

A nyírás- és a térfogatváltozás mértékének kvantitatív becslése szigmoidális húzásos hasadékok alapján a BAF–2 fúrás mintáinak példáján

TÓTH Emese^{*1}, HRABOVSZKI Ervin¹, STEINBACH Gábor², SCHUBERT Félix¹

¹Szegedi Tudományegyetem TTIK Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, 6722 Szeged, Egyetem utca 2.

²MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont, 6726 Szeged, Temesvári krt. 62.

*levelező szerző, e-mail: emese.toth.95@gmail.com

Quantitative estimation of shear strain and volume change using sigmoidal tension gashes

Abstract

The aim of our study is to call attention to the potential of sigmoidal tension gashes to estimate shear strain and bulk volume change of shear zones. The formation mechanisms of en échelon vein arrays and tension gashes within shear zones as well as the development of sigmoidal vein shapes are discussed in detail. A numerical method is presented that enables to define the shear strain and dilational components of shear zones. Two potential models of tension gash formation are discussed. In order to use the proper calculation method, it is essential to determine the formation mechanism of the particular tension gash arrays. For this purpose, a detailed guide is presented. The applicability of the methodology mentioned above is introduced on selected borehole samples from the Boda Claystone Formation (Mecsek Mts, BAF–2 well). The quantified values based on the different models are a) passive rotation model: shear strain $\gamma = 0.74$ and 0.73 ; bulk volume change -49% and -57% , b) folded bridge model: shear strain $\gamma = 0.71$ and $\gamma = 0.63$; bulk volume change -46% and -41% . Based on these shear strain and volume change values, we suppose that the studied shear zones of the BAF–2 well supported similar deformation. According to our criteria system, the investigated shear zones were formed by the folded bridge mechanism.

Keywords: tension gashes, extensional veins, en échelon, shear zone, strain analysis, Boda Claystone Formation

Összefoglalás

Munkánkban bemutatjuk a kulisszás elrendeződésű erek képződési mechanizmusait, tárgyaljuk a húzásos hasadékok nyírás zónákban belüli fejlődését, illetve a húzásos hasadékok szigmoidális alakjának alapvető kialakulási modelljeit. Mindezek alapján egy olyan, a húzásos hasadékrendszer geometriáján alapuló módszertant mutatunk be, amelynek segítségével megbecsülhető a nyírás zónákban lezajlott nyírás alak-, illetve térfogatváltozás. A megfelelő számítási módszer kiválasztásához nélkülözhetetlen az adott húzásos hasadékrendszer képződési modelljének meghatározása. Ennek érdekében egy több elemből álló szempontrendszerrel állítottunk össze. A bemutatott módszertan alkalmazhatóságát a Nyugati-Mecsekben elhelyezkedő Bodai Agyagkő Formáció BAF–2 fúrásának példáján szemléltetjük. A fúrás maganyagában nagy számban fordulnak elő töréses-képlékeny nyírás zónákra jellemző, szigmoidális húzásos hasadékrendszer. Tanulmányunkban számszerűsítjük az elemzésre alkalmas nyírás zónákban végbement nyírás- és térfogatváltozás mértékét. Az egyes modellek felhasználásával kapott értékek — a) passzív forgási modell: nyírás alakváltozás $\gamma = 0,74$ és $0,73$; térfogatváltozás -49% illetve -57% , b) „redőzött közhíd” modell: nyírás alakváltozás $\gamma = 0,71$ és $\gamma = 0,63$; térfogatváltozás -46% és -41% — alapján feltételezzük, hogy a nyírás zónák azonos (vagy egyenértékű alakváltozást eredményező) deformációs esemény során keletkeztek. Szempontrendszerünk alapján a vizsgált nyírás zónák kialakulása a „redőzött közhíd” modell révén történt.

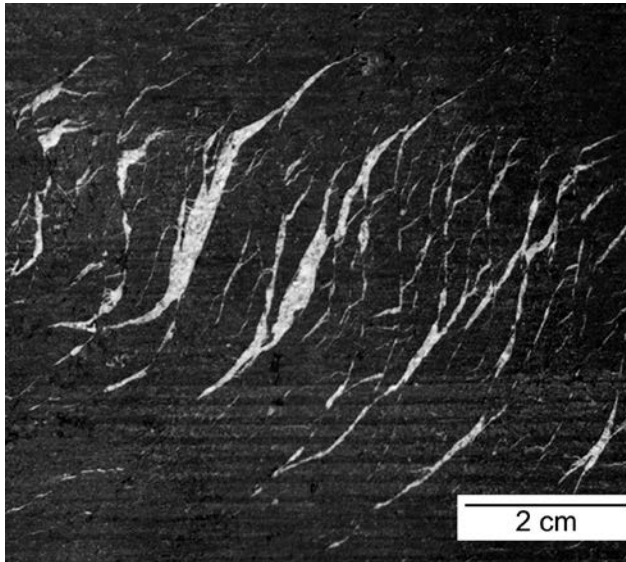
Tárgyszavak: húzásos hasadékok, kulisszás törések, nyírás zóna, alakváltozás, Bodai Agyagkő Formáció

Bevezetés

A töréses deformáció során a kőzetek folytonossága megszakad, aminek következtében töréses szerkezeti elemek, ezen belül vetők, kőzetrések keletkeznek. A töréses

deformáció az elmozdulási vektor és a törési sík kapcsolata alapján három csoportba sorolható (TWISS & MOORES 1992, FOSSEN 2010). Az extenziós törések esetében az elmozdulási vektor merőleges a törés síkjára, míg a nyírásos törések esetében párhuzamos azzal. Azokat a töréseket, amelyekben

felnyílás és nyírás is történik, hibrid töréseknek nevezzük (HANCOCK 1985, FOSSEN 2010). A szigmoidális húzásos hasadékrendszereket olyan szakításos törések (*extensional fractures*) alkotják, amelyeket jellegzetes geometria és belső térbeli elrendeződés jellemez. Bennük az egyes erek S vagy Z alakúak, és kulisszás elrendeződésben — egymáshoz képest eltolva — helyezkednek el. Az említett három tulajdonság együttesen jellemzi ezeket a szerkezeteket (1. ábra).



1. ábra. Szigmoidális húzásos hasadékrendszer a Boda, BAF-2_500 mintában
Figure 1. Sigmoidal tension gashes in sample Boda, BAF-2_500

Hazánkban a nagy aktivitású radioaktív hulladékok végleges felszín alatti tárolójának potenciális befogadó képződménye a Nyugati-Mecsekben elhelyezkedő, perm időszerű Bodai Aggagkő Formáció. A képződmény izolációs tulajdonsága nagy mértékben függ az egykori szerkezetföldtani események által létrehozott nyírás zónáktól, szerkezeti inhomogenitásoktól, így indokolt a BAF deformációtörténetének minél pontosabb megismerése. A kutatásunk tárgyát képező BAF-2 fúrás a BAF egy igen tektonizált rétegsorát tárja fel. A különböző típusú vetők és köztrécek mellett nagy számban fordulnak elő törések képlékeny deformációs stílusú nyírás zónákra jellemző szigmoidális húzásos hasadékokból álló érrendszerek (RAMSAY & HUBER 1987).

Ezek a hasadékok felhasználhatók a képződményt ért deformációs események jellemzésére és számszerűsítésére. Munkánkban bemutatjuk — az eddig megjelent releváns publikációk alapján — a húzásos hasadékok kialakulási modelljeit, valamint e deformációs elemek alkalmazhatóságát a térfogat- és a nyírás alakváltozás számszerűsítésében a BAF-2 mélyfúrás kőzetmintáinak példáján. Tanulmányunk módszertani jellegű, a BAF-2 fúrásban előforduló 214 db húzásos hasadékrendszer teljeskörű vizsgálata, illetve a hasadékok petrográfiai jellemzése meghaladja jelen tanulmány terjedelmi korlátait.

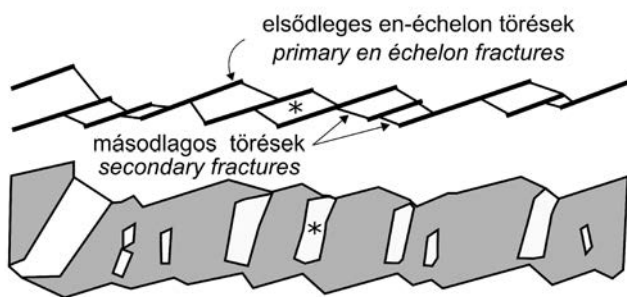
A kulisszás elrendeződésű szerkezeti elemek megjelenési formái és képződési mechanizmusai

A kulisszás elrendeződésű erek kialakulási mechanizmusai

A húzásos hasadékok olyan extenziós erek, amelyek hosszanti tengelye a legnagyobb főfeszültséggel (σ_1) párhuzamos, legnagyobb szélességüket központi részükön érik el, végeik csúcsosodva elvékonyodnak (BONS et al. 2012). Az erek sorozatokban fordulhatnak elő, amely sorozatokban egymáshoz képest eltolva, kulisszaszerűen (*en échelon*) helyezkednek el. A kulisszaszerűen elrendeződő erek négy eltérő modell alapján alakulhatnak ki: (1) POLLARD et al. (1982) modellje szerint a — feszültségmező megváltozása miatt — egyetlen főtörés feldarabolódásából alakulnak ki a kulisszás elrendeződésű törések. (2) RAMSAY & HUBER (1987) szerint az erek extenziós törésekként alakulnak ki egy képlékeny nyírás zónában. A húzásos hasadékok párhuzamosak a legnagyobb kompressziós főfeszültséggel (σ_1), legnagyobb vastagságukat erre merőlegesen, a legkisebb kompressziós feszültség (σ_3) irányában érik el (FOSSEN 2010). A nyírás zóna esetleges, nyírás kísértő térfogatváltozása befolyásolja az alakváltozási ellipszis helyzetét, ennek értelmében a deformáció korai szakaszában a törések geometriai tulajdonságait a nyírás kísértő térfogatváltozás határozza meg (RAMSAY & HUBER 1987). RAMSAY (1980) feltételezése szerint, amennyiben a nyírás zónában térfogat-növekedés megy végbe, a törések elvégződése a nyírás zóna határaival 45° -nál kisebb szöget zárnak be, ellenkező esetben — a nyírás zóna térfogatcsökkenésekor — a törések elvégződése a nyírás zóna határaival 45° -nál nagyobb szöget zárnak be. Amennyiben a rendszerben nincs térfogatváltozás, a töréseket egyszerű nyírás alakítja ki, a törések elvégződése és a nyírás zóna határa 45° -ot zárnak be egymással. (3) OLSON & POLLARD (1991) szerint a kőzetben a gyengeségi pontok és heterogenitások körül helyi feszültségfelhalmozódás jön létre, amelyek iránya és eloszlása véletlenszerű. A már meglévő mikrohasadékok következtében véletlenszerű térbeli eloszlást mutató, de irányukat tekintve egymással közel párhuzamos mikrotörések keletkeznek. Ezeket a mikrotöréseket fluidumok, illetve az ezekből kiváló ásványok tölthetik ki, így erek jöhetnek létre. Miután az erek hosszúságuk miatt kölcsönhatásba léphetnek egymással, növekedésük szelektívvé válhat. Így az összeakadó sorozatok (*stacked arrays*) tagjainak növekedése lelassul, vagy megáll, míg a kulisszás elrendeződésű sorozatok tagjainak növekedése fokozódik. A folyamat eredményeként változó hosszúságú és elhelyezkedésű erek járnak át a kőzetet, amelyek közül számos kulisszás elrendeződésű sorozatot alkot. Az így kialakult kulisszás elrendeződésű érsorozatok — az érkítőltő ásványok anyagától függően — a kőzettest gyengeségi zónái lehetnek, így egy későbbi deformáció lehetséges helyét jelölik ki a kőzetben. Az ilyen területeken — a kőzet gyengeségét kihasználva — képlékeny stílusú nyírás zónák alakulhatnak ki; a már meglévő erek szigmoidális alakjukat

a zónában létrejövő nyírási alakváltozás hatására érik el. Mind RAMSAY & HUBER (1987), mind OLSON & POLLARD (1991) modellje nyírási zónákhoz kapcsolódik, az első esetben a nyírási zóna hatására alakulnak ki az erek, míg a második esetben az erek jelentősen befolyásolják a kialakuló nyírási zóna elhelyezkedését (BONS et al. 2012). (4) ROERING (1968) szerint en échelon szerkezetű törérendszerek — márkánsan anizotróp szerkezetű kőzetekben — (kink)redőződés során alakulhatnak ki.

A kulisszás elrendeződésű erek fejlődése során az egyedi erek között található közethidak törésesen és képlékenyen is deformálódhatnak. Rideg alakváltozás esetében az egyes ereket összekapcsoló törések fejlődnek ki, lehetővé téve a közethidak merev blokkokként történő forgását. További fejlődés eredményeként a hasadékok egyetlen érré olvadnak össze, amelyben a közethidak „úszó” mellékközvetzárványoknak tekinthetők (2. ábra; BONS et al. 2009, BONS et al. 2012). Amennyiben a befogadó kőzet makroszkóposan folytonosan deformálódik, a közethidak meghajlanak, így az erek mentén — lokálisan — térfogat-növekedés megy végbe (BEACH 1975, NICHOLSON 1991). Az egyes erek elhelyez-

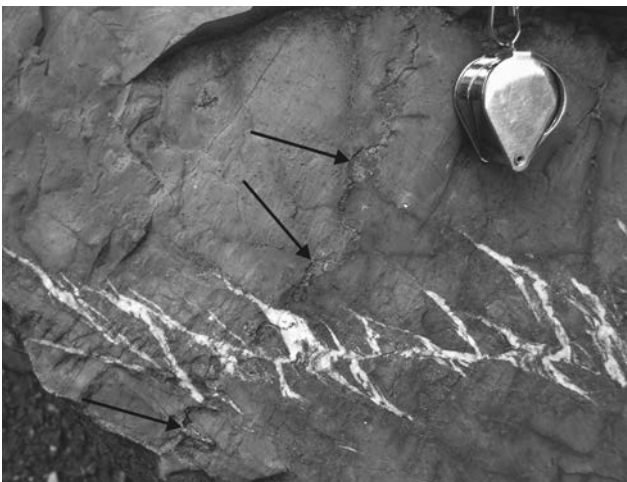


2. ábra. Töréses deformációval kialakuló közethidak fejlődésének kezdeti (A) és előrehaladott állapota (B).

A * szimbólum az azonos közethidakat jelöli BONS et al. 2012)

Figure 2. Early (A) and mature (B) stages of brittle bridge formation during en échelon vein development.

The * symbol indicates the same brittle bridges (BONS et al. 2012)

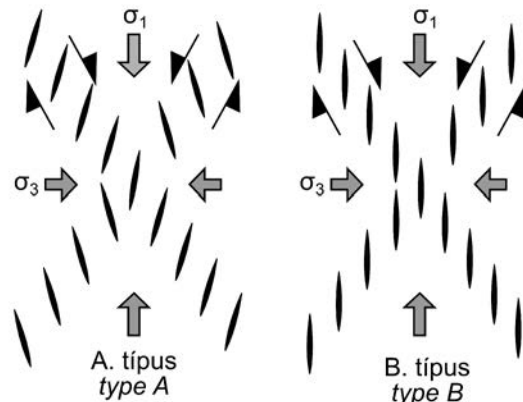


3. ábra. Sztilolit és szigmoidális húzásos hasadékrendszer a Kantavári kőfejtőben

Figure 3. Stylolite and sigmoidal tension gash array in the Kantavár quarry

kedésétől és az elmozdulás irányától függően a közethidak forgása és meghajlása a közethidak tágulásához vagy térfogatcsökkenéshez is vezethet. Térfogatcsökkenés esetében a közethidakban nyomási oldódási folyamatok is lejátszódhatnak (3. ábra, BEACH 1975, BONS et al. 2012, SEYUM & POLLARD 2016).

A nyírási zónákhoz kapcsolódó kulisszás elrendeződésű húzásos hasadékrendszerek gyakran konjugált párokat alkotnak. BEACH (1975) a konjugált rendszereket geometriájuk alapján két típusba sorolta (4. ábra). Az A típusban az erek az érsorozat falával párhuzamosak, míg a B típusban a



4. ábra. A és B típusú konjugált párok (BONS et al. 2012, módosítva)

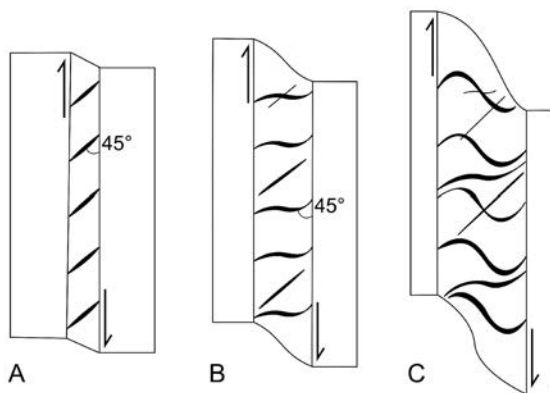
Figure 4. Type A and B en échelon veins (modified after BONS et al. 2012)

két sorozatban egymással párhuzamos erek találhatók. SMITH (1996) a konjugált párokat a hasadékrendszeren belüli erek által bezárt szög valamint a két érrendszer által bezárt szög alapján jellemezte. Ezek alapján megkülönböztetett divergens, párhuzamos és konvergens típusokat. A SMITH (1996) konvergens (*cross paralell*) és a párhuzamos (*bisector paralell*) típusa megfeleltethető BEACH (1975) A és B típusának. SRIVASTAVA (2000) megállapította, hogy geometriai megfontolások alapján a természetben divergens típusú konjugált hasadékrendszer nem alakulhat ki. A konjugált párokban megjelenő hasadéksorozatok felhasználhatók a rendszert kialakító főfeszültségirányok meghatározására, a legnagyobb főfeszültség (σ_1) konjugált síkok által bezárt kisebb szög szögfelezőjében helyezkedik el (RAMSAY & HUBER 1987, SMITH 1996, SRIVASTAVA 2000, BELAYNEH & COSGROVE 2010).

A húzásos hasadékok fejlődése a nyírási zónákban

A nyírási zónákban kialakuló szigmoidális húzásos hasadékok fejlődése három lépésben mutatható be. A nyírási zónában kialakuló kulisszás elrendeződésű törések a legnagyobb főfeszültség irányával párhuzamosak, a zóna falával 45° -ot zárnak be. A nyírási alakváltozás hatására az erek kezdeti — a nyírási zóna falával bezárt — 45° -os szögei a húzásos hasadékok forgása következtében növekedni kezdenek. Forgásuk közben a hasadékok gyakran felnyílnak, ezáltal a kőzetet átjáró fluidumból ásványok válhatnak ki

bennük. Ahogyan a nyírési zóna fejlődése során a hasadékok szélesednek, az erek csúcsai továbbra is a nyírési zóna falai felé növekednek, amelyek így újból 45° -ot zárnak be a zóna határaival (RAMSAY & HUBER 1987). A folyamat hatására a húzásos hasadékok így már szigmoidális alakot mutatnak, a középső részek a nyírás hatására elforogtak, a hasadékok csúcsos elvégződése pedig 45° -ot zárnak be a zóna határaival (5. ábra; RAMSAY & HUBER 1987). POLLARD et al. (1982) szerint az erek szigmoidális alakja kialakulhat nyírési alakváltozás által okozott forgás nélkül is, ha az ér növekedése a kőzetben fellépő mechanikai akadály — amely lehet rétegzés, kőzetben található inhomogenitás — miatt görbültté válik. Nagy mértékű nyírési alakváltozás következtében előfordulhat, hogy a húzásos hasadékok középső részének kedvezőtlen orientációja megakadályozza a hasadék további növekedését.



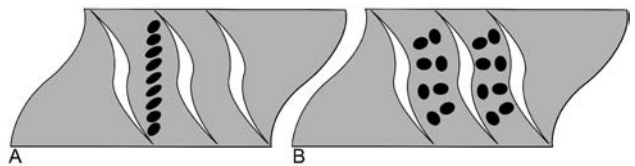
5. ábra. Kezdetben egyenes (A) húzásos hasadékok szigmoidális alakjának kialakulása (B) egy nyírési zónában. Jelentős alakváltozás esetén a zónában újabb hasadékgenerációk alakulnak ki (B), amelyek idővel szintén szigmoidális alakúvá deformálódnak (C) (RAMSAY & HUBER 1983)

Figure 5. Evolution of sigmoidal en échelon veins within a shear zone. Initially straight veins (A), evolution of the sigmoidal shape of the early veins and formation of new tension gashes (B), continuous evolution of the differently-aged veins with ongoing deformation of the shear zone (C) (RAMSAY & HUBER 1983)

Ekkor új, az idősebb erekre merőlegesen álló (*cross cutting*) erek jelennek meg, amelyek újfent 45° -os szöget zárnak be a nyírési zóna határaival (5. ábra, C). A korábbi húzásos hasadékok növekedése megáll, az új húzásos hasadékrendszer fejlődik tovább (RAMSAY & HUBER 1987).

A húzásos hasadékok szigmoidális alakjának kialakulása

A szigmoidális húzásos hasadékok görbült alakjának kialakulása LISLE (2013) szerint két különböző modellel írható le (6. ábra). Az első modell a görbültséget egy kezdetben egyenes ér nyírési alakváltozás által előidézett passzív rotációjával (*passive rotation*) magyarázza (6. ábra, A), a második modell szerint a húzásos hasadékok a köztük lévő kőzethidak deformációt befolyásoló hatásának köszönhetik görbültségüket (6. ábra, B; NICHOLSON & POLLARD 1985, NICHOLSON & EJOFOR 1987, NICHOLSON 2000).



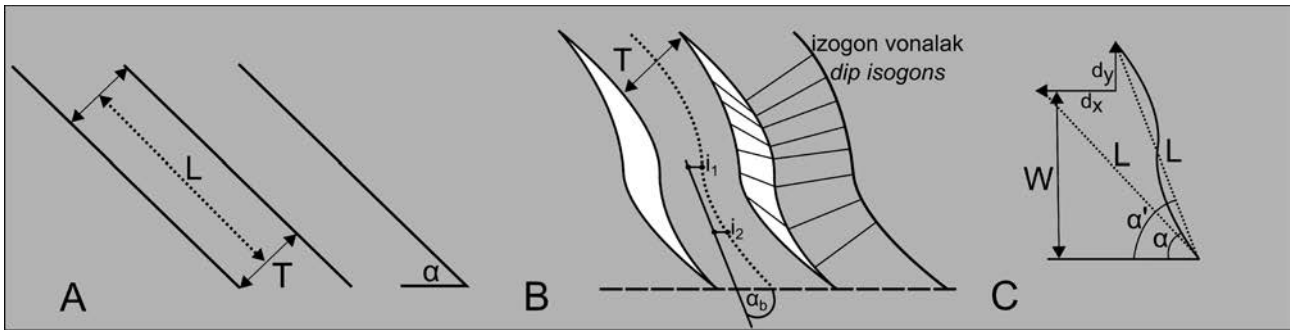
6. ábra. A passzív forgási modell (A), illetve a „redőzött kőzethíd” modell (B) szerint kialakult, idealizált szigmoidális húzásos hasadékrendszer (a fekete ellipszoidok a nyírési zóna alakváltozási ellipszoidjai) (LISLE 2013)

Figure 6. Idealized sigmoidal tension gash array formed by the passive rotation model (A) and the folded bridge model (B) (the black ellipsoids are the strain ellipsoids of the shear zone) (LISLE 2013)

A passzív forgási modell szerint a hasadékok szigmoidális alakja a nyírési zónában kialakuló inhomogén alakváltozás hatására jön létre, amely során a húzásos hasadék eltérő pontjai különböző mértékű rotációt végeznek (RAMSAY & GRAHAM 1970, HANCOCK 1972, BEACH 1977). A húzásos hasadék deformált iránya függ az ér kiindulási orientációjától és az alakváltozás nagyságától. Az eredeti törés iránya a hasadék hegyeinek orientációjából becsülhető meg. Ez a modell feltételezi, hogy a nyírás mértéke folyamatosan változik a nyírési zóna határai között. A hasadék végső alakja függ a deformáció típusától, a térfogatváltozás mértékétől, továbbá a nyírás és a térfogatváltozás időbeli kapcsolatától (RAMSAY & HUBER 1983, LISLE 2013).

A „redőzött kőzethíd” (*folded bridge*) modell szerint a deformációt az erek közti kőzethidak kőzetzfizikai tulajdonságai befolyásolják. A „redőzött kőzethíd” modell szerint a kulisszás elrendeződésű érsorozat a nyírési zónát L hosszúságú kőzethidakra osztja fel (7. ábra). A kezdeti törések a nyírési zóna határaihoz α szöggel hajlanak, a hidak T távolságra vannak egymástól, amely egyben a kőzethidak vastagsága (7. ábra; LISLE 2013). A nyírési zóna működése során bekövetkező térfogatváltozás közben a redőzött kőzethíd hossz tengelyének orientációja megváltozik, így kialakulhatnak a hasadékok. A deformáció során a kőzethidak vastagsága nem változik, az általuk alkotott redők RAMSAY (1967) osztályozása alapján párhuzamos redő (azonos vastagságú) típusúak. A húzásos hasadéksorozatok ismétlődő egységekből épülnek fel, amelyek egy hasadékot és egy kőzethidat tartalmaznak. Ez az ismétlődő egység összetett réteggként fogható fel, amely alakja alapján RAMSAY (1967) hasonló redőosztályába sorolható.

A nyírési zóna deformációja a nyírési zóna határán lévő pontok elmozdulásából határozható meg; az elmozdulás vízszintes összetevője (d_x) párhuzamos a nyírési zóna határvonalával és egyszerű nyírásra utal, míg az elmozdulás függőleges összetevője (d_y) a nyírési zóna térfogatváltozását fejezi ki (7. ábra; LISLE 2013). A nyírési zóna deformációjának vízszintes (d_x) és függőleges (d_y) összetevői megadhatók a nyírési zóna vastagságára normalva, amelyeket D_x -szel és D_y -nal jelölünk. A hasadékok fejlődése során — amennyiben a nyírás hatására az erek olyan orientációt érnek el, amely megakadályozza további növekedésüket — újabb törések alakulhatnak ki, új erek növekedhetnek. A „redőzött kőzethíd” modell nem számol ezzel a folyamattal (5. ábra; LISLE 2013), így ilyen esetekben a modell segít-



7. ábra. A „redőzött kőzethíd” modell

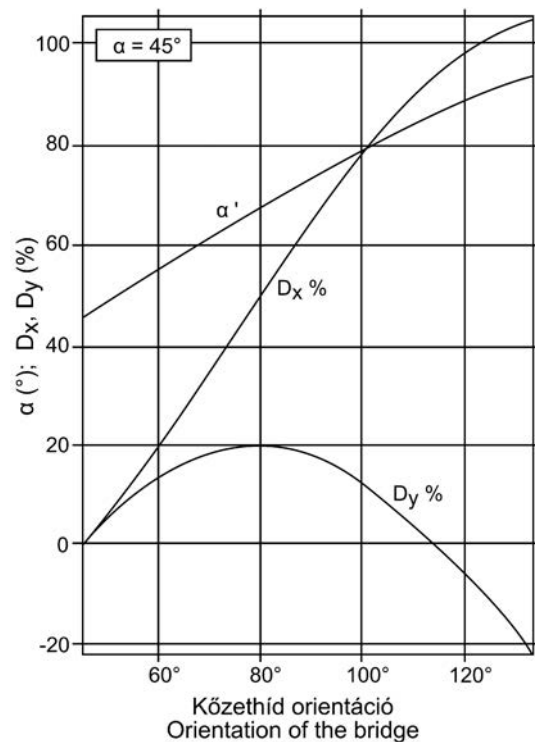
α = a hasadékok és a nyírási zóna határa által bezárt kezdeti szög, α' = a szigmoidális alakú hasadékok és a nyírási zóna határa által bezárt szög, T = a kőzethidak vastagsága, L = a kőzethidak hosszúsága, W = a nyírási zóna szélessége, d_x = a nyírási zóna határán található adott pont elmozdulásának a nyírási zóna határával párhuzamos összetevője, d_y = a nyírási zóna határán található adott pont elmozdulásának nyírási zóna határára merőleges összetevője, α_b = kőzethíd orientációja, i_1 = a kőzethíd középvonalának inflexiósi pontja, i_2 = a kőzethíd középvonalának egyenes szakaszának végpontja (LISLE 2013, módosítva)

Figure 7. The folded bridge model

α = initial vein orientation, α' = deformed vein orientation, T = thickness of the bridge, L = length of the bridge, W = width of the shear zone, d_x , d_y = lateral and dilational components of the shear zone's displacement, α_b = orientation of the bridge, i_1 = inflection point of the middle surface of the bridge, i_2 = end of the straight portion of middle surface of the bridge (modified after LISLE 2013)

ségével a nyírási zónában kialakult nyírási alakváltozás minimális értékét kaphatjuk meg. A modell szerint a hidak iránya és a nyírási zóna határa közötti szög (α_b) a deformáció előrehaladtával folyamatosan növekszik. Ez a növekedés összefügg a szigmoidális hasadék forgásának szögével (LISLE 2013). Ahogyan α_b növekszik a kőzethíd redőszárnyai által bezárt központi nyílásszög csökken. Mivel a redőzött kőzethidak minimális nyílásszöge 0° , emiatt a „redőzött kőzethíd” modell csak $D_x < 1,6$ — azaz a nyírási zóna szélességének (W) 1,6-szorosánál kisebb elmozdulás — esetében használható (LISLE 2013). A fentiekből következik, hogy az egyes hasadékok alakja, valamint a kőzethidak vastagsága geometriailag behatárolja a nyírási zóna egészében végbemenő alakváltozást.

A deformáció korai szakaszában — azaz kis D_x érték esetében — a húzásos hasadék felnyílása térfogat-növekedést von maga után, ami a nyírási zóna szélesedését eredményezi, mivel a kőzethidak térfogata nem változik a deformáció során. Következésképp a deformáció korai szakaszában a zónával párhuzamos elmozdulás (D_x) a zónára merőleges tágulással (D_y) jár (8. ábra). A tágulás mértékét a nyírási zóna határaival párhuzamos nyírás határozza meg. Ahogyan a nyírás növekszik, a nyírási zóna térfogata nő, de a térfogat-növekedés mértéke csökken (8. ábra), amint a kőzethidak átlagos elhajlása (α_b) eléri a 80° -ot. Ekkor a nyírási zóna eléri a maximális szélességét. A deformáció ezen szakaszában a nyírási zóna szélessége ~20%-kal haladja meg a kezdeti állapotot (LISLE 2013). A deformáció további részében a kőzethíd növekvő elhajlásával ($80^\circ < \alpha_b < 115^\circ$) a nyírási zóna korábban megnövekedett térfogata fokozatosan csökkenni kezd és akár elérheti a zóna kezdeti térfogatát (9. ábra), vagy annál kisebb értéket is ($\alpha_b > 115^\circ$). A nyírási zóna mentén bekövetkező térfogatváltozás mértékét az erek kezdeti orientációja is befolyásolja. A nyírási zóna térfogatváltozásának mértéke a kezdeti α értékekkel fordított viszonyban van, azaz minél nagyobb a kezdeti α érték, annál kisebb lesz a nyírási zóna térfogatváltozása a deformáció során (LISLE 2013).



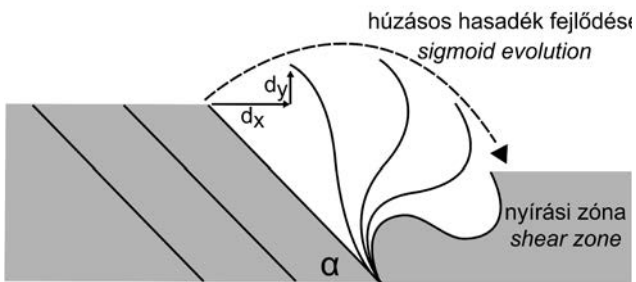
8. ábra. A hasadéksorozat paramétereinek változása a deformáció során, a „redőzött kőzethíd” modell esetén

α' = a szigmoidális alakú hasadékok és a nyírási zóna határa által bezárt szög, $D_x\%$ és $D_y\%$ = a nyírási zóna határán található adott pont elmozdulásának nyírási zóna határára párhuzamos és merőleges összetevői a nyírási zóna vastagságához viszonyítva, százalékban kifejezve (LISLE 2013, módosítva)

Figure 8. Changes in the deformation parameters of a gash array during a folded bridge model deformation

α' = deformed vein orientation, $D_x\%$ and $D_y\%$ = displacement components as percentage of shear zone width (modified after LISLE 2013)

Nagy alakváltozással rendelkező nyírási zónák esetében a kőzethidak közötti hasadékok zárulhatnak. Kétséges, hogy az egyes húzásos hasadékok ebben a fejlett szakaszban tovább fejlődnének, mivel a szükséges tér hiányában az ér alakjának jelentős mértékben módosulnia, torzulnia kellene (pl. az érkítőltő ásványok anyagának nyomási oldódása;



9. ábra. A nyírás zóna és a húzásos hasadékok fejlődése a „redőzött kőzetű” modell esetében

A nyírás zóna vastagsága kezdetben növekszik, majd a fejlődés későbbi szakaszában csökken. α = a hasadékok és a nyírás zóna határa által bezárt kezdeti szög, d_x = a nyírás zóna határán található adott pont elmozdulásának a nyírás zóna határával párhuzamos összetevője, d_y = a nyírás zóna határán található adott pont elmozdulásának nyírás zóna határára merőleges összetevője (Lisle 2013, módosítva)

Figure 9. Evolution of a shear zone and the tension gashes according to the folded bridge model

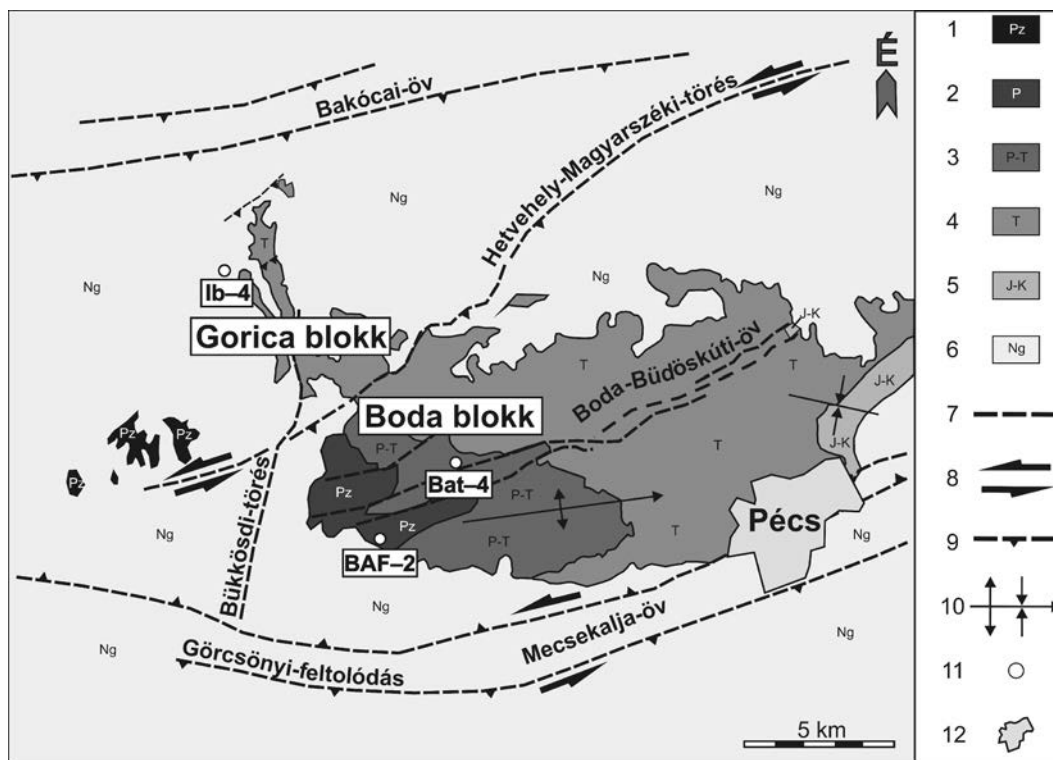
The initial increase of the shear zone width is followed by a decrease with evolution of the zone. α = initial vein orientation, d_x and d_y = lateral and dilational components of the shear zone's displacement (modified after LISLE 2013)

LISLE 2013). A nyírás zóna szélességének „redőzött kőzetű” modell szerinti fejlődését a 9. ábra foglalja össze. A nyírás zóna szélességének kezdeti növekedése fokozatos csökkenésbe megy át, miután az erek átlagos elhajlása elér egy kritikus értéket ($\alpha_b = 80^\circ$).

A szigmoidális alakot kialakító mechanizmusoknak fontos szerepük van a nyírás zónák vizsgálata során. A nyírás zónában kialakuló nyírás alak-, illetve térfogatváltozás mértéke a húzásos hasadékok segítségével — szigmoidális alakot kialakító mechanizmustól függően — két különböző módszerrel számítható ki (LISLE 2013).

Földtani háttér

A késő-perm korú BAF a Tiszai-főegységben, a Mecsek hegység területén és környezetében található (10. ábra; HAAS 1994, MÁTHÉ 2015). A képződmény elterjedési területe szerkezetileg két részre osztható, a Nyugat-mecseki-antiklinálisra (Boda-blokk), valamint a Gorica-blokk területére. A két területet a Hetvehely–Magyarorszáki-törés választja el egymástól (WÉBER 1977, KONRÁD & SEBE 2010, MÁTHÉ 2015), a képződmény igazolt elterjedési területe 150–200 km² (BARABÁS & BARABÁSNÉ STUHL 1998, KONRÁD & HÁMOS 2006, HALÁSZ 2011, MÁTHÉ 2015). A képződmény ásványos összetétele és szöveti jellegei alapján a Nyugat-mecseki-antiklinálison belül albitos („albitfészkes”) agyagkő, albitolit, valamint aleurolit kőzettípusokra osztható (MÁTHÉ 2015), amelyben homokkő-kőzbetelepülések is megjelennek (BARABÁS & BARABÁSNÉ STUHL 1998, VARGA et al. 2006). A képződmény teljes rétegsorát még



10. ábra. A Bodai Agyagkő Formáció elterjedési területe (KONRÁD & SEBE 2010, módosítva)

Jelmagyarázat: 1 – paleozoos képződmények általában, 2 – felső-permi Bodai Agyagkő Formáció, 3 – felső-permi – triász Kővágószőlősi Homokkő Formáció, 4 – triász üledékes kőzetek (homokkővek, karbonátok, evaporitok), 5 – jura és kréta üledékes kőzetek, kréta vulkanitok, 6 – neogén képződmények, 7 – vető, 8 – oldaleltolódás, 9 – áttolódás, 10 – szinklinális és antiklinális, 11 – fúráspon, 12 – település

Figure 10. Distribution of the Boda Claystone Formation (modified after KONRÁD & SEBE 2010)

Legend: 1 – Palaeozoic in general, 2 – Upper Permian Boda Claystone Fm, 3 – Upper Permian – Triassic Kővágószőlősi Sandstone Fm, 4 – Triassic sediments (sandstones, carbonates, evaporites), 5 – Jurassic and Cretaceous sediments and Cretaceous volcanites, 6 – Neogene sediments, 7 – fault, 8 – strike-slip fault, 9 – thrust fault, 10 – syncline and anticline, 11 – well site, 12 – settlement

egyetlen fúrás sem tárta fel, legnagyobb vastagságban a XV. szerkezetkutató fúrás (~870 m) és a BAF-2 (~905 m) fúrás harántolta (MÁTHÉ 2015).

Ásvány- és kőzettani, geokémiai, valamint szedimentológiai tulajdonságai alapján a képződmény arid-szemiarid klímán kialakult sekélyvízi, sós tavi playa üledék (ÁRKAI et al. 2000, KONRÁD et al. 2010, MÁTHÉ & VARGA 2012).

A Bodai Agyagkővet érintő legjelentősebb szerkezetalakulás feltehetően az alpi orogenezis során fellépő, ÉNy-DK-i késő-kréta kompresszióhoz kapcsolható (BENKOVICS et al. 1997, KOVÁCS 1999). A folyamat során létrejöttek a Mecsek hegység ÉK-DNy-i tengelyű gyűrődései (NÉMEDI-VARGA 1983), a redőtengelyekkel megegyező csapású balos eltolódások (MAROS et al. 2004) és réteglapmenti rátolódások (MAROS et al. 2000). A Pannon-medence kialakulásához kapcsolódóan a Mecsek hegység többfázisú szerkezetfejlődésen ment keresztül. A medence kialakulásához köthető színrift fázisban balos transzpressziós eltolódások (TARI 1993) és pull-apart medencék alakultak ki a hegységet határoló északi és déli törészónák mentén (WEIN 1967). A posztrift fázisban a késő-miocén elején ÉNy-DK-i tengelyű tenziós feszültségmező állt fent (CSONTOS et al. 2002, MAROS et al. 2004). A Mecsek és a Villányi-hegység kiemelkedése a korábbi ÉNy-DK-i balos eltolódásos törészóna reaktiválódását okozta, amely során rátolódásos eltolódások alakultak ki (MAROS et al. 2004). KONRÁD & SEBE (2010) szerint a Nyugati-Mecsek egységes tömbként viselkedett a pannóniai-negyedidőszaki mozgások során, a fiatal szerkezeti mozgások a hegységperemre és az előtér területére korlátozódtak.

A BAF-2 fúrásban a BAF rétegdlése jellemzően DDK-DK-i irányú, amely az antiklinális déli szárnyának megfelelő (KONRÁD et al. 2015). A fúrás szerkezetföldtani vizsgálata alapján három fő tektonikai esemény körvonalazódik. A legidősebb — amely kis hullámhosszú redőket és réteglap menti feltolódásokat eredményezett — megközelítőleg ÉNy-DK-i irányú kompressziós esemény lehetett. A kompressziós feszültségmezőben, az első esemény későbbi szakaszában redők keletkeztek, majd ezekhez kapcsolódó feltolódások jöhettek létre, továbbá az antiklinális déli szárnyán a képződmény egységesen kibillent DK-felé. A második fázisban, transzpressziós feszültségmezőben a kibillenés hatására meredekké váló réteglap menti elmozdulások eltolódásként reaktiválódtak. A harmadik fázisban újabb kompresszió hatására feltolódások alakultak ki, valamint a hegység kiemelkedéséhez kapcsolódóan a képződmény felső 400 métere fellazult, a törések felnyíltak (KONRÁD et al. 2015).

A BAF-2 fúrás képződményeit a BAF tektonikai dokumentálásához kialakított (HÁMOS 1997), majd módosított (MAROS et al. 2000) morfológiai alapú nevezéktan alapján HRABOVSKI et al. (2017) a BAF-2 fúrás töréses szerkezeti elemeit négy makroszkópos kategóriába sorolták. A kulisszás elrendeződésű erekre antitaxiális növekedés valamint kalcit és anhidrit anyagú kitöltés jellemző (HRABOVSKI et al. 2017). A kulisszás törésrendszerek kialakulása — Mecsek hegységi analógiák alapján (MAROS et al. 2000, 2004) — feltételezhetően a késő-kréta ÉNy-DK-i irányú

kompresszió (BENKOVICS et al. 1997) hatására kialakuló rátolódásos szerkezetalakuláshoz köthető.

Minták és vizsgálati módszerek

Munkánk során a BAF-2 fúrás kőzetanyagán számos szigmoidális húzásos hasadékrendszeret azonosítottunk. Az elemzett mintákat az egyszerűbb kezelhetőség érdekében azonosító számokkal láttuk el, amelyet a fúrásszám és az adott fúrómag mélységköze alapján határoztunk meg (*I. táblázat*). A fúrómagokat saját fejlesztésű magszkenner (TÓTH 2016) segítségével dokumentáltuk a Szegedi Tudo-

I. táblázat. A BAF-2 fúrás vizsgált mintái

Table I. The analyzed samples from the BAF-2 well

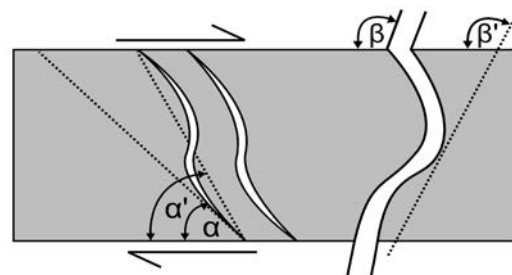
| Mélységköz Depth interval | Mintaazonosító Sample ID | Vizsgálati módszer Method |
|------------------------------|-----------------------------|---|
| 500,65–500,85 m | BAF-2_500 | CT |
| 594,95–595,12 m | BAF-2_594 | Geometria |
| 662,10–662,40 m | BAF-2_662 | Nyírási alakváltozás és térfogatváltozás számítás |
| 667,66–667,80 m | BAF-2_667 | Nyírási alakváltozás és térfogatváltozás számítás |

mányegyetem Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszékén. A tanulmányban közölt méréseket a magszkenner által készített magpalást fotókon végeztük el. A húzásos hasadékok felhasználásával megbecsülhető a nyírási zónában kialakuló nyírási alak- és térfogatváltozás mértéke (RAMSAY 1980, RAMSAY & HUBER 1987, LISLE 2013). A számításokat a bevezetésben ismertetett két fejlődési modellnek megfelelő, kétféle módszerrel végeztük. Az alábbiakban részletesen bemutatjuk a két módszer alkalmazásának menetét a BAF-2 fúrás kiválasztott magmintáin.

