

**SZERKEZETFEJLŐDÉSI ÉS
FLUIDUMMIGRÁCIÓ-TÖRTÉNETI
REKONSTRUKCIÓ A BODAI AGYAGKŐ
FORMÁCIÓ ÁSVÁNYOS EREI ALAPJÁN**

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

HRABOVSZKI ERVIN

TÉMAVEZETŐ:

DR. SCHUBERT FÉLIX

KÖRNYEZETTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA
ÁSVÁNYTANI, GEOKÉMIAI ÉS KÖZETTANI TANSZÉK
SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS
INFORMATIKAI KAR
SZEGED
2022

I. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Doktori kutatásom során a Nyugat-Mecsekben elhelyezkedő, késő-perm korú Bodai Agyagkő Formáció (BAF) kőzetanyagát vizsgáltam. A kőzettest geometriai adottságai, alacsony porozitása és permeabilitása (FEDOR et al. 2008) kiemelkedő izolációs képességekről árulkodnak. Az országos földtani felmérés (KONRÁD & HÁMOS 2006) alapján a BAF hazánkban a legalkalmasabb képződmény nagy aktivitású radioaktív hulladékok mélységi tárolójának befogadására. Ilyen típusú kőzetek ugyanakkor a mátrix kedvező kőzetfizikai tulajdonságai ellenére gyakran jelentős fluidumáramlásnak adhatnak helyet szerkezeti inhomogenitásaik mentén. Így kiemelten fontos a képződmény szerkezetfejlődésének és paleofluidum-migráció történetének megismerése, amely megértése segítheti a tároló izolációs alkalmasságának megítélését. Ebből adódóan kutatásom fő célkitűzése a BAF-ot ért tektonikai fázisok és fluidummigrációs események megismerése, rekonstrukciója volt. További célom egy komplex módszertan kidolgozása, amely alkalmas olyan szerkezeti, szöveti, ásványtani és geokémiai összefüggések feltárására, amelyek a szerkezetfejlődésről és paleofluidum-migrációról hordoznak információt. A lehető legtöbb szerkezeti elem és ezek kölcsönös viszonyainak megfigyelésére a képződményt legnagyobb

vastagságban (~905 m) feltáró BAF–2 fúrás ad lehetőséget, ezért a módszertan kidolgozására a képződmény ezen kitüntetett mélységszelvényét választottam. Mindemellett célom volt annak ellenőrzése, hogy van-e lehetőség a BAF–2 fúrásban tett megfigyelések képződményen belüli, térbeli kiterjesztésére. Ennek érdekében további két fúrás (BAT–4 és Delta–3) teljes maganyagának áttekintését, mintázását, valamint a kiválasztott minták petrográfiai leírását végeztem el.

II. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A vázolt környezetföldtani probléma megoldásához, kutatásom céljainak eléréséhez változatos anyagvizsgálati módszereket alkalmaztam a képződmény szerkezetfejlődésének és fluidummigráció-történetének körülményeit megőrző ásványos ereken. A minták petrográfiai leírását 30 μm vastagságú polírozott vékonycsiszolatokon, Olympus BX41 típusú polarizációs mikroszkóppal végeztem. A felvételeket Olympus DP73, illetve UC30 típusú digitális kamerák segítségével készítettem.

A kérdéses ásványokat THERMO DXR Raman mikrospektroszkóppal azonosítottam. A gerjesztő hullámhossz 532 nm, a lézerteljesítmény 10 mW, míg a tűlyukapertúra átmérője 25 μm volt. A Raman spektrumokat a RRUFF adatbázis (<http://rruff.info>) alapján értékeltem.

Röntgenfluoreszcens elemtérképezést Horiba Jobin Yvonne XGT-5000 röntgenfluoreszcens spektrométerrel végeztem 30 kV gyorsítófeszültség és 0,5 mA áramerősség mellett.

Katódlumineszcens megfigyeléseket egy Olympus BX43 típusú polarizációs mikroszkópra szerelt Reliotron VII katódlumineszcens berendezéssel hajtottam végre 7 kV gyorsítófeszültség és 0,7 mA áramerősség mellett.

A fluidumzárványok petrográfiai leírását és mikrotermometriai vizsgálatát mindkét oldalán polírozott, 80–100 μm vastagságú vastagsziszolatokon végeztem egy Olympus BX41 típusú polarizációs mikroszkópra szerelt Linkam MDS600 hűthető-fűthető tárgyasztallal. A tárgyasztal kalibrációja szintetikus fluidumzárványokkal, $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$T_m(\text{CO}_2)$], $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$T_m(\text{H}_2\text{O})$] és $374,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$T_h(\text{H}_2\text{O})$] hőmérsékleten történt. A fluidumzárványok részletes petrográfiai leírását GOLDSTEIN & REYNOLDS (1994) által javasolt kritériumoknak megfelelően készítettem. Homogenizációs hőmérsékleteket (T_h) fokozatos fűtés mellett határoztam meg, az összes zárványt ellenőrizve a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os lépcsők között. A végső jégolvadási hőmérsékleteket [$T_m(\text{Ice})$] gőzfázis jelenlétében határoztam meg. Mind a T_h , mind a $T_m(\text{Ice})$ értékeket a GOLDSTEIN & REYNOLDS (1994) által javasolt ciklusos (*cycling*) technikával mértem. A sótartalmat $T_m(\text{Ice})$ adatokból határoztam meg a BODNAR (1993) által bemutatott összefüggés alapján és tömeg% NaCl-egyenértékben adtam

meg. Az egyfázisú fluidumzárványok mesterséges nyújtását fokozatos fűtéssel értem el, 290 °C maximális hőmérséklet mellett. Az eutektikus hőmérsékletek (T_e) meghatározását a fluidumzárványok kis mérete nem tette lehetővé. A fluidumzárványok gőz fázisának területarányát 2D-s mikroszkópi felvételeken határoztam meg az ImageJ 1.53g szoftver segítségével, következésképp a bemutatott értékek nem tekinthetők valós térfogataránynak (φ_v). A petrográfiai- és katódlumineszcens megfigyelések, valamint a Raman elemzések, a röntgenfluoreszcencia-térképezés és a fluidumzárvány-vizsgálatok a Szegedi Tudományegyetem Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszékén készültek.

Elektronmikroszkópos vizsgálatok Hitachi S-4700 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és Bruker (Röntec) QX2 típusú energiadiszipatív röntgenspektrométerrel (EDS), 15–20 kV és 10 μ A mérési paraméterek mellett történtek a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karán.

Éralkotó ásványokból és mellékkőzetből származó furadék minták C ($n=22$), O ($n=22$) és S ($n=8$) stabilizotóp-arány mérései a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Atommagkutató Intézetében (ATOMKI) készültek Thermo Finnigan DELTA^{plus} XP típusú stabilizotóp-arány mérő tömegspektrométerrel Fisons NA1500 NCS elemanalizátor ($\delta^{13}\text{C}$ és $\delta^{34}\text{S}$

mérések) és magas-hőmérsékletű konverziós elemanalizátor ($\delta^{18}\text{O}$ mérés) segítségével. Az eredmények V-PDB, V-SMOW és V-CDT sztenderdekhez viszonyított $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^{34}\text{S}$ értékeként vannak kifejezve, melyek esetében $\delta(\text{‰}) = R(\text{minta}/R_{\text{szttenderd}} - 1) \times 1000$ és $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$, ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ és ${}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}$. A mérések pontossága 0,08‰ ($\delta^{13}\text{C}$), 0,1‰ ($\delta^{18}\text{O}$) és 0,4‰ ($\delta^{34}\text{S}$).

III. EREDMÉNYEK

Kutatásom során a BAF–2, a BAT–4 és az Alfa–1 vágatból indított Delta–3 fúrásokból származó kőzetmintákat vizsgáltam. A fúrások teljes maganyagának áttekintését követően a BAF–2 fúrásból 56 db, a BAT–4 fúrásból 21 db, míg a Delta–3 fúrásból 11 db fúrómag mintát gyűjtöttem be. Petrográfiai megfigyeléseket mindhárom fúrás mintáin végeztem, míg geokémiai vizsgálatok a BAF–2 fúrás maganyagából készültek.

1. A BAF–2 fúrás kőzetanyagában 4 eltérő geometriájú érgenerációt azonosítottam: fonatos lefutású, mellékkőzetzárványokban és kúp-a-kúpban szerkezetekben gazdag erek ($Vein_{CIC}$), egyenes lefutású erek ($Vein_{STR}$), kulisszás elrendeződésű erek ($Vein_{ECH}$), valamint breccsa jellegű repedéskitöltések ($Vein_{BR}$). Az érgenerációk egymáshoz

viszonyított kora metsződési viszonyuk alapján meghatározható. Legidősebb a *Vein_{CIC}* érgeneráció, fiatalabb a *Vein_{STR}*, amelyet a *Vein_{ECH}*, majd a *Vein_{BR}* erek követnek (HRABOVSKI et al. 2022).

2. A *Vein_{CIC}* érgenerációban megjelenő mikroszerkezetek (zárványsorok, zárványsávok, kúp-a-kúpban szerkezetek) és kőzetzárvány geometriai viszonyok alapján az érgeneráció kialakulása folytonos volt. Ennek értelmében az erek fejlődése nem a klasszikus repedésképződés és bezáródás mechanizmus (RAMSAY 1980) révén történt, hanem a növekvő kristályok által kifejtett nyomás eredményeként ment végbe. Ezt bizonyítja (a) a kőzetzárványok hajlott geometriája, (b) a kőzetzárványok központi nyílásszögének érközepek felé tartó fokozatos csökkenése, (c) az érfaláról részlegesen leszakadó szilárdzárványok, valamint (d) a szomszédos klasztok jelentősen eltérő mérete. A diffúz kőzetzárványhatárok, a kúp-a-kúpban mikroszerkezetek, a kőzetzárványok körül megjelenő autigén albit, valamint az albit szemcsékben megjelenő apró klasztok arra utalnak, hogy a kőzetzárványok képlékeny stílusú alakváltozása és ezáltal a *Vein_{CIC}* erek kialakulása kis kohéziójú üledékben, atektonikus, korai diagenetikus folyamatok során ment végbe.

Egyes *Vein_{CIC}* erek két oldalán megjelenő litoklasztok egymáshoz viszonyított helyzete, és a mikroszerkezetek

orientációja alapján a megfigyelt erek kezdetben szakításos eredetű törések voltak. Ugyanakkor a *Vein_{CIC}* erek mikroszerkezetének és szövetének kialakulása nem egyeztethető össze, amely alapján az elsődleges szövet már átalakult, a minták jelenlegi kitöltése másodlagos eredetű, így az érképződés körülményeiről nem hordoz információt. Mindezt alátámasztja, hogy a folytonos érnövekedés rostos kristályok kialakulásával jár (BONS et al. 2012), amely értelmében a *Vein_{CIC}* ereket eredetileg egy olyan korai, rostos ásvány cementálhatta, amely már nincs jelen ezekben a szerkezeti elemekben. A feltételezett rostos ásványt a megfigyelt ásványok helyettesíthették diagenetikus, hidrotermális folyamatok során, megőrizve az eredeti mikroszerkezeteket (HRABOVSZKI et al. 2020).

3. A *Vein_{CIC}* érgenerációt alkotó ásványokkal ellentétben a *Vein_{STR}*, *Vein_{ECH}* és *Vein_{BR}* erekben megjelenő ásványok a törések kialakulásával közel egyidősek lehetnek, így a szerkezetfejlődési események során uralkodó, eredeti fizikai-kémia viszonyok hordozóinak tekinthetők. Kivételt képeznek az anhidrit generációk (*Anh_{EB}*, *Anh_{FIB}*), amelyek szövetük alapján az elsődleges éralkotó ásványokat helyettesítik. Hasonlóképpen másodlagos eredetű a *Vein_{BR}* legfiatalabb, kalcit ásványa (*Cal_{EB2B}*), amely petrográfiai és geokémiai

jellemzői alapján az ereket kialakító breccásodást követően vált ki (HRABOVSKI et al. 2022).

4. Az éralkotó kristályok megnyúlt tömbös, illetve tömbös morfológiája alapján a $Vein_{CIC}$ és $Vein_{STR}$ erek esetében az uralkodó anyagtranszport mechanizmus törések menti advekció volt (BONS et al. 2012). A $Vein_{ECH}$ érgeneráció rostos szemcse-morfológiája, illetve az éralkotó és mellékközetben megjelenő karbonát igen hasonló stabilizotóp-arány értékei alapján az érfejlődésre jellemző anyagtranszport folyamat diffúzió volt. A $Vein_{BR}$ érgenerációban megjelenő szögletes alakú, egymáshoz tökéletesen illeszkedő közetzárványok (in-situ töréses szerkezetek) nagy mennyisége arra utal, hogy az érfejlődés fluidumhoz kapcsolódó breccásodáshoz kötődik, mozgó hidraulikus törések eredményeként jött létre (JÉBRAK 1997; BONS 2001; HRABOVSKI et al. 2022).

5. A $Vein_{CIC}$ és $Vein_{STR}$ generációk karbonát ásványaiban (Cal_{SHR2} , $Cal_{EB1A-B-C}$) lévő elsődleges fluidumzárványok homogenizációs hőmérsékletei (T_h) egy szűk tartományban, átlagosan 108 és 132 °C között összpontosulnak (min. értékek: 90, 80, 94 és 84 °C). A $Vein_{ECH}$ (Cal_{FIB2}), a $Vein_{CIC}$ és a $Vein_{STR}$ generációkra jellemző T_h értékek hasonló tartományba esnek, jóllehet a $Vein_{ECH}$ fluidumzárványainak átlagos T_h értékei 99 és 115 °C között helyezkednek el (min. érték: 80 °C). A Cal_{EB2A} kalcit ($Vein_{BR}$) fluidumzárványai magasabb hőmérsékleten

(~140–148 °C, min. érték: 130 °C) homogenizálódtak; míg a Cal_{EB}2B kalcit legtöbb fluidumzárványa egyfázisú (L), és 50 °C alatti bezáródási hőmérsékletet feltételez. A Cal_{EB}2B kalcitban mért kétfázisú fluidumzárványok T_h értékei (43–50 °C), illetve végső jégolvadási hőmérsékletei szintén felszínközeli kialakulási körülményeket sejtetnek (HRABOVSZKI et al. 2022).

6. Az éralkotó ásványok $\delta^{18}\text{O}$ értékei és fluidumzárványainak T_h értékei alapján valószínűsíthető, hogy a legtöbb repedéskitöltő ásványgeneráció (Cal_{SHR}2, Cal_{EB}1A, Cal_{EB}1B, Cal_{EB}1C, Cal_{FIB}2, Cal_{EB}2A) szülőfluiduma hasonló eredetű volt. Ezen ásványok szülőfluidumát képviselő sós póruszvizek a fosszilis playa és az agyagásványok átalakulásából származó diagenetikus eredetű fluidumok keveredéséből származhatnak. Azaz a *Vein_{CIC}*, *Vein_{STR}* és *Vein_{ECH}* erek kalcit generációinak szülőoldatai lokális, formációs fluidumok és diagenetikus eredetű fluidumok keveredésének eredményeként jöttek létre. Mivel a tárgyalt három érgenerációt alkotó ásványok szülőfluiduma feltehetően a képződményen belülről származott, így kialakulásuk hosszú ideig fennálló, zárt geokémiai rendszert feltételez, amely a kőzettest kiemelkedő fluidumrekesztő tulajdonságait támasztja alá (HRABOVSZKI et al. 2022).

7. A breccsás ér (*Vein_{BR}*) legfiatalabb kalcit-generációjában (Cal_{EB}2B) megjelenő fluidumzárványok 50 °C

alatti homogenizációs hőmérséklete, alacsony sótartalma (0,0–0,4% wNaCl_{eq}), illetve szülőfluidumának $\delta^{18}\text{O}$ értékei alapján elkülönül a többi érkötő kalcitól. Mindez, valamint a szemcsék tömbös, megnyúlt tömbös morfológiája alapján a legfiatalabb kalcit (Cal_{EB}2B) kialakulása az elsődleges érfejlődést követően, meteorikus fluidumok advektív áramlása során ment végbe, amely nyitott geokémiai rendszer jelenlétére utal. Jóllehet a breccsák nem gyakoriak a képződményben, jelenleg is nyitott pórusaik révén gyakoriságuk, térbeli elhelyezkedésük, és fluidumvezető képességük felmérése kiemelt hangsúlyt érdemel a megfelelő telephely kiválasztásakor (HRABOVSKI et al. 2022).

8. A BAT–4 és a Delta–3 fúrásokban szerkezeti, szöveti és ásványtani jellemzők alapján megjelennek mindazon ásványos erek, amelyek a BAF–2 fúrással jellemzőek. Ez alapján a BAF–2 fúrásban megfigyelt szerkezet- és paleofluidum-fejlődési sajátosságok a BAF fenti két fúrás által megmintázott köztérzfogatára is érvényesek.

HIVATKOZÁSOK

BODNAR, R. J. 1993: Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O–NaCl

- solutions. — *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**, 683–684.
- BONS, P. D. 2001: The formation of large quartz veins by rapid ascent of fluids in mobile hydrofractures. — *Tectonophysics* **336**, 1–17.
- BONS, P. D., ELBURG, M. A., GOMEZ-RIVAS, E. 2012: A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. — *Journal of Structural Geology* **43**, 33–62.
- FEDOR, F., HÁMOS, G., JOBBIK, A., MÁTHÉ, Z., SOMODI, G., SZÜCS, I. 2008: Laboratory pressure pulse decay permeability measurement of Boda Claystone, Mecsek Mts., SW Hungary. — *Physics and Chemistry of the Earth* **33**, S45–S53.
- GOLDSTEIN, R. H., REYNOLDS, T. J. (eds.) 1994: Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. SEPM (Society for Sedimentary Geology), 199 p.
- KONRÁD, GY., HÁMOS, G. 2006: A magyarországi nagy aktivitású radioaktív hulladéktároló telephely kijelölésének földtani szempontjai és az eddigi kutatások eredményei. — *Acta Geographica, Geologica et Meteorologica Debrecina* **1**, 33–39.
- RAMSAY, J. G. 1980: The crack-seal mechanism of rock deformation. — *Nature* **284**, 135–139.

SZERZŐ DOLGOZATTAL KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓI

Folyóirat

HRABOVSZKI, E., TÓTH, E., M. TÓTH, T., MÁTHÉ, Z., SCHUBERT, F. 2020: Potential formation mechanisms of early diagenetic displacive veins in the Permian Boda Claystone Formation. — *Journal of Structural Geology* **138**, 104098.

HRABOVSZKI, E., TÓTH, E., M. TÓTH, T., GARAGULY, I., FUTÓ, I., MÁTHÉ, Z., SCHUBERT, F. 2022: Geochemical and microtextural properties of veins in a potential high-level radioactive waste disposal site. — *Journal of Structural Geology* **154**, 104490.

Konferencia kötet

HRABOVSZKI, E., TÓTH, E., SCHUBERT, F. 2018: A Bodai Agyagkő Formáció repedéskitöltéseinek geometriája és mikroszerkezete (BAF–2 fúrás). In: BERKESI, M., CSERESZNYÉS, D., GELENCSÉR, O., KIRÁLY, CS., PÁLOS, ZS., SPRÁNITZ, T., SZABÓ, ZS., SZABÓ, ZS. (szerk.): Az asztenoszféráról az atmoszféráig: 9. Közettani és Geokémiai Vándorgyűlés. Absztrakt kötet. Budapest, 65–66.

HRABOVSZKI, E., TÓTH, E., SCHUBERT, F. 2019: Cone-in-cone structures: Crack-sealing or continuous vein growth? In: HRDLICKOVÁ, K., DANKOVÁ, L. (eds.): 17th Meeting of the Central European Tectonic Studies Group — CETeG 2019. Abstract Volume. Prague, 24 p.

SZERZŐ EGYÉB PUBLIKÁCIÓI

Folyóirat

HRABOVSZKI, E., TÓTH, E., RAUCSIK, B., VARGA, A., SCHUBERT, F. 2017: A BAF–2 fúrás töréses szerkezeti elemeinek mikroszerkezeti és cementáció vizsgálata (Bodai Agyagkő Formáció). — *Földtani Közlöny* **147/3**, 245–264.

TÓTH, E., HRABOVSZKI, E., M. TÓTH, T., SCHUBERT, F. 2020: Shear strain and volume change associated with sigmoidal vein arrays in the Boda Claystone. — *Journal of Structural Geology* **138**, 104105.

TÓTH, E., HRABOVSZKI, E., SCHUBERT, F., M. TÓTH, T. 2022: Discrete fracture network (DFN) modelling of a high-level radioactive waste repository host rock and the effects on its hydrogeological behaviour. — *Journal of Structural Geology* **156**, 104556.

TÓTH, E., HRABOVSZKI, E., SCHUBERT, F., M. TÓTH, T. 2022: Lithology-Controlled Hydrodynamic Behaviour of a Fractured Sandstone–Claystone Body in a Radioactive Waste Repository Site, SW Hungary. — *Applied Sciences* **12**, 2528.

TÓTH, E., HRABOVSZKI, E., STEINBACH, G., SCHUBERT, F. 2018: A nyírás- és a térfogatváltozás mértékének kvantitatív becslése szigmoidális húzási hasítékok alapján. — *Földtani Közöny* **148/4**, 367–380.

Konferencia kötet

HRABOVSZKI, E., TÓTH, E., SCHUBERT, F. 2017: A study of different vein types from the Boda Claystone Formation, Mecsek Mountains, SW Hungary. In: Kövér, Sz., Fodor, L. (eds.): 15th Meeting of the Central European Tectonic Studies Group — CETeG 2017. Abstract Volume. Szeged, 15 p.

LADÁNYI, L., HRABOVSZKI, E., SCHUBERT, F. 2021: Szerkezetfejlődés és repedéscementáció az Óbányai-völgyben (Kelet-Mecsek). In: Király, E., Fűri, J. (szerk.): Átalakulások II.: 11. Közettani és Geokémiai Vándorgyűlés. Absztrakt kötet. Budapest, 30 p.

- TÓTH, E., HRABOVSKÍ, E., M. TÓTH, T., SCHUBERT, F. 2021:
A Bodai Agyagkő litológiai változékonyságának hatása a
töréshálózat hidrodinamikájára. In: Király, E., Fűri, J.
(szerk.): Átalakulások II.: 11. Közettani és Geokémiai
Vándorgyűlés. Absztrakt kötet. Budapest, 53–55.
- TÓTH, E., HRABOVSKÍ, E., SCHUBERT, F., M. TÓTH, T. 2019:
Shear strain and volume change estimation in shear zones
using sigmoidal extension veins. In: HRDLICKOVÁ, K.,
DANKOVÁ, L. (eds.): 17th Meeting of the Central European
Tectonic Studies Group — CETeG 2019. Abstract
Volume. Prague, 87 p.