A rendezvény támogatói:

MECSEKÉRC ZRT.

Geo-Log

GEOMEGA

KŐMÉRŐ

ROTAQUA

WSP GOLDER

AGILA Renewable Energy Services Kft.

Szervezők:

Magyarhoni Földtani Társulat
Hungarian Geological Society

RHK
RADIOAKTÍV HULLADÉKOKAT KEZELŐ KFT.

„A BODAI AGYAGKŐ FORMÁCIÓ KUTATÁSÁNAK LEGÚJABB EREDMÉNYEI" SZAKMAI ELŐADÓI NAP 2022.

„A BODAI AGYAGKŐ FORMÁCIÓ (BAF) KUTATÁSÁNAK LEGÚJABB EREDMÉNYEI" SZAKMAI ELŐADÓI NAP

Pécs, 2022. december 08.

A Bodai Agyagkő Formáció (BAF) kutatásának legújabb eredményei

szakmai előadói nap

kiadványa

2022. december 8.

Kiadja a Magyarhoni Földtani Társulat

Szervezők:

Magyarhoni Földtani Társulat Dél-Dunántúli Területi Szervezete

MTA Pécsi Akadémiai Bizottság X. sz. Föld- és Környezettudományok Szakbizottság
Földtani és Bányászati Munkabizottsága

Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft.

Helyszín:

Laterum Hotel
(Pécs, Hajnóczy u. 37-39. I. emeleti konferenciaterem)

A rendezvény támogatói:

AGILA Renewable Energy Services Kft.

Geo-Log Környezetvédelmi és Geofizikai Kft.

GEOMEGA Földtani és Környezetvédelmi Kutató-Szolgáltató Kft.

Golder Associates (Magyarország) Zrt.

Kőmérő Műszaki, Tudományos, Kutató-Fejlesztő és Szolgáltató Kft.

MECSEKÉRC Környezetvédelmi Zrt.

ROTAQUA Geológiai-, Bányászati kutató Mélyfúró Kft.

ISBN 978-963-8221-90-2

Szerkesztette:

Hámos Gábor, Sámson Margit

Borítóterv:

Sámson Margit

Címlapfotó:

Horváth Károly Roland: Drónfelvétel a BAF-3 fúrás helyszínéről

Nyomda:

Molnár Nyomda és Kiadó Kft.
(7622 Pécs, Légszeszgyár u. 28.)

A kötetben közölt cikkekért a szerzők vállalják a szakmai felelősséget.

„A Bodai Agyagkő Formáció (BAF) kutatásának legújabb eredményei” szakmai előadói nap

2022. december 08. (csütörtök)
Helyszín: Pécs, Laterum Hotel első emeleti előadó (Pécs, Hajnóczy u. 37-39.)

P R O G R A M		
08.20-9.20	**Regisztráció**	
9.15-9.20	**Köszöntő** Köszöntőt mond: Hámos Gábor Magyarhoni Földtani Társulat Dél-Dunántúli Területi Szervezet, Elnök MTA PAB X. sz. Föld- és Környezettudományok Szakbizottság Földtani és Bányászati Munkabizottsága, Elnök	
I.: A Bodai Agyagkő Formáció kutatásának helyzete, szakterületi vizsgálatai, értékelései, új BAF kutatófúrások kivitelezése Levezető elnök: Hámos Gábor		
9.20–9.40	Kereki F., Nős B. (RHK Kft.)	A magyarországi radioaktívhulladék-elhelyezés helyzete
9.40–9.55	Kuncz M., Ács P., Fedor F. (Geochem Kft.)	A 8. Nemzetközi Agyag Konferencia (Nancy) tapasztalatai, a kutatások fókusza
9.55–10.10	Tóth T., Kádi Z., Wórum G., Koroknai B. (Geomega Kft.)	S-hullám szeizmikus mérések alkalmazási lehetőségei a felszínközeli képződmények rétegtani és tektonikai vizsgálatában
10.10–10.30	Keresztény B., Albrecht R., Hámos G., Hochrein B., Kocsis G., Tátrai R. (MECSEKÉRC Zrt.)	A BAF-3, -3A, -4 kutatófúrások műszaki kivitelezésének összefoglalója és a jellemző fúrómagtörési jelenségek értelmezése
10.30–10.55	Bernáth Gy., Kovács A. Cs., Szongoth G. (Geo-Log Kft.)	Mélyfúrásgeofizikai és VSP mérések eredményei a BAF-3, -3A és BAF-4 fúrásokban
10.55–11.10	**Kávészünet**	
II.: A Kővágószőlősi antiklinális északi szerkezeti blokkjában mélyült BAF kutatófúrások helyszíni és labor mérései, eredményei Levezető elnök: Földing Gábor		
11.10–11.25	Mező Gy., Földvári K. (Golder Zrt.), Korpai F. (AGILA RES Kft.)	A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrások pakkeres hidraulikai és hidrorepesztés vizsgálatai
11.25-11.35	Korpai F., Csicsák P. (AGILA RES Kft.)	A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrások többpakkeres rendszereinek telepítése és előzetes eredményei
11.35–11.50	Keresztény B., Albrecht R. (MECSEKÉRC Zrt.)	A BAF-3 és BAF-4 fúrások in-situ feszültségmérései overcoring módszerrel
11.50–12.10	Máthé Z., Mucsi P. (MECSEKÉRC Zrt.)	A BAF-3, -3A és BAF-4 mélyfúrások kőzetanyagának laboratóriumi vizsgálati eredményei, ásvány-kőzettan, geokémia
12.10–12.20	Csurgó G., Földing G. (MECSEKÉRC Zrt.) Palcsu L.	A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrásokból származó vízminták laborvizsgálati eredményei
12.20-12.40	Gál V., Gelencsér K., Zipfné Mázik K., Kovács L. (Kőmérő Kft.)	Hagyományos és újszerű kőzetmechanikai laboratóriumi mérések a BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrások maganyagából
12.40–13.40	**Ebédszünet**	

III.: A Kővágószőlősi antiklinális északi szerkezeti blokkjában mélyült új BAF kutatófúrások földtani, geotechnikai, kőzetfizikai eredményei Levezető elnök: Molnár Péter		
13.40–13.55	Vizhányó Zs., Ács P., Fedor F. (Geochem Kft.)	A BAF kutatás 3. fázisának kőzetfizikai eredményei
13.55-14.20	Hámos G., Benő D., Szabó R., Sámson M. (MECSEKÉRC Zrt.)	A BAF-3,-3A és BAF-4 fúrási szelvények rétegtani, tektonikai jellemzői
14.20–14.35	Gelencsér K., Gál V., Zipfné Mázik K. (Kőmérő Kft.), Rátkai O. (MECSEKÉRC Zrt./Kőmérő Kft.)	A BAF-3, -3A és BAF-4 kutatófúrások geotechnikai képe
14.35–14.50	Maros Gy., Héja G., Lantos Z., Markos G., Palotai M., Kovács J., Hatvani I., Benkó Zs. (SZTFH)	Bodai agyagkövet harántolt fúrások magszkennelési eredményei – Új adatok a Mecsek-hegység szerkezetfejlődésének megértéséhez
14.50–15.00	Dr. Baracza M. K., Dr. Szilágyiné Dr. Sebők Sz., Horváth G., Dócs R. (ME)	A Bodai Agyagkő Formáció kőzetmintáin végzett nanopermeabilitás mérések eredményei
15.00–15.15	Konrád Gy. (Mérce Bt.), Halász A. (RHK Kft.), Hámos G. (MECSEKÉRC Zrt.), Sebe K. (PTE), Molnár P. (RHK Kft.)	A középső-perm Bodai Agyagkő (Ny-Mecsek) kutatásának rétegtani eredményei
15.15-15.40	Molnár Péter (RHK Kft.)	Zárszó/Jövőkép

Poszterek:

Hrabovszki Ervin, Tóth Emese, M. Tóth Tivadar, Schubert Félix: A Bodai Agyagkő Formáció ásványos ereinek petrográfiai jellemzői;

Hrabovszki Ervin, Tóth Emese, M. Tóth Tivadar, Schubert Félix: A Bodai Agyagkő Formáció ásványos ereinek geokémiai jellemzői

Tóth E., Hrabovszki E., Schubert F., M. Tóth T.: A Bodai Agyagkő Formáció töréshálózatának geometriai és hidrogeológiai tulajdonságai a BAF–2, BAF–3, BAF–3A és BAF–4 fúrások alapján

Tóth E., Hrabovszki E., Schubert F., M. Tóth T.: A Bodai Agyagkő Formáció töréssűrűségének becslése lyukgeofizikai adatok alapján

A 8. Nemzetközi Agyag Konferencia (Nancy) tapasztalatai, a kutatások fókusza

8th International Conference on Clays (Nancy) – experiences & topics of research

KUNCZ MÁTÉ[1], ÁCS PÉTER[2], FEDOR FERENC[3]

[1]GEOCHEM Kft. (kuncz.mate@geochem-ltd.eu),
[2]GEOCHEM Kft. (acs.peter@geochem-ltd.eu),
[3]GEOCHEM Kft. (fedor.ferenc@geochem-ltd.eu)

Abstract

The "8th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement" was held in Nancy, France, from 13-16 June 2022, after several postponements. Nearly 400 papers on 12 topics were presented in 3 plenary sessions and 22 blocks, as well as posters. A special focus was on the behaviour of bentonites, a key issue in the construction of non-clay reservoirs (e.g. Finland), and on the study of hydro-mechanical and gas transport processes, but all the topics studied so far were covered.

Összefoglaló

A „8th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement" többszöri halasztás után 2022. 06. 13-16 között került megrendezésre Nancyban, Franciaországban. A közel 400 előadás 12 témakörben, 3 plenáris ülésen és 22 blokkban, valamint poszterként volt prezentálva. Kiemelt téma volt a bentonitok viselkedése, mely a nem agyagos tárolók építése során is kulcskérdés (ld. Finnország), valamint a hidro-mechanikai és gáztranszport folyamatok vizsgálata, de gyakorlatilag az összes eddig vizsgált témakör érintve volt.

Kulcsszavak: geológiai tároló, műszaki gát, bentonit, NMR, tomográfia

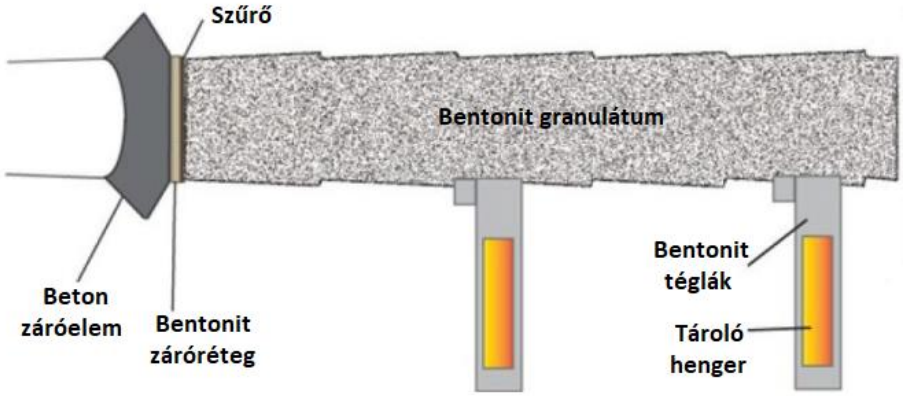
Bevezető

A felszín alatti elhelyezést tervező és már folyamatban lévő projektekkel rendelkező országok száma egyre bővül. Példaként említhető Finnország, ahol a mélységi geológiai tároló kialakítás alatt, Svédország és Franciaország, ahol a kialakítás már előrehaladott állapotban van, Kína, ahol felszín alatti kutatólaboratórium létesült, valamint Japán, az Egyesült Királyság és Németország mind szervezett kijelölési stratégiával rendelkeznek. Földtani gát funkciójuk mellett az agyagtartalmú képződmények műszaki gátként is alkalmazhatóak tömítő, tömedékelő anyag formájában. Ezek a bentonit bázisú anyagok használhatóak akár más típusú befogadó kőzettestek esetén is (ld. Finnország). A földtani és műszaki gátak viselkedésének hosszú távú vizsgálata mind az üzemelés, mind a lezárást követően elengedhetetlen.

Az idén 8. alkalommal megrendezett, a COVID helyzet miatt többször elhalasztott „International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement" konferencia széleskörű fórumot biztosított a tárolók tervezésével, építésével kapcsolatos fejlemények bemutatására, valamint a hosszú távú biztonság kérdéseinek megvitatására. A konferencián 12 témakörben szerveztek előadásokat, három plenáris ülésen 13 előadás, valamint 22 blokkban 97 előadás hangzott el. Emellett közel 280 poszter került kihelyezésre. Az alábbiakban csak néhány, részletesebben érintett témakör kerül bemutatásra.

1. Nemzetközi esettanulmány – Finnország

Sok ország most kezdi a radioaktív hulladékelhelyezés kérdésének vizsgálatát (pl. Dánia, Hollandia), más országok már előrehaladott állapotú kutatásokról tudnak beszámolni (pl. Cigeo projekt – Franciaország) és néhány ország gyakorlatilag most először engedett mélyebb betekintést radioaktív hulladékelhelyezés projektjébe (pl. Kína, Dél-Korea). Új eszközök, kísérletek, adatfeldolgozási, értelmezési, modellezési technológiák jelentek meg. Kiemelt figyelmet érdemel azonban Finnország, mivel jelenleg itt a legelőrehaladottabb a mélységi geológiai tároló készültségi állapota, mely Olkiluotoban, 400-450 m-es mélységben található egy 1,8-1,9 milliárd éves migmatitos gneisz komplexumban. Vízszintes alagutakkal összekötött 6-8 m mély aknákban függőlegesen helyezik egymásra a hengeres réz tárolóedényeket, melyeket 25-32 cm vastagságú bentonit téglák vesznek körül (*1. ábra*). A tárolóedény, a befogadó kőzet és a bentonit téglák közti hézagokat kb. 1x1x1 cm-es párna formájú bentonit pelletekkel töltik ki. Az aknák feletti vízszintes alagutakat bentonit granulátummal töltik fel, majd egy homogén bentonit réteggel, egy esetleges szűrőréteggel és egy beton elemmel zárják. A homogén záró bentonit réteg 1 m vastagságú és előnedvesített állapotban kerül a helyére. Amennyiben a nedvesítés nem megoldható, az később valósul meg a beton elemen keresztül, mely esetben a szűrőréteg biztosítja a beáramló víz egyenletes eloszlását az alagút teljes keresztmetszetén. Az in-situ rendszer-teszt 2019-ben indult, mely során hulladék nélkül, fűtőelemekkel szimulálják a radioaktív bomlás során keletkező hőt. Közel 500 szenzorral monitorozzák a hőmérséklet és nyomásváltozásokat a tárolóedényekben, a tömedékelt aknákban és alagutakban [1].



1. ábra: Az Olkiluotoi geológiai tároló alagút és aknarendszerének sematikus ábrája

2. Bentonit vizsgálata

2.1. Duzzadóképesség és permeabilitás vizsgálat

A bentonit lelőhelyek szűkössége miatt előfordul, hogy adott elhelyezési projekthez több forrásból szükséges az anyagot beszerezni. A vizsgálatok során meghatározták 6, Japán eltérő területeiről származó bentonit-minta száraz-sűrűségét (ρ_m), kationcsere kapacitását (CEC) és a cserélhető Na-ionok arányát (Na/CEC). A duzzadási nyomás és permeabilitás mérésekor ioncserélt víz besajtolása történt fix vertikális nyomás és térfogat mellett, valamint a duzzadási deformációt is vizsgálták. Magasabb ρ_m értékekhez magasabb duzzadási nyomás tartozik. A Na/CEC arányt vizsgálva megállapítható, hogy a legmagasabb duzzadási nyomás 0,58-as Na/CEC értéknél, a legnagyobb mértékű duzzadási deformáció 0,84-as Na/CEC értéknél jelentkezett. Feltételezhetően a nagyobb mértékű deformációt a Na-montmorillonit ozmotikus duzzadása váltja ki, míg a duzzadási nyomást a kompakció mértéke befolyásolja nagyobb mértékben [2].

A bentonitok permeabilitása a ρ_m és Na/CEC arány segítségével közelíthető. Magasabb Na/CEC arányhoz alacsonyabb permeabilitás köthető, továbbá csökkenő ρ_m esetén a Na/CEC értéke még intenzívebben befolyásolja a permeabilitást. Alacsony ρ_m esetén, ahol az ozmotikus duzzadás dominál, a permeabilitás becsülhető a ρ_m és Na/CEC értékekkel. Magasabb ρ_m esetén, ahol a kristályos duzzadás jellemző, a permeabilitás változás független a Na/CEC aránytól [2].

2.2. Duzzadás vizsgálata állandó térfogaton, numerikus és kísérleti módszerekkel

A duzzadási nyomás, mely a bentonit alapú mérnöki gátak telítése során jelentkezik, fontos paraméter a mélységi geológiai tárolók tervezésekor, biztonságuk elemzésekor. A bentonit duzzadási nyomásának elegendőnek kell lennie a megfelelő zárás kialakulásához, de nem haladhatja meg a befogadó kőzettest feszültségértékeit. A kísérlet során a bentonit mintát izosztatikusan tömörítik, hidratálják teljes telítettségig állandó térfogat mellett. A teljes telítés 14 hónapot vett igénybe. A telítés időtartama alatt folyamatosan regisztrálják a beáramlott folyadék mennyiségét, a tengelyirányú nyomást és a palást irányú nyomást 4 eltérő magasságban. A vízbesajtolás, telítés során gyűjtött adatok alapján a tengely és radiális irányú feszültségek változása nem egyenletes, az adatok anizotrópiát mutatnak, melyek a minta teljes telítése utáni egyensúlyi állapotában is fennállnak. A numerikus szimulációk alapján a bonyolult, nem egyenletes feszültség-felépülés a mintában kialakuló, mozgó hidratációs/duzzadási határfelületnek, valamint az irreverzibilis deformációs folyamatoknak köszönhető [3].

2.3. Bentonit homogenizáció mesterséges üregekben

A bentonit hidratációja nem egyenletes folyamat. A tömítőanyag kitölti a mérnöki gát esetleges üregeit, azonban ennek üteme több tényezőtől is függ: a radioaktív hulladék hőmérsékletétől, a pórusnyomástól, a rendelkezésre álló fluidum mennyiségétől és összetételétől. A nem egyenletes duzzadás állandóan fennálló heterogenitást eredményezhet, mely sűrűség, permeabilitás és duzzadási nyomás gradiensek kiépülésében nyilvánul meg. Ezek hosszútávú következményei még nem ismertek. A bizonytalanság csökkentése érdekében számos bentonit hidratációs kísérletet végeztek különböző hőmérsékleteken, eltérő sótartalmú oldatokkal. Különböző hosszúságú tömörített bentonit mintákat helyeztek állandó térfogatú, két véglapján bemeneti nyílással rendelkező edényekbe. Mindegyikben legalább 2 tengelyirányú és 3 sugárirányú feszültségérzékelő volt; néhány esetben a minta hossza mentén helyi pórusnyomást mértek. A kísérletek 90, 100 és 150 °C-on zajlottak, 4,5 MPa nyomáson, a duzzadás során folyamatos nyomásmérés mellett. Még 100 nap elteltével is a duzzadás jelentős térbeli szórása tapasztalható, a minta hossza mentén fennmaradó sűrűséggradiens miatt. Magasabb hőmérsékleten a minták nedvességtartalma, száraz sűrűsége alacsonyabb volt, magasabb sótartalmú oldat nagyobb sűrűséggradienst eredményez. Ahol a bentonitnak kevés helye volt a duzzadásra, ott a homogenizáció lényegesen tovább tartott [4].

2.4. A bentonit vizsgálata képalkotó módszerrel telítésnél és intenzív felfűtésnél

A nukleáris hulladék által generált hő miatt a tárolóedények környezetében a hőmérséklet jóval meghaladhatja a 100 °C-ot. A speciális kettős célú tárolóedények esetében ez az érték meghaladhatja a 300 °C-ot is. A magas hőmérséklet kedvezőtlenül befolyásolja a geológiai tároló élettartamát, megbízhatóságát. Ennek eredményeként a bentonit tömítőanyagok anyagi tulajdonságainak változása 100 °C felett a figyelem középpontjába került [5].

A laboratóriumi kísérletek során két speciális, röntgensugárzást átengedő fém nyomástartó edénybe elhelyezésre került MX-80 típusú bentonit, melynek palástja mentén homokréteg biztosítja a vízzel telítés útját, továbbá az egyik cella közepén egy fűtőszál az elérni kívánt hőmérsékletet (200 °C). Szintetikus sótartalmú oldatot injektáltak a cellákba. Képalkotó módszerekkel (CT és Elektromos Ellenállás Tomográfia) élőben, 3 dimenzióban ábrázolták a hidratációs, duzzadási és párolgási folyamatokat. A folyadékáram kémiai tulajdonságai folyamatos ellenőrzés alatt vannak, így könnyebben megérthetők a hidratáció, duzzadás és fűtés hatására meginduló geokémiai változások. Az előzetes eredmények alapján a besajtolási nyomás nagysága hatással van a nedvesítés mértékére, a nedvesítés hatására bekövetkező duzzadásra és a geokémiai viszonyokra. A képalkotó módszer eredményeinek validálásához szükség van a mintatartó megbontására és a minta roncsolásos vizsgálatára [5]. Megjegyzendő, hogy a GEOCHEM Kft. laboratóriumában már fejlesztés alatt van egy nagynyomású, maximum 150 °C-ig mérésre alkalmas speciális multifrekvenciás elektromos impedancia tomográf, mely a világ élvonalába tartozó méréseket tesz majd lehetővé e területen.

3. Pórusvíz tartalom, pórusszerkezet vizsgálata NMR módszerrel

Az alacsony mágneses térerősségen (<0,5T) végzett mágneses rezonancia (NMR) mérések különösen alkalmasak a víz mennyiségének és mobilitásának feltárására természetes agyagrendszerekben vagy más alacsony áteresztőképességű porózus közegekben. A NEA Clay Club által indított CLAYWAT projekt keretében 11 agyagban gazdag üledékes képződményen zajlottak NMR mérések. (Boom Clay, Yper Clay, Callovo-Oxfordian, Upper Toarcian, Opalinus Clay, Queenston Fm., Georgian Bay Fm., Blue Mountain Fm., Bodai Agyagkő, Wakkanai Fm. és Koetoi Fm. A minták e csoportján belül a keménység mértéke jelentősen változik, ami 0,02-0,6 közötti széles porozitási tartományt eredményez. A mintákat tartósított állapotban lehetett elemezni, megőrzött víztartalommal [6]. E méréssorozatban a GEOCHEM Kft. laboratóriuma is részt vett pórusszerkezet mérésekkel.

A víztartalom meghatározásához standard T2 relaxációs méréseket, a (relatív) vízmegkötő képességre következtető T1-T2 térképeket, egyes esetekben diffúziós koefficiensek meghatározásához deutérium diffúziós csere kísérleteket, valamint a nedves konzervált állapotban a pórusok méreteloszlásának meghatározásához krioporozimetriát végeztek. Példaként említve az Opalinus Clay esetében a pórusméretek 2 nm-től körülbelül 1 mikronig terjednek, és összehasonlíthatók más módszerekkel, például BET és H_2O-adszorpció vagy Hg-injektálás segítségével kapott pórusméret-eloszlásokkal. Az összes NMR-mérést koherensen értelmezik a CLAYWAT projekt keretében végzett egyéb mérésekből származó, a pórusszerkezetre vonatkozó ismeretek felhasználásával. Például a BET-felületeket a T2-eloszlás módusával összefüggőnek találták, és ez a kapcsolat az NMR relaxációs mérések alapelveinek figyelembevételével magyarázható [6].

4. Összefoglalás

Jelen összefoglaló és a részletesebben kifejtett kísérletek főként a BAF kutatás során felmerülő kérdésekre, a bentonitok viselkedésére és az NMR vizsgálatokra koncentrált. A BAF kutatás szempontjából akár a kőzethőmérséklet emelkedésre való érzékenységét, akár az öngyógyuló képességét vizsgáljuk, célszerű kiindulni a bemutatott kísérleti háttérből és ezen kísérletek tapasztalatait a jövőbeli kutatási tevékenység során figyelembe venni. Elkerülhetetlennek tűnik K+F feladatokkal is számolni a vizsgálatok során, mivel a bemutatott kísérletek majd mindegyike technológiai vagy módszertani fejlesztést igényelt.

Irodalom

[1] M. Niskanen, E. Muuri, R. Lamminmäki, S. Maanoja, V. Heino, A. Kontula, B. Pastina, J. Hansen, P. Koho, M. Palmu, T. Schatz, S. Kumpulainen, N. Marcos, A. Idiart, P. Wersin, P. Smith: Buffer, Backfill and Closure Evolution in KBS-3V spent nuclear fuel repository

[2] Y. Watanabe, S. Yokoyama, M. Shimbashi, Y. Yamamoto, T. Goto: Swelling characteristics and permeability of bentonites of various effective montmorillonite dry densities and exchangeable cation compositions

[3] A-C. Dieudonné, C. Gatabin, W. Dridi, J. Talandier, F. Collin, R. Charlier: An experimental and numerical study of bentonite swelling under constant-volume conditions

[4] K. Daniels, C. Graham, J. Harrington, A. Wiseall, P. Sellin: Bentonite homogenisation in engineered cavities

[5] Y. Wu, S. Borglin, C. Chou, C. Chang, L. Peruzzo, T. Kneafsey, J. Birkholzer, L. Zheng: THMC behaviors of bentonite clay under hydration and high temperature heating

[6] M. Fleury, M. Mazurek: 30th Clay Club – Pore water content, pore structure and water mobility in clays and shales using NMR methods

S-hullám szeizmikus mérések alkalmazási lehetőségei a felszínközeli képződmények rétegtani és tektonikai vizsgálatában

High-resolution S-wave Seismic Profiling for Tectonic and Stratigraphic Studies

TÓTH TAMÁS[1], KÁDI ZOLTÁN[2], WÓRUM GÉZA[3], KOROKNAI BALÁZS[4]

[1] *GEOMEGA Kft., info@geomega.hu,*
[2] *GEOMEGA Kft., kadizol@geomega.hu,*
[3] *GEOMEGA Kft., worg@geomega.hu,*
[4] *GEOMEGA Kft., koroknai@geomega.hu,*

Abstract

Modern S-wave vibroseis source combined with a newly developed LandStreamer sensor system and conventional 3C geophones offers unprecedented seismic images of shallow subsurface layers. The developed system can be used for high-resolution seismic imaging both in natural field conditions and in urban areas on paved ground. Recording geometry specifically designed for the target depth could result submeter resolution in the shallowest strata and several hundreds meter penetration.

Összefoglaló

Egy modern S-hullám vibroszeiz forrás, a hozzá kifejlesztett LandStreamer érzékelő rendszerrel és hagyományos 3C geofonokkal a felszínközeli rétegek korábban nem látott részletességű leképezését teszi lehetővé. A kifejlesztett mérési rendszer nagy előnye, hogy mind természetes környezetben, mind belterületen, burkolt felületen, lehetővé teszi szeizmikus szelvények mérését. A kutatási mélységhez és a felszínközeli geológiai szerkezethez tervezett méréssel a legfelső rétegekben 1 méteresnél jobb felbontás is elérhető, a maximális behatolás pedig kedvező rétegtani helyzetben akár több száz méteres is lehet.

Kulcsszavak: S-hullám szeizmika, vibroszeiz forrás, LandStreamer érzékelő, nagyfelbontású szeizmikus mérések

Bevezető

Szeizmikus mérések a felszín alatti rétegek leképezésének egyik leghatékonyabb geofizikai módszerét jelentik. A szénhidrogén kutatásban leggyakrabban alkalmazott P-hullám szeizmikus mérések a földtani kutatásban is sikeresen alkalmazhatók. Neotektonikai és felszínközeli rétegtani kutatásokban érdemi korlátot jelent a P-hullám szeizmikus mérések korlátozott felbontása, és a legfelső több 10 méter leképezésének hiánya. Mindkét problémára megoldást jelenthet az S-hullám szeizmikus mérések alkalmazása, mely jobb felbontással és praktikusan a felszíntől kezdődően képes leképezni a felszín alatti rétegeket. Jogosan merül fel a kérdés, hogy miért nem S-hullám szeizmikus méréseket végeznek rutinszerűen a P-hullám mérések helyett. Problémát a jelgerjesztés jelenti. P-, azaz nyomáshullámot sokkal egyszerűbb akár vibroszeiz, akár robbantásos forrással gerjeszteni, mint S-, azaz nyíróhullámot. Különösen igaz ez a nagy mélységek leképezését lehetővé tévő, nagy energiájú nyíróhullámok esetén. Méréseink során egy olyan speciális S-hullám vibroszeiz forrást alkalmazunk, ami mind földtani, mind mérnökgeofizikai vizsgálatok során optimális leképezést biztosít a nagy részletességű vizsgálatokhoz. A mérőrendszer észlelési oldalán az általunk kifejlesztett LandStreamer érzékelő és hagyományos „tüskés” geofonok szükség szerint kombinált alkalmazása biztosítja a hatékony mérések kivitelezését.

1. S-hullám vibroszeiz forrás

Az alkalmazott Lightning E-vibroszeiz forrás egy elektromos szeizmikus forrás, mely lineáris szinkron motorokkal kelt kontrollált rezgést az 1-1000 Hz frekvencia tartományban. A jelgerjesztési frekvencia tartományból a 8-400 Hz közötti tartomány maximális, 1700 N erővel áll rendelkezésre. A jelforrást eredetileg alagútfúró berendezésbe építve, a fúrópajzs előtti tartomány leképezésére fejlesztették ki (Bharadwaj, 2017), ebből készült egy mind P-, mind S-hullám gerjesztésére alkalmas vibroszeiz jelforrás (Noorlandt, 2015).

Az elektromos vibroszeiz forrás egy alaplapból (baseplate) és egy hozzá képest mozgatott ellensúlyból (reaction mass) áll. Az alaplap az egész vibroszeiz forrást befoglaló dobozzal egybeépítve képezi a földfelszínnel kapcsolatban lévő tömeget. Az ellensúlyt egy rugólapos mechanizmus tartja, vezérelt mozgatását lineáris elektromotorok végzik. A tartódoboz 90 fokos elforgatásával a vibroszeiz forrás P-, vagy S-hullám jelgerjesztésre is alkalmas, P-hullám esetén 1200 N, míg S-hullám esetén 1700 N maximális erővel. A forrás mozgatását és a leszorító erő biztosítását egy elektromos meghajtású quad és a ráépített emelő szerkezet biztosítja. A rendszer minden alkatrésze elektromos meghajtású, egy teljes töltéssel több, mint egy nap folyamatos munkavégzésre alkalmas. Az 1. ábra mutatja az S-hullám gerjesztésére alkalmas állásban az elektromos vibroszeiz forrást földre szorított helyzetben.

1. ábra: Lightning E-vibroszeiz forrás elektromos meghajtású hordozó járműre építve, a mögötte vontatott LandStreamer érzékelő rendszerrel. Pozícionálást a forrás felett elhelyezett RTK-GPS antenna biztosítja.

2. LandStreamer érzékelő rendszer

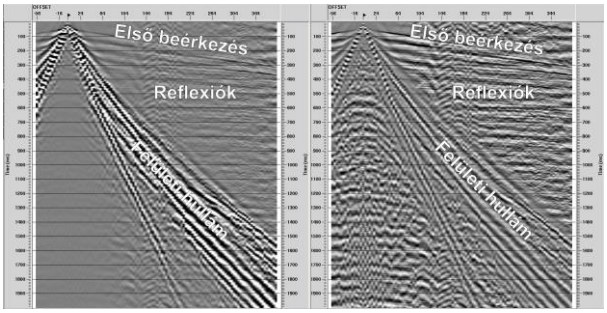
A szeizmikus mérőrendszer fejlesztése során célunk volt, hogy egy olyan érzékelő rendszert fejlesszünk ki, mely mind természetes környezetben, mind pedig városi környezetben, burkolt felületen, utakon alkalmas szeizmikus mérések hatékony kivitelezésére. A hagyományos, leszúrható 3 komponenses (3C) geofonok mellé egy vontatható, szintén 3C geofonokat, mint érzékelőket használó LandStreamer került kifejlesztésre. Az egyes 3C geofonokat kibővítve, mindegyik geofonba saját fejlesztésű adatrögzítő elektronika került beépítésre. Az adatrögzítő elektronika minden egyes geofonba épített 3 db 24 bites A/D kártyát, SD kártya alapú adattárolást, tápellátást és időszinkront biztosító vezérlést jelent. Az adatrögzítést vezérlő szoftver egy laptopon futtatva automatikusan felismeri a jelforrást (vibroszeiz, kalapács, vagy más jelforrás) és annak megfelelően automatikusan állítja a felvételi paramétereket.

A LandStreamer érzékelősorok jelenleg 0,5 m-es és 2 m-es geofontávolsággal állnak rendelkezésre, egyenként 40 db 3C geofont tartalmazó szekciókban. Mérés során a LandStreamer érzékelőket a vibroszeiz forrást mozgató elektromos quad mögött vontatva biztosítható a gyors és hatékony szeizmikus felvételezés. Ezt a mérési konfigurációt mutatja az 1. ábra. Az egyes szekciók kombinálhatók, egyszerre több LandStreamer is összekapcsolható.

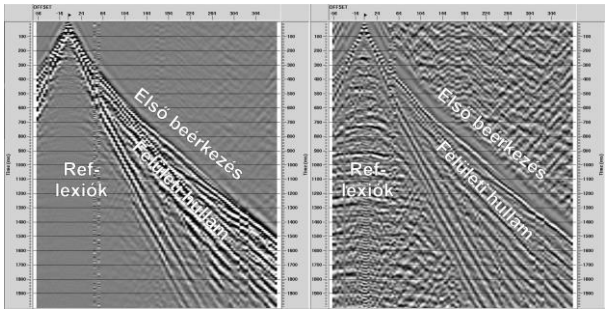
Pozícionálást a vibroszeiz forrás felett rögzített RTK-GPS antenna biztosítja, mellyel minden egyes forráspont bemérésre kerül. A vontatott LandStreamer egyes geofonjainak pozícióját a forráspontok nyomvonalából extrapoláljuk.

3. Mérési eredmények

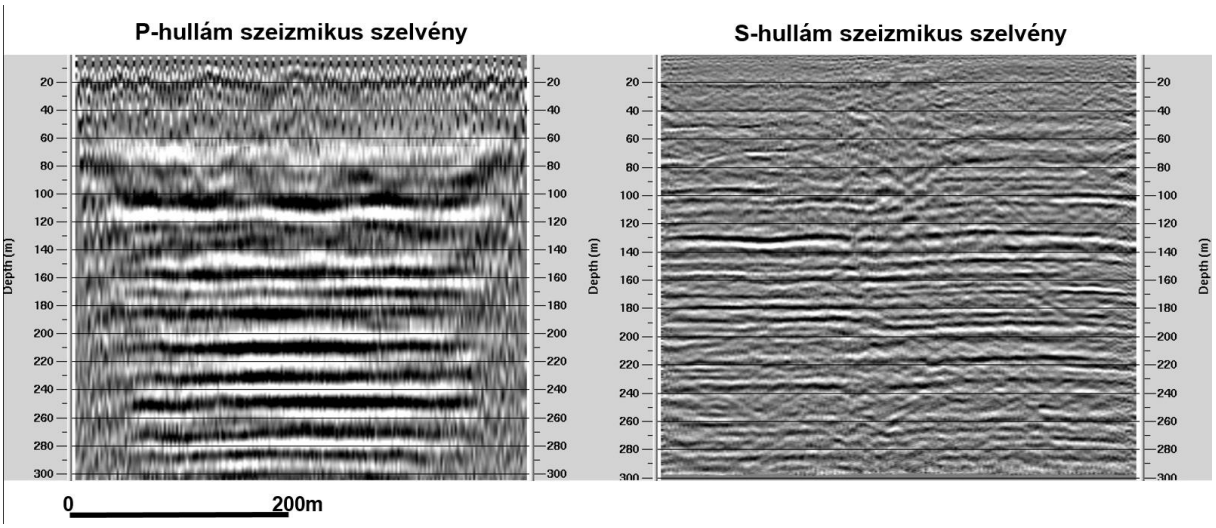
Tanulságos összehasonlítani az egyazon szelvényben, egyező mérési paraméterekkel felvett P- és S-hullám robbantóponti felvételeket és szeizmikus szelvényeket. Egy fiatal üledékes medenceterületen mért P- és S-hullám robbantóponti felvételpárt mutat a 2. és 3. ábra, míg a 4. ábra a P- és S-hullám mélységszelvényeket ismerteti. A robbantóponti felvételeken jól látható a P- és S-hullám sebességek különbözősége miatt eltérő hullámkép, míg a 4. ábra mélységszelvényén az S-hullám szelvény jelentősen jobb felbontása és a felszínközeli rétegek leképezése szembetűnő.



2. ábra: P-hullám vibroszeiz robbantóponti felvétel. Bal oldali ábra csatornakiegyenlítéssel, jobb oldali amplitúdó korrekció és sávszűrés alkalmazásával megjelenítve.

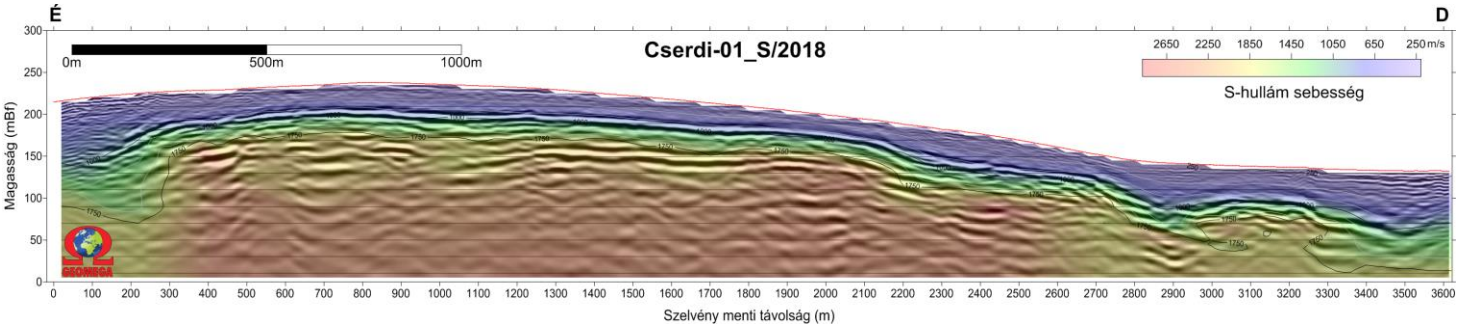


3. ábra: S-hullám vibroszeiz robbantóponti felvétel. Bal oldali ábra csatornakiegyenlítéssel, jobb oldali amplitúdó korrekció és sávszűrés alkalmazásával megjelenítve.



4. ábra: Egyazon nyomvonal mentén mért P- és S-hullám szeizmikus szelvény. Mindkét szelvény forrása a Lightning elektromos vibrátor volt, egyik esetben P-, míg a másik esetben S-módban üzemeltetve. Jól látható az S-hullám szeizmikus szelvény jelentősen jobb felbontása és kis mélységű leképezése.

Olyan területeken, ahol felszín közelben található idős kőzetek jelentős sebességkontraszttal jelentkeznek, markánsan eltérő szeizmikus kép várható. A nagy sebességugrás egyben jelentős akusztikus impedancia kontrasztot, azaz visszaverő képességet is jelent. Ez egyrészt egy nagy energiájú reflexiót eredményez, másrészt pedig jelentősen lecsökkenti a mélyebb rétegek felé továbbhaladó energia arányát, rontva ezzel a mélyebb rétegek leképezését. Ilyen földtani környezet például a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) felszínközeli megjelenése. Az 5. ábra egy 3600 m hosszú, É-D-i irányítottságú szelvény példáján mutatja be a felszínközeli BAF S-hullám szeizmikus leképezését. A szelvény a reflexiós képet és a színskálával megjelenített S-hullám sebességteret egyszerre mutatja be.



5. ábra: A Mecsek-hegység délnyugati peremén, a BAF felszínközeli területén mért S-hullám reflexiós szeizmikus szelvény. Markáns reflexióként és sebességugrásként jelentkezik a szelvény mentén változó mélységben leképezett BAF felszín.

A mért szelvényen egyértelműen kijelölhető és követhető a fiatal (főként negyedidőszaki) fedőüledékek és az alaphegységi képződmények határa azokon a szelvényszakaszokon is, ahol a fedőüledékek kivékonyodnak, vastagságuk csak néhányszor tíz méteres, vagy akár 10 méter alá csökken. Ilyen kis mélységű réteghatár P-hullám reflexiós szeizmikus szelvénnyel nem képezhető le, ami igen fontos minőségi előrelépés a felszínközeli réteghatárok szeizmikus leképezésében. P-hullám reflexiós szelvényezéssel a kiemelt helyzetű aljzattető és az azon települő, vékony fiatal fedőüledékek leképezése vagy egyáltalán nem, vagy csak nagyobb mélységektől és lényegesen rosszabb felbontással megvalósítható. A mélyebb leképezést biztosító P-hullám 2D és 3D mérések eredményeit nagyfelbontású S-hullám szeizmikus mérésekkel kombinálva mind a mély, mind a legsekélyebb szerkezeti és rétegtani elemek részletesen megismerhetők, tanulmányozhatók.

4. Köszönetnyilvánítás

Szerzők ezúton is szeretnék megköszönni mindazon kollégák munkáját, akik az S-hullám mérések során segítségünkre voltak, valamint a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft. hozzájárulását a BAF kutatása kapcsán mért szelvény bemutatásához.

Az S-hullám szeizmikus forrás és a LandStreamer érzékelő rendszer a GINOP-2.1.2-8-1-4-16 számú pályázat támogatásával került kifejlesztésre.

Irodalom

[1] Bharadwaj, P., Drijkoningen, G.G., Mulder, W., Thorbecke, J., Neducza, B., Jenneskens, R., 2017. A shear-wave seismic system using full-waveform inversion to look ahead of a tunnel-boring machine - Near Surface Geophysics 2017.

[2] Noorlandt, R., Drijkoningen, G., Dams, J. and Jenneskens, R. 2015. A seismic vertical vibrator driven by linear synchronous motors. GEOPHYSICS, VOL. 80, NO. 2.

A BAF-3, -3A, -4 kutatófúrások műszaki kivitelezésének összefoglalója és a jellemző fúrómagtörési jelenségek értelmezése

Summary of the technical implementing of the BAF-3, -3A, -4 boreholes and the interpretation of the typical drill core fracture phenomena

., ALBRECHT R.[1], HÁMOS G.[2], HOCHREIN B.[3], KERESZTÉNY B.[4], KOCSIS G.[5], TÁTRAI R.[6]

[1] Albrecht Richard Gyula (MECSEKÉRC Zrt., albrechtrichard@mecsekerc.hu)
[2]Hámos Gábor (MECSEKÉRC Zrt., hamosgabor@mecsekerc.hu)
[3]Hochrein Bence (MECSEKÉRC Zrt., hochreinbence@mecsekerc.hu)
[4]Keresztény Balázs (MECSEKÉRC Zrt., keresztenybalazs@mecsekerc.hu)
[5]Kocsis Gábor (MECSEKÉRC Zrt., kocsisgabor@mecsekerc.hu)
[6]Tatrai Róbert (MECSEKÉRC Zrt., tatrairobert@mecsekerc.hu)

Abstract

BAF-3, BAF-3A and BAF-4 boreholes were carried out as part of the Medium-Term Research Program fof Boda Claystone Formation (hereinafter BAF). The planned drilling and field testing program was carried out in response to the unplanned geological and technical events during the implementation and flexible responses were given to these situation, in order to obtain the most comprehensive data and information on the suitability of the BAF as a high-activity radioactive waste storage host rock. In order to achieve this aim, during the investigation the coring ratio was reached 94% for the entire core drilling section, as well as to carry out the required field tests on at the technically feasible sections, which reached a rate of over 96% for the entire section length drilled in this investigation phase.

Based on the previous investigations the BAF – Dombó Division is the most suitable for constract a possible storage space. That's why the explanation of the fragmented core material that was occured in the section between 537.00-604.92 m of the BAF-3 borehole (in the Dombó Division), predominantly "fragmented" into sections of 7-10 cm which according teh geophysical sections is originally undamaged, one of the least tectonized sections of the entire borehole. The phenomenon occurred only during the use of the SK 4 ¼" drilling tool, so its occurrence is primarily related to this type of coring tool.

Összefoglaló

A Bodai Agyagkő Formáció (tovvábbiakban BAF) Középtávú Kutatási Program részeként került kivitelezésre a BAF-3, BAF-3A, valamint a BAF-4 fúrás. A tervezett fúrási és helyszíni vizsgálati program a kivitelezés közben fellépő, nem tervezett geológiai és műszaki események hatására, a kialakult helyzetre rugalmasan reagálva került megvalósításra, annak érdekében, hogy a lehető legszélesköűbb adatok és információk birtokába jussunk a BAF, mint nagyaktivitású radioaktív hulladéktároló kőzetösszlet alkalmassága kapcsán. Ezen cél megvalósítása érdekében a fenti kutatófúrások kivitelezése során sikerült a teljes magfúrási szakaszra vetítve 94 %-os magkihozatalt elérni, valamint a műszakilag megvalósíthartó legtöbb szelvényszakaszon elvégezni a tevezett helyszíni vizsgálatokat, melyek jelen fázisban mélyített teljes szelvényhosszra vantkozóan 96 % fölötti arányt értek el.

Az eddigi vizsgálatok alapján a BAF - Dombói Tagozata a legalkalmassabb egy lehetséges tárolótér kiépítésére. Ezért is bír nagy jelentősséggel a BAF-3 fúrás (Dombói Tagozatban mélyül) 537,00-604,92 m közötti szakaszán tapasztalt, uralkodóan 7-10 cm-es szakaszokra „darabolódott" maganyag kialakulásának magyarázata– ami a mélyfúrás-geofizikai szelvények alapján eredeti állapotában a fúrás teljes szelvényében legkevésbé tektonizál szakaszainak egyike. A jelenség kizárólag a SK 4 ¼" magfúró szerszám alkalmazása során jelentkezett, így létrejötte elsősorban e szerszámtípushoz köthető.

Kulcsszavak: BAF, helyszíni fúrólyuk vizsgálatok, magfúrás, , magtörési jelenségek

Bevezető

A Bodai Agyagkő Formáció (továbbiakban BAF) Középtávú Kutatási Program részeként került sor a BAF-3, BAF-3A, valamint a BAF-4 fúrások mélyítésére és vizsgálatára, melyben beruházóként a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. (RHK), fővállalkozóként a MECSEKÉRC Zrt. vett részt.

A kutatási tervek a BAF-3,-3A esetében 850 m, ill. 1500 m, A BAF-4 esetében 800 m talpmélység elérését célozták meg, jelentős részben magfúrással, szakaszos hidrogeológiai, mélyfúrás-geofizikai, és geotechnikai helyszíni vizsgálati programok elvégzésével, valamit a fúrásokból begyűjtött kőzet- (fúrómag) és vízminták széleskörű dokumentációs és laboratóriumi vizsgálatával, végül hosszútávú monitoring tevékenységre alkalmas többpakkeres rendszerek telepítésével.

1. Célok és elért eredmények

A BAF-3,-3A fúráspár kutatási célja az volt, hogy a BAF-3 fúrás 850 m mélységig mélyüljön magfúrással, komplex helyszíni vizsgálati program elvégzése mellett, majd a BAF-3A fúrás kb. 750 m-ig mélységig teljesszelvénnyel haladjon és magfúrásra váltson kb. 100 m fúrások közti mélységi átfedéssel elérje, valamint néhány 10 m hosszban harántolja a BAF feküképződményét, a Cserdi Formációt.

A BAF-4 fúrás kitűzött célja volt, hogy kedvező tektonikai szituáció esetén magfúrással elérje a BAF feküjét vagy esetleg elérje, harántolja a Hetvehely-Magyarszék törésvonalat a komplex helyszíni vizsgálati program elvégzése mellett.

Szintén a kiemelt célok között szerepelt, hogy az említett fúrások mindegyikébe hosszú távú többpakkeres monitoring-rendszer kerüljön telepítésre. Ezt szem előtt tartva terveztük és végeztük a szakaszos – elsősorban hidrogeológiai – vizsgálati programot, illetve a végleges lyukszerkezet kialakítását, ami a fúrás közben szükségessé váló műszaki megoldások miatt több esetben is komoly kihívás elé állította mind a rendszerek tervezését, mind a telepítését.

A BAF-3 fúrás végül 845,18 m-ig (MD) mélyült. A BAF-3A fúrás 801 m-ig mélyült teljesszelvénnyel, majd 1319,02 m talpmélységet ért el, ahol műszaki (szerszámtörés és -vesztés) és pénzügyi okokból befejeződött. A beruházó döntését befolyásolta az a fúrás kivitelezése közben begyűjtött ismeretanyag, ami alapját szolgálta a feltételezésnek, hogy a Cserdi Formáció elérése a tervezett 1500 m-es mélységig vélhetően nem sikerülne.

A projekt erőforrásai így átcsoportosításra kerültek a BAF-4 fúrás kivitelezésére, ahol már 600-650 m-es talpmélységnél várható volt, hogy a Hetvehely-Magyarszék vonalat nem keresztezi, annak ellenére, hogy térbeli közelségét több vizsgálat és megfigyelés is sejtette. Viszont esély mutatkozott a fúrás másodlagos céljának elérésére, miszerint feltárja a BAF feküképződményeit, ami be is következett. A fúrás harántolta a BAF-ot, majd az alatta fekvő a Cserdi Formációt (mindössze néhány méter vastagságban), végül a Gyűrűfűi Lapillitufa Formációban állt meg, 901,14 m-es talpmélységben.

2. Helyszíni vizsgálatok

A kutatófúrások – előzetes tervek szerinti – kivitelezése 200-300 m magfúrás előrehaladást követően komplex vizsgálati program elvégzésével zárul, mely rendszerint mélyfúrás-geofizikai szelvényezéssel kezdődik, amit pakkeres hidrogeológia vizsgálati program, lehetőség szerint tartós víztermelés, vízmintavétel és visszatöltődés vizsgálat zár. A tervezett geotechnikai vizsgálatok közül az IST overcoring vizsgálatokat is ezekhez a kampányokhoz terveztük. A végleges talpmélység elérését követően záró mélyfúrás-geofizikai vizsgálat, VSP, valamint hidrorepesztéses geotechnikai vizsgálatok kerülnek kivitelezésre (1. táblázat).

A fentiekben felvázolt programot nem minden esetben lehetett tartani. Mindhárom fúrás esetében szükség volt cementezéssel történő lyukstabilizására vagy öblítőfolyadék veszteség (vagy éppen szaporulat miatt) megszűntetésére, ami előtt a vizsgálati programot előre kellett hozni az információvesztés elkerülése érdekében. Ez nagyfokú rugalmasságot igényelt a vizsgálatokat végző alvállalkozóktól.

1. táblázat: A fúrásokban végzett helyszíni vizsgálatok

Vizsgálat típusa / *Fúrás jele, talpmélysége (m)*	*Komplex mélyfúrás-geofizika (szelvényezett fm)*	*Hidrogeológiai vizsgálatok (vizsgált szelvényhossz, fm)*	*VSP (szelvényezett fm)*	*IST overcoring (viszgálati szakaszok száma)*	*Hidrorepesztés (vizsgálati szakaszok száma*
BAF-3 (845,18)	812,57	725,03	-	3 (1 sikertelen)	6
BAF-3A (1319,02)	1264,50	505,93 (801 m-től)	1236,00	-	-
BAF-4 (901,14)	894	833,75	834,09	7 (2 sikertelen)	-

Az IST overcoring vizsgálatok kivitelezését nehezítette, hogy a teszteket végző Sigra Pty Ltd. szakemberei külföldről érkeztek és a Covid pandémia ideje alatt a mobilizálásuk nehézségekbe ütközött, így a szakmai szempontok mellett a logisztikai lehetőségeket is figyelembe kellett venni a mérési szakaszok és kivitelezési időpontok meghatározásában.

A fúrások mindegyikében sikerült 95% fölötti arányban elvégezni a komplex mélyfúrásgeofizikai vizsgálatokat, a pakkeres vizsgálatokat, illetve a VSP szelvényezést.

3. Fúrási tevékenység

A fúrási tevékenység elsősorban magfúrással haladt, zárt, jobb öblítéses rendszerben, uraninnal nyomjelzett vízzel. Az fúráshoz használt víz a Husztót K2 vízkútból származott (vízkor miatt), melynek célja az volt, hogy megfelelően lehessen elvégezni a pakkeres vizsgálatokat (azaz az polimeres iszap használata révén ne képződjön iszaplepény a lyukfalon), valamint elősegítse a vízmintavételt és a minták laborvizsgálatainak értelmezhetőségét. Ezért a polimeres iszap használata általában csak bővítésnél, speciális kútmunkálatoknál volt engedélyezett.

A speciális öblítési mód ugyanakkor komoly kihívást jelentett a magfúrás szempontjából. Elsősorban, a tektonizált és öblítőfolyadék veszteséggel fúrt zónákban okozott problémát. Kivételes esetnek számít a BAF-3A fúrás 979,38-1092,91 m közötti szakasza, ahol a lyukstabilitási problémák miatt szükség volt polimeres iszap használatára.

3.1. Magfúrás

A Kutatófúrások magfúrási szakaszai – az induló néhány 10 m-es mélységtől eltekintve, ahol Geobor-S méretet (Ø146/100 mm) alkalmaztunk – mindenhol SK (Ø120,6/63 mm) átmérőre voltak tervezve, meghagyva a lehetőségét a műszaki, vagy geológia okokból történő átmérő csökkentésre HQ (Ø96/61 mm), nagyobb mélység esetén NQ (Ø 76/45 mm) méretre.

A fúrások egyikét sem sikerült végig SK méretben lefúrni, különböző geológiai, műszaki okokból, mindegyik fúrásnál HQ szelvénnyel értük el a végleges talpmélységet. A különböző szelvényátmérővel mélyített szakaszok magkihozatali arányát összegzi a 2. táblázat.

2. táblázat: Magkihozatali arány a BAF-3,-3A, BAF-4 fúrásokban

Fúrás jele	*Magfúrás, átmérője (mm/mm)*	*Magfúrás hossza (m)*	*Maghossz (m)*	*Magkihozatali arány (%)*
BAF-3	110/95 száraz magfúrás	11,15	11,15	100.00
	Geobor-S (146/100)	4,48	4,15	92,63
	SK (120,6/63)	559,82	510,62	91,21
	HQ (96/61)	267,21	265,69	99,43
BAF-3A	Geobor-S (146/100)	18,80	18,80	100,00
	SK (120,6/63)	291,91	252,25	86,41
	HQ (96/61)	226,11	220,66	97,59
BAF-4	Geobor-S (146/100)	40,06	35,41	88,39
	SK (120,6/63)	331,86	289,55	87,25
	HQ (96/63)	542,25	533,54	98,39

Összességében megállapítható, hogy a legjobb magkihozatalt a HQ szelvényű magfúrással értük el (leszámítva a rövid, többnyire felszínközeli SK átmérőnél nagyobb szelvényeket), amit a tektonizált zónák se rontottak le jelentősen. Az eszközrendszer használatának ez komoly előnye, ugyanakkor a 96 mm-es névleges lyukátmérő a fúrólyukban végzett vizsgálatok szempontjából nagyobb kihívást jelent a lyukfalból esetlegesen kipergő kőzetdarabok miatt (ez a szituáció előfordult és szondaszorulást is okozott a BAF-4 fúrásban), valamint a HQ 3 ½”-os fúrócsövek falvastagsága (89/78 mm), ezáltal szakítószilárdsága kisebb az SK 4 ¼”-os fúrócsövekénél (108/92 mm), ami eszközszorulás, jelentős túlhúzás esetén nagyobb eséllyel szakadhat el (ami a BAF-3A fúrásában a végleges talp elérést követően be is következett).

3.1.1. Magtörési jelenségek a BAF-3 fúrásban

A „magdarabolódás” jelensége (1. fotó) a BAF-3 fúrás 537,00 – 604,92 m közötti szakaszának mélyítése során került a figyelem középpontjába. A fúrás eddig a mélységig alapvetően SK wireline magfúrási technológiával SK 4¾” (Ø120,6/63 mm) PDC koronával, triplafalú magcsővel, uraninnal nyomjelzett husztóti vizes öblítéssel mélyült. Itt közel 70 m-es összefüggő szakaszon – korábban sohasem tapasztalt hosszban és mértékben – lehetett megfigyelni a fúrómag daraboknak a fúrás tengelyére többnyire merőleges irányú felületek mentén történő darabolódását és a véglapok, palástok menti intenzív lecsiszolódását, koptatódását, karcolódását. Ezen a szakaszon jellemzőek a simára csiszolódott, koptatódott magfelületek, a domború-homorú formát mutató véglapok (gyakran egymás „negatív” párjaként), a magvégek élein mutatkozó kipattogzódások, körkörös köszörülés nyomok, koncentrikus „csavarmenetes” rövid szakaszok, cikkcakkos varrógépöltésre hasonlító – valószínűleg vibráció okozta – palástfelületi karcok. A döntően hengeres magdarabok hossza uralkodóan 4-20 cm között váltakozó, gyakran szinte egyenközű magdarabokkal (leggyakrabban 70-100 mm közötti hosszal).

1. fotó: Jellemző magládakép (546,83-551,74 m között) és magdarabolódási jelenségek a BAF-3 fúrás 537,0 – 604,92 m közötti „magdarabolódott” szakaszából

A jelenség azért volt meglepő a szakemberek (műszaki és földtani egyaránt) számára, mert az érintett szakaszon a fúrómagok állapota és a komplex, akusztikus lyuktelevíziós lyukgeofizikai szelvényezés alapján is a BAF-3 fúrás a Bodai Agyagkő Formáció egy nyugodt településű (a földtani dokumentáció szerint 3°-12° közötti változó magtengelyhez viszonyított rétegdőlések, ABI felvétel alapján 3°-17° közötti dőlésű K-i irányú rétegdőlések), törésektől, szerkezeti mozgásoktól mentes rétegösszletét harántolta. A szakaszon a BAF fő tömegét alkotó homogén albitos agyagkő, agyagos albitolit kőzetcsoport 70%-ot elérő aránya összeadódva a közberétegzést, konkréciót tartalmazó albitos agyagkő (18%) rétegszakaszokkal mutatja, hogy a darabolódásnak nem a lyukdeformáció általi és nem elsősorban rétegtani, szedimentológiai oka van.

2. fotó: BAF-2 fúrásban jelentkező magdarabolódás

A jelenséget az említett földtani, ásványtani, valamint műszaki, azaz az SK 4 ¼” magfúrási technológia együttes hatása válthatta ki. A magdarabolódás szelvényváltást (HQ) követően (azonos földtani rétegtani feltételek mellett) nem jelentkezett A jelenség vizsgálata során mind a BAF-3 homokkőben mélyült, mint a BAF-2 fúrás (azonos technológiával mélyült) magfotóinak átvizsgálása során is felismerhető volt a magdarabolódás (2. fotó), de ezt a harántolt rétegek tektonizáltsága elfedte és korántsem terjedt ki ekkora egybefüggő szakaszokra.

Irodalom

[1] Hámos G. et al. (MECSEKÉRC Zrt.) 2022: A BAF-3 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. – Paks, RHK Kft. Adattár. RHK-H-007/21

[2] Hámos G. et al. (MECSEKÉRC Zrt.) 2022: A BAF-4 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. – Paks, RHK Kft. Adattár. RHK-H-001/22M01

[3] Hámos G. et al. (MECSEKÉRC Zrt.) 2020: A BAF-3A fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. – Paks, RHK Kft. Adattár. RHK-H-015/22M01

Mélyfúrás-geofizikai és VSP mérési eredmények a BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrásokban

Well logging and VSP results from BAF-3, BAF-3A and BAF-4 boreholes

BERNÁTH GYÖRGY[1], KOVÁCS ATTILA CSABA[2], SZONGOTH GÁBOR[4], ZILAHI-SEBESS LÁSZLÓ[3], CSABAFI RÓBERT[5]

[1]Geo-Log Kft., bernath.gyorgy@geo-log.hu,
[2]Geo-Log Kft., kacs@geo-log.hu
[3]Geo-Log Kft., szongoth.gabor@geo-log.hu
[4]Szabályott Tevékenységek Felügyeleti Hivatala, zilahi.sebess.laszlo@sztfh.hu
[5]Szabályott Tevékenységek Felügyeleti Hivatala, csabafi.robert@sztfh.hu

Abstract

Boda Claystone Formation is considered to be the most potential host rock for high level radioactive waste deposition in Hungary. As part of the exploration program BAF-3, BAF-3A, and BAF-4 drillings were completed. In our presentation some results of the well logging and VSP measurements will be introduced.

Among results of well logging we focus on shale volume and porosity calculations, correlation between BAF-3, and BAF-3A, interpretation of acoustic borehole televiewer images, and nuclear magnetic resonance logs.

The most important goal of Vertical Seismic Profiling is to provide accurate transformation of the seismic sections measured in the X-T (distance-time) domain into the X-Z (distance-depth) domain. In both boreholes, we identify the reflection on the corridor-stack using borehole geophysical, geological and tectonic data.

Összefoglaló

A Bodai Agyagkő Formáció (BAF) a nagy aktivitású radioaktív hulladékok végső elhelyezésének potenciális befogadó kőzete. A kutatási program keretében 2019-2020 között a BAF-3, BAF-3A és a BAF-4 és fúrások mélyültek le. Előadásunkban – a teljesség igénye nélkül – a mélyfúrás geofizikai és a VSP mérés eredményeit mutatjuk be.

A mélyfúrás geofizikai eredmények közül kitérünk az agyagtartalom és a porozitás számítására, bemutatjuk a lyukfaltelevíziós felvételek értékelését, a BAF-3, és -3A fúrások korrelációját, valamint a nukleáris mágneses rezonancia mérést.

A vertikális szeizmikus szelvényezés legfontosabb célja az X-T (távolság-idő) tartományban mért szeizmikus szelvények X-Z (távolság-mélység) tartományba történő transzformációjának minél pontossá tétele. Mindkét fúrásban elvégeztük a corridor-stack-eken látható reflexiók azonosítását a mélyfúrás-geofizikai, földtani és tektonikai adatok segítségével.

Kulcsszavak: Bodai Agyagkő Formáció, Nyugat-Mecsek, mélyfúrás-geofizika, VSP

Bevezető

A nagyaktivitású radioaktív hulladékok végső, felszín alatti elhelyezésének potenciális befogadó kőzete a Bodai Agyagkő Formáció (BAF), melynek kutatása több évtizedre nyúlik vissza. A fúrásos kutatás 2019-2020 időszakában mélyültek le a BAF-3 (talpmélység: 845,18 m), a közvetlen mellette található BAF-3A (1319,02 m) valamint a BAF-4 (901,14 m) fúrások. Mindhárom fúrás célja a földtani, hidrogeológiai, valamint geofizikai információszerzés volt, elsősorban a Bodai Agyagkőről, másodsorban a fedő és fekü képződményekről.

1. Mélyfúrás geofizikai mérések a BAF-3, -3A és BAF-4 fúrásokban

A mélyfúrás-geofizikai méréseket a Geo-Log Kft. végezte el. A komplex karotázs szelvényezés mellett áramlásmérések, valamint néhány speciális mérés (akusztikus lyukfaltelevízió, spektrál gamma, gerjesztett polarizáció, nukleáris mágneses rezonancia) kivitelezése is megtörtént. A mérések értelmezését a fúrások jelentéseiben adtuk meg. Előadásunkban a kapott eredményekből mutatunk be néhányat.

1. táblázat: A BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrásokban alkalmazott mélyfúrás-geofizikai módszerek

Komplex karotázs szelvényezés	Természetes potenciál (SP) Fajlagos ellenállás 40 cm-es (E40) és 10 cm potenciál (E10) Guard laterolog ellenállás (LL3) Mikroellenállás, normál (MRN) és inverz (MRG) Lyukátmérő, 3 karú (DH) Természetes gamma (GR) Hőmérséklet (TL) és Differenciál hőmérséklet (DIT) Akusztikus hullámkép (SON) Neutron-porozitás (NPOR) Sűrűség, hosszú (DEL) és rövid (DES) csatorna Lyukátmérő, 1 karú (DH1)
Áramlásmérés	Nagyérzékenységű forgólapátos áramlásmérés (FLOW) Hőmérséklet (TL) és Differenciál hőmérséklet (DIT) és / vagy Hőimpulzusos áramlásmérés (HPF)
Spektrál gamma (SGR)	
Gerjesztett polarizáció (IP)	
Akusztikus lyukfaltelevízió (BHTV)	
Nukleáris mágneses rezonancia (NMR)	

1.1. Agyagtartalom, porozitás számítása

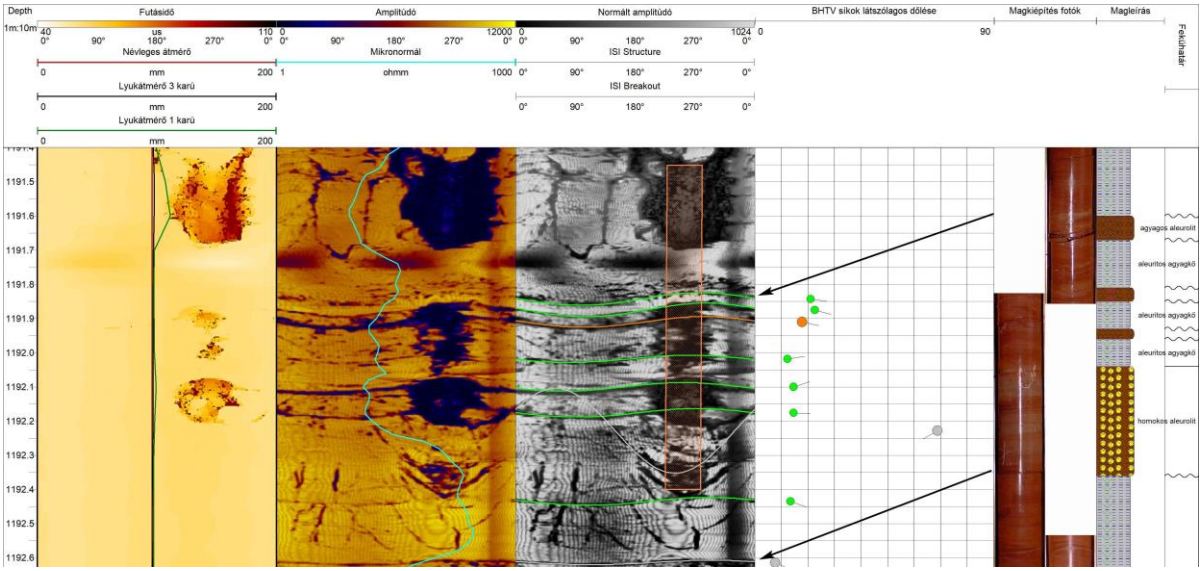
A neutronporozitás- és sűrűségszelvények felhasználásával meghatároztuk a következő egyszerű kőzetmodell-komponensek részarányait: száraz agyagtartalom, kőzetmátrix, totál porozitás. A totál porozitás ellenőrzésére az agyagosságot is figyelembevevő akusztikus porozitást számítottuk, amit a módosított Raymer-Hunt összefüggés alapján végeztünk el. A két különböző módon számított porozitás jó korrelációt adott.

1.2. Akusztikus lyukfaltelevíziós mérések

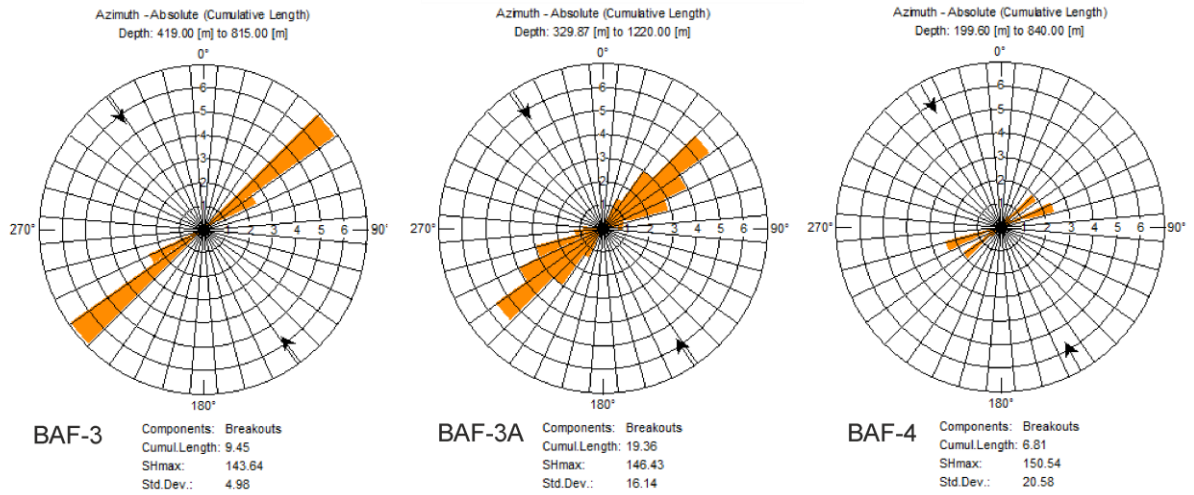
A BHTV felvételeken szinuszok illesztésével bejelöltük a sík elemeket és meghatároztuk azok látszólagos, majd a ferdeséggel korrigált valós dőlését. Külön figyelmet fordítottunk a réteghatárok azonosítására, a rétegdőlés meghatározására (1. ábra). Az eredmények azt mutatták, hogy a Bodai Agyagkő dőlése BAF-4 fúrásban átlagosan 30 – 35 fok ÉÉNY-i irányban, a BAF–3 és –3A fúrásokban pedig 8 – 18 fokos dőlésérték és K-i irány jellemző. A felvételeken breakout zónákat is értelmeztünk, amelyek mindhárom fúrás esetében ÉNy-DK irányú maximális horizontális főfeszültség irányt jeleznek (2. ábra).

1.3. Korreláció a BAF-3, -3A fúrások között

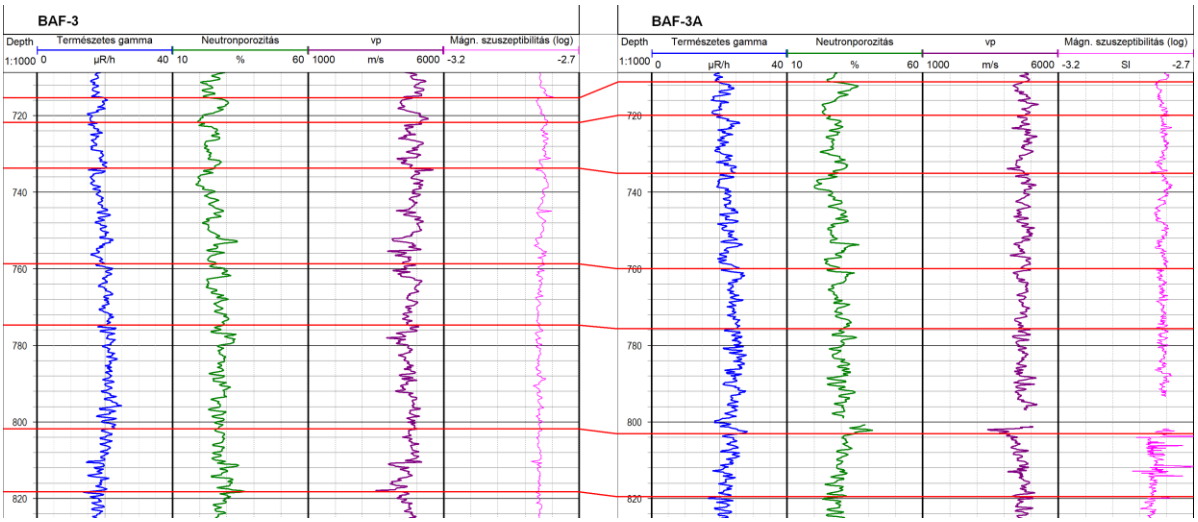
Az egymástól 17,82 m-re elhelyezkedő BAF–3 és BAF–3A fúrások között korrelációt készítettünk, melynek részletét mutatja a 3. ábra. A korrelációhoz a karotázs mérések közül a természetes gamma, mágneses szuszceptibilitás, vp sebesség és laterolog ellenállás görbéket használtuk fel. A korrelációs szintek alapján számolható áldőlések jól megfeleltethetők a lyukfaltelvíziós mérésekkel meghatározott rétegdőlésekkel.



1. ábra: BHTV síkok és breakout értelmezése a BAF-3A fúrásban (földtani adatok 25 cm-rel elcsúszva)



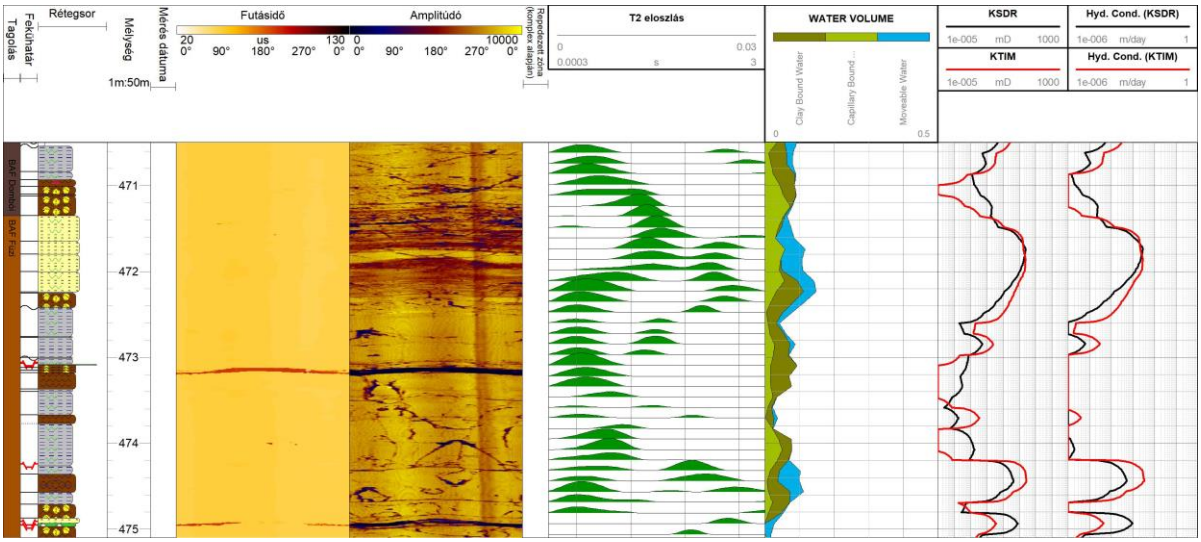
2. ábra: Breakout iránystatisztikák és a maximális horizontális főfeszültség iránya



3. ábra: Korreláció a BAF-3 és BAF-3A fúrások között (710 – 825 m)

1.4. NMR mérés

A mérési programokban nukleáris mágneses rezonancia szelvényezés is helyet kapott. Az adatfeldolgozás során meghatároztuk a totálporozitást, az agyaghoz kötött, kapilláris és szabad víz arányokat. A számításhoz az olajipari gyakorlatban a sziliciklasztos környezetre elfogadott cutoff értékeket alkalmaztuk. A Timur-Coates és a Schlumberger-Doll modellek szerint permeabilitás görbéket is számítottunk, ezeket azonban csak kvalitatív értékelésre használhatjuk, melynek oka egyrészt a cutoff értékek bizonytalansága, másrészt pedig az, hogy a BAF kőzet elsősorban repedezett porozitású, szabad víz tartalma, permeabilitása főleg repedésekhez, repedezett zónákhoz kapcsolódik. Egy-egy homokos betelepülésnél lehet esély mátrixporozitásra is (4. ábra).



4. ábra: BHTV és NMR mérés részlet (BAF-4, homokos betelepüléssel)

2. Vertikális Szeizmikus Szelvényezés a BAF-3A és a BAF-4 fúrásokban

2021-ben a BAF-3A és a BAF-4 fúrásokban került sor Vertikális Szeizmikus Szelvényezésre (VSP). A mérés főbb céljai: a szeizmikus hullámterjedés sebesség-mélység függvényeinek meghatározása, a fúrások környezetében a kőzettest szeizmikus tulajdonságainak megismerése, továbbá a reflexiós szeizmikus mérések integrált értelmezésének támogatása.

2.1. Terepi mérések

Mindkét fúrásban a VSP mérést a Geo-Log Kft végezte a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ, 2022 január 1-től Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága) közreműködésével.

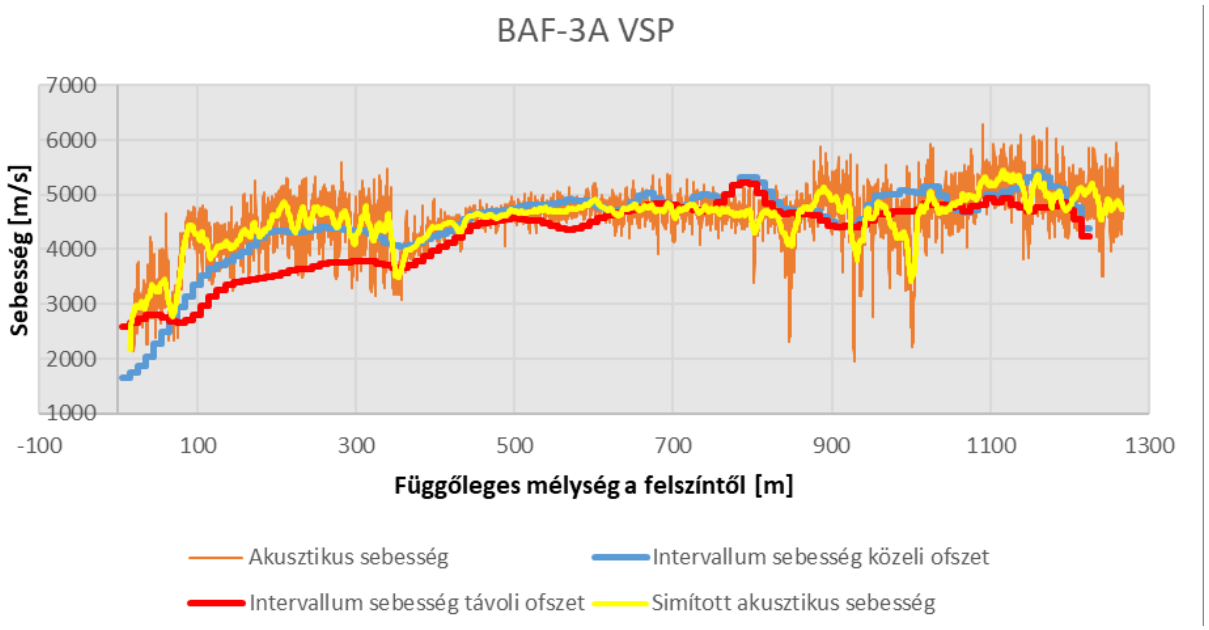
Mindkét fúrás esetében vibrátoros forrással történt a jelgerjesztés (8-100 Hz közötti frekvenciájú, 14 másodperces lineáris sweep), a beérkező jeleket három komponenses mérőrendszerrel rögzítettük (Seismic Instruments U-node SE Light műszer Sercel408-as terepi elektronikákkal, Geovista Ltd. gyártmányú BKG1000 szonda). Mindkét mélyfúrásban 10 m mélységközzel valósult meg az adatgyűjtés. A BAF-3A fúrásban két szakaszban végeztük el a mérést, első lépésben 20–800 m-es, majd 810-1235 m-es mélységtartományban. A BAF-4 fúrásban 20–890 m közötti szakaszon valósult meg a VSP mérés. A méréseket megelőző szakmai egyeztetések eredményeként mindkét fúrásban egy-egy távoli ofszetes (BAF-3A 296 m, BAF-4 276 m) VSP mérés is történt.

2.2. Adatok feldolgozása

A vertikális szeizmikus szelvényezés legfontosabb célja az X-T (távolság-idő) tartományban mért szeizmikus szelvények X-Z (távolság-mélység) tartományba történő transzformációjának minél pontosabbá tétele, a mélyfúrásokban meghatározott, a felszíntől mért mélységben megadott réteghatárok megbízható azonosítása a szeizmikus szelvényeken értelmezett időhorizontokkal. A VSP mérések elvi alapjait magyar nyelven a Magyar Geofizika XXVI. évf. 2. számában (1985) Gönz G., Késmárky I., Mód G., Rádler B. szerzők ismertetik [4][5][6]. Az adatfeldolgozás menete röviden összefoglalva a következő volt: geometriai leírás, szerkesztés, sávszűrés, VSP dekonvolúció, azonos mélységben levő szonda esetében készült (ismételt) felvételek összegzése (vertikális stack), a direkt beérkezések bejelölése, hullámtér (felfelé- és lefelé haladó) elválasztása F-K szűréssel, majd a corridor stack (közeli ofszetes mérés), illetve összegszelvény (távoli ofszetes mérés) elkészítés.

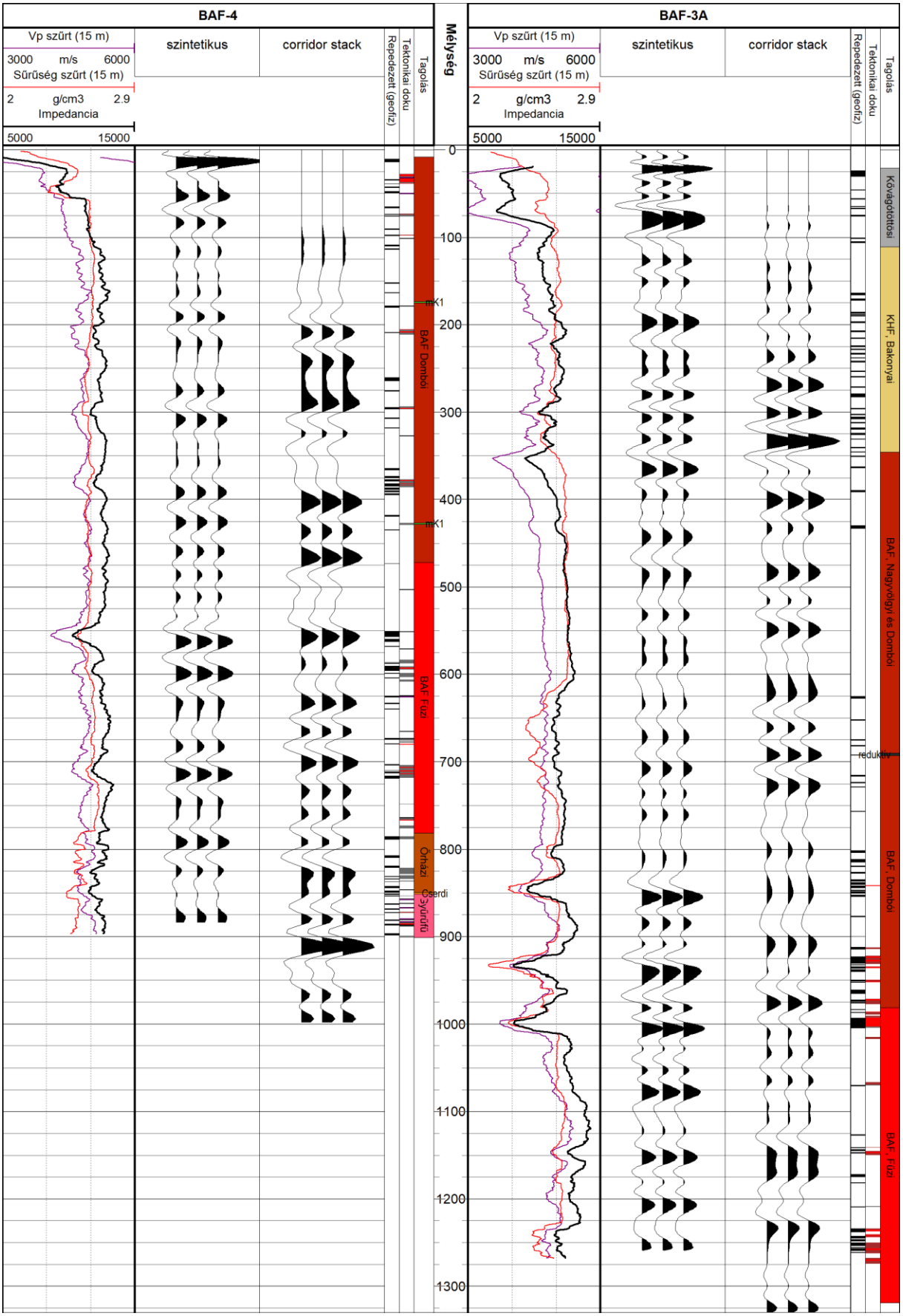
2.3. Mérési eredmények

A vertikális regisztrátumok első beérkezéseiből meghatároztuk az intervallum sebességeket, amit az akusztikus karotázs hullámképből meghatározott V_P sebességekkel vetettünk össze. Az 5. ábra mutatja be a különböző módon meghatározott sebességek összehasonlítását a BAF-3A fúrásban, melyek jól korrelálnak egymással.



5. ábra: A BAF-3A fúrásban meghatározott intervallum sebességek és a fúrásban mért akusztikus sebességek összehasonlítása

A BAF-4-es fúrásban a VSP adatokból sikerült az S-hullám intervallum sebesség meghatározása is, amely jól korrelál az akusztikus mérésből meghatározott transzverzális hullám sebességeivel. A BAF-3A és a BAF-4 mélyfúrás-geofizikai adataiból készült szintetikus és a VSP mérésből készült corridor-stack csatornák összehasonlítását a mélyfúrás-geofizikai, földtani és tektonikai adatokkal együtt ábrázolja a 6. ábra. A számított és a mért corridor-stack változat között jó a korreláció, hasonló fázisban vannak a jelek, bár néhány helyen ellentétes fázisúak (BAF 3A: 350 m, 450 m, illetve BAF-4: 500 m felett).



6. ábra: A BAF-4 és BAF-3A VSP mérések komplex szelvénye a mélyfúrás-geofizikai, a szintetikus és az elkészített corridor-stack-kel, illetve a főbb tektonikai szakaszokkal és földtani egységekkel

A BAF-3A corridor-stack-en határozott reflexióval jelentkezik a Kővágószőlősi Homokkő Formáció és a Bodai Agyagkő Formáció határa (345 m). E fölött is megjelennek reflexiók (250-350 m között), amik a szintetikus corridor-stack-en is határozott jelként láthatók. A BAF Dombói és Fűzi Tagozatainak 981 m-nél lévő határa is reflexióval jelentkezik a corridor-stack-en. A rétegváltásokon túl további határozott reflexiók is láthatók a corridor-stack-en (625, 850, 930, 1150, 1230 m), melyeknél a fúrásban mért, az akusztikus impedanciát befolyásoló paraméterek (sebesség, sűrűség is) megváltoznak. A corridor-stack-en lévő ezen reflexiós jelek a tektonikai, töréses elemekkel korrelálnak (6. ábra).

A BAF-4 corridor-stack-en lévő reflexiós jelek véleményünk szerint a tektonikai elemekkel korrelálnak jobban, mint a formáció, illetve réteghatárokkal. A 471 m-nél lévő BAF Fűzi és Dombói Tagozat, a 781 m-nél lévő BAF Fűzi és átmeneti réteg határa, illetve a 851 m-nél lévő Gyűrűfűi Formáció teteje jelentkezik reflexióval a corridor-stack-en. A tektonikai határok (repedezett zónák) reflexióként jelentkeznek a corridor-stack-en (210 m, 300 m, 475 m, 550 m, 775 m, 800 m, 860 m és 900 m). A vizsgált 850 m mélységű tartományban olyan sok a tektonikai, illetve repedéses jelenség, hogy ezek elkülönítése a réteghatároktól a corridor-stack-en nem lehetséges. A BAF-4-es fúrás 901 m mélységben állt meg, a mélyfúrás-geofizikai és a fúrómag adatok alapján is egy tektonikai zóna határán. Valószínűleg ez a tektonikus határ jelentkezik határozott reflexióval a corridor-stack-en 900 m mélység alatt (6. ábra).

A corridor-stack-eket és a távoli ofszetes mérésekből készített szelvényeket érdemes összehasonlítani a területen található szeizmikus szelvényekkel. Esetünkben azonban mind a két fúrás a 2D szelvényektől jelentős távolságra található. A BAF-3A 910 m-re, míg a BAF-4 610 m-re helyezkedik el a Me-102 jelű 2D szeizmikus szelvénytől. A cikk megírásával egy időben fejeződött be a Nyugat-Mecsek 3D szeizmikus mérés, melynek a területére esik mind a két bemutatott fúrás. Egy következő kiadványban lesz majd érdemes ismertetni a VSP és a 3D mérés együttes eredményét.

Irodalom

[1] Konrád, Gy., Sebe, K., 2010: Fiatal tektonikai jelenségek új észlelései a Nyugati-Mecsekben és környezetében. – Földtani Közlöny, 140/2, pp. 135-162.

[2] Zilahi-Sebess L., 2010: A repedezettség hatása a mélyfúrás-geofizikai mérésekre. – Magyar Geofizika, 51/3, pp. 124-142.

[3] Zilahi-Sebess L., Fancsik T., Török I., Kovács A. Cs., 2007: Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján. – Magyar Geofizika, 48/3 2007 pp. 99-111.

[4] Gönz G., Rádler B., 1985: A vertikális szeizmikus szelvényezés (VSP) alapjai. – Magyar Geofizika XXVI évfolyam 2. szám.

[5] Gönz G., Rádler B., Tóth J., 1985: A VSP mérés. – Magyar Geofizika XXVI évfolyam 2. szám.

[6] Gönz G., Késmárky I., Véges I., 1985: Kis offsetű VSP mérések feldolgozása. – Magyar Geofizika XXVI évfolyam 2. szám.

A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrások pakkeres hidraulikai és hidrorepesztéses vizsgálatai

Hydraulic testing and hydrofracking in Boreholes BAF-3, -3A and BAF-4

MEZŐ GYULA[1], FÖLDVÁRI KOPPÁNY[2], KORPAI FERENC[3]

[1]WSP Golder, gyula.mezo@wsp.com, [2]WSP Golder, koppany.foldvari@wsp.com
[3]AGILA RES Kft., fkorpai@agila-pecs.hu

Abstract

The suitability of a potential high-level radioactive waste repository site is judged on the basis of the hydrogeological and geomechanical characteristics of the host rock. Packer hydraulic and hydraulic fracturing tests are probably the most important methods for determining these characteristics.

Using packer hydraulic tests, the most important hydrogeological characteristics of the formations are determined: transmissivity and static pressure of the tested borehole sections. Transmissivity and hydraulic head profile of the boreholes were constructed based on the results of the hydraulic tests.

The stresses related to the rock environment can be calculated from the pressures recorded during the hydraulic fracturing tests using different analytical models. The direction of the in-situ rock stress was determined based on the trace of the formed hydraulic fracture on the borehole wall. The maximum principal stress in the horizontal plane was greater than the lithostatic stress at all test sections. In the sections where the vertical stress component is the smallest, the measurement results show values typical of a compressive stress field. On the other hand, where the the lithostatic stress lies between the minimum and maximum horizontal stresses, strike-slip deformation is typical.

Összefoglaló

A nagyaktivitású radioaktív hulladéktároló potenciális helyszínének alkalmasságát nagy mértékben a befogadó kőzetformáció hidrogeológiai és geomechanikai jellemzői alapján ítélik meg. E jellemzők meghatározásának fontos módszerei a fúrólyukban elvégezhető pakkeres hidraulikai-, illetve a hidraulikus repesztéses vizsgálatok.

A pakkeres hidraulikai vizsgálatok során meghatároztuk a képződmények fontosabb vízföldtani jellemzőit: a vízvezető képességet és az egyes vizsgálati szakaszok nyugalmi nyomását. A hidraulikai vizsgálatok eredményei alapján megszerkesztettük a fúrások transzmisszivitás- és potenciálszelvényét.

A kőzetkörnyezetre vonatkozó feszültségek a hidraulikus kőzetrepesztéses vizsgálat során rögzített nyomásokból számíthatók különböző analitikus modellek alkalmazásával. Az in-situ kőzetfeszültség irányát a kialakított hidraulikus repedésnek a fúrólyuk falán megjelenő nyoma alapján határoztuk meg. A horizontális síkban lévő maximális főfeszültség minden mért szakaszon nagyobb volt, mint a litosztatikus feszültség. Azokon a szakaszokon, ahol a függőleges feszültségkomponens a legkisebb, a mérési eredmények kompressziós feszültségtérre jellemző értékeket mutatnak. Ahol viszont a minimális és maximális horizontális feszültségek közrefogják a litosztatikus feszültséget, az oldalelmozdulásos (strike-slip) deformáció a jellemző.

Kulcsszavak: kúthidraulika, transzmisszivitás, hidraulikus potenciál, hidraulikus kőzetrepesztés, kőzetfeszültség

Bevezető

A pakkeres hidraulikai vizsgálatok célja a kutatási terület földtani képződményeinek és szerkezeteinek vízföldtani jellemzése, a vízvezető képesség, a hidraulikus potenciálviszonyok és a vízáramlás geometriai jellemzőinek meghatározása, mélységi víz- és gázmintavétel lehetőségének megteremtése. Ilyen típusú vizsgálatok végzése a fúrások maggal mélyített teljes lyukszakaszán, szisztematikusan zajlik.

A hidraulikus repesztés standard eljárássá vált a mérnöki gyakorlatban a kőzetek in-situ feszültségének meghatározásához, és egyike azon kevés módszernek, amelyet mélyfúrásokban is el lehet végezni [2]. A módszer lényege, hogy egy rövid vizsgálati szakaszt a fúrás megfelelő mélységében (felfújható pakkerekkel) elzárnak, majd az elkülönített szakaszba fluidumot (általában vizet) injektálnak be olyan hozammal, hogy a hidraulikus nyomás gyorsan megemelkedjen, és a fúrólyuk falán hidraulikus repedés keletkezzen.

1. Pakkeres hidraulikai vizsgálatok

A WSP Golder és az AGILA Renewable Energy Services Kft. végezte a terepi kútvizsgálatok tervezését és kivitelezését. A fúrások mélyítése közben, a fúrási tevékenységet megszakítva több mérési kampány alkalmával kiviteleztük a pakkeres hidraulikai vizsgálatokat. Az eredményeket feldolgozva meghatároztuk a fúrások transzmisszivitás- és potenciálszelvényét.

Az 1. ábra mutatja be a BAF-3 fúrás transzmisszivitás- és potenciálszelvényét. A transzmisszivitás szelvényen látható, hogy a Bodai Agyagkő fedőképződményeiben elvégzett tesztekre a 10^{-7}–10^{-3} m^2/s tartományba eső transzmisszivitás jellemző, míg a BAF képződményei inkább a 10^{-13}–10^{-7} m^2/s közötti értékeket mutatnak.

A durvább szemcseméretű jellemzett homokköves képződmények átlagosan jobb vízvezető képességűek, míg az agyagköves szakaszok gyengébb vízvezető képességűek. A Bakonyai Homokkő Tagozaton belül a transzmisszivitás mélység szerinti növekvő trendje ismerhető fel. A Bodai Agyagkő Formáción belül nem látszik, hogy a transzmisszivitás mélység szerint valamilyen trendet követne, a relatíve gyengébb és jobb vízvezető képességű szakaszok látszólag szabálytalanul váltogatják egymást.

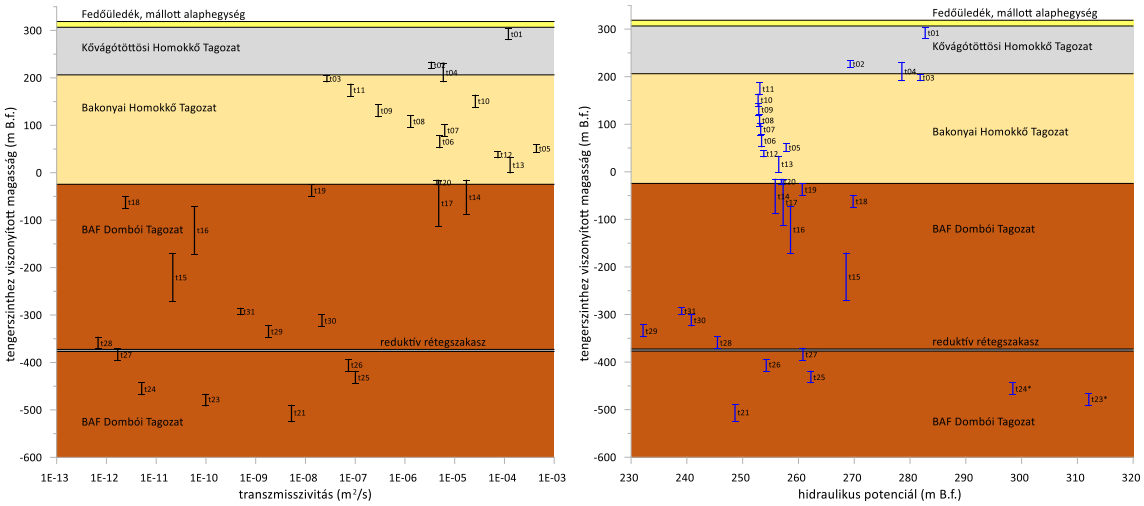
A potenciálszelvényen látható, hogy míg a Kővágótöttösi Homokkő Tagozatban végzett tesztek (t01–t04) alapján a nyugalmi potenciálok a 269,3–282,7 m Bf tartományba esnek, addig a Bakonyai Homokkő Tagozatra a 252,8– 257,8 m Bf közötti potenciálok jellemzők. A potenciálszintek alapján a Bakonyai Homokkő hidraulikai értelemben egyetlen összefüggő rendszernek felel meg, ezt a potenciálok kis változékonysága is jelzi (az adatok szórása 1,67 m).

A 2. ábra a BAF-3A fúrás transzmisszivitás- és potenciálszelvényét szemlélteti. A kőzetek vízvezető képességének mértéke elsősorban a kőzetminőség függvénye: a tektonikailag jobban igénybe vett képződmények relatíve jobb vízvezető képességűek. A transzmisszivitás a mélység függvényében csökkenő trendet követ a BAF-3A fúrás vizsgált szakaszán, mely trendet az egyes törészónák befolyásolnak. A Dombói Tagozatot magasabb potenciálszintek jellemzik, mint a Fűzi Tagozatot. A tényleges nyomásviszonyok tisztázását a fúrásba telepített multipakker-rendszer eredményei tudják biztosítani, mivel a rövid idejű vizsgálatok alapján meghatározott nyomásértékek, illetve azokból levezetett sűrűség- és potenciálértékek jelentős bizonytalansággal bírnak.

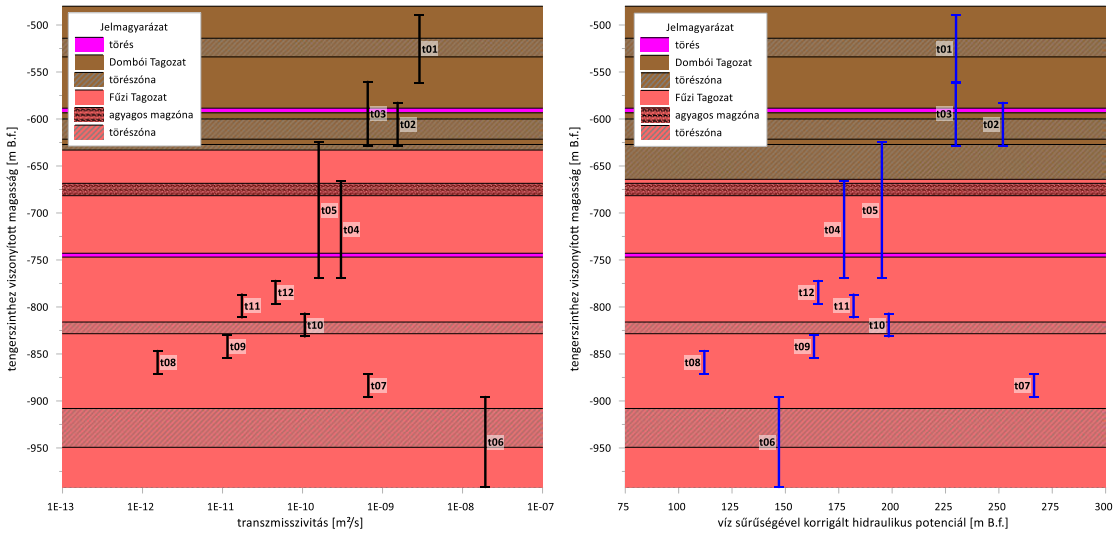
A BAF-4 fúrás transzmisszivitás- és potenciálszelvényét a 3. ábra mutatja be.

A Bodai Agyagkő Formáción belül a Fűzi Tagozat esetében jellemző, hogy a transzmisszivitás mélység szerint valamilyen trendet követ, a Dombói Tagozat esetében a relatíve gyengébb és jobb vízvezető képességű szakaszok a meszesedés-albitosodás mértékének függvényében váltják egymást.

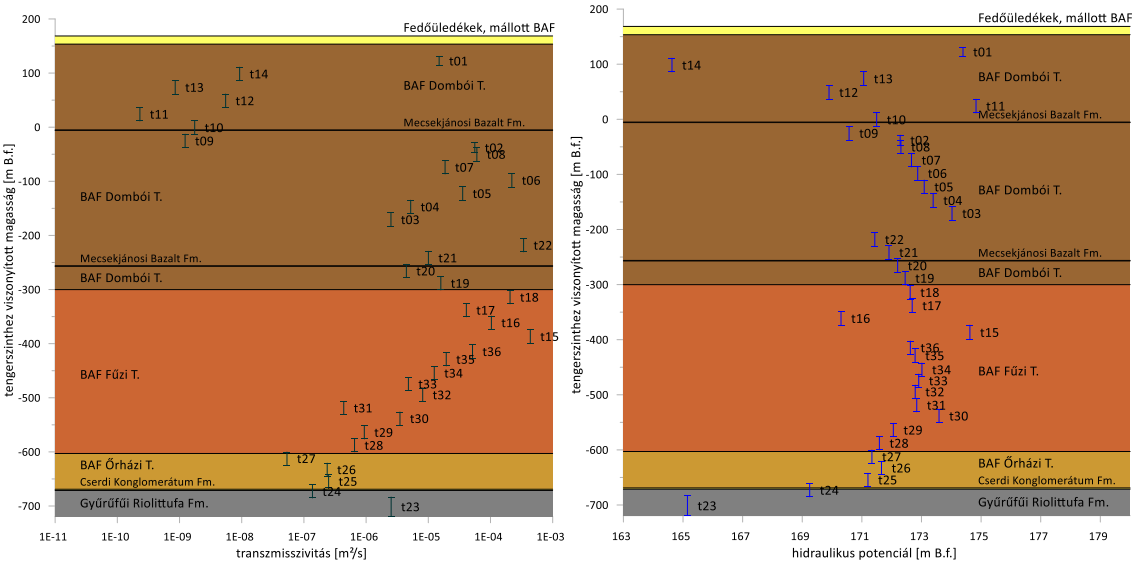
A BAF-4 fúrás hidraulikus potenciálszelvénye sokkal kisebb változatosságot mutat. A fúrás során már kis mélységekben folyamatosan szabadon kifolyó vizet tapasztaltak, mely a nyugalmi potenciálszint terepszintnél magasabb voltára utal. A nyugalmi nyomások meghatározásának bizonytalanságaiból fakadó szóródásoktól eltekintve a BAF potenciálképe egyveretű, ami arra utal, hogy valószínűleg egyetlen, folytonos hidraulikai egységet alkot. A kevés számú mérés ellenére valószínűsíthető, hogy a Cserdi és Gyűrűfűi Formációk a BAF-tól elkülönülő hidraulikai egységbe sorolhatók.



1. ábra: A BAF-3 fúrás transzmisszivitás- és potenciálszelvénye



2. ábra: A BAF–3A fúrás transzmisszivitás- és potenciálszelvénye



3. ábra: A BAF-4 fúrás transzmisszivitás- és potenciálszelvénye

2. Hidrorepesztéses vizsgálatok a BAF-3 fúrásban

A BAF-3 fúrásban hat vizsgálatot végeztünk a felszín alatti 239,6 és 668,5 m között. A zavartalan szakaszokra a közel vízszintes rétegződés is utalt. Az 1. táblázat tartalmazza a vizsgálati szakaszok mélységét és litológiai jellemzőit.

A kőzetkörnyezetre vonatkozó feszültségek a vizsgálat során rögzített nyomásokból számíthatók különböző analitikus modellek alkalmazásával (lásd pl. [1] ill. [2]). Az in-situ kőzetfeszültség irányát a kialakított hidraulikus repedésnek a fúrólyuk falán megjelenő nyoma alapján határozzák meg, a méréseket megelőző majd azokat követő akusztikus lyukfaltelevízió (ABI) felvételek összehasonlító értékelése alapján.

1. táblázat: A hidraulikus repesztéses vizsgálatok mélységei és litológiája

Vizsgálat	*Vizsgálati mélység [m felszín alatt]*	*Litológia*
HFt1	667,16–668,50	vörösesbarna agyagkő aleurolit betelepülésekkel
HFt2	503,22–504,80	vörösesbarna agyagkő karbonáterekkel
HFt3	446,81–448,39	rétegzetlen, homogén barna agyagkő
HFt4	457,59–459,17	rétegzetlen, homogén barna agyagkő
HFt5	407,48–409,06	rétegzetlen, homogén barna agyagkő
HFt6	239,60–241,20	sötét barnásvörös aleurolit, finomszemű homokkő, jól osztályozott, rétegzetlen

A 4. ábra mutatja be a mért minimális és becsült maximális feszültségadatokat. Utóbbiakat a törési nyomás és a második, újranyitási fázis alapján lehetett kiszámítani. A sűrűség mélységszelvényből számított litosztatikus feszültség gradiense a vizsgálati szakaszokra vonatkozóan átlagosan 0,0244 MPa/m-nek adódott.

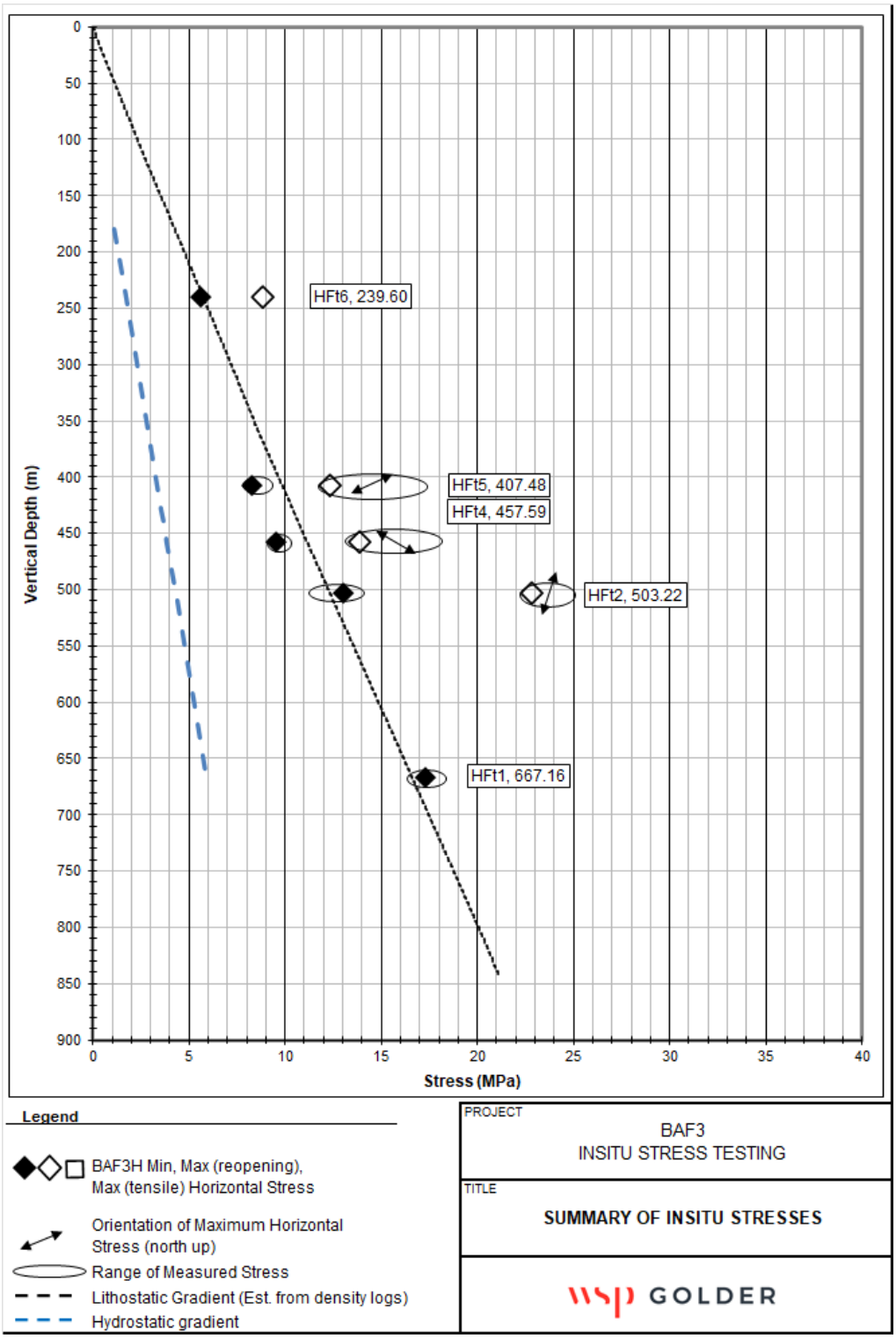
Az HFt1 és HFt2 szakaszoknál a minimális horizontális a litosztatikus feszültséghez viszonyítva, annak rendre 1,04 és 1,05-szöröse, míg a HFt4–HFt6 szakaszokon a minimális horizontális feszültség a litosztatikus feszültségnek 0,84–0,97-szerese. A horizontális síkban lévő maximális főfeszültség minden mért szakaszon nagyobb, mint a litosztatikus feszültség.

Azokon a szakaszokon, ahol a függőleges feszültségkomponens a legkisebb, a mérési eredmények kompressziós feszültségtérre jellemző értékeket mutatnak. Ahol viszont a minimális és maximális horizontális feszültségek közrefogják a litosztatikus feszültséget, az oldalelmozdulásos (strike-slip) deformációk a jellemzőek.

Irodalom

[1] Bredehoeft, J. D., Wolff, R. G., Keys, W. S. and Dhutter, E. (1976): Hydraulic Fracturing to determine the regional in-situ stress field, Piceance Basin, Colorado, Geol. Soc. Am. Bull., vol. 87, pp. 250 – 258.

[2] Haimson, B. C. (1993): The Hydraulic Fracturing Method of Stress Measurements: Theory and Practice, in: Fundamental Rock Engineering, Fairhurst, C. ed., pp. 396 – 412.



4. ábra: A BAF–3 fúrásban mért feszültségadatok összefoglalása

A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrások többpakkeres rendszereinek telepítése és előzetes eredményei

Multipacker systems in the boreholes BAF-3, -3A and BAF-4 (installation and preliminary data interpretation)

BENKOVICS ISTVÁN [1], CSICSÁK PÁL [1], KORPAI FERENC [1]

[1] *AGILA REnewable Energy Services Kft., 7673 Kővágószőlős, Uránbányász utca 5.*
ibenkovics@agila-pecs.hu; pcsicsak@agila-pecs.hu; fkorpai@agila-pecs.hu

Abstract

The use of multi-packer systems is of extreme importance for long-term hydrogeological monitoring. The design of these systems requires specialized knowledge and devices, which usually have to be designed and developed based on the unique characteristics of the given borehole. In order to increase reliability, efforts must be made to use simple technical solutions wherever possible. The purpose of the multipacker observation systems is to monitor the evolution and possible changes of the potential head in the geological formations of the research area - in order to refine the flow system. For this reason, the data of the multi-packer systems installed in the BAF-3, -3A and BAF-4 boreholes play an important role in the interpretation of the hydrogeological conditions of the BAF.

Összefoglaló

A többpakkeres észlelőrendszerek alkalmazása kiemelkedő fontosságú a hosszú távú vízföldtani monitoring szempontjából. A rendszerek kialakítása speciális tudást és eszközöket igényel, melyeket általában az adott fúrás egyedi tulajdonságai alapján kell megtervezni és kialakítani. A megbízhatóság növelése érdekében lehetőség szerint egyszerű technikai megoldások alkalmazására kell törekedni. A többpakkeres észlelőrendszerek célja - az áramlási rendszer pontosítása érdekében - a potenciálviszonyok alakulásának és esetleges változásának megfigyelése a kutatási terület földtani képződményeiben. Emiatt a BAF-3, -3A és BAF-4 fúrásokba telepített többpakkeres észlelőrendszerek adatai fontos szerepet töltenek be a BAF vízföldtani viszonyainak értelmezésében.

Kulcsszavak: BAF-3; BAF-3A; BAF-4; többpakkeres észlelőrendszer; hosszú távú monitoring

Bevezető

A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrások egy hosszú idejű földtani kutatási program keretében mélyültek. A program végső célja egy lehetséges mélységi geológiai radioaktívhulladék-tároló kialakítása a Nyugat-Mecsek területén, a Bodai Agyagkő Formációban (BAF), a Magyarországon keletkező nagyaktivitású radioaktív hulladékok és kiégett fűtőelemek végleges és biztonságos elhelyezése céljából.

A kutatási program legfontosabb létesítményei a mélyfúrások, amelyekben a harántolt képződmények és szerkezetek vízföldtani jellemzőit helyszíni pakkeres mérésekkel kell vizsgálni, majd lehetőség szerint minden fúrás nyitott szakaszába többpakkeres észlelőrendszert kell telepíteni. A rendszereket minden fúrásra egyedileg kell összeállítani a fúrási rétegsor, valamint az egyedi pakkeres mérésekből szerkesztett transzmisszivitási és potenciálszelvény alapján, figyelembe véve a pakkerek megfelelő zárásának követelményét. A kialakított észlelési szakaszok hossza 65-210 m között változik. A többpakkeres észlelőrendszert az AGILA Renewable Energy Services Kft. szakemberei tervezték és telepítették.

A többpakkeres észlelőrendszerek célja az áramlási rendszer pontosítása érdekében megfigyelni a potenciálviszonyok alakulását és esetleges változását a kutatási terület földtani képződményeiben mélyülő kutatófúrások különböző szakaszán, továbbá adatszolgáltatás a vízföldtani modellek kalibrálásához. Az egyedi kialakítás miatt a BAF-3 fúrásba 5 pakker, a BAF-3A fúrásba 4 pakker, a BAF-4 fúrásba 6 pakker került.

1. Műszaki kialakítás

A többpakkeres észlelőrendszerek kialakításánál figyelembe vettük, hogy a többpakkeres észlelőrendszereknek hosszú ideig kell a fúrásokban megbízhatóan működni, ezért az eszközök műszaki kialakítása során igyekeztünk egyszerű, de megbízható technikai megoldásokat alkalmazni. Az észlelőrendszer a fúrásba telepített mélységi, valamint felszíni eszközökből áll. A mélységi eszközökhöz tartozik a rudazat, a pakkerek és a felfúvó rendszer vezetékei, valamint a mérőszondák és az elektromos összekötő vezetékek. A felszíni eszközök közé sorolható az adatgyűjtő, az áramellátó tápegység, illetve a pakkerek megfelelő nyomását biztosító tartály. A felszíni eszközöket – a korábbi fúrásoknál alkalmazott megoldáshoz hasonlóan – a fúrási pontra telepített zárható konténerben helyeztük el.

Az észlelőrendszer felszíni eszközeinek elrendezését úgy kell kialakítani, hogy az észlelőrendszerek ellen tudjanak állni az időjárási viszontagságoknak. Gondoskodni kell az elfagyás, a túlmelegedés, valamint az átnedvesedés, beázás és a légköri elektromosság elleni védelemről. Az egyedi körülményeket figyelembe véve a DataCan adatgyűjtő rendszerét választottuk, amely elektromos felszíni rendszere gyári védelemmel van ellátva, mind pára és csapadék, mind villámlás szempontjából. A pakkerek kiültetését mindhárom rendszer esetében hígított fagyálló folyadékkal végeztük. A többpakkeres észlelőrendszerek fő alkotóelemei a fúrásban a pakkerek és a mérőszondák, felszínen az adatgyűjtő és az áramellátó egység. A többpakkeres eszközrendszerek kialakítása, az eszközök egymáshoz illesztése, összeállítása speciális műszaki megoldások alkalmazását igényli. Amennyiben a fúrólyuk állapota megengedi, a többpakkeres rendszer a fúrólyukból kiépíthető, és egyes elemei újból, más rendszer részeként is fölhasználhatóak.

1.1. Mélységi eszközök

1.1.1. Pakkerek

A pakker egy cső külső felületét körbefogó, acél merevítésű gumitömlő, amely a külső nyomást meghaladó belső nyomás hatására kidagad, és szorosan nekifeszül a fúrólyuk falának. A térfogatnövekedés a tömlő rövidülésével jár, amit az tesz lehetővé, hogy a tömlő alsó pereme tengelyirányban el tud mozdulni a csövön. A pakkerek méretét a felfújás nélküli, ill. a maximális átmérővel szokták jellemezni. Különböző lyukátmérőkhöz eltérő méretű pakkereket célszerű alkalmazni, hogy a pakker viszonylag mérsékelt tágulással is szorosan a lyukfalnak feszüljön. Ugyanakkor arra is célszerű ügyelni, hogy – különösen a mélyebbre beépített pakkerek esetében – a pakker és a lyukfal között mindig legyen elegendő méretű gyűrűstér, hogy a lyukfal egyenetlenségei és a fúrólyukban lévő technikai védőcsőrakatok nehogy megsértsék a pakkert a beépítés során. Ezekben a fúrásokban 96 mm és 120 mm átmérőjű lyukszakaszokba ültettünk pakkereket. A lyukátmérő mellett figyelembe vettük a pakkerek beépítési mélységét, valamint a várható potenciálkülönbséget a pakker két oldalán, így egyes észlelési szakaszoknál a német Comdrill cég által gyártott, Bimbar típusú hidraulikus pakkert alkalmaztunk, míg más szakaszokon az amerikai Baski típusú pakkereket használtuk.

A hidraulikus pakkerek mind gázzal, mind folyadékkal ültethetők. A gázzal való ültetés egyszerűbb és gyorsabb, a folyadékkal való ültetés lassabb és körülményesebb, viszont a vízzel való ültetés hosszú távon biztonságosabb, így a körülményesebb használat ellenére ezt a megoldást választottuk. Mivel az észlelőrendszereket úgy alkottuk meg, hogy szükség esetén – ha a fúrólyuk állapota is lehetővé teszi – a fúrásból kiépíthetők legyenek, ezért gondoskodni kellett arról, hogy a

felfújó rendszer leüríthető legyen. A fúrások eltérő mélységét és a helyi potenciálviszonyokat figyelembe véve a felfújórendszer is egyedileg az adott körülményekhez igazodva került kialakításra, ami egyes esetekben speciális megoldásokat igényelt.

1.1.2. Az eszközrendszer váza

A pakkerek beépítéséhez 2 ⅜”-os és 2 ⅞”-os acél rudazatot használtunk (olajipari tubing), ami az egész eszközrendszer vázául szolgál. A kisebb terhelésű észlelési szakaszokon 2 ⅜”-os NU menettípusú, majd a terhelést növekedését figyelembe véve 2 ⅜”-os EU típusú, 2 ⅞”-os NU, valamint 2 ⅞”-os EU rudazat tartja az észlelőrendszert. A rudazatnak a rendszer mozgatásán, ill. a távtartáson kívül más funkciója nincs. Minden szakasz felső részén, a pakker alá egy szellőző furattal ellátott közdarabot építettünk be, melyen keresztül a rudazatba szorult levegő távozni tud a rendszerből, így biztosítva, hogy az észlelési szakaszok légmentesek maradjanak. A pakkerek felett lévő „ablak” pedig lehetővé teszi, hogy a beépítéskor a rudazat belseje folyamatosan töltődjön. A pakkerek alá/fölé vakdugóval szerelt átmenő közdarabot építettünk be, amelyek együttesen garantálják a vizsgálati szakaszok áteresztésmentes elkülönítését. Ez a speciális átvezető közdarab biztosította, hogy a közvetlenül a legalsó pakkerhez vezető felfúvó vezetéket és a digitális jeleket továbbító elektromos kábelt az egyes észlelő szakaszok között át tudjuk vezetni. A legalsó pakker alatt, valamint minden észlelési szakaszban egy speciális szondatartó elembe, a rudazat belsejébe helyeztük a nyomás- és hőmérsékletszondát. Az észlelési szakaszokban a nyomásszondák közvetlenül mérik a nyomás adatokat.

1.1.3. Adatgyűjtő egység

A megfigyelési szakaszok nyomás- és hőmérsékletadatainak méréséhez a DataCan rendszer elemeit alkalmaztuk. A kanadai cég fejlesztése felszín alatti nyomás- és hőmérséklet-szondákból, acélvédelemmel ellátott vezetékből, felszíni adatgyűjtő és tápegységből áll. Az adatgyűjtő műanyag zárható doboza látja el a rendszer mechanikai és csapadék elleni védelmét.

A rendszer energiaellátását 4 db, 12 V-os zselés műszerakkumulátor biztosítja. A tápegységet a felszínen, a zárható fémdobozban helyeztük el. A tápegység kialakítása olyan, hogy egyidejűleg négy akkumulátor csatlakoztatását teszi lehetővé, de mivel a rendszer egy akkumulátorral is működtethető, így az akkumulátorok egyesével kicserélhetőek. Emellett ideiglenes áramforrásként szolgálhat áramfejlesztő, autóban szivargyújtóról üzemeltethető inverter, vagy kézzel mozgatható, kis méretű 12V-os szünetmentes tápegység, továbbá a rendszer 220 V-os hálózatról is tölthető, így az akkumulátorok cseréje áramkimaradás nélkül többféle módon is megoldható. Az átnedvesedés és a légköri elektromosság elleni védekezés érdekében a felszíni elektromos csatlakozások szigeteltek és vízhatlanok.

Az eszközrendszer felszín alatti szondái ¼”-os TEC vezetékkel csatlakoznak egymáshoz. Az elemek vízzáró csatlakozását több rétegű szigetelő O-gyűrűk és vágógyűrűs fittingek biztosítják. A beépítés előtt ezeket speciális szilikonzsírral is tömítettük. A szondák a megfigyelési szakaszokban mind a nyomást, mind a hőmérsékletet mérik. A nyomásszondák mérési tartománya különböző, és ennek megfelelően pontosságuk és érzékenységük is eltérő, így minden fúrásban a várható nyomásviszonyoknak megfelelő nyomásszondát alkalmaztunk, amelyek egységesen maximum 150°C-ig működtethetőek. A szondák pontosságát és érzékenységét a gyártó a teljes nyomástartományhoz viszonyítva adta meg: általánosságban a szondák pontossága ±0,05%-a, felbontóképessége pedig 0,0003%-a a mérési tartománynak. A szondák abszolút (azaz a légnyomással nem kompenzált!) nyomást mérnek.

1.2. Felszíni eszközök

A mérőegység adatgyűjtő része a felszínen helyezkedik el, programozás után a vizsgálati szakaszok, a mérési sorozat adatai, valamint az adatok rögzítésének előre megadott időpontjai,

valamint a kalibráció alapján korrigált adatok nyerhetőek ki belőle. Az adatrögzítés a hosszú távú monitoring céljára általában 30 perces gyakorisággal történik.

Az adatgyűjtő a megadott időpontokban „lekérdezi" a hozzá csatlakoztatott szondákat. A mért értékek az észlelés időpontjával együtt speciális memóriaegységen digitális formában tárolódnak. Ez egy olyan memória, amely az elraktározott adatokat az áramellátás kimaradása esetén is megőrzi, memóriája több mint 20 millió mérési adat tárolására képes.

Az adatgyűjtőben tárolt adatok a felszíni egység (surface box) speciális kiolvasó portján keresztül tölthetők le. Az adatgyűjtő programozása PC-ről a DataCan saját szoftverével történik, ugyanezzel a terepi számítógéppel végezhetjük el az adatok kiolvasását is. Kiolvasás közben a szoftver több formátumot is felkínál az adatokat mentésére, de legcélszerűbb az adatokat egyszerű ASCII txt formátumban menteni, mivel így a továbbiakban szinte bármilyen adatfeldolgozó, vagy egyéb modellező szoftverekkel is egyszerűen kezelhető.

A korábbi meghibásodások miatt kiemelt figyelmet fordítottunk az adatgyűjtő rendszer elektromos védelmének kialakítására. A DataCan által gyártott adatgyűjtő rendszer saját villámvédelmi megoldással rendelkezik, melynek helyi bekötését független szakértő ellenőrizte.

2. Az eszközrendszer tervezése, felépítése

A többpakkeres észlelőrendszerekkel szemben támasztott legfontosabb követelmény, hogy a pakkerek megbízhatóan különítsék el a fúrólyuk egyes szakaszait. Ehhez egyrészt a pakkereknek kell tökéletesen zárniuk, másrészt nem szabad a pakkert olyan szakaszon kiültetni, ahol lehetőség van rá, hogy a kőzet repedésein keresztül, a pakkert megkerülve hidraulikai rövidzár alakuljon ki az elkülönített szakaszok között. Az említett okok miatt a pakkerek kiültetésére az ép, kevésbé repedezett lyukszakaszok a legalkalmasabbak. További szempont, hogy feltehetőleg egységes vízföldtani szerkezetek (pl. nagyon alacsony vagy éppen magas transzmisszivitású fúrólyukszakaszok) azonos megfigyelési szakaszon belülre kerüljenek, ugyanakkor a vélhetően elkülönülő (pl. jelentősen eltérő potenciálszintű) repedésrendszereket pakkerek válasszák el egymástól.

A pakkerek pontos kiültetési helyét a fúrásokról rendelkezésre álló fúrástechnikai, földtani, geofizikai és kútvizsgálati adatok figyelembevételével határoztuk meg. A pakkerek helyének kiválasztásához figyelembe vettük a fúrólyuk szerkezetét (a csövezett szakaszok helyét), bőség-, termikus és elektromos szelvényét, az akusztikus lyuktelevíziós felvételeket, valamint a nagyérzékenységű áramlásmérések és az egyedi pakkeres kútvizsgálatok eredményeit. A pakkerek kiültetéséhez olyan szakaszokat választottunk, ahol a lyukfal a bőségszelvény szerint egyenletes, a fúrólyuk átmérője azonos a nominális fúrási átmérővel, és az elektromos szelvény is nagy ellenállású, azaz alig repedezett kőzetet jelez. Az akusztikus lyuktelevíziós felvételeken ellenőriztük, hogy a kiválasztott hely körzetében nincsenek-e olyan meredek dőlésű repedések, amelyeken keresztül a pakkerrel elkülönített lyukszakaszok közvetlen kapcsolatba kerülhetnének egymással.

Meghatároztuk a hőmérsékletszelvény, a nagyérzékenységű áramlásmérések és az egyedi pakkeres kútvizsgálatok alapján kijelölhető fő vízvezető zónákat. Egymáshoz közel lévő beáramlási helyek közé nem ültettünk pakkert. Figyelembe vettük viszont az egyedi kútvizsgálatok alapján meghatározott potenciállépcsőket, hiszen a potenciálugrás valószínűleg elkülönülő vízföldtani egységeket jelez. Ezekre a helyekre igyekeztünk pakkert telepíteni.

A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrásokban a vizsgálati szakaszok hossza 65–210 m között változik, a beépített pakkerek számát a fúrólyuk nyitott szakaszához igazodva választottuk meg. Az egyedi kialakítás miatt BAF-3 fúrásba 5 pakker, a BAF-3A fúrásba 4 pakker, a BAF-4 fúrásba 6 pakker került.

A BAF–3 és BAF–3A fúrásokban a transzmisszivitás viszonylag széles tartományban 9 nagyságrenden belül változik. A felszín közelében (kb. 400 m-ig) a képződmények transzmisszivitása

zömmel 10^{-8} és 10^{-4} m^2/s között változik, ez a rész foglalja magába a fúrás legjobb vízvezető képességű, homokköves szakaszait. A 350–600 m közötti szakasz ugyan már a BAF-ban mélyült, de a felső néhány tíz méteres szakasza még kissé magasabb transzmisszivitású (feltehetően a repedések bekapcsolódnak a homokköves rétegszakaszba), alatta már zártabb, így a BAF felső részét a homokköves szakaszokkal fogtuk egy szakaszba Ezzel a kialakítással így a 10^{-11} m^2/s-os nagyságrendbe eső értékek is egy külön észlelési szakaszba kerülhettek. A mélyebb szakaszokon a mérsékelt és alacsony tartományba eső értékek jellemzőek (bár a BAF-3A fúrás egy magasabb transzmisszivitással rendelkező szakasz fúrásával fejeződött be).

A BAF–4 fúrásban a transzmisszivitások 7 nagyságrenden belül változnak. A fúrás felső részén (kb. 200 m fölött) a képződmények transzmisszivitása zömmel 10^{-8} m^2/s alatti tartományban változik, de a fúrás 38-54 m közötti szakaszán ettől magasabb (10^{-5} m^2/s nagyságrendbe eső) értéket mértünk. A 200 m alatti szakaszon végig 10^{-8} m^2/s-ot meghaladó (zömmel 10^{-7} m^2/s-ot is meghaladó) értékeket kaptunk.

A BAF-3 és BAF-3A fúrásokban a potenciálszint több részre tagolható. A felső 130 m-ben felszínhez közeli 280 m Bf körüli értékek jellemzőek. Ez alatt a potenciálszint a mélységgel fokozatosan csökken, 800-850 m-es mélységben már 200 m Bf (kb. 120 m f.a.) a jellemző, ami a BAF-3A fúrás alsó szakaszán egészen 160 m Bf (kb. 160 m f.a.) értékre csökken.

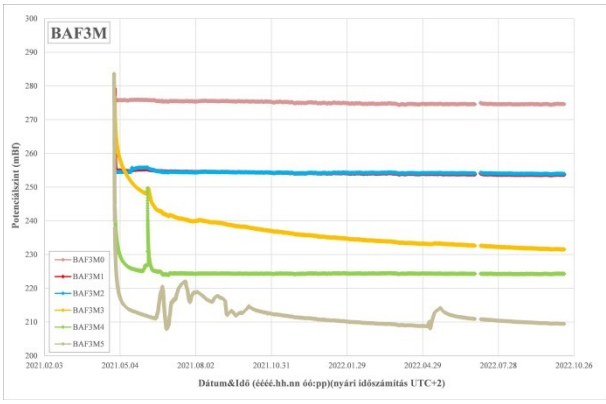
Ezzel szemben a BAF-4 fúrásban a pakkeres vizsgálatok kivitelezésekor a 38-54 m szakaszon még néhány méterrel felszín alatti nyugalmi nyomást kaptunk, de az ezt követő teszteknél már tapasztaltunk felszín fölé emelkedő nyugalmi nyomásértéket is. Az előzetes potenciálszint diagramon az látszott, hogy a potenciálszint a felszín közelében (de 800 m-es mélységig végig a felszín alatt) húzódik, viszont a fúrási időszakban és a hidraulikai vizsgálatok elvégzése közben is végig azt tapasztaltuk, hogy a fúrásból kisebb-nagyobb hozammal folyik a víz, így megállapítható, hogy az előzetes potenciálszint értékek nem elég pontosan határozták meg a nyugalmi vízszintet. Ez nem azt jelenti, hogy a meghatározott nyugalmi nyomásszintek nem lennének eléggé pontosak, az eltérés oka mindössze a fúrás ferdeségéből adódó mélységrövidülés lehet, ugyanis a hidraulikai vizsgálatok kivitelezésekor (valamint azok gyors-jelentéseinek elkészítésekor) még nem áll rendelkezésre a számításhoz szükséges ferdeség adatsor (valamint a hidraulikai vizsgálatok eredményének mielőbbi ismertetése miatt a gyorsjelentés elkészítésekor nincs elegendő idő minden befolyásoló tényező figyelembe vételéhez), így a nyomásszondákból származtatott nyugalmi nyomásértéket vízoszlop magasságra átszámítva egy mélyebb pozícióhoz társítottuk (mivel ezek számításakor függőleges fúrást feltételeztünk). Ezek miatt kijelenthető, hogy az előzetes potenciáldiagramokon látható potenciálszint ugyan nem a valós képet mutatja, de a potenciálszinteket egymáshoz viszonyítva és összevetve a fúrás közben szerzett tapasztalatokkal és a geológiai adatokkal a potenciálszint mélységgel történő kis mértékű emelkedését sugallta.

A valós potenciálképet mindössze a többpakkeres észlelőrendszer telepítését követően kaptuk meg, amikor megláttuk, hogy a fúrás felső szakaszán kb. 1-2 m-rel a felszín alatt húzódik a nyugalmi nyomás, ami mélységgel kis mértékben növekszik, 1-2 m-rel felszín fölé emelkedik, majd mélyebben ismét csökken. Ezek alapján megállapítottuk, hogy a BAF–4 fúrás alsó és felső szakaszán is a néhány méterrel felszín alatt húzódó potenciálszint a jellemző, de a fúrás középső szakaszán a potenciálszint néhány méterrel magasabb, ezzel a felszín fölé emelkedik.

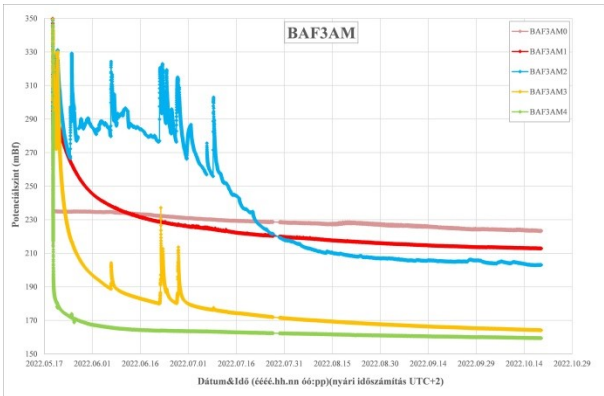
3. Üzemeltetés

A többpakkeres észlelőrendszerek üzemeltetése önmagában nem egy bonyolult feladat, a megbízható működés érdekében a rendszeres ellenőrzés és az időszakos karbantartási munkálatok szükségessége kiemelkedő fontosságú. Az üzembiztonság érdekében az új nyomásszondák, illetve adatgyűjtők működését a beépítés előtt a felszínen, több napi méréssel ellenőriztük, a pakkerek működését nyomáspróbákkal ellenőriztük. Ennek ellenére – az évekig tartó folyamatos üzemelés és a szélsőséges időjárási viszonyok miatt – még a leggondosabb üzemeltetés mellett sem lehet teljesen kizárni egy esetleges meghibásodás lehetőségét. A hosszútávú monitoring során beállított 30 perces

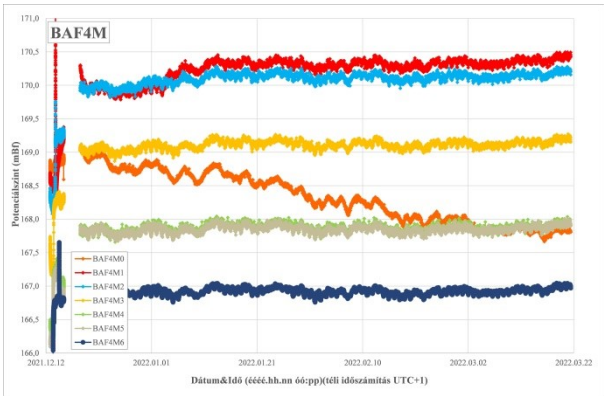
adatgyűjtési gyakoriság mellett 2-3 hetente célszerű kiolvasni a rendszert, a 20 millió adat tárolására alkalmas kapacitás ezt lehetővé teszi. Az adatok kiolvasása a DataCan szofverrel végezhető el, az akkumulátorok cseréjét és a felfújórendszer nyomásának ellenőrzését minden kiolvasás alkalmával célszerű elvégezni.



1. ábra: A BAF-3 fúrásba telepített többpakkeres észlelőrendszer adatai



2. ábra: A BAF-3A fúrásba telepített többpakkeres észlelőrendszer adatai



3. ábra: A BAF–4 fúrásba telepített többpakkeres észlelőrendszer adatai

Irodalom

[1] Korpai F., Andrássy M., Csicsák P., Darvas K.: Többpakkeres észlelőrendszer telepítése a BAF-3 fúrásba – Megvalósulási dokumentáció (2021. december)

[2] Csicsák P.: Többpakkeres észlelőrendszer telepítése a BAF-4 fúrásba – Megvalósulási dokumentáció (2022. április)

[3] Csicsák P., Illés D., Korpai F., Várkonyi D.: Többpakkeres észlelőrendszer telepítése a BAF-3A fúrásba – Megvalósulási dokumentáció (2022. október)

A BAF-3 és BAF-4 fúrások in-situ feszültségmérései overcoring módszerrel

In-situ Stress Tests with overcoring method in BAF-3 and BAF-4 drillings

ALBRECHT RICHARD GYULA[1], KERESZTÉNY BALÁZS[2],

[1] *Albrecht Richard Gyula (MECSEKÉRC Zrt., albrechtrichard@mecsekerc.hu)*
[2]*Keresztény Balázs (MECSEKÉRC Zrt., keresztenybalazs@mecsekerc.hu)*

Abstract

Compared to the previuos tests aimed to define the primary stress field in BAF, the IST overcoring tests were performed with different implementation and interpretation method The prerequisite of the test method is that the individual test sections are drilled by HQ core drilling section and (wireline) tool. In the case of boreholes that are basically drilled with the SK 4 ¼" coring system, the diameter change required more serious preparations, which made it difficult to carry out the test and subsequently entailed an extension of the drilled section, at the same time, in the case of sections drilled with the HQ coring-system, the test did not involve a diameter change, the implementation was simplified and became relatively quick.

The in situ measurement results were followed by nuneruos geomechanical laboratory tests. Through the information obtained in this way, provide those prameters which used to define the direction and magnitude of the primary horizontal stress field characteristic of the test sections.

Összefoglaló

A BAF-ban eddig történt mag-túlfúrásos primer feszültségtér megállapítására irányuló vizsgálatokhoz képest a BAF-3 és BAF-4 fúrásokban eltérő kivitelezési és értelmezési módszerrel végrehajtott, ún. IST overcoring vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálati módszer előfeltétele, hogy az egyes tesztszakaszok HQ magfúrási szelvényben és (wireline) szerszámmal mélyüljenek. Az alapvetően SK 4 ¼" rendszerrel mélyülő fúrások esetében az átmérőváltás komolyabb előkészülteket igényelt, ami megnehezítette a vizsgálat kivitelzését, és azt követően szelvénybővítéssel járt, ugyanakkor a HQ magfúró rendszerrel mélyülő szakaszok esetében a vizsgálat átmérőváltással nem járt, a kivitelezés leegyszerűsödött, és valóban viszonylag gyorsan kivitelezhetővé vállt.

Az in situ mérési eredményeket kőzetmechanikai laborvizsgálatok követték. Az így nyert informáicó révén nyílt lehetőség a helyszíni adatok további értelmezésére, az adott szelvényszakaszra jellemző primer horizontális feszültségetér irányának és nagyságának meghatározására.

Kulcsszavak: BAF, primer feszültségtér meghatározás, overcoring

Bevezető

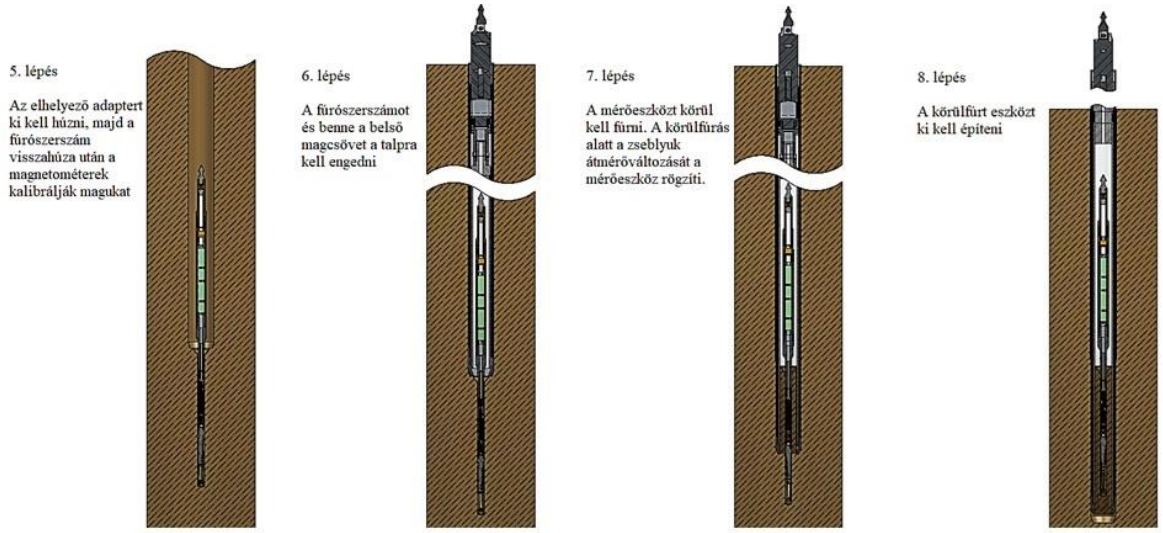
A Bodai Agyagkő Formációban in-situ feszültségtér meghatározására irányuló vizsgálatok, azon belül magtúlfúrásos (azaz overcoring) módszer alkalmazására már korábban is sor került. Először a BAF föld alatti kutató laboratóriumban (FAKL), az ALFA-1 vágat nyugati oldalkamráiban [1], majd a későbbiekben a középtávú kutatási programban a Bak-5, az Egéd-1 és Het-6 fúrásokban [2] történt overcoring vizsgálat. A középtávú program jelenlegi szakaszában viszont, a BAF-3 és BAF-4 fúrásokban végzett primer feszültségtér vizsgálatok a korábbiakhoz képest eltérő – Magyarországon még nem végzett – technikával történtek.

A BAF-3,-3A és BAF-4 fúrások kivitelezése és vizsgálata tárgyú megbízási szerződés keretében (Megbízó RHK Kft.) 2020-21-ben, a MECSEKÉRC Zrt. szakmai irányításával, az ausztrál Sigra Pty Ltd. kivitelezésében és a Rotaqua Kft. közreműködésével kerültek elvégzésre ezek a Magyarországon unikálisnak mondható vizsgálatok. Az eredmények feldolgozását és a laboratóriumi vizsgálatokat a Sigra Ltd., valamint a Kőmérő Kft. végezte.

A BAF-3 és BAF-4 fúrás két, ill. négy szakaszán nyílt lehetőségünk a speciális vizsgálat elvégzésre, melyeknek módszerét, eredményeit és tapasztalatait mutatjuk be.

1. Overcoring vizsgálatok elméleti és gyakorlati háttere

Az ún. In-situ Stressz-Tesztekhez (IST) a Sigra Pty. Ltd. (továbbiakban Sigra) szabadalmaztatott, speciális eszközét és technológiáját alkalmaztuk. Az IST egy olyan módszer, amely a körülfúrás/túlfúrás közben méri a deformációt egy 25-27 mm-es átmérőjű vezetőlyukba (zseblyukba) telepített szondával, a lyuk palástján, hat mérési pontban, ún. pinekkel, melyek fokban megadva: 0°; 60°; 120°; 30°; 90°; 150° kiosztásban helyezkednek el a szonda tengelyére merőlegesen. Az eszköz telepítését és a zseblyuk kifúrás a HQ (96/61 mm-es koronaátmérő és 89/78 mm-e átmérőjű fúrócsövek) gyorsmagszedős magfúró rendszerre tervezték. A különböző eszközök mozgatása a gyorsmagszedős rendszerrel történik (1. ábra), ami adott esetben jelentősen lerövidíti a mérés előkészületeinek időszükségletét. A módszer kivitelezése során ugyanis nincs szükség a szerszám többszöri ki-beépítésére, valamint a szonda ragasztással történő telepítésére, ezáltal kötési idő kivárására **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**.



1. ábra: IST overcoring vizsgálat műveleti sora

A mérés fontos lépése a szonda mágneses orientációja, amit a telepítését követően kell elvégezni a fúrószerszám szondától 3-5 m magasságba történő visszahúzásával. Az így szerzett adatok segítségével lehet a szonda-pinek, azaz deformáció irányát megállapítani.

A szonda (egyben a zseblyuk) körülfúrását követően további 0,5 m magfúrás indokolt, hogy a pinek által regisztrált deformáció értelmezéséhez szükséges kőzetmechanikai (reológiai) laborvizsgálatokat el lehessen végezni. A laborban meghatározásra kerül többek között a mintatest Young modulusa és Poisson tényezője. Ezekkel a paraméterekkel számítható a mért deformációból a primer horizontális feszültség magnitúdója [4].

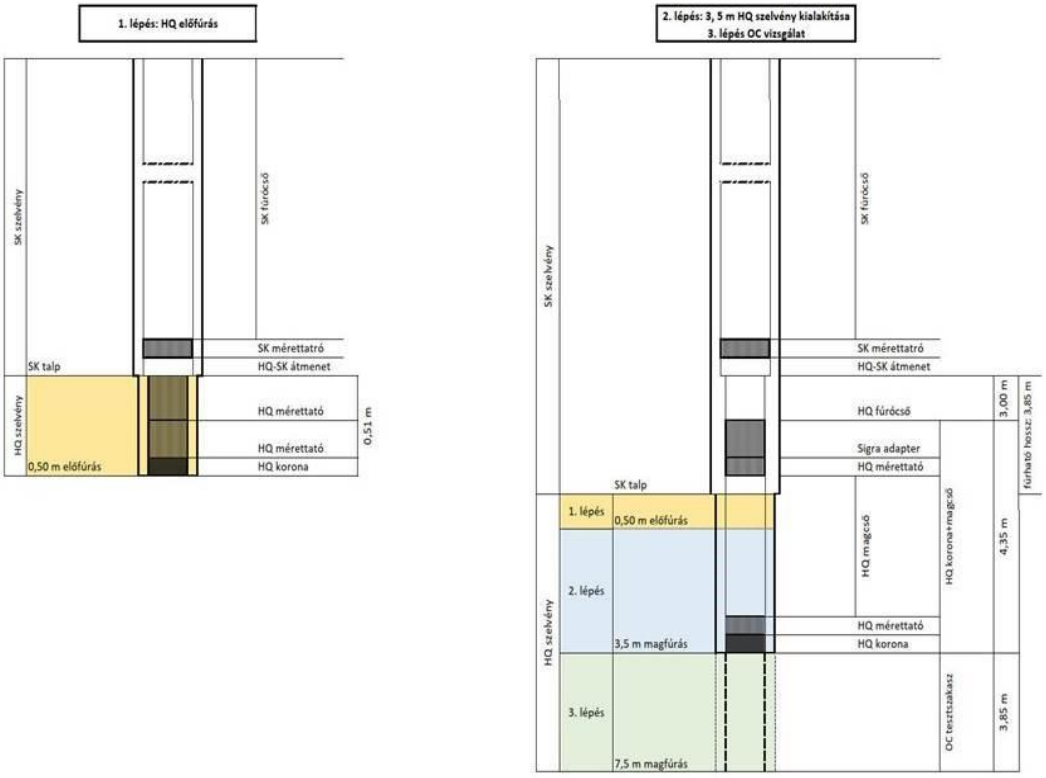
2. Overcoring vizsgálatok a BAF-3 és BAF-4 fúrásokban

A BAF-3 és BAF-4 fúrások overcoring méréseit az egyes vizsgálati kampányokra vonatkozó, az aktuális körülményekhez igazodó részletes műveleti utasítás szabályozta, összhangban a fúrások általános műveleti tervével, és az IST overcoring vizsgálatokra vonatkozó általános műveleti tervvel.

A vizsgálat elvégzésének fúrásműszaki feltételei az alábbiak **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**:

- A fúróberendezésnek alkalmasak kell lennie HQ gyorsmagszedős magfúrási technológia végzésére.
- Egyenes 3 méter hosszú HQ-3 magcső (vagy PQ) használata. A magcső végén gyorszáras reteszelő résznek kell lennie, nem menetes csatlakozónak. A hátsó adaptert ki kell cserélni egy Sigra által szállított egységgel, amely a vezető csapokat tartalmazza.
- Egyenes átjárható HQ fúrócsövek.
- A fúrás során a tesztet károsan befolyásoló rezonancia csökkentése érdekében a szerszám megfelelő központosításáról gondoskodni kell.
- Megfelelő öblítési paramétereket biztosítani kell. A vizsgálat során mérőrendszerrel ellátott, szabályozható szivattyút kell alkalmazni. Az öblítő nyomás maximum 60 bar lehet. A szivattyú teljesítményt 50-140 l/min között kell tartani.
- Megfelelő tisztaságú (minimális furadéktartalmú) öblítőfolyadék szükséges, hogy ne forduljon elő ebből adódó rezgés, és a furadék ne ülepedjen le a zseblyukban.
- Az előtolást pontosan kell szabályozni a mag-körülfúrás közben. A penetrációt 2 – 5 cm/perc között kell tartani.
- A kábeles gyorsmagszedő megfelelő, zökkenőmentes működését biztosítani kell annak érdekében, hogy a szerszámok ellenőrzött sebességgel futhassanak le rajta. A maximális sebesség 3 cm/sec.
- A könnyű hozzáférést a kábel tetejéhez biztosítani kell, hogy az IST szerszám ráhelyezhető (vagy rögzíthető) legyen a drótvezetékre és befusson a lyukba.
- A fúrótorony üzemeltetője, a fúrásiszemélyzet és a mérőszemélyzet együttműködése a helyszínen.

A vizsgálatot megelőzően, azokban az esetekben, ahol „normálrendű”, azaz SK 4 ¾”-os szelvényben (Ø 120,6/63 mm) történő magfúrás folyt, ott a megfelelő előkészületek elvégzését követően váltottunk HQ 3 ¾”-os magfúrási szelvényre (Ø 96/61 mm), A vizsgálatot HQ és SK fúrócsövekből álló kombinált szerszám rezsimmel végeztük. Előrefúrtunk ~10 m-t, hogy az átmérőváltásból adódó, vizsgálatot károsan befolyásoló szerszámrezonanciát minimalizáljuk (2. ábra),



2. ábra: BAF-4 fúrás BAF4/OC-01 vizsgálat előtti átmérőváltás műveleti sora

majd ezt követően kezdtük meg annak a vizsgálatra alkalmas szakasznak a keresését (általában 0,5-1,0 m-es fúrt szakaszokkal), ahol a fúrómag ép, hengeres, látszólag tektonikai behatásoktól mentes. A teszteket követően a HQ (96 mm) szelvényszakaszt felbővítettük SK (120,6 mm) méretre.

HQ szelvénnyel történő magfúrás esetében az előkészületi műveletek és ezáltal az időráfordítás is jelentősen lecsökkent. Megfelelőnek minősített kőzetszakasz harántolása esetén, azonnal kezdhető volt a vizsgálati sor (1. ábra).

1. táblázat: A BAF-3 és BAF-4 fúrásokban elvégzett IST overcoring mérések

Fúrás jele	*Vizsgálat sorszáma*	*Felvonulási kampány*	*Viszgálati szakasz, MD (m-m)*	*Szelvény átmérő a vizsgálat előtt*	*eredményesség*
BAF-3	BAF-3/OC-01	I.	318,30-319,00	SK	sikertelen
BAF-3	BAF-3/OC-02	II.	505,13-506,14	SK	sikeres
BAF-3	BAF-3/OC-03	II.	507,70-508,70	SK	sikeres
BAF-3	-	III.	-	HQ	-
BAF-4	BAF-4/OC-01	IV.	227,67-228,67	SK	sikertelen
BAF-4	BAF-4/OC-02	IV.	230,64-231,64	SK	sikeres
BAF-4	BAF4/OC-03	V.	614,15-615,15	HQ	sikertelen
BAF-4	BAF4/OC-04	VI..	615,15-616,15	HQ	sikeres
BAF-4	BAF4/OC-05	VI.	617,65-618,65	HQ	sikeres
BAF-4	BAF4/OC-06	VII..	727,38-728,38	HQ	sikeres
BAF-4	BAF4/OC-07	VII.	729,38-730,38	HQ	sikeres

Minden tesztszakaszon (felvonulási kampányban) minimum két egymást követő sikeres IST overcoring vizsgálat elvégzése volt a cél, a kapott adatok összehasonlíthatósága érdekében. A BAF-3 fúrásban az I. felvonulási kampányában, illetve a BAF-4 fúrásban az IV. felvonulási kampányban nem sikerült teljesíteni ezt a követelményt (1. táblázat). Az első esetben földtani okokból (a szonda telepítése tektonizált zónában került, a túlfúrás során jelentősen megsérült), a második esetben a BAF-4/OC-01 teszt során csak a Sigra levonulása után derült ki, hogy a szonda által rögzített adatok, szondahiba miatt nem feldolgozhatóak.

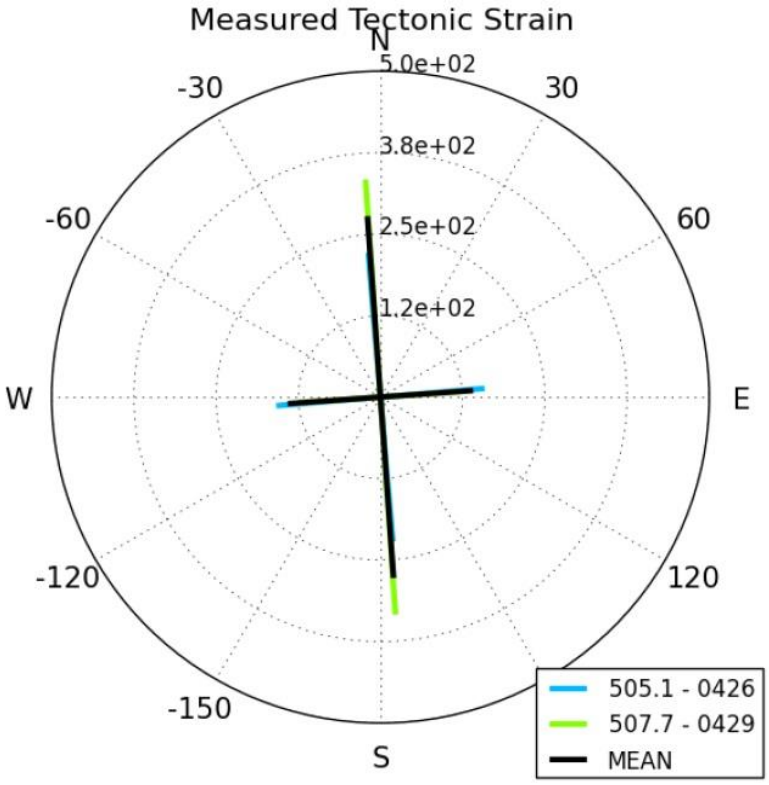
2.1. BAF-3 fúrás IST overcoring vizsgálatainak eredményei

A BAF-3 fúrás II. felvonulási kampányában két egymást követő sikeres vizsgálat történt. Az I. felvonulás alkalmával nem sikerült eredményes mérést elvégezni. A III. kampány alkalmával a fúrt kőzet volt alkalmatlan a 830-850 m között tervezett tesztelésre (1. táblázat). A sikeresen elvégzett BAF-3/OC-02; és BAF-3/OC-03 tesztek 505,13-506,14 m, valamint az 507,70-508,70 m közötti szakaszokon kerültek kivitelezésre, a BAF Dombói Tagozatában **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**.

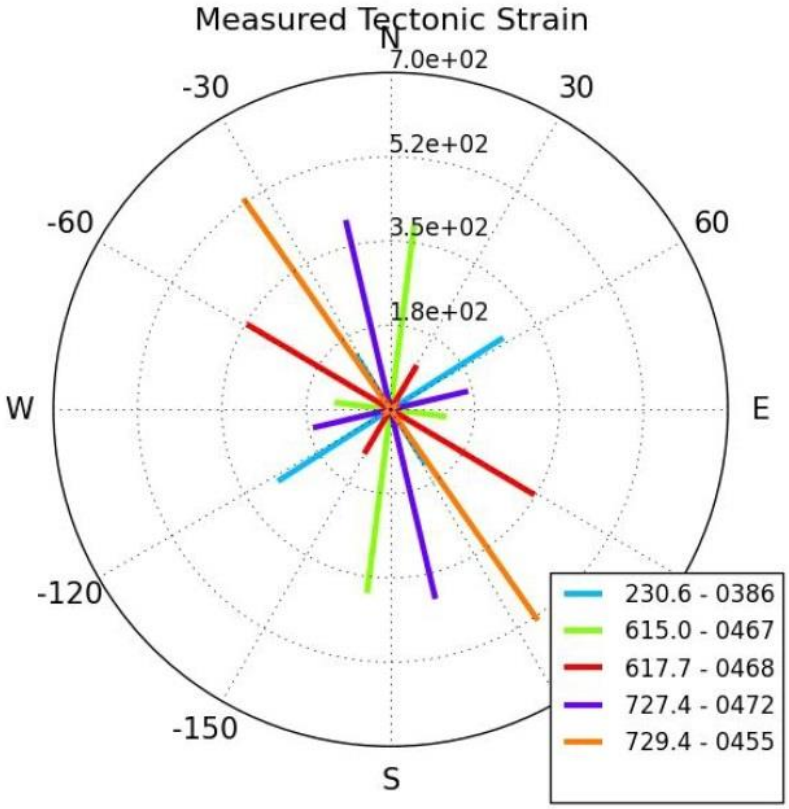
A mérések kiértékeléséből származó eredményeket a 2. táblázat és a 3. ábra mutatja be.

2. táblázat: BAF-3 IST overcoring vizsgálatok eredményei

Vizsgálat sorszáma	*mélységköz MD (m-m)*	σ_H *(MPa)*	σ_h *(MPa)*	*Horizontális főfeszültség iránya a mágneses északhoz viszonyítva (°)*
BAF-3/OC-02	505,17-505,67	17,44	15,28	-4,8
BAF-3/OC-03	507,70-508,20	22,46	15,24	-3,9
Átlag	505,0-508,0	19,95	15,26	-4,4



3. ábra: A BAF 3 fúrás 505-508 m közötti szakaszán kimutatott tektonikus alakváltozások és irányuk.



4. ábra: A BAF 4 fúrás vizsgálati szakaszian kimutatott tektonikus alakváltozások és irányuk.

2.2. BAF-4 fúrás IST overcoring vizsgálatainak eredményei

A BAF-4 fúrásban a 4 kijelölt szakaszon, összesen 9 db elvégzett vizsgálatból végül 7 esetben sikerült értékelhető in-situ feszültség adatok kinyeréséhez megfelelő adatok gyűjteni. A BAF-4/OC-01 teszt eszközhiba miatt, a BAF-4/OC-03 teszt a túlfúrt magon lévő törés miatt lett sikertelen. Ez utóbbi vizsgálatot a következő fogásban végzett sikeres teszttel pótoltuk. A BAF-4/OC-2 jelű teszt kivételével (BAF Dombói Tagozat) a vizsgálati szakaszok a Füzi Tagozatba estek **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**.

A mérésekből származó eredményeket a 3. táblázatban közöljük, valamint a 4. ábra mutatja be. Azonban az értelmezés jelen fázisában ezek még csak előzetes eredmények, a végleges feldolgozás a későbbiekben készül el [6].

3. táblázat: A BAF-3 IST overcoring vizsgálatok eredményei

Vizsgálat sorszáma	*mélységköz MD (m-m)*	σ_H *(MPa)*	σ_h *(MPa)*	*Horizontális főfeszültség iránya a mágneses északhoz viszonyítva (°)*
BAF-4/OC-02	230,64-231,14	15,12	10,93	57,5
BAF-4/OC-04	615,15-615,65	27,49	18,23	7,3
BAF-4/OC-05	617,65-618,15	29,18	19,20	-59,3
BAF-4/OC-06	727,38-727,88	35,38	16,86	-13,3
BAF-4/OC-07	729,38-729,88	45,88	18,68	-34,9

Irodalom

[1] Kovács L. (MECSEKÉRC RT.) 1999/A: A Bodai Aleurolit Formáció Minősítésének Rövidtávú Programja. Kutatási zárójelentés, 6. kötet: Kőzetmechanikai, geotechnikai vizsgálati program. Pécs, 1999. március. Kézirat. RHK Kft. Adattár.

[2] Kovács L. (BOMIX KFT.) 2004.: Értékelő jelentés a Bak-5, Eg-2 és Het-6 jelű fúrásokban elvégzett mag-túlfúrásos in situ feszültségmérésekről. Pécs, 2004. december 10. Kézirat. RHK Kft. Adattár. BAF04-A.4.1-3./1

[3] Hámos G., Keresztény B., Albrecht R., Sámson M., Mucsi P., Máthé Z., Kocsis G., Szabó R., Benő D. (MECSEKÉRC Zrt.), Bernáth Gy. (Geo-Log Kft.), Mező Gy., Földvári K. (Golder Zrt.), Andrássy M., Darvas K. (AGILA Kft.) (2022): A BAF-3 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése – Kézirat. Mecsekérc Zrt. Irattár, Pécs. RHK-N-007/21

[4] Gray I. (Sigra Pty Ltd.) 2020. Underground Mining Technology, J. Wesseloo (ed.) Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9876389-9-1

[5] Hámos G., Keresztény B., Albrecht R., Sámson M., Mucsi P., Máthé Z., Kocsis G., Szabó R., Benő D. (MECSEKÉRC Zrt.), Bernáth Gy. (Geo-Log Kft.), Mező Gy., Földvári K. (Golder Zrt.), Andrássy M., Darvas K. (AGILA Kft.), Mike Lemon, Ryan Preston (SIGRA LTD), Maros Gy. (SZTFH), Kovács L., Rátkai O., Gelencsér K., Mázik K., Gál V. (Kőmérő Kft.), Fedor F. (GEOCHEM Kft.) 2022: A BAF-4 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. – Kézirat. Paks, RHK Kft. Adattár. RHK-H-007/22M01

[6] Gray I. (Sigra Pty Ltd.) 2022. In situ Stress Testing on Borehole BAF-4. preliminary riport

A BAF-3, -3A és BAF-4 mélyfúrások kőzetanyagának ásvány-kőzettan, geokémia és korvizsgálati eredményei

Results of petrographical, geochemical and geochronological studies of BAF-3, -3A, BAF-4 exploration drilling sections

MÁTHÉ ZOLTÁN, MUCSI PÉTER[1]

[1]*Mecsekérc Zrt., mathezoltan@mecsekerc.hu, mucsipeter@mecsekerc.hu*

Abstract

The „gray sandstone" (Kővágótöttösi Sandstone Member) and the" variagated sandstone" (Bakonyai Sandstone Member) has fairly similar detrital mineral composition with exception of pyrite and hematite content. The original mineral composition and the matrix of the Gyűrűfűi Lapilli Tuff exposed in the BAF-4 borehole underwent a large scale alteration: albitization, potassic, K-silicate alterations. The mineral composition of the two alkaline basalt dykes (quartz, albite, illite, chlorite, calcite) also indicates strong alteration processes (albitization, argillitization, carbonate alteration), however the amphiboles (kaersutite) are still fresh in the lower situated dyke in the BAF-4 borehole. The main rock-forming minerals in the Boda Claystone Formation (BCF) sections of the boreholes are the following: clay minerals (illite is dominant, minor chlorite always present) authigenic albite, quartz (detrital component), carbonates (calcite, dolomite) and hematite. Based on the quantitative ratios of the main mineral phases and thin-section analysis, the rock types that make up the formation are the following: claystone, albitolite, aleurolite, dolomite and sandstone. The dominant mineral phase in each rock type is the authigenic albite, which gradually disappears only in the transition zone on the overlying side of the formation. The prominent minerals by the main constituent are anhydrite and chlorite formed during secondary processes in the BCF section of the BAF-3A drilling. They are present in the matrix, in the albitic pores, as well as in the multiphase vein fillings, and they also form independent veins. U-anomalies related to redox fronts occures in the BCF section of the lowert part of the BAF-4 borehole (825,74m: 151,0 ppm U content). The most important difference in the mineral composition of the Cserdi Formation and the BCF is the lack of authigenic albite in the Cserdi section.

Összefoglaló

A „szürke homokkő" (Kővágótöttösi Homokkő Tagozat) és a „tarka homokkő" (Bakonyai Homokkő Tagozat) a pirit és a hematit kivételével meglehetősen hasonló törmelékes ásványos összetétellel bír. A BAF-4 fúrásban feltárt Gyűrűfűi F. eredeti ásványos összetétele és az alapanyaga nagymérvű átalakuláson esett át, albitosodás, kálimetaszomatózis, kovásodás. A BAF-4 fúrás két alkáli bazalt telérének ásványos összetétele (kvarc, albit, illit, klorit, kalcit) szintén erőteljes átalakultásra utal (albitosodás, agyagosodás, karbonátosodás), azonban az alsó telérben az amfibolok (kaersutit) még üdék. A fúrások Bodai Agyagkő Formáció (BAF) szelvényeiben a fő kőzetalkotó ásványok: agyagásványok (uralkodó az illit, mellette a klorit mindig jelen van), autigén albit, kvarc (törmelékes alkotó), karbonátok (kalcit, dolomit) és hematit. A fő ásványfázisok mennyiségi arányai és a vékonycsiszolatos vizsgálatok alapján a formációt felépítő kőzettípusok: agyagkő, albitolit, aleurolit, dolomit és homokkő. Mindegyik kőzettípusban meghatározó ásványfázis az autigén albit, csak a formáció fedő felőli átmeneti zónájában tűnik el fokozatosan. A BAF-3A fúrás BAF szelvényének a fő alkotók mellett feltűnő ásványa a másodlagos folyamatok során képződött anhidrit és klorit. Jelen vannak az alapanyagban, az albitos pórusokban, valamint a többfázisú érkitöltésekben, és önálló ereket is képeznek. A BAF-4 fúrás BAF szelvényének alsó szakaszán a redoxfrontokhoz kapcsolódó U-anomáliák vannak (825,74 m, 151,0 ppm U). A Cserdi Formáció és a BAF ásványos összetételében a legfontosabb különbség az autigén albit hiánya a cserdi szelvényben.

Kulcsszavak: Ny-Mecsek, perm, Bodai Agyagkő Formáció (BAF), Cserdi Formáció, anhidrit

Bevezető

A kutatási időszak során lemélyített fúrások közül, BAF-3 és a -3A fúrások egy fúráspárt alkotnak, először a BAF-3 mélyfúrás készült el, 845,18 m talpmélységgel. Ezt követte a BAF-3A fúrás kivitelezése, 800,0 m-ig teljes szelvénnyel, majd maggal mélyült 1319,02 m-ig. A fúráspár által feltárt rétegsor: 2,02 m negyedidőszaki üledék, amely a 343,08 m-ig harántolt Kővágószőlősi Homokkő Formáció (későbbiekben KHF) rétegsorára települ. A feltárt KHF szelvénye 108,98 m hosszban tartalmazza a Kővágótöttösi Homokkő Tagozat („szürke homokkő") képződményeit, majd a BAF-3 fúrás 234,1 m-t haladt a Bakonyai Homokkő Tagozat („tarka homokkő") törmelékes összletében. A fúráspár 973,92 m hosszban harántolta a Bodai Agyagkő Formációt (későbbiekben BAF). A BAF-4 mélyfúrás 8,08 m-nyi kvarter üledék alatt mintegy 843,0 m hosszban tárta fel a BAF-ot, mely a Cserdi Formációra települ, a Cserdi F. alatt a Gyűrűfűi Lapillitufa Formációt harántolta a fúrás 851,41 és 901,14 m között. A BAF, a Cserdi és a Gyűrűfűi Formáció érintkezése tektonikus. A BAF-4 fúrás rétegsorának érdekessége a 173,67-174,59 és 426,71-427,71 méterközökben harántolt két sötétszürke színű magmás kőzettelér. A vizsgálatok célja a megismert képződmények részletes ásvány-kőzettani és geokémiai jellemzése és összehasonlítása a korábbi adatokkal.

1. Vizsgálati módszerek, mintázás

A fúrások kőzetanyagának ásvány-kőzettani, geokémiai és kor vizsgálata a BAF korábbi kutatási programjai során alkalmazott vizsgálati csomagok szerint került kivitelezésre, „AV" alap, „AV" bővített és „AV" kiegészítő vizsgálati csomag. Az „alapcsomag" vizsgálati eljárásai (vékonycsiszolatos leírás, XRD, DTA, teljes kémiai elemzés, nyomelemzés) lehetővé teszik a vizsgált minta „klasszikus" ásvány-kőzettani és geokémiai jellemzését. A „bővített" és „kiegészítő" csomag" az alapcsomag kiegészítése azokkal a vizsgálati eljárásokkal, melyek a fentieken túl lehetővé teszik a kőzetalkotó ásványok (kiemelten az agyagásványok, földpátok, karbonátok) szerkezetének, kémiai összetételének pontosabb megismerését (agyagásvány szeparátumok komplex XRD vizsgálata, elektronmikroszonda, transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálat [TEM]), a képződmények átalakulási fokának (diagenezis mértékének) meghatározását (illit és klorit kristályossági indexek mérése) és korának (K-Ar korvizsgálat) megismerését. A kőzetalkotó ásványok mellett a tektonikai zónákat, litoklázisokat kitöltő ásványegyüttesek vizsgálatára is sor került (karbonát kitöltések kora, stabilizotóp mérések, folyadékzárványok mikrotermometriai mérése, katódlumineszcencia), azonban számuk jóval kisebb, mint a kőzetmintákon elvégzetteké. A begyűjtött minták a BAF esetében reprezentálják a makroszkóposan elkülöníthető alap kőzettípusokat, a mintaszámok visszatükrözik ezek mennyiségi viszonyait. A KHF és a Cserdi F. esetében a vizsgált minták a finomabb szemcseméretű üledékeket képviselik (agyagkő, aleurolit, maximum középszemű homokkő rétegek). A BAF-4 fúrás magmás kőzetteléreit egy-egy jellegzetes, míg a Gyűrűfűi Formációt 2 db minta képviseli.

2. Eredmények

2.1. Ásvány-kőzettan

2.1.1. Kővágótöttösi Homokkő Tagozat

A tagozatból vizsgált („szürke homokkő") két aprószemű homokkő, egy agyagos, aleuritos finom-, aprószemű homokkő és egy tektonikusan erősen igénybevett agyagkő meghatározó ásvány fázisai a kvarc, földpátok, agyagásványok, karbonátok (1. táblázat). A törmelékes kvarc mennyisége viszonylag szűk tartományban változik. A vékonycsiszolatos vizsgálatok szerint egyenes és hullámos kioltású, valamint mono- és polikristályos kvarc egyaránt jelen van. A szemcsék egy részének piroklaszt eredetét jelzi a gyenge töredezettség és a szilánkos törés. A szintén törmelékes eredetű földpátok, plagioklász és K-földpát, összmennyisége tágabb határok között változik. A 33,6-33,8 méterköz agyagos, aleuritos finomszemű homokkő mintájában az XRD vizsgálat nem mutatott ki plagioklászt, csak K-földpátot (19 tömeg%), ellenben a másik két mintában 25 tömeg%-ot. Összetételükre a szim-

metrikus kioltási zónában mért maximális kioltási szög alapján albit-oligoklász adódott a szemcsék többségében. A K-földpát mennyisége a kvarchoz hasonlóan egységesebb képet mutat, ortoklász és mikroklin egyaránt jelen van. A léces, táblás gyengén közepesen koptatott földpát szemcsékre a változó mértékű bontottság, átalakulás jellemző, szericitesedés agyagosodás. Az agyagásvány összetételre, melynek mennyiségi arányai kőzettípustól függően széles tartományban mozognak, az illit, szericit és a klorit jellemző (táblázatban a fehércsillám összefoglaló név magába foglalja a muszkovitot, szericitet és az illitet). A tektonikailag erősen igénybevett minta (104,45-104,65 m), mely erősen dolomitosodott, kivételével a karbonát tartalom minimális. A tagozat reduktív jellegéből adódóan a minták többségében a pirit is megjelenik, a DTA szerint maximuma 1,7 tömeg%. A főalkotók mellett a vékonycsiszolatos vizsgálatok még a következő ásvány fázisok jelenlétét igazolták, melyek állandó alkotói a vizsgált mintáknak: csillámok, klorit, opakásványok, cirkon, apatit, rutil, staurolit, szervesanyag törmelék. Kőzettörmelék szemcsék: leggyakoribbak a kvarcit és a változatosan átkristályosodott, átalakult savanyú vulkanit szemcsék, ezek mellett megfigyelhetők a különböző metamorfit (gneisz, csillámpala), gránit és jóval kisebb mennyiségben a plagioklász lécekből álló bázisos kőzetszemcsék.

2.1.2. Bakonyai Homokkő Tagozat

A vizsgált 12 db minta a tagozat változatos színű (sötétszürke, szürke, világosszürke, fakóvörös, vöröses barna) és szemcseméretű (agyagos aleurolit; finomhomokos aleurolit; agyagos, aleuritos finomszemű homokkő; aprószemű homokkő; apró-középszemű homokkő; kavicsos homokkő) képződményeit reprezentálja. A fázisanalitikai vizsgálatok által változó arányban kimutatott fő kőzetalkotó ásványfázisok: kvarc, földpátok, agyagásványok, karbonátok és hematit (1. táblázat). Az egyik meghatározó törmelékes ásványfázis a kvarc, mennyisége az XRD felvételek szerint 28 és 48 tömeg% között változik. Egyenes és hullámos kioltású, valamint mono- és polikristályos kvarc egyaránt jelen. A szemcsék egy része gyengén töredezett, szilánkosan törött, ami piroklaszt eredetre utal. A másik meghatározó törmelékes ásvány a földpát (15-51 tömeg%), a finomabb szemcseméretű kőzettípusok földpát-tartalma számottevően alacsonyabb, míg a homokkövekben összmennyisége eléri, vagy meghaladja a kvarcét. Plagioklász és K-földpát egyaránt jelen van, azonban mennyiségük erősen ingadozik, ez különösen igaz a K-földpát esetén. Az uralkodó földpát minden esetben a plagioklász, alapvetően albit-oligoklász összetételű. A K-földpát együttesben dominál az ortoklász, mellette a mikroklin alárendelt. Átalakulásuk (agyagosodás, szericitesedés) változó, csaknem üde, kevésbé bontott és erősen átalakult szemcse egyaránt megfigyelhető. A fázisanalitikai vizsgálatok szerint az agyagfrakciót két fázis uralja, az illit és a klorit, meghatározó az illit. A komplex agyagásvány vizsgálatok keretében elvégzett kezelések kismennyiségű szmektit jelenlétét is igazolták, mely lehet önálló fázis vagy az illitben és a kloritban közberétegzés. Az 1. táblázatban szereplő fehércsillám kategória a törmelékes muszkovit és az illit mellett magába foglalja a szericitet is, amely a vékonycsiszolatos vizsgálat szerint a vizsgált homokkő minták agyagásvány frakciójának meghatározó tagja. Két megjelenési formája különíthető el: (1) földpát szemcsék átalakulási terméke, aprószemcsés, (2) jóval nagyobb mennyiséget képvisel a törmelékes szemcsék közötti tér döntő hányadát kitöltő nagyobb szemcseméretű szericit fázis. Az utóbbi az illittel és a klorittal a homokkövek meghatározó kötőanyaga. A vékonycsiszolatos vizsgálat és a CO_2-tartalmak alapján a karbonát állandó alkotója a mintáknak, mennyisége a vizsgált minták többségében az XRD és DTA kimutatási határértéke alatti. Azonban tagozat felső 40 m-es szakaszán jelen van a karbonát, elsősorban a dolomit (158,14-158,29 m, 17 tömeg% dolomit). A homokkő mintákban a törmelékszemcsék közötti pórustér alárendelt hányadát tölti ki. A 336,87-336,94 méterközből gyűjtött kavicsos homokkő mintában a szemcseközi karbonát az elektronmikroszonda elemzés szerint dolomit, Mn- és Fe-tartalommal. A vörösbarna szín különböző árnyalatait mutató oxidatív jellegű rétegekben az XRD vizsgálat 3 és 5 tömeg% közötti értékben hematitot is kimutatott. A termikus és az elektronmikroszonda vizsgálat néhány mintában minimális mennyiségű pirit és kalkopirit jelenlétét is igazolta. A főalkotók mellett állandó törmelékes alkotói a vizsgált mintáknak: csillámok (muszkovit, biotit), klorit, opakásványok, cirkon, apatit, rutil, staurolit, monacit. Kőzettörmelék szemcsék: leggyakoribbak a kvarcit és a változatosan átkristályosodott, átalakult savanyú vulkanit szemcsék, rajtuk kívül megfigyelhetők a különböző metamorfit (gneisz, csillámpala), gránit és jóval kisebb mennyiségben a plagioklász lécekből álló bázisos kőzet szemcsék.

2.1.3. Bodai Agyagkő Formáció

A három fúrás által ~1813,0 m összhosszban feltárt BAF ásvány-kőzettani jellemzése 77 db minta (ez 23 m átlagos mintavételi távolságot jelent) vizsgálati adatain alapul. A minták reprezentálják a makroszkóposan elkülöníthető kőzettípusokat a szelvényekben harántolt gyakoriságuk figyelembevételével, valamint az egyedi kőzettípusok is mintázásra kerültek. A BAF-3 magfúrással, a BAF-3A teljes szelvénnyel (2 méterenkénti furadék mintavétellel) harántolta a kővágószőlősi antiklinális központi zónájában korábban már több fúrásban (BAT-4, Delta-9, BAF-2) feltárt, vizsgált ún. reduktív rétegszakaszt.

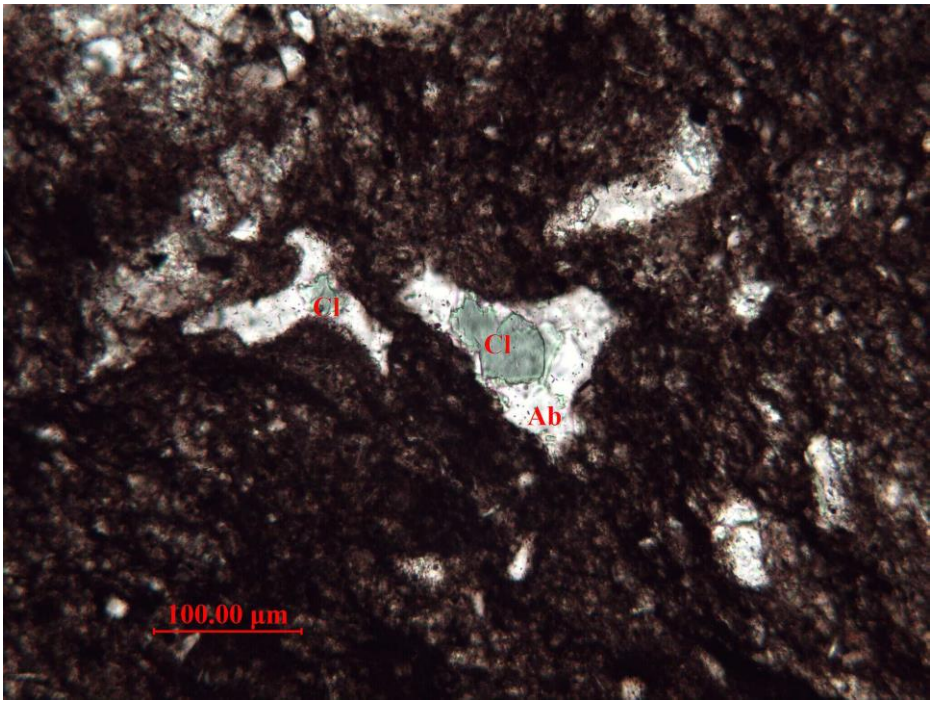
A fázisanalitikai vizsgálatok eredményei alapján a fő ásványfázisok: agyagásványok, kvarc, földpátok, karbonátok, hematit. Uralkodó agyagásvány az illit, mennyisége kőzettípusonként és rétegtani helyzetétől függően széles sávban mozog, XRD és DTA kimutatási határértéke alatt és 48 tömeg% között. Szerkezetének és kémiai összetételének megismerése céljából mindhárom fúrás két-két mintájából transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálatok készültek. A minták reprezentálják az „átlagos" nem bontott agyagköveket, a reduktív réteget (BAF-3 fúrás) és a tektonikai zónák tektonikailag igénybevett átalakult agyagköveit. A BAF-3A fúrás „átlagos" agyagkövét képviselő mintában (1252,13-1252,30 m), mint uralkodó agyagfázis, az illit jellemzői: hk0 vetületű felvételeken polikristályos jellegű, a kristályok 200-550 nm laterális kiterjedésűek, a diffrakciós gyűrűket diszkrét maximumok alkotják, turbosztratikus szerkezetre utaló folytonos szórás nincs. A kristálytani c-tengelyre merőlegesen léces megjelenésű, a lécek vastagsága 5-20 nm. Kémiai összetételének jellemzői: a tetraéderes térben a Si 3,2 feletti értéket képvisel képletegységenként, az oktaéderes térben Al > Mg > Fe van jelen, a vas mennyisége 0,2 képletegységenként. A rétegtöltést alapvetően a K egyenlíti ki, emellett kisebb mennyiségű H_3O^+ is feltételezhető.

Példaként az egyik EDS mérésből számolt illit képlete: $\mathbf{K_{0,3}Na_{0,3}(Mg_{0,33}Fe_{0,17}Al_{1,5})[Al_{0,27}Si_{3,73}]O_{10}(OH)_2}$, amennyiben H_3O^+ is azonosításra került, akkor a képlet következőképpen módosul: $\mathbf{K_{0,71}Na_{0,04}(H_3O)_{0,21}(Mg_{0,31}Fe_{0,19}Al_{1,5})[Al_{0,65}Si_{3,35}]O_{10}(OH)_2}$ [4]. Ez az illit típus a másik két fúrás mintáiban - beleértve a reduktív réteget - is jelen van [4], [5]. A vizsgálatok során egyaránt kimutatásra került a BAF-4 és a BAF-3A fúrás üde és tektonikailag igénybevett agyagköveiben az illit-szmektit kevertszerkezet [4], [5]. Az illit mellett másik meghatározó agyagfázis a klorit, a minták többségében kimutatásra került, mennyisége mindig alacsonyabb az illitnél, egyedül a BAF-3 fúrás reduktív rétegének mintájában éri el az illitét (1. táblázat). A TEM vizsgálatok a fúrások mindegyik mintájában azonosították, példaként a BAF-3 fúrás reduktív rétegének kloritjának jellemzői: Si-(Mg, Al)-Fe összetételű. A hk0 vetületű diffrakció alapján polikristályos, enyhén diffúz szórást mutat, a világos látóterű felvételeken inkább léces alakú, az egyedi kristályok laterális kiterjedése 200 nm alatti. Kémiai összetételében a Mg és az Al közel megegyező mennyiséget képvisel és jelentős a Fe-tartalma is (4-6 atom%).

A K és a Na 1 atom% alatti, a Ca nyomnyi mennyiségben előfordulhat [9]. A „tiszta" klorit mellett klorit-vermikulit (BAF-4 fúrás 406,71-406,85 m) kevert szerkezet is azonosításra került [5]. A formációra általánosan jellemző kőzetalkotó klorit fázis mellett a BAF-3A fúrás 953,45-953,56 méterközéből vizsgált mintában – aleuritos, albitos („albitfészkes") agyagkő – az albitos pórus kitöltések közepén, valószínűleg utolsó kiválásként, is megjelenik egy saját alakú lemezes klorit fázis. A lemezekre zöld pleokroizmus és barna interferenciaszín jellemző (1. ábra). Az elektronmikroszonda elemzések szerint méretük több tíz mikrométer és kémiai összetételükre közepes Mg (10% körüli) és Fe (20% körüli) tartalom jellemző, ez alapján a klinoklór és a chamosit közötti átmeneti összetételűek [11]. A BAF-3A fúrásszelvény alsó harmadára jellemző a klorit újabb típusának a megjelenése. A tektonikailag igénybe vett kőzetek szétesési felületein megjelenő méregzöld színű klorit, valamint a több ásvány alkotta változó vastagságú erekben azonosított klorit. Az 1230,72-1230,75 és 1251,37-1251,42 mélységközökben megjelenő erekben makroszkóposan is felismerhető klorit fázisok kémiai összetételének meghatározására elektronmikroszonda vizsgálatok készültek. Mindkét esetben a kloritokat alacsony Mg (6-8%) kis (12-17%) és közepes (17%) Fe tartalom jellemezte, ami alapján sem klinoklórként sem chamositként nem határozhatók meg, valószínűleg a két ásvány közötti átmenetek [11]. Az agyagásványok mellett a másik meghatározó fő kőzetalkotó ásványfázis a plagioklász, mennyisége a minták XRD felvételei szerint 6 és 68 tömeg% szélsőértékek között változik. Két gene-

tikai típusa különíthető el: törmelékes és autigén eredetű. Az elszórva megjelenő maximum finomhomok szemcseméretű törmelékes eredetű plagioklászok változó mértékben bontottak, jellemzően albit-oligoklász összetételűek. Az autigén eredetűek a nagyszámú változatos kőzettani jellegű mintában elvégzett összetételi (elektronmikroszonda) vizsgálatok szerint a sztöchiometrikus albit összetételével megegyező kémiai összetételt mutatnak. A szöveti, szerkezeti vizsgálatok alapján (vékonycsiszolatos vizsgálatok) a következő megjelenési formái különíthetők el:

- Átitatódásként való jelenlét (1. típus), „cementálja" a képződményt (kötőanyag). Az eredeti pórustérfogatot eltünteti, kitölti, vagy egészen minimálisra csökkenti. Az elektronmikroszonda vizsgálatok szerint a kristályok mérete 10 μm körüli, a TEM mérések szerint még a 2 mikronnál kisebb frakcióban is jelen van. Mennyisége kőzettípusonként széles határok között változik.
- A 2. megjelenési formája az "albitos fészkek" (ezeket szakmailag szabatosabban albitos pórus- vagy üregkitöltéseknek kellene nevezni), melyekben a vékonycsiszolatos vizsgálatok szerint táblás, léces, poliszintetikusan ikerlemezes kristályokként van jelen a pórusok falán. A vékonycsiszolatok mikroszkópi vizsgálata során a „fészkek" jelentős hányadának alakja a makroszkóposhoz képest egyértelműbb, határozottabb és olyan feltűnő jellegzetességekkel bír, melyek egyértelműen mutatják a genetikájukat. Ezek a jellegzetes alakok a következők: csillag, torzult csillag; négyzet, torzult négyzet, háromszög és „V" alak, melyek egyértelműen bizonyítják, hogy ezek eredetileg displacive kősókristályok voltak. Ezek egyik jellegzetes alakja az úgynevezett „hopper halite". A képződött kősókristályok visszaoldódtak és a helyüket tölti ki a fészkek jellegzetes ásványegyüttese.
- A 3. típusa a változatos ásványi összetételű tektonikai zónákat és litoklázisokat kitöltő erekben való jelenlét.
- A 4. típus az albitból és karbonátból álló gipsz és anhidrit utáni pszeudomorfózák, melyek alakja kisméretű gumók, gumócsoportok, enterolikus szerkezetek, megnyúlt sokszög alakú metszetek a makroszkóposan kisszámú vagy „albitos fészket" egyáltalán nem tartalmazó kőzettípusokban.



1. ábra: Klorittal és albittal kitöltött torzult csillag, háromszög alakú pórusok aleuritos agyagkőben, a BAF-3A jelű fúrás 953,45-953,56 m közötti szakaszában.

A kvarc, mint uralkodó törmelékes frakció, mennyisége az XRD vizsgálat alapján széles határok között változik, <kimutatási határérték-28 tömeg%. Poli- és monokristályos kvarc egyaránt megfi-

gyelhető. Erekben is található monokristályos kvarcfázis alaktalan foltokban és tömegesen, a BAF-3A fúrás tektonikailag igénybevett 1251-1271 m közötti szakaszában. A vékonycsiszolatos vizsgálatok szerint a karbonát a BAF állandó alkotója, mindig jelen van változó mennyiségben, még azokban a mintákban is, amelyekben az XRD és a DTA nem mutatta ki. Ezt megerősítik a meghatározott CO_2 koncentrációk is. Az össz karbonát maximuma 56 tömeg%, a magas kiugró értékek a dolomit esetén jelentkeznek. A vizsgált minták többségében kalcit és dolomit egyaránt jelen van. A szöveti vizsgálatok szerint, a karbonát több megjelenési formában van jelen:

- az alapanyag karbonátja, két típusra osztható: 1. finomszemcsés karbonát, mely átitatja a kőzetet, 2. az alapanyagban elszórva megjelenő, közel rombusz alakú kristályok, illetve ezekből álló kristálycsoportok;
- az albitos fészkekben a karbonát három típusa figyelhető meg, 1. aprószemcsés karbonát, mely a földpátok (albit és K-földpát) közötti teret tölti ki, 2. szabályos, közel rombusz alakú kristályok, melyek az albitok között jelennek meg, 3. pátos karbonát, mely döntően a karbonát által uralt „albitos fészkekre" jellemző (a pórusok közepét töltik ki;
- a repedéseket, litoklázisokat kitöltő változatos megjelenésű karbonát.

A 40 tömeg% feletti dolomit értékek a közbetelepülő dolomit rétegeket reprezentálják. Ezen rétegek uralkodó ásványfázisát adó dolomit kristályok metszeteinek alakja visszatükrözi a genetikájukat. A kristályok többségénél egyértelműen felismerhetők a kősó jellegzetes kristályformájának, a „Hopper halite", jellegzetes metszetei, ami egyértelműen bizonyítja a dolomit rétegek másodlagos eredetét. Ezek a rétegek kősó rétegek, kiválások voltak eredetileg, majd visszaoldódtak és helyettük képződtek a jelenlegi dolomit rétegek. A dolomit kristályok kősó utáni pszeudomorfózák. A hematit a reduktív réteg kivételével szintén egyike BAF fő ásványos alkotóinak, maximális koncentrációja az XRD vizsgálatok alapján 11 tömeg%. A formáció vörösbarna színének az okozója. A vékonycsiszolatos vizsgálatok szerint eloszlása nem egyenletes, jelentős hányada az alapanyagban jelenik meg átitatódásként, emellett a kőzetet átjáró (átszövő) érrendszert is képez. A K-földpát állandó, de nem fő alkotója a BAF-nak. A plagioklászhoz hasonlóan két genetikai típusa különböztethető van: törmelékes és autigén eredetű. Az autigén sztöchiometrikus összetételű K-földpát az „albitos fészkekben" (általában a pórusok közepén, mint utolsó kiválás), illetve a kőzet alapanyagában figyelhető meg. A BAF-3A fúrás rétegsorának feltűnő ásványa az anhidrit, a vékonycsiszolatos és elektronmikroszonda vizsgálatok a begyűjtött minták felében igazolták jelenlétét. Változatos megjelenés jellemzi: átitatódás, albitos fészkekben és erekben való megjelenés. Legfeltűnőbb a 894,01-894,12 méterköz mintájában, ahol az albitos agyagkövet egy változó vastagságú, megszakadozó (csillagszerű alakzatokat formáló) döntően anhidrit anyagú érrendszer járja át. A pirit a BAF-3 fúrás által feltárt reduktív réteg jellegzetes ásványa (a DTA 1,6 tömeg%-ban jelezte). Elszórva csaknem mindhárom fúrásszelvényben észlelhető a reduktív rétegen kívül is. Az anhidrithez hasonlóan részletesebben kell tárgyalni a baritot is. Mennyiségileg nem jelentős, azonban a vékonycsiszolatos és mikroszonda vizsgálatok a vizsgált minták többségében kimutatták változatos megjelenési módban, jelen van az „albitos fészkekben", önálló ereket képez vagy tagja az összetett ásványparagenezisű ereknek. A vékonycsiszolatos és a mikroszonda vizsgálatok a következő ásványszemcséket azonosították még, mint mellékes törmelékes alkotókat: **rutil, apatit, titanit, ilmenit, cirkon, klorit, biotit, muszkovit, monacit, xenotim, turmalin**. Közülük a leggyakoribbak a csillámok, elsősorban a muszkovit.

2.1.4. Cserdi Formáció

A formációnak a BAF-4 fúrás által feltárt vékony szelvényét 4 minta reprezentálja, melyek közül 1 mintából csak elektronmikroszonda vizsgálat készült (844,44-844,53 m). A vizsgálatok célja az ásványos összetétel meghatározása és összevetése a felette települő BAF-al, valamint a makroszkópos jellegek alapján megállapított fedő felőli határának a pontosítása. A fázisanalitikai vizsgálatok szerint uralkodó fázis a kvarc (33-50 tömeg%). Két típusa különböztethető meg: (1) Törmelékes eredetű szemcsék (szemcseméret aleurittól a középszemű homokig terjed), abszolút uralkodó. Egyenes és hullámos kioltású szemcse egyaránt jelen van, inkább jellemző a hullámos kioltás. A szemcsék egy része töredezett, szilánkosan törött, ami piroklaszt eredetre utal. Monokristályos és polikristályos szemcsék egyaránt jellemzőek. (2) A kőzetet átjáró vékony ereket kitöltő kova anyag. A 847,30-850,04 méterköz 3 mintájában az XRD felvételek szerint a kvarc mellett a másik meghatározó ásványos alkotó a föld-

pát, két mintában (847,30-848,13 méterköz) a kimutatási határérték felett csak plagioklász került kimutatásra, míg a 849,92-850,04 m-es mintában megegyezik a plagioklász és a K-földpát mennyisége (22, illetve 23 tömeg%). A felső két mintában is van K-földpát a vékonycsiszolatos vizsgálat alapján. Törmelékes alkotók, léces, táblás kristályok, változó mértékben bontottak, átalakultak: agyagosodás, szericitesedés, karbonátosodás jellemző. A 844,44-844,53 m-ből való mintában az elektronmikroszonda vizsgálat során elemzett plagioklászok a sztöchiometrikus albit összetételt adták, míg a K-földpátok a sztöchiometrikus szanidinét. A Na térkép szerint az albit mennyisége jelentős lehet [5]. Mindkét fázisanalitikai vizsgálat szerint az agyagásvány frakciót abszolút uralja a fehércsillám, vagyis az illit, mellette szericit és törmelékes muszkovit van jelen. A klorit a két módszer kimutatási határértéke alatt van jelen. Karbonátot az XRD és a DTA kimutatási határértéke alatti mennyiségben tartalmazzák a vizsgált minták, ezt megerősítik az igen alacsony CO_2 koncentrációk is. A két felső minta vékonycsiszolatában minimális mennyiségű karbonát jelen van a szemcseközi térben, vékony erekben és a földpátok belsejében. A kőzetek vörösbarna színét a finomszemcsés hematit átitatódás adja, az XRD szint 4 tömeg%.

2.1.5. Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció

A 49,71 m vastagságban feltárt formációt 3 minta reprezentálja, egy mintából csak elektronmikroszonda vizsgálat, míg a másik kettőből a fentebb bemutatott „AV alapcsomag” vizsgálatai készültek. A formáció uralkodó ásványfázisa a kvarc (43-47 tömeg%), a földpátok összmennyisége megközelíti, illetve meghaladja a kvarcét (43-52 tömeg%). Uralkodó földpát fázis a K-földpát, de jelentős az albit aránya is. Az elektronmikroszonda elemzések szerint mindkettő kémiai összetétele megközelíti a sztöchiometrikusat. A vizsgálatok 5-10 tömeg% közötti illit jelenlétét is igazolták, míg a DTA 2 tömeg% kalcitot is kimutatott az egyik mintában. Az ásványos összetétel utólagos kálimetaszomatózisra utal, illetve az eredeti földpátok albitosodtak.

2.1.6. Magmás kőzettelérek

A BAF-4 fúrás által harántolt magmás kőzettelért (173,67-174,59 m és 426,71-427,71 m) egy-egy minta reprezentálja, melyeken az „AV alapcsomag” vizsgálatai kerültek kivitelezésre. Ásványos összetételükben nagyfokú hasonlóságok és különbségek is szembetűnnek. Uralkodó ásványfázisuk a savanyú plagioklász, albit, mellette meghatározó az agyagásványok aránya is (1. táblázat). A felső telérben a DTA és az XRD felvétel csak kloritot jelez, míg az alsóban közel hasonló mennyiségű illitet és kloritot. A kvarc és a karbonát (kalcit) tartalmak szintén megegyezőek. Az alsó telér feltűnő ásványa az üde titánamfibol (kaersutit) jelenléte, 8 tömeg%. A két telér esetén az ásványos összetétel nagyfokú, de eltérő mértékű átalakulásra utal: karbonátosodás, agyagosodás, albitosodás.

1. táblázat: A fúrásokban feltárt képződmények XRD és DTA analízis minimum-maximum értéktartományai tömeg%-ban kifejezve. Rövidítések: KHF-Kővágószőlősi Homokkő Formáció, KHT- Kővágótöttösi Homokkő Tagozat, BHT-Bakonyai homokkő tagozat, Sm-szmektit, Mi/il-csillám/illit, Chl-klorit, Q-kvarc, Pl (ab)-plagioklász (albit), K-fdp-káliföldpát, Ca-kalcit, Dol-dolomit, Hem-hematit, Py-pirit, Am-amfibol

Fúrás jele	Formáció	kőzettípus	Sm	Mi/il	Chl	Q	Pl (ab)	K-fdp	Ca	Dol	Hem	Py	Am
BAF-3	KHF-KHT	aleuritos homokkő, homokkő	-	8-35	3-17	34-40	25	19-26	0-1	1-3	-	0-0,6	-
	KHF-BHT	agyagos homokos aleurolit, homokkő	-	4-32	3-18	28-41	15-39	0-19	0-2	5-17	0-5	0-0,3	-
BAF-3, BAF-3A, BAF-4	Bodai Agyagkő Formáció	agyagkő	0-16	10-48	0-20	0-28	13-50	0-14	0-13	0-12	4-12	0-0,7	-
		reduktív agyagkő	-	22-24	22	10	36	-	4	6	1	1,6	-

Fúrás jele	Formáció	kőzettípus	Sm	Mi/il	Chl	Q	Pl (ab)	K-fdp	Ca	Dol	Hem	Py	Am
		aleurolit	0-7	6-27	0-21	6-27	37-62	0-11	0-10	0-18	4-10	0-0,7	-
		karbonátos aleurolit	-	2-13	0-2	5-22	40-68	0-7	0-22	0-29	2-7	-	-
		albitolit	-	7-25	0-14	0-9	51-67	0-8	0-10	0-16	6-11	-	-
		dolomit	-	10	1	10	24	-	0	56	3	-	-
		homokkő	-	0-12	0-11	8-26	32-57	0-4	0-14	0-50	0-5	-	-
BAF-4	-	szubvulkáni telérkőzet	-	-	32	6	50	-	12	-	-	-	-
			-	13	17	4	44	-	14	-	-	-	8
	Cserdi Formáció	agyagos homokos aleurolit, homokkő	-	18-30	-	33-50	22-35	0-23	-	-	4	-	-
	Gyűrűfűi Formáció	ignimbrit	-	5-10	-	43-47	13-17	30-35	0-2	-	-	-	-

2.2. Geokémiai vizsgálatok

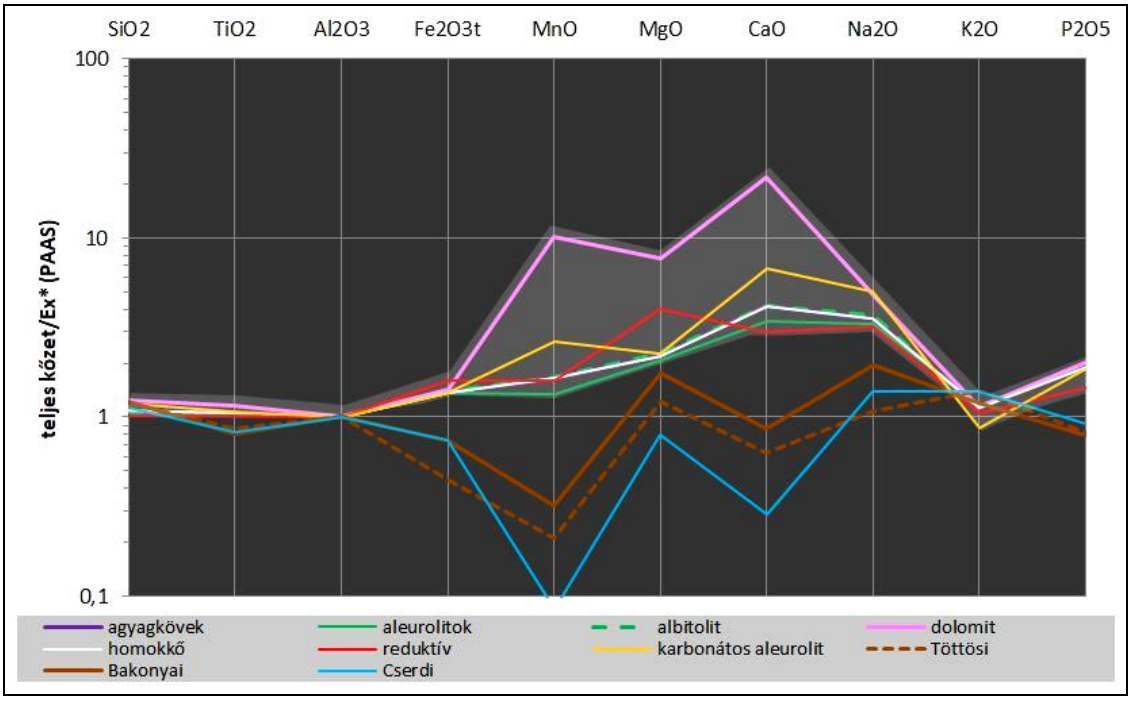
A fúrások sziliciklasztikus képződményeinek geokémiai jellemzéséhez a fő oxidos alkotók és nyomelemek mennyiségeit a McLennan [6] által a felső kéregre, valamint Nance és Taylor [7] által az átlagos archaikum utáni ausztrál agyagpala összetételre („post-Archean Australian average shale", PAAS) közölt, Al_2O_3-tartalomra normált dúsulási tényezőkből szerkesztett diagramokat használjuk (1. ábra). Ennek oka az, hogy a tapasztalatok alapján a hidrodinamikai osztályozódás következtében, az elemek mennyiségei az Al_2O_3-koncentrációval korrelálnak a finomszemcsés üledékes kőzetekben (Varga; 2005, [1]). Mivel a fúrásokban a BAF fő kőzettípusai megegyező ásványos összetétellel rendelkeznek, a 2. ábra az azonos kőzettípusainak (pl. agyagkő, albitolit, aleurolit), átlag főelem-összetételeit ábrázoltuk, a fekü Cserdi Formáció és a fedő Kővágószőlősi Homokkő Formáció (KHF) tagozatainak átlag főelem-összetételei mellett. A diagramon egyértelmű különbség mutatkozik a BAF és a fekü-fedő kőzetek koncentráció arányai között. A BAF kőzettípusai a PAAS-hoz és a Felső kéreghez viszonyítva is változó mérvű, de egyértelmű dúsulást mutatnak a TiO_2, Fe_2O_{3total}, MnO, MgO, CaO, Na_2O és P_2O_5 tekintetében. Ezzel szemben a fekü Cserdi Formáció és fedő KHF tagozatai a K_2O-tartalom kivételével, jóval alacsonyabb értékekkel rendelkeznek. Ennek oka az ásványtani összetételben keresendő: eltérő mennyiségű hematit-, földpát-, kalcit-, dolomit- tartalom és agyagásvány összetétel (illit, klorit, szmektit) okozza (1. táblázat). A K_2O-tartalmak közel azonosak, mivel minden kőzettípusban található magas káliumhordozó illit és káliföldpát fázis, azonban amíg a BAF-ban az illit az uralkodