

A doktori értekezés tézisei

**TÖBBFÁZISÚ FLUIDÁRAMLÁSI ESEMÉNYEK
REKONSTRUKCIÓJA ÉS SZERKEZETFEJLŐDÉS EGY
VARISZKUSZI KORÚ GRÁNITINTRÚZIÓBAN (VELENCEI-
HEGYSÉG, NY-MAGYARORSZÁG)**

BENKÓ ZSOLT

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Ásványtani Tanszék, Budapest
Földtudományi Doktori Iskola
Geológia-Geofizika program
Vezető: Dr. Monostori Miklós

és

Henry Poincaré Egyetem, Nancy 1, Természettudományi és Műszaki Kar
RP2E Doktori Iskola

Témavezetők

Dr. Molnár Ferenc habilitált egyetemi docens, Ásványtani Tanszék ELTE TTK
Marc Lespinasse professzor, Henri Poincaré Egyetem, Nancy 1

2008

BEVEZETÉS, FŐ CÉLKITŰZÉSEK

A hidrotermális fluidumok és felszín alatti vizek fő vezetőcsatornái kristályos kőzetekben a mikrorepedések és a töréses zónák. A felszín alatti fluidumok számos szempontból lehetnek érdekesek a geológusok számára. A klasszikus porózus üledékes szénhidrogén tároló kőzetek kimerülésével egyre több figyelem fordul a nem hagyományos, hasadékos kőzetekből kitermelhető kőolaj és földgáz készletek felé. Magmás és metamorf kőzetekben a fluidumáramlást alapvetően a törések befolyásolják, ezek jelentősége a hidrotermás ércképződésben közismert. Az elmúlt évtizedekben a nukleáris hulladéklerakók tervezésére és létesítésére kristályos kőzetekben is egyre több figyelem fordul. A felsorolt példák mellett a kristályos kőzetek hasadékrendszereinek vizsgálata hidrogeológiai szempontból fontos különösen a sivatagos területeken.

A törésrendszerek vizsgálata során a korábbi tanulmányok elsősorban a nagyméretű, jól látható törésekre és ásványosodott telérekre fókuszáltak, amelyek jól mérhetőek és láthatóak a terepen. Az elmúlt évtizedekben azonban egyre több figyelem fordul a nyílt és behegedt mikrorepedések felé és ezek kapcsolatára más nagyságrendű törésrendszerekkel. Bebizonyosodott, hogy ezen mikrorepedés rendszerek vizsgálatának alapvető jelentősége van a kőzetek permeabilitásának és porozitásának becslésében és hozzájárulnak a kőzetet ért szerkezetfejlődési események megismeréséhez. Egyes speciális mikrorepedések apró cseppeket fognak be a kőzetben áramlott hidrotermás fluidumokból (fluidzárványok), így a hidrotermás rendszer szerkezeti viszonyai mellett annak fizikai és kémiai jellemzői is vizsgálhatóvá válnak. Ezeket a repedéseket fluidzárványsíkoknak nevezzük.

Doktori dolgozatom célja a különböző nagyságrendekben vizsgálható repedések kapcsolatának vizsgálata egy relatíve homogén gránittestben és a gránittestet érintő különböző korú hidrotermás oldatáramlási események tér- és időbeli kapcsolatának megállapítása. A kiválasztott terület a Velencei-hegység (Nyugat-Magyarország), amelyet mind az Alpi, mind a Variszkuszi szerkezetföldtani és oldatáramlási események érintettek. Speciális geotektonikai helyzetének köszönhetően a Velencei-hegységet és környezetét az Alpi orogén majd minden fázisában érintette valamilyen oldatáramlási vagy magmás esemény az óceán felnyílástól annak záródásáig. A terület kiválasztásában szerepet játszottak a hegység kiváló feltárási viszonyai. Korábbi vizsgálatok bizonyították, hogy a gránitot számos magas hőmérsékletű oldatáramlási esemény érintette, amelyek fluidzárvány vizsgálatok alapján könnyen

elkülöníthetőek egymástól. További fontos kérdés volt a kutatás során, hogy a földtörténet során kialakult nyílt és zárt repedések milyen kapcsolatban vannak a gránit jelenlegi repedésrendszerével.

MÓDSZEREK

A repedésrendszerek fejlődésnek megértése a szerkezetföldtani események tükrében alapvetően a terepen vizsgálható makroszkópos vető és törésrendszerek vizsgálatát kívánta meg, a mikrorepedések vizsgálata mellett. A repedésrendszer fejlődésének tanulmányozása ugyanakkor megkívánta a hidrotermás rendszerek fizikai-kémiai és korviszonyainak tisztázását is. Szükséges volt továbbá a hidrotermás telérrendszerek ásványtani, geokémiai, szerkezetföldtani és geometriai vizsgálata is.

A makroszkópikus törésrendszerek egymás közti valamint a mikrorepedés rendszerekkel való összehasonlítása egy új terepi módszer kidolgozását tette szükségesszerűvé. Egy kiválasztott alapvonal mentén szisztematikusan jellemeztük a hidrotermális kőzetátalakulási és szerkezetföldtani jellemzőket (törések, telérek dőlése, csapás, jellege, kitöltöttsége, hossza, szélessége). Az így elkészült adatbázis alkalmas volt különféle statisztikai számítások elvégzésére (fraktálanalízis, peremabilitásbecslés). Vetőanalízissel meghatároztam a töréseket létrehozó feszültségtér irányokat is.

Agyagásványok és azok ásványtani jellegei hidrotermás rendszerekben érzékenyek a fluidum-kőzet kölcsönhatás körülményeire, ezért elvégeztem ezek szisztematikus ásványtani jellemzését, hogy a hidrotermás rendszereket egymástól térben elkülöníthessem Kálium tartalmú agyagásványokon K-Ar radiometrikus kormeghatározást végeztem, a hidrotermás rendszer korviszonyainak tisztázása céljából.

Kénizotóp vizsgálatok készültek ércásványokon. A $\delta^{34}\text{S}$ értékek önmagukban jellemezhetik az ásványosodást létrehozó fluidumok által érintett kőzeteket, és alkalmasak lehetnek különböző ércesedések kapcsolatának megállapítására. További előny hogy koegzisztens ásványfázisok között, amelyek ugyanabból a hidrotermás oldatból kristályosodtak hőmérsékletfüggő izotópfractionáció lép fel, így a kénizotóp adatok alkalmasak voltak a hidrotermás oldatok hőmérsékletének becslésére.

Az ólomizotóp vizsgálatok célja kettős volt: egyrésztől célom volt a kvarc-fluorit-polimetallikus telérek modellkorának meghatározása, vagy ha ez az izotópadatok alapján nem lehetséges, akkor a forráskőzetek meghatározása, továbbá a Velencei-hegységi ércesedések

összehasonlítása a Szabadbattyáni és a Déli- és Kelet-Alpi hasonló jellegű ércesedésekkel.

Regionális fluidzárvány vizsgálatokat végeztem másodlagos fluidzárványokon a gránit kőzetalkotó kvarcában, a hidrotermás oldatáramlási események térbeli kiterjedésének megállapítása céljából. A fluidzárvány vizsgálatok fontos új szerkezetföldtani események felismeréséhez vezettek és alapvetően hozzájárultak a hidrotermás oldatáramlási események fizikai-kémiai (nyomás, hőmérséklet, összetétel) körülményeinek megállapításához.

A fluidzárványsíkok képződése a gránit kőzetalkotó kvarcában szerkezetföldtanilag kontrollált, ezért ezek orientációjának vizsgálatával meghatározhattam a különböző korú oldatáramlási események során fennálló feszültségterek legkisebb főfeszültség irányait. Másrészt a fluidzárványsíkok geometriai tulajdonságai (száma, hossza) arányban áll a kőzet paleoporozitásával és paleopermeabilitásával. A geometriai és zárványsík orientáció vizsgálatokat egy új, Franciaországban kifejlesztett számítógépes program, az AnIma és univerzális forgatóasztal segítségével végeztem el.

A telérrendszerek statisztikai paramétereinek ismeretében elvégeztem azok fraktálanálízis vizsgálatát, majd a megismert paramétereket összehasonlítottam más módszerek (fluidzárványsík statisztikai vizsgálatok, permeabilitásbecslés) által kapott eredményekkel, a különböző feltárások összehasonlítása céljából.

Mindezen ismeretek fényében lehetségessé vált a makroszkópos és mikroszkópos repedésrendszerek fejlődésének jellemzése, a különböző korú oldatáramlási események során.

A DOLGOZAT TÉZISEI

1. A Velencei-hegységben nyolc szerkezetföldtani eseményt sikerült elkülöníteni, amelyek a késő variszkuszi és az alpi hegységképződési folyamatokhoz köthetőek. A gránit alapvető repedésrendszere a karbon és a triász oldatáramlás események során jött létre. A fiatalabb repedésrendszerek képződést és fejlődését alapvetően ezek a szerkezetföldtani és hidrotermás események befolyásolták.

2. Variszkuszi oldatáramlás nyomait csak a hegység keleti felében sikerült azonosítani. Az oldatáramlás ugyanabban az ÉNy-DK-i extenziós feszültségtérben zajlott, amely korábban a gránitporfír és aplittelérek csapását is meghatározta.

3. A triász oldatáramlás egy permutáló feszültségtérben zajlott. Feszültségtér permutáció jellemzően kiemelkedő kőzettestekre jellemző. A regionális feszültségtér a triász során, megegyezően a variszkuszival ÉN-DK irányú, extenziós maradt.

4. A Triász oldatáramlási zónákban a jellemző agyagásvány paragenézis az illit-kaolinit-szmektit, amely körülveszi a kvarc-fluorit-polimetallikus teléreket. Az első képződő agyagásvány fázis az illit volt, amelyik 250°C felett képződött, a kaolinit és a szmektit a hidrotermás oldatáramlás hőmérsékletének csökkenésével jött létre, 200°C alatt.

5. A kvarc-fluorit-polimetallikus telérek a triász során képződtek, a Neo-Thetys riftesedésének előrehaladott fázisában. A triász kor közvetlen bizonyítéka a telérekkel szingenetikus agyagásvány asszociációk K-Ar radiometrikus kora. Közvetett bizonyítékul szolgálnak a fluidzárvány vizsgálatok, az agyagásvány asszociációk, a kén és az ólomizotóp vizsgálatok.

6. A kvarc-fluorit-polimetallikus telérek képződése 250°C fokon kezdődött, 700-1000 bar nyomáson. A teléreképződés többfázisú folyamat volt, az érchozó fluidumok növekvő szalinitása és csökkenő hőmérséklet jellemezte.

7. A triász fluidzárvány asszociációk bimodális eloszlása a hegység keleti és nyugati fele között a hegység egyes blokkjainak triász utáni vertikális elmozdulását bizonyítja.

8. A velencei-hegységi kvarc-fluorit-polimetallikus telérek fluidzárvány-, kén-, ólom adatai és K-Ar radiometrikus korának feltűnő hasonlósága az Alpi-típusú Mississippi-valley típusú Pb-Zn ércesedésekkel a Déli- és a Keleti Alpokban, azok közös eredetét, rokonságát valószínűsíti

9. A velencei-hegységi ólom-cink ércesedés és a szabadbattyáni ólomércesedés hasonlósága az Alpi Mississippi-valley típusú telepekkel a Karawankákban, valamint az ércesedések környezetének hasonló földtani felépítése azt valószínűsíti, hogy a vizsgált két terület a paleogén előtt Mezica és Eisenkappel közelében helyezkedhetett el.

10. A paleogén oldatáramlás és magmás tevékenység érintette a gránittest keleti felét, ugyanakkor a hidrotermás oldatmobilizáció és közetátalakulás csak a paleogén andezittelérekben és azok szűk környezetében valamint egyes ÉK-DNy csapású tektonikai zónákban mutatható ki. A paleogén oldatáramlás ezért lokálisnak tekinthető.

11. Az új K-Ar radiometrikus kormeghatározások alapján a magmás és hidrotermás oldatmobilizáció 32-28 millió évvel ezelőtt a kora-oligocénban zajlott.

12. A paleogén átalakulási zónákban illit és illit-dickit a jellemző agyagásványok. A jól kristályosodott illit, alacsony szmektit közberétegződéssel azt bizonyítja, hogy a paleogén oldatmobilizáció és kőzetátalakulás legalább 250°C-on zajlott. Az illit-dickit ásványtársulás alacsonyabb 200-250°C hőmérsékletet valószínűsít a hidrotermás rendszer peremi zónáiban.

13. Három különböző paleogén fluidzárvány asszociációt sikerült elkülöníteni a gránit kőzetalkotó kvarcában. Ezen zárványasszociációk azonosak a korábban a paleogén Vulkáni Egységből és a gránitból leírt hidrotermás képződmények (erezések) fluidzárványainak jellemzőivel

14. Paleogén fluidzárvány asszociációk csak az illites átalakulási zónákban jelennek meg a gránit kőzetalkotó kvarckristályaiban. A fluidzárvány asszociációk alapján a hidrotermás fluidumok felforrtak, ezért a fluidzárványok szalinitása tág határok között változott. A homogenizációs hőmérsékletek alapján az oldatáramlás 250°C hőmérsékleten zajlott, ami összhangban van az illit alapján becsült minimális hőmérséklettel. Helyenként ugyanakkor magasabb 400-450°C hőmérsékletű oldatáramlást is azonosítottam az andezittelérek környezetében. A fluidzárvány jellemzők a fluidumok sekély mélységű felforrást bizonyítják vulkáni és szubvulkáni mélységben.

15. A kvarc-barittelérek a hegység keleti felében a fluidzárvány- és a K-Ar radiometrikus kormeghatározási vizsgálatok alapján paleogén korúnak bizonyultak, szemben az eddig feltételezett variszkuszi korrallal.

16. Paleogén szubvulkáni és vulkáni szintet képviselő fluidzárvány generációk együttes megjelenése a gránitban egyazon topográfiai magasságban a hidrotermás oldatáramlással egyidős szerkezeti mozgásokat bizonyít a gránittest és a paleogén Vulkáni Egység között. Amíg a gránittest keleti fele relatíve kiemelkedett a Nadap-vonaltól keletre, addig a Paleogén Vulkáni Egység lesüllyedt.

17. A nadapi területen a paleogén felfűtés az idősebb variszkuszi és triász zárványgenerációk dekrepitációját vagy reekvilibrációját okozta, aminek következtében a zárványsíkok áttöltődtek paleogén fluidumokkal.

18. Bebizonyosodott, hogy a fluidzárványsíkok vizsgálata alapvetően fontos a gránit szerkezetföldtani megismerésében: a variszkuszi, ÉK-DNy csapású fluidzárványsíkok egyértelműen bizonyítják az ÉNy-DK irányú extenziót, amiben létrejöttek. A fluidzárványsíkoknak alapvető jelentősége volt a triász feszültségtér

permutáció felismerésében. A paleogén fluidzárványsíkok iránya bizonyította, hogy a gránit iniciális repedésrendszere alapvetően meghatározza annak későbbi fejlődését. A makroszkópicusan észlelt vetőrendszerek kormeghatározása és viszonyainak tisztázása csak a fluidzárványsík vizsgálatok segítségével volt lehetséges.

19. A fluidzárványsíkok párhuzamosak a velük együtt képződött hidrotermás telérekkel, a nyílt mikrorepedések pedig a litoklázis rendszerekkel azonos feltárásokon belül. Ennek elméleti jelentősége, hogy a repedésrendszerek mérettartománytól függetlenül hasonló tulajdonságokkal bírnak. Gyakorlati jelentősége, hogy nyersanyagkutatás során nem feltétlen van szükség nagyméretű feltárásokra az oldatáramlási események szerkezeti kontroljának vizsgálatára, hanem ahhoz elegendő egy kisebb kőzetminta vagy egy fúrómag is.

20. A triász fluidzárványsíkok száma a fő triász oldatáramlási zónák irányában nő az átalakulatlan gránithoz képest, míg átlaghosszuk csökken. A két jelenség eredőjeként a fluidzárványsíkok összhossza azonban összességében mégis nő. Az alapvetően a feszültségtér által meghatározott repedésrendszerekben tehát a csökkenő átlaghosszhoz növekvő zárványsík szám tartozik.

21. A magmás és hidrotermás hő-sokknak köszönhetően a paleogén átmeneti zónákban a triász fluidzárványok reekvilibráltak, ezáltal a zárványsíkok részlegesen felnyíltak és propagáltak. Ez a folyamat a zárványsíkok összekapcsolódáshoz vezetett, ami statisztikailag átlaghossz növekedéshez és zárványsík-szám csökkenést eredményezett. Végeredményben egy jobban összekötött, jobban fejlődött repedésrendszer jött létre. Az illites átalakulási zónákban a hő-sokk az idősebb zárványok dekrepitációjához és a zárványsíkok teljes felnyílásához majd áttöltődéséhez vezetett. Az áttöltődést ugyanakkor új, rövid repedések megjelenése is kísérte, ezáltal az átlaghossz növekedés és a zárványsík-szám csökkenés nem volt olyan markáns, mint az átmeneti zónákban. Összefoglalásképpen a termális repedésfelnyílás egy jól összekötött repedésrendszer kialakuláshoz vezet, amelyik kiváló vezetősatornája lehet a hidrotermális oldatoknak.

22. A magas repedéssűrűséggel jellemezett zónák határozottan kijelölik a fő oldatáramlási útvonalakat a paleogén során, a repedéssűrűség térkép alapján. A legpermeábilisabb zónák és a fő szerkezeti vonalak tökéletesen átfednek egymással. Ennek gyakorlati jelentősége akkor mutatkozik meg, ha csak kisebb kőzetdarabok állnak rendelkezésre a vizsgálatokhoz a kutatások során.

KONKLÚZIÓ

A doktori dolgozat eredményei bebizonyították, hogy amennyiben a hidrotermális rendszer ásványtani és geokémiai és fizikai paraméterei ismertek (fluidzárvány jellemzők, agyagásványosodás jellege, kora) a fluidzárványsík vizsgálatok kiváló eszközként használhatóak az oldatáramlási események lehatárolásában és a szerkezeti kontrolljuk megismerésében, kristályos kőzetekben. Az ásványtani, geokémiai fluidzárvány és szerkezetföldtani vizsgálatok komplex alkalmazása számos nyitott, eddig megválaszolatlan kérdést oldott meg a Velencei-hegyégi hidrotermális rendszerek fejlődését és kapcsolatát illetően. Az eredmények lehetővé tették a Velencei-hegység szerkezetföldtani eseményeinek regionális összefüggésben való vizsgálatát is.

A számos új lokális és regionális eredményen túl a dolgozat számos új módszertani megközelítés lehetőségét, alkalmazhatóságát és határait vázolta fel. Ezek a módszerek és komplex alkalmazásuk hasznos lehet a nyersanyagkutatás, a rezervoár geológia a hidrogeológia, de még a környezetföldtani vizsgálatok során is.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK

CIKKEK

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc (2003): „Application of studies on fluid inclusion planes for evaluation of structural control on Variscan and Alpean fluid mobilization processes in the monzogranite intrusion of the Velence Mts. (W-Hungary)” – *Acta Mineralogica-Petrographica*, Vol. 45/1 p. 123-131.

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc, Marc Lespinasse (2008): Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedezettségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában I.: Mószertani alapvetés és alkalmazás a Velencei-hegység fluidummobilizációs folyamataira. – *Földtani Közöny (in press)*

Szabó Bernadett, Benkó Zsolt, Molnár Ferenc, Marc Lespinasse (2008): Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedezettségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában II.: A Mórági Gránit repedésrendszerei. – *Földtani Közöny (in press)*

Poros Zsófia, Molnár Ferenc, Koroknai Balázs, Marc Lespinasse, Maros Gyula, Benkó Zsolt (2008): Fluidzárványsík és repedésrendszer vizsgálatok alkalmazása granitoid kőzetek fluidáramlási rendszereinek rekonstrukciójában III.: A Bábaapáti (Üveghuta) radioaktív hulladékártató telephely kutatófúrásaiban végzett vizsgálatok eredményei. – *Földtani Közlöny (in press)*

KONFERENCIA KIVONATOK

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc (2003): Structural controls of fluid mobilization processes connected to the Variscan and Alpean igneous activity in the Velence Mts. (W-Hungary) on the basis of studies of fluid inclusion planes – „2nd Mineral Science in the Carpathians Conference”, Acta Mineralogica-Petrographica Abstract Series, 2003 pp.11.

Benkó Zsolt Molnár Ferenc (2003): Tectonic control of fluid circulation related to Variscan and Alpean hydrothermal processes in the Velence Mts. (W-Hungary) on the basis of fluid inclusion planes – Geodynamics and Ore Deposit Evolution of the Alpine-Balkan-Carpathian-Dinaride Province, Final GEODE-ABCD Workshop, Seggau, Ausztria Abstracts, pp. 17.

Molnár Ferenc, Benkó Zsolt (2003): – Evaluation of Multi-phase crack evaluation in the granite intrusion of the Velence Mts. (W-Hungary) on the basis of studies on fluid inclusion planes – ECROFI XVII., Budapest, Abstract pp.127.

Benkó Zs., Molnár F. (2003): Granitoid kőzetek repedésrendszereinek fejlődéstörténete fluidzárványsíkok vizsgálata alapján. – Hungarian Geological Society, Proceeding of the Mineralogical Department

Benkó Zsolt. (2004): A Velencei-hegység hidrotermális rendszereinek szerkezeti kontrollja fluidzárványsík és repedésrendszerek vizsgálata alapján. - Young Scientists Conference, Sárospatak

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc, Lespinasse Marc, Pécskay Zoltán (2005): The significance of analyses on fluid inclusion planes (FIP) in reconstruction of spatial and temporal evolution of fracture development in relation to multiple hydrothermal processes in granitoid rocks. - ECROFI, Siena 2005

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc, Marc Lespinasse, Pécskay Zoltán (2006): Reconstruction of multi-phase fluid flow history and tectonic evolution in a Variscan granite intrusion (Velence Mts., Hungary). - EGU General Assembly, Wien.

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc (2006): Több fázisú magmás-hidrotermális tevékenység rekonstrukciója a Velencei hegységben. – Young Scientists Conference, Balatonkenese

Benkó Zsolt, Molnár Ferenc (2006): Application of K-Ar age determination of Rock Forming and Hydrothermal Clay Minerals For reconstruction of Fluid Mobilization Processes on the Variscan granite intrusion (Velence Mts. W-Hungary). – „3rd Mineral Science in the Carpathians Conference” Miskolc Abstract pp. 11.

Benkó Zsolt (2007): Reconstruction of multi-phase fluid flow history and tectonic evolution in a Variscan granite intrusion (Velence Mts., Hungary). – Proceeding of the Royal Natural History Museum, Stockholm

CIKKEK ELŐKÉSZÜLETBEN

Zsolt Benkó, Ferenc Molnár, Zoltán Pécskay, Marc Lespinasse: K/Ar age determination and mineralogy of Triassic and Palaeogene argillic alteration zones in a Variscan granite body along the Periadriatic Balaton Lineament system

Zsolt Benkó, Kjell Billström, Ferenc Molnár, Zoltán Pécskay, Bernadett Bajnóczi, Marc Lespinasse: Triassic fluid mobilization along the Periadriatic-Balaton Lineament system: genetics of the Pb-Zn mineralization of the Velence Mountains and Szabadbattyán (W-Hungary) and their geotectonic relationships

Zsolt Benkó, Marc Lespinasse, Ferenc Molnár: Combination of Fault slip analysis, Fluid Inclusion Plane measurements and Fluid Inclusion Microthermometry: Tectonic evolution of the Velence Mts. granite (W-Hungary)