Passzív forgási modell (Passive rotation model)

Egyszerű nyírás esetében a nyírási alakváltozás a nyírási zóna adott pontján RAMSAY & HUBER (1983) képletének átrendezésével adható meg (LISLE 2013):

$$\gamma = \cot \alpha - \cot \alpha' \quad (1)$$



11. ábra. Az α , α' és β , β' szögek helyzete a nyírási zónában. A hasadékok és a nyírási zóna határa által bezárt kezdeti (α) és deformált szög (α'). A nyírási zóna kialakulásánál korábbi és a nyírási zóna határa által bezárt kezdeti (β) és deformált szög (β')
Figure 11. α , α' and β , β' position in the shear zone. α and α' = initial and deformed tension gash orientation, β and β' = initial and deformed vein orientation)

Ahol α a kezdeti törés orientációját, α' a deformált ér orientációját, valamint γ a nyírás alakváltozást jelöli (11. ábra). Az egyenletből következik, hogy az ér bármely pontjának görbülete megfeleltethető az α' változásának mértékével, amely a nyírás alakváltozás (γ) helyi értékét tükrözi. A nyírás zónában végbemenő teljes laterális elmozdulás (d_x) két különböző módon számítható (LISLE 2013). RAMSAY (1980) módszere szerint a (2) egyenlet nyírás alakváltozás (γ) értékeinek integrálásával, vagy grafikus módon, a szigmoidális húzásos hasadék és a deformáció előtti ér feltételezett irányának összevetésével kapható meg a nyírás zónában végbemenő laterális elmozdulás mértéke (LISLE 2013). Abban az esetben, ha a nyírás zónában legalább kettő, eltérő orientációjú szerkezeti elem (pl. idősebb ér, törés, rétegzés) is megtalálható, az egyszerű nyírás és a térfogatváltozás ($1+\Delta$) nagysága RAMSAY & HUBER (1987) módszerével becsülhető, amely a következő egyenleteken alapul:

$$\gamma = \frac{\cot\alpha' \cot\beta - \cot\beta' \cot\alpha}{\cot\alpha' - \cot\beta'} \quad (2)$$

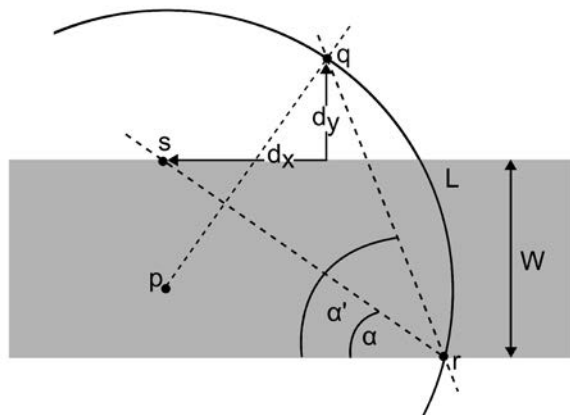
$$1 + \Delta = \frac{\cot\alpha - \cot\beta}{\cot\alpha' - \cot\beta'} \quad (3)$$

A képletekben szereplő α és β a két — nyírás alakváltozást jelző — vonalas szerkezeti elem nyírás zónával bezárt kezdeti-, míg α' és β' a deformációt követő szöge (11. ábra; RAMSAY & HUBER 1987, LISLE 2013).

„Redőzött kőzethíd” modell (Folded bridge model)

A „redőzött kőzethíd” modell szerinti képződést feltételezve a kialakult húzásos hasadékokból, az alábbi grafikai módszert alkalmazva megbecsülhető a nyírás zóna mentén bekövetkezett alakváltozás (LISLE 2013):

(1) Ismert α és α' , amely szögek — a nyírás zóna határaihoz viszonyítva — megadják a kezdeti hasadék irányát



12. ábra. A nyírás és térfogatváltozás mértékének meghatározásához alkalmazható grafikai módszer a „redőzött kőzethíd” modell alapján keletkezett húzásos hasadék esetében (LISLE 2013, módosítva)

Figure 12. A graphical method for estimating shear and dilational components from gashes formed by the folded bridge model (modified after LISLE 2013)

(α), és a deformált hasadék csúcstól csúcsig tartó orientációját (α').

(2) Adott egy tetszőleges sugarú kör (p) középponttal (12. ábra).

(3) Adott egy P ponton keresztül húzott egyenes, ami merőleges a kezdeti húzásos hasadék orientációjára. A vonal a kör kerületét q pontban metszi.

(4) Adott a q ponton keresztül rajzolt egyenes, ami a húzásos hasadék két csúcsát összekötő egyenes irányába fut. Ez a vonal a körvonallal r pontban találkozik. A qr ív hossza megegyezik a kőzethíd eredeti hosszával (L).

(5) A qr vonal megnyúlása (S) a következő egyenlettel adható meg (a szögek radiánban értendők):

$$S = \sin(\alpha' - \alpha) / (\alpha' - \alpha) \quad (4)$$

(6) Az eredeti, prekursor törés ezek alapján megszerkeszthető, irányát az r ponton keresztül futó, nyírás zóna határával α szöget bezáró vonal jelöli ki.

(7) Végpontja (s) származtatható a qr vonal megnyúlásából, továbbá a q és az r pontok távolságából: sr távolság = $S \times qr$ távolság. Az eredeti törést az sr vonal jelöli.

(8) Az s és a q pontok a törés csúcsait jelölik eredeti és deformált állapotban, valamint referencia pontokat jelentenek az elmozdulási komponensek (d_x, d_y) méréséhez. A d_x és a d_y értékeket célszerű a nyírás zóna eredeti szélességéhez (W) viszonyítva kifejezni ($d_x/W = D_x; d_y/W = D_y$).

A kőzethidak geometriai jellemzőinek vizsgálata

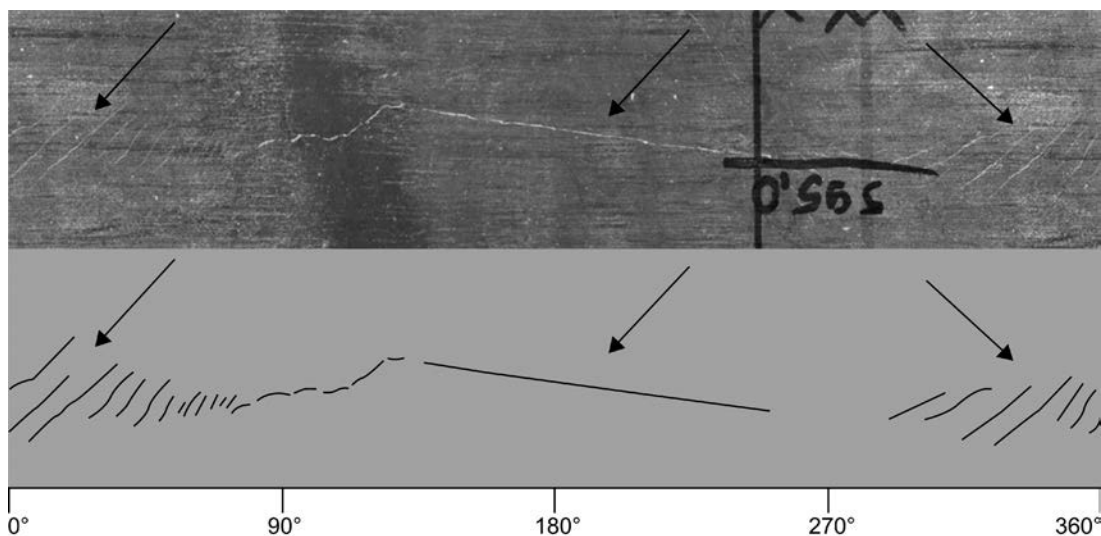
A szigmoidális alakot kialakító mechanizmus azonosítható a hasadékok közötti kőzethidak geometriájának vizsgálatával. Ennek érdekében a szomszédos hasadékok azonos dőlésszögű pontjait összekötve meghatároztuk, hogy a hasadékok között található kőzethidak RAMSAY (1967) osztályozása szerint melyik redőosztályba tartoznak (LISLE 2013). Ehhez a saját fejlesztésű, MATLAB környezetben futó PLINES szoftver segítségével meghatároztuk a kőzethidak izogon vonalait, azaz a kőzethidak szemközti oldalainak azonos dőlésszögű pontjait összekötő szakaszokat. A program a kézzel bedigitalizált szomszédos húzásos hasadékokra két görbét illeszt, majd a görbék legmeredekebb pontjából kiindulva detektálja és összeköti az azonos meredekségű pontpárokat a két görbén. Az eredményül megkapott, a hasadékok között elhelyezkedő kőzethíd azonos dőlésszögű pontjait összekötő izogon vonalak sűrűsége a folyamat során beállítható. A „redőzött kőzethíd” modell konvergáló izogon vonalakkal rendelkező — párhuzamos redőtípus (RAMSAY 1967) — redőt alakít ki, míg a passzív forgási modell által létrehozott — hasonló redőtípus (RAMSAY 1967) — redő izogon vonalai párhuzamosak.

Az ideális metszet kiválasztása

A szigmoidális húzásos hasadéksorozatok vizsgálatokor alapvető fontosságú, hogy a geometriai adatok rögzítése a nyírás zóna és a benne található húzásos hasadékok meg-

felelő orientáltságú metszetén (a főmetszetben) történjen. A húzásos hasadékok főmetszetében — amely a nyírási zónára merőleges és a nyírás irányával párhuzamos — a törések szigmoidális alakja látható. Mivel a hasadékok a σ_1 főfeszültséggel párhuzamosan alakulnak ki, valamint a σ_3 főfeszültségre merőlegesen érik el legnagyobb vastagságukat, a főmetszet definiálható a hasadékokat kialakító feszültségmező σ_2 irányára merőleges síkként. Az ettől eltérő metsze-

hasadékok ásványos kitöltése elkülöníthető a befogadó kőzet anyagától. A nyírási zónára merőleges és az elmozdulás irányával párhuzamos metszetben készült felvételeken a hasadékok szigmoidális alakja megfigyelhető. Ezzel ellentétben a nyírási zóna határának síkjával — amelyet a hasadékok csúcsai határoznak meg — párhuzamosan készült képen (14. ábra) a húzásos hasadékok nem ismerhetők fel, csak a nyírási zóna síkja látható.

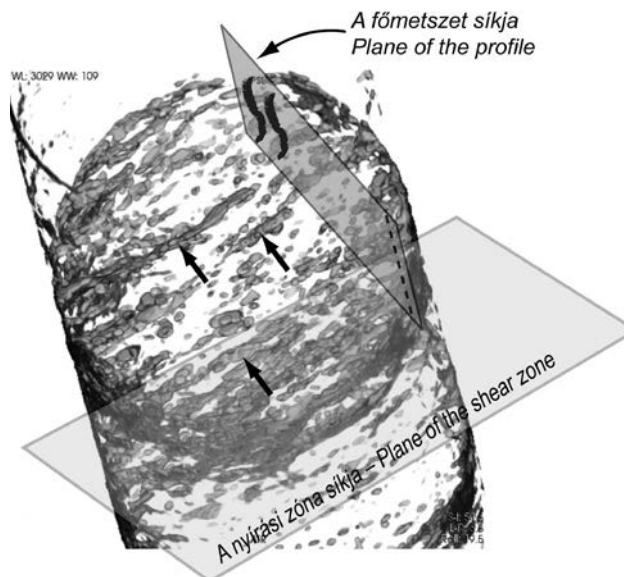


13. ábra. A BAF-2_594 fúrómag minta palást fotója. A fekete nyilak a húzásos hasadékok különböző irányú metszeit jelölik. A kép szélessége, azaz a magminta kerülete 196 mm

Figure 13. Stitched scanner image of the core sample BAF-2_594, tension gashes with different sections are indicated by black arrows. The width of the image is 196 mm

tekben a húzásos hasadékok alakja torzulhat, valós vastagságuknál szélesebbek vagy keskenyebbek lehetnek (SMITH 1995). Szélsőséges esetben, a húzásos hasadékok főmetszete és a nyírás irányára merőleges metszetben a szigmoidális törés egy egyenes töréssé (érré) degradálódik. Ez a jelenség figyelhető meg a BAF-2_594 mintában megjelenő húzásos hasadéksorozaton (13. ábra). Az említett mintában előforduló húzásos hasadéksorozat kiszélesedik, majd elvékonyodik, mivel a fúrás a nyírási zóna síkjából egy kört metszett ki, így a magpalástról készített képeken a húzásos hasadékok különböző irányú metszetei láthatóak. Fúrómagonként változó, hogy a fúró milyen orientációban metszette a nyírási zónát, azaz a fúrómag palástján megjelenik az adott húzásos hasadék szigmoidális alakja.

A fúrómagokon található törések elhelyezkedését és geometriáját komputertomográfia (CT) segítségével vizsgáltuk (14. ábra). A képek a szegedi Diagnoscan központban készültek, GE Lightspeed VCT 64 szeletes berendezéssel. A felvételeket OsiriX 7.5 program segítségével elemeztük. A befogadó kőzet és a repedéskitöltések Hunsfield értékeik alapján jól elkülöníthetők, külön-külön ábrázolhatók. Így kiválasztható az optimális orientációjú metszet, amelyen a szigmoidális húzásos hasadékok valós alakja és geometriai paramétereik vizsgálhatók. A CT felvételeken a húzásos



14. ábra. A húzásos hasadéksorozatok különböző irányú metszetei a BAF-2_500 mintában (CT felvételek).

A és B - a nyírási zónára merőleges és az elmozdulás irányával párhuzamos metszetek, C - a nyírási zóna síkjával párhuzamos metszet

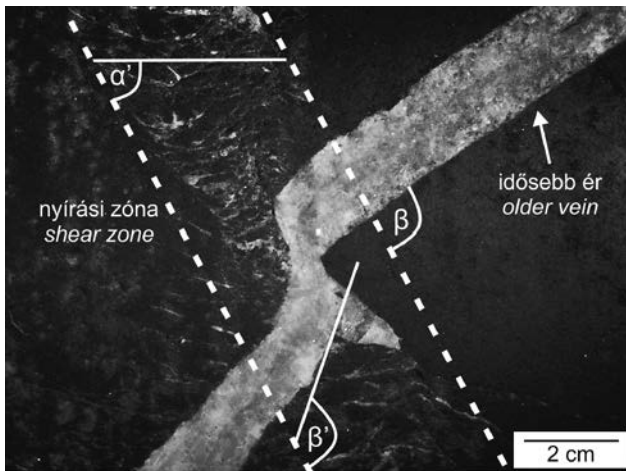
Figure 14. Tension gash array from different viewpoints in core sample BAF-2_500 (CT images).

A and B - sections perpendicular to the shear zone and parallel to the shear direction; C - section parallel to the shear zone

Eredmények

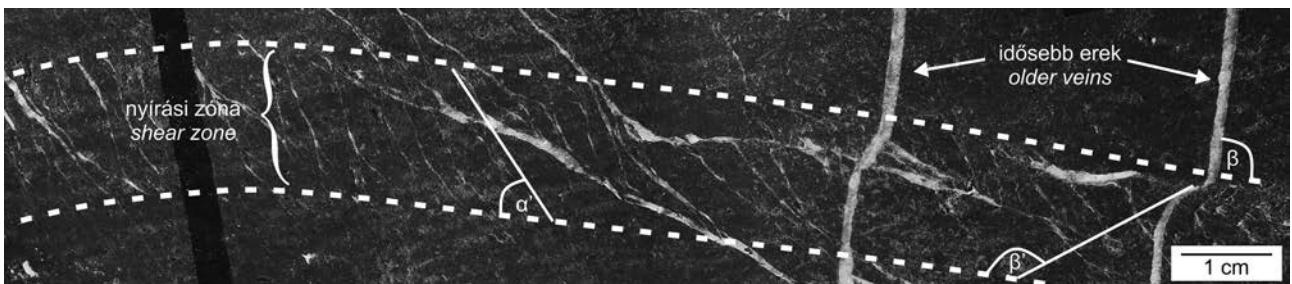
A nyírési zónában létrejövő nyírás- és térfogatváltozás kiszámításához a húzásos hasadékokon kívül szükséges egy további nyírást jelző szerkezeti elem, mivel a passzív forgási modell két eltérő orientációjú szerkezeti elem helyzetét használja fel a nyírás mértékének becsléséhez. Emiatt a modell alkalmazhatósága igen korlátozott, a BAF-2 fúrásban 214 hasadérendszer figyelhető meg, azonban ezek közül csak két hasadérendszer esetében alkalmazható a passzív forgási modellen alapuló számítási eljárás. Ez a két nyírési zóna a BAF-2_662, illetve a BAF-2_667 mintákban található (15. és 16. ábra). A húzásos hasadékok sötét, finomszemcsés, nagy agyagtartalmú kőzetrészekben jelennek meg. A hasadékokat dominánsan kalcit és anhidrit tölti ki (HRABOVSKI et al. 2017).

A fenti mintákon LISLE (2013) által leírt két képződési modell alapján elvégeztük a nyírési zónában létrejött nyírás alak- és térfogatváltozás mértékének becslését. A továbbiakban a „Minták és vizsgálati módszerek” fejezetben ismertetett eljárásokat alkalmaztuk (1. és 2. elektronikus melléklet).



15. ábra. Az elemzett nyírési zóna a BAF-2_662 mintában. Az „idősebb ér” anyaga a nyírési zóna fejlődése előtt keletkezett

Figure 15. The analysed shear zone in sample BAF-2_662. The “older vein” was formed before the shear zone development



16. ábra. Az elemzett nyírési zóna a BAF-2_667 mintában. Az „idősebb ér” a nyírési zóna fejlődése előtt keletkezett

Figure 16. The analysed shear zone in sample BAF-2_667. The “older vein” was formed before the shear zone development

A BAF-2_662 és BAF-2_667 mintákban a húzásos hasadékok által meghatározott nyírési zónák HRABOVSKI et al. (2017) által „egyszerű” típusúként említett erek lefutását módosítják (15. és 16. ábra). Az ér kezdeti orientációját a nyírési zóna határával bezárt szöge, a módosított orientációját az inflexiós ponthoz húzott érintő és a nyírési zóna határa által bezárt szög határozza meg (11. ábra).

A BAF-2_662 mintában található nyírési zóna húzásos hasadékainak kezdeti orientációja $\alpha = 45^\circ$, a deformált orientáció $\alpha' = 63^\circ$, az ásványér orientációja $\beta = 89^\circ$, $\beta' = 145^\circ$ (15. ábra). A passzív forgási modell alapján a nyírás alakváltozás $\gamma = 0,74$, a térfogatváltozás $1+\Delta = 0,51$ (ami 49% térfogatsökkenésnek felel meg). A „redőzött kőzet-híd” modell alapján a nyírás alakváltozás $D_x = 0,70$ (megfeleltethető γ -val), a térfogatváltozás $D_y = -0,455$ (46% térfogatsökkenéssel egyenlő; megfeleltethető $1+\Delta$ -val; II. táblázat).

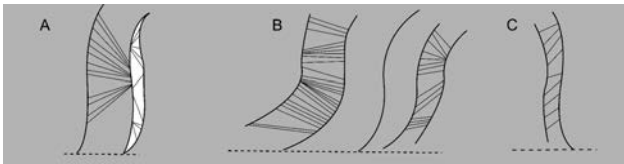
II. táblázat. Eredmények a passzív forgási- és a „redőzött kőzet-híd” modell alapján

Table II. The results of the passive rotation and the folded bridge model

| | BAF-2_662 | BAF-2_667 |
|--|---|---|
| Passzív forgási modell Passive rotation model | $\gamma = 0,74$ 49% térfogatsökkenés | $\gamma = 0,73$ 57% térfogatsökkenés |
| „Redőzött kőzet-híd” modell Folded bridge model | $D_x = 0,71$ 46% térfogatsökkenés | $D_x = 0,63$ 41% térfogatsökkenés |

A BAF-2_667 fúrómag mintában található nyírési zóna húzásos hasadékainak kezdeti orientációját $\alpha = 45^\circ$ -nak feltételeztük, a deformált orientáció $\alpha' = 58^\circ$, az ásványér orientációja $\beta = 86^\circ$, $\beta' = 147^\circ$ (16. ábra). A passzív forgási modell alapján a nyírás alakváltozás $\gamma = 0,73$ a térfogatváltozás $1+\Delta = 0,43$ (= 57% térfogatsökkenés). A „redőzött kőzet-híd” modell alapján a nyírás alakváltozás $D_x = 0,63$, a térfogatváltozás $D_y = -0,41$ (= 59% térfogatsökkenés; II. táblázat).

A PLINES szoftver segítségével meghatároztuk a BAF-2_662 és BAF-2_667 minták húzásos hasadékai között kialakult kőzet-hidak izogon vonalait (17. ábra). Az izogon vonalak egymáshoz viszonyított helyzete utalhat a hasadékok szigmoidális alakját kialakító mechanizmus típusára. A vizsgált kőzet-hidak izogonjai konvergálnak, ezáltal megfeleltethetők RAMSAY (1967) osztályozása szerinti párhuzamos kategóriájú redőknek.



17. ábra. A BAF-2 fúrásból származó mintákon meghatározott közhid izogon vonalak. A - BAF-2_500, B - BAF-2_667, C - BAF-2_662

Figure 17. Bridge isogons in core samples from BAF-2 well. A - BAF-2_500, B - BAF-2_667, C - BAF-2_662

Disszkusszió

Munkánk során összegeztük a húzásos hasadékok kialakulásának lehetséges módjait, illetve két különböző képződési modellt felhasználva kísérletet tettünk — a hasadékrendszerek alapján — a nyírási zónában kialakult nyírás és térfogatváltozás becslésére.

A BAF-2 fúrásban vizsgált nyírási zónák kis, átlagosan $22^\circ \pm 7^\circ$ dőlésszögűek (HRABOVSKI et al. 2017). A hasadékok alakjából következtetni lehet a nyírás értelmére; a nyírási zóna falai a szigmoidális hasítékok hegyeinek irányával ellentétes irányú mozgásra utalnak (RAMSAY & HUBER 1987). Ennek értelmében megállapítható, hogy a vizsgált nyírási zónák menti elmozdulás (a képződés kibillenesének lehetőségét/mértékét figyelmen kívül hagyva) dominánsan rátolódásos jellegű. Mindazonáltal a térrövidülést előidéző feszültségmező főfeszültség-irányai a fúrómagminták irányítottágának hiányában nem definiálhatók.

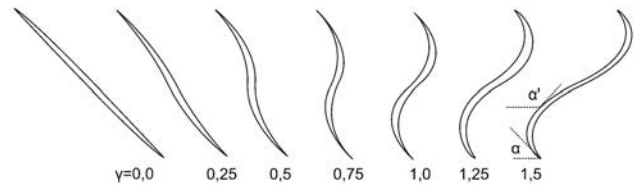
A képződés rétegződése — amelyet a redőződés jelentősen módosíthatott — nem követhető nyomon a fúrás teljes hosszában. A húzásos hasadékok jellemzően a fúrás azon szakaszaiban jelennek meg, amelyekben rétegzettség nem ismerhető fel, így a húzásos hasadéksorozatok és a rétegződés kapcsolata nem vizsgálható.

A BAF-2 fúrás BAF-2_662 és BAF-2_667 mintáiban található nyírási zónák húzásos hasadékaiból két — LISLE (2013) által bemutatott — modellt alapul véve határoztuk meg a nyírási zónák térfogatváltozását és nyírási alakváltozás mértékét.

A passzív forgási modell alapján számított nyírási alakváltozás a két vizsgált mintában $\gamma = 0,74$ (BAF-2_662) és $\gamma = 0,73$ (BAF-2_667), valamint a modell eredményei alapján a nyírási zónákban jelentős térfogatcsökkenés következett be (49% [BAF-2_662] és 57% [BAF-2_667].)

A „redőzött közhid” modell alapján számított nyírási alakváltozás mértéke ($\gamma = 0,71$ [BAF-2_662] és $\gamma = 0,63$ [BAF-2_667]), a passzív forgási modell alapján számított értékektől szignifikánsan nem tér el. A „redőzött közhid” modell alapján a nyírási zónákban a térfogatváltozás igen jelentős, ami 46% (BAF-2_662) és 41%-os (BAF-2_667) térfogatcsökkenésben nyilvánul meg.

A 18. ábra a nyírás mértékének és a húzásos hasadék alakjának kapcsolatát szemlélteti. Az általunk vizsgált hasadékok megegyeznek a fenti ábra $\gamma \approx 0,7$ nyírási alakváltozás hatására kialakult hasadék alakjával.



18. ábra. A húzásos hasadék alakjának fejlődése a növekvő nyírási alakváltozás függvényében

α = a hasadékok és a nyírási zóna határa által bezárt kezdeti szög, α' = a szigmoidális alakú hasadékok és a nyírási zóna határa által bezárt szög, γ = nyírási alakváltozás (LISLE 2013, módosítva)

Figure 18. Progressive evolution of gash shape with increase in the average shear strain across the shear zone

α = initial vein orientation, α' = deformed vein orientation, γ = shear strain (modified after LISLE 2013)

RAMSAY (1980) feltételezése szerint amennyiben a nyírási zónában térfogatcsökkenés megy végbe a húzásos hasadékok hegyei és a nyírási zóna határa által bezárt kezdeti szög (45°) növekedni fog. A BAF-2_662 mintában a húzásos hasadékok a nyírási zónával 47° -ot, míg a BAF-2_667 mintában 46° -ot zárnak be. Ez a kismértékű eltérés nem tekinthető szignifikánsnak, így nem igazolja egyértelműen a nyírási zónákban bekövetkezett térfogatcsökkenést.

Az általunk vizsgált nyírási zónákban — feltételezésünk szerint — a húzásos hasadékrendszerek fejlődése jelentős mértékű térfogatcsökkenéssel járt. Ilyen mértékű térfogatvesztés más típusú képződésben (karbonátos kőzetek, homokkővek) sztilolitképződéssel jár (THIELE et al. 2015, SEYUM & POLLARD 2016). A húzásos hasadékrendszerekben megjelenő sztilolitok jelentőségét THIELE et al. (2015) tárgyalták. Megfigyeléseik alapján a hasadékok között megjelenő sztilolitok mentén a nyírás hatására kialakulhat elmozdulás, amellyel a fent említett modellek nem számolnak. A szigmoidális hasadékokon alapuló térfogatváltozás és nyírás becslési módszerek a valódi deformáció mértékét ilyen esetekben felülbecsülik, mivel a nyomásoldódási felületeken végbemenő nyírás hatására a húzásos hasadékok szigmoidális alakja számottevő forgás vagy elhajlás nélkül is kialakulhat (THIELE et al. 2015). Ebből adódóan a nyírás mértékének becslése során fontos a sztilolitok azonosítása, hatásuk figyelembevétele. A BAF-2 fúrás mintáiban és a nyírási zónák környékén nem találtunk nyomásoldódásra utaló jeleket (pl. sztilolit, nyomásoldódási felület). A sztilolitok hiánya a BAF kőzetei esetében nem cáfolja minden kétséget kizáróan a nagymértékű térfogatcsökkenést, mivel az agyagkő oldhatósága rendkívül alacsony, ezért a nyomási oldódás (így a sztilolitképződés) erősen korlátozott (BAUD et al. 2016).

Az eltérő modellek alapján vizsgált két nyírási zóna (BAF-2_662 és BAF-2_667) közötti vertikális távolság csupán 5,5 m, amely a képződés feltárt közel 1 km-es vastagságához viszonyítva elenyésző. A nyírási zónák dőlésszöge, valamint alakváltozásuk mértéke ($\gamma \approx 0,7$) közel megegyező mindkét modell szerint. Ezek alapján feltételezhető, hogy a két nyírási zóna azonos (vagy egyenértékű alakváltozást eredményező) deformációs esemény során keletkezett. A szigmoidális alakot kialakító mechanizmus kiválasztásához a nyírási zóna további tulajdonságainak

vizsgálata szükséges. A következő tulajdonságok az egyes modellek meghatározó bélyegei lehetnek (LISLE 2013):

— A húzásos hasadékok közötti kőzethidak alakja RAMSAY (1967) osztályozása szerinti párhuzamos típusú redő a „redőzött kőzethíd” modellre utal, míg a hasonló típusú redő a passzív forgási modell jellemzője.

— A hasadékok alakja, mérete és a kőzethidak vastagsága közötti kapcsolat igazolhatja a „redőzött kőzethíd” modellt (8. ábra in LISLE 2013).

— A kőzetben megjelenő sztilolitik cáfolják azt a feltételezést, hogy a kőzethidak állandó térfogaton deformálódtak.

A vizsgált húzásos hasadékok azonos dőlésszögű pontjait összekötő izogon vonalak a kőzethidak alkotta redők magja felé konvergálnak (17. ábra). Ez alapján a kőzethidak alakja RAMSAY (1967) párhuzamos típusú redőosztályába tartozik. Mivel a „redőzött kőzethíd” modell révén kialakult hasadérendszer konvergáló izogon vonalakkal rendelkező — párhuzamos redőtípus (RAMSAY 1967) — redőt alakít ki, ezért a vizsgált hasadékok szigmoidális alakja feltételezhetőleg a „redőzött kőzethíd” modell által leírt mechanizmus szerint jött létre.

A hasadékok alakja és a kőzethíd vastagsága közötti kapcsolat alapján a vizsgált mintákban megjelenő húzásos hasadékok a LISLE (2013) 8. ábrán bemutatott A és B típusnak felelnek meg (15. és 16. ábra). Ezek alapján a tanulmányozott hasadékrendszerek a „redőzött kőzethíd” modell szerinti képződést igazolják.

A passzív forgási modell szerinti képződés során a hasadékok görbültségüket egy kezdetben egyenes ér, nyírás alakváltozás által előidézett passzív rotációjával érik el. Ezáltal a hasadékok a nyírás zónában kialakuló heterogén alakváltozás hatására jönnek létre, amely során a húzásos hasadék eltérő pontjai különböző mértékű rotációt végeznek. Tehát a kezdetben egyenes erek kialakulása a szigmoidális alakot létrehozó nyíráshoz viszonyítva *prekinematikusnak* tekinthető.

Ezzel ellentétben a „redőzött kőzethíd” modell esetében a szigmoidális alak a fejlődés korai szakaszában egyenes ér folyamatos rotációjával, a hasadék tágulása során alakul ki. A szigmoidális alak a hasadékok felnyílásával egyidejűleg, azaz *szinkinematikusan* megy végbe. Így a tágulással lépést tartó, újonnan kiváló ásványok az anti-taxiális érfejlődésnek megfelelően, a hasadékok peremén, a kezdetben egyenes ér kristályainak epitaxiális továbbnövekedéseként jelennek meg (BONS et al 2012). A meggyező kristálytani orientációval rendelkező szemcsék növekedése követi az érfalak távolodásának irányát, ezáltal rostos morfológiájú kitöltést hozva létre. Mindezek értelmében a hasadékok utólagosan deformált kitöltése a passzív forgási modellt, míg a deformálatlan mikroszövet a „redőzött kőzethíd” modellt igazolja. Az általunk vizsgált húzásos hasadékok kitöltésének rostos morfológiájú, utólagos deformációt nem szenvedett mikroszövege (10. ábra C in HRABOVSKÍ et al. 2017) a redőzött kőzethidak képlékeny stílusú deformációját támasztja alá.

Összefoglaló következtetések, a további kutatás lehetséges irányai

Tanulmányunkban áttekintettük a szigmoidális húzásos hasadékok képződési modelljeit és összehasonlítottuk az ezen modelleken alapuló, a hasadékokat kialakító nyírás intenzitásának, illetve a nyírás zóna mentén bekövetkezett térfogatváltozás becslésére alkalmas számítási módszereket. Az alkalmazni kívánt számítási eljárás kiválasztása elengedhetlenné teszi a hasadékrendszert kialakító mechanizmus/modell előzetes azonosítását. Ennek érdekében egyrészt az irodalmi munkák alapján, másrészt saját megfigyeléseinket felhasználva összefoglaltuk azon szempontokat, amelyek támpontot nyújthatnak a későbbi felhasználóknak a megfelelő képződési modell kiválasztásában. A modell azonosításának egyik eszköze a húzásos hasadékok közötti kőzethidak, mint redőződött kőzetdomének izogon vonalainak vizsgálata. Az erre a célra kifejlesztett PLINES szoftver a Földtani Közöny honlapjáról mindenki számára elérhető (lásd elektronikus mellékletek).

A megfelelő modell kiválasztását és a bemutatott számítási eljárások menetét a BAF-2 fúrás kiválasztott mintáin mutattuk be. A vizsgált két nyírás zóna hasadékainak szigmoidális alakja feltételezhetően a „redőzött kőzethíd” modell alapján alakult ki. E képződési modell működését támasztják alá a hasadékok között található, RAMSAY (1967) alapján párhuzamos típusú kőzethídredők, a sztilolitik hiánya, illetve a kitöltések utólagos deformációt nem mutató mikroszövege is. A vizsgált két húzásos hasadékrendszer mind a nyírás mértéke, mind a térfogatváltozás (térfogatcsökkenés) tekintetében igen hasonló értékeket mutat.

Annak ismeretében, hogy a) a húzásos hasadékrendszerek dőlésszögei közel azonosak, b) a két hasadékrendszer csupán 5,5 m távolságra helyezkedik el egymástól, valamint c) mindkét nyírás zóna azonos kőzettípusban alakult ki, a két zónára kapott azonos nyírás alakváltozás és térfogatváltozás alapján feltételezhető, hogy azonos vagy egyenértékű alakváltozást eredményező deformációs esemény során alakultak ki.

Több morfológiai és szöveti bizonyíték is alátámasztja, hogy a vizsgált két hasadékrendszer a „redőzött kőzethíd” modellnek megfelelően alakult ki. Ebben az esetben a nyírás- és térfogatváltozás mértékének meghatározásához nem szükséges két eltérő korú, egymást metsző szerkezeti elem megléte, amely feltétel a számítható felhasználatos hasadékrendszerek számát rendkívüli mértékben leszűkítette. A fenti modell szerinti hasadékképződést feltételezve, gyakorlatilag minden húzásos hasadékrendszer, amely szigmoidális morfológiát mutat, felhasználatos a nyírás- és térfogatváltozás mértékének becsléséhez. Így a BAF-2 fúrásban megjelenő valamennyi (214 db) húzásos hasadékrendszer vizsgálható lesz a jövőben, ezáltal információt nyerhetünk a fúrás teljes terjedelmében a nyírásos deformáció intenzitásáról és annak mélység szerinti különbözőségeiről. Ezen információk révén lehetővé válna a BAF jelenlegi szerkezetfejlődési modelljének pontosítása.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Dr. MÁTHÉ Zoltánnak, HÁMOS Gábornak, a Mecsekérc Zrt-nek és a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft-nek, amiért lehetővé tették a kutatás kivitelezését. Köszönet illeti a szegedi Szent-Györgyi Albert Klinikai Központ Diagnostics központ

munkatársait a komputertomográfiai felvételek elkészítéséért. Köszönjük Dr. TÓTH Sándornak a felmerülő részproblémák megoldása során nyújtott segítségét. A tanulmány az Emberi Erőforrások Minisztériuma UNKP-17-3 (HE) kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

Irodalom — References

- ÁRKAI, P., DEMÉNY, A., FÓRIZS, I. & MÁTHÉ, Z. 2000: Composition, diagenetic and post-diagenetic alterations of a possible radioactive waste repository site: The Boda Albitic claystone formation, southern Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **43/4**, 351–378.
- BARABÁS A. & BARABÁSNE STUHL Á. 1998: A Mecsek környéke perm képződményeinek rétegtana. — In: BÉRCZI I. & JÁMBOR Á. (szerk.): *Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana*. MOL Rt. – MÁFI kiadvány, Budapest, 187–215.
- BAUD, P., ROLLAND, A., HEAP, M., XU, T., NICOLE, M., FERRAND, T., REUSCHLE, T., TOUSSAINT, R. & CONIL, N. 2016: Impact of stylolites on the mechanical strength of limestone. — *Tectonophysics* **690**, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.004>
- BEACH, A. 1975: The geometry of en-echelon vein arrays. — *Tectonophysics* **28/4**, 245–263. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90040-2)
- BEACH, A. 1977: Vein arrays, hydraulic fractures and pressure-solution structures in a deformed flysch sequence, S.W. England. — *Tectonophysics* **40**, 201–225. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90066-x](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90066-x)
- BELAYNEH, M. & COSGROVE, J. W. 2010: Hybrid veins from the southern margin of the Bristol Channel Basin, UK. — *Journal of Structural Geology* **32**, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.11.010>
- BENKOVICS, L., MANSY, J.-L., CSONTOS, L. & BERGERAT, F. 1997: Folding in the Abaliget road cut (Mecsek Mountains). — *Acta Geologica Hungarica* **40/4**, 425–440.
- BONS, P. D., MONTENARI, M., BAKKER, R. J. & ELBURG, M. A. 2009: Potential evidence of fossilised Neoproterozoic deep life: SEM observations on calcite veins from Oppaminda Creek, Arkaroola, South Australia. — *International Journal of Earth Sciences* **98**, 327–343. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0245-4>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.005>
- CSONTOS, L., BENKOVICS, L., BERGERAT, F., MANSY, J.-L. & WÓRUM, G. 2002: Tertiary deformation history from seismic section study and fault analysis in a former European Tethyan margin (the Mecsek–Villány area, SW Hungary). — *Tectonophysics* **357**, 81–102. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00363-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00363-3)
- FOSSEN, H. 2010: *Structural Geology*. — Cambridge University Press, New York, 463 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511777806>
- HAAS J. 1994: *Magyarország földtana. Mezozoikum*. — Egyetemi jegyzet. ELTE, TTK, 119 p.
- HALÁSZ A. 2011: *A Bodai Aleurolit Formáció ciklussztratiográfiai vizsgálata*. — PhD értekezés, Pécsi Tudományegyetem, 129 p.
- HÁMOS G. 1997: Földtani és bányászati kutatás a Nyugat-Mecseki antiklinális területén, a Bodai Formációnak, mint radioaktív hulladékbefogadó kőzetösszetételnek az alkalmassága vizsgálatára. — *Földtani Kutatás* **34/3**, 46–52.
- HANCOCK, P. L. 1972: The analysis of en-echelon veins. — *Geological Magazine* **109**, 1591–1599. <https://doi.org/10.1017/s0016756800039315>
- HANCOCK, P. L. 1985: Brittle microtectonics: principles and practice. — *Journal of Structural Geology* **7**, 437–457. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3)
- HRABOVSKI 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 Közlemények* **147/3**, 245–264. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2017.147.3.245>
- 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.
- KONRÁD GY. & SEBE K. 2010: Földtani jelenségek új észlelései a Nyugati-Mecsekben és környezetében. — *Földtani Közlemények* **140/2**, 135–162.
- KONRÁD GY., SEBE K. & HALÁSZ A. 2015: Földtani-tektonikai értékelés. — In: SÁMSON M. (szerk.): *BAF–2 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése*. — Kutatási jelentés, Mecsekérc Zrt. Adattára, Pécs, 119–163.
- KONRÁD, GY., SEBE, K., HALÁSZ, A. & BABINSZKI, E. 2010: Sedimentology of a Permian playa lake: the Boda Claystone Formation, Hungary. — *Geologos* **16/1**, 27–41. <https://doi.org/10.2478/v10118-010-0002-1>
- KOVÁCS L. (szerk.) 1999: A Bodai Aleurolit Formáció minősítésének rövidtávú programja. Kutatási zárójelentés. Összefoglaló kötet. — *Kutatási jelentés*, Mecsekérc Zrt. Adattára, Pécs, 68 p.
- LISLE, R. J. 2013: Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. — *Journal of Structural Geology* **13**, 595–608. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.08.002>
- MAROS GY., KOROKNAI B., PALOTÁS K., FODOR L., DUDKO A., FORIÁN-SZABÓ M., ZILAHÍ-SEBESS L. & BÁNNÉ GYÓRI E. 2004: A Mórággyi-rög ÉK-i részének tektonikája és szerkezetalakulása. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi jelentése* **2003**-ról, 371–394.
- MAROS GY., PALOTÁS K., FODOR L., SALLAY E., RÁLISCHNÉ FELGENHAUER E., KOROKNAI B. & MATYIKÓ M. 2000: A Bodai Aleurolit Formációban mélyült D–5 és D–6 fúrások ImaGeo magszkennelrel történt értékelésének eredményei. — *Kézirat*, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

- MÁTHÉ Z. 2015: A Bodai Agyagkő Formáció ásvány-kőzettani és geokémiai vizsgálata. — *PhD értekezés*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 130 p.
- MÁTHÉ Z. & VARGA A. 2012: „Ízesítő” a permi Bodai Agyagkő Formáció őskörnyezeti rekonstrukciójához: kősó utáni pszeudomorfozák a BAT-4 fúrás agyagkőmintáiban. — *Földtani Közlöny* **142/2**, 201–204
- NÉMEDI-VARGA Z. 1983: A Mecsek hegység szerkezetalakulása az alpi hegységképződési ciklusban. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi jelentése* **1981**-ről, 467–484.
- NICHOLSON, R. 2000: Inter-array and intra-array kinematics of en echelon sigmoidal veins in cross-bedded sandstone, Merimbula, southeastern Australia: discussion. — *Journal of Structural Geology* **22**, 145 p. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00134-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00134-0)
- NICHOLSON, R. & EJOFOR, I. B. 1987: The three-dimensional morphology of arrays of echelon and sigmoidal, mineral-filled fractures: data from north Cornwall. — *Journal of the Geological Society* **144**, 79–83. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.1.0079>
- NICHOLSON, R. & POLLARD, D. 1985: Dilation and linkage of echelon cracks. — *Journal of Structural Geology* **7**, 583–590. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90030-6)
- NICHOLSON, R. 1991: Vein morphology, host rock deformation and the origin of fabrics of echelon mineral veins. — *Journal of Structural Geology* **13**, 635–641. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90026-f](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90026-f)
- OLSON, J. E. & POLLARD, D. D. 1991: The initiation and growth of en échelon veins. — *Journal of Structural Geology* **13**, 595–608. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90046-1)
- POLLARD, D. D., SEGALL, P. & DELANEY, P. T. 1982: Formation and interpretation of dilatant echelon cracks. — *Geological Society of America Bulletin* **93**, 1291–1303. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)92078-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)92078-9)
- RAMSAY, J. G. 1980: Shear zone geometry: A review. — *Journal of Structural Geology* **2**, 83–99. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(80\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(80)90038-3)
- RAMSAY, J. G. & GRAHAM, R. H. 1970: Strain variation in shear belts. — *Canadian Journal of Earth Science* **7**, 786–813. <https://doi.org/10.1139/e70-078>
- RAMSAY, J. G. & HUBER, M. I. 1983: *The Techniques of Modern Structural Geology, 1: Strain Analysis*. — Academic Press, London.
- RAMSAY, J. G. & HUBER, M. I. 1987: *The Techniques of Modern Structural Geology, 2: Folds and Fractures*. — Academic Press, London.
- RAMSAY, J. G. 1967: *Folding and Fracturing of Rocks*. — McGraw-Hill, New York.
- ROERING, C. 1968: The geometrical significance of natural en-echelon crack-arrays. — *Tectonophysics* **5**, 107–123. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(68\)90084-x](https://doi.org/10.1016/0040-1951(68)90084-x)
- SEYUM, S. & POLLARD, D. D. 2016: The mechanics of intersecting echelon veins and pressure solution seams in limestone. — *Journal of Structural Geology* **89**, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.06.009>
- SMITH, J. V. 1995: True and apparent geometric variability of en-échelon vein arrays. — *Journal of Structural Geology* **17**, 1621–1626. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(95\)00058-L](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00058-L)
- SMITH, J. V. 1996: Geometry and kinematics of convergent conjugate vein array systems. — *Journal of Structural Geology* **18**, 1291–1300. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(96\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)00053-3)
- THIELE, S. T., MICKLETHWAITE, S., BOURKE, P., VERRALL, M. & KOVESI, P. 2015: Insights into the mechanics of en-échelon sigmoidal vein formation using ultra-high resolution photogrammetry and computed tomography. — *Journal of Structural Geology* **77**, 27–44. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.05.006>
- TARI, G. 1993: Late Neogene transpression in the Northern Imbricates Zone, Mecsek Mountains, Hungary. — *Annales Universitatis Scientiarum Budapestiensis Rolando Eötvös Nominatae, Sectio Geologica* **29**, pp. 165–187
- TÓTH E. 2016: Szigmoidális húzási hasítékok képződési mechanizmusai és azok alkalmazási lehetőségei a nyírás mértékének becslésére a BAF-2 fúrás mintáinak példáján. — *BSc szakdolgozat*, Szegedi Tudományegyetem, 61 p.
- TWISS, R. J. & MOORES, E. M. 1992: *Structural Geology*. — W. H. Freeman, New York, 532 p.
- VARGA A., RAUCSIK B., SZAKMÁNY GY. & MÁTHÉ Z. 2006: A Bodai Aleurolit Formáció törmelékeny kőzettípusainak ásványtani, kőzettani és geokémiai jellemzői. — *Földtani Közlöny* **136/2**, 201–232.
- WÉBER B. 1977: Nagyszerkezeti szelvényvázlat a Ny-Mecsekből. — *Földtani Közlöny* **107/1**, 27–37.
- WEIN Gy. 1967: Délkelet-Dunántúl hegység szerkezeti egységeinek összefüggései az óalpi ciklusban. — *Földtani Közlöny* **97/3**, 286–293.

Kézirat beérkezett: 2018. 05. 31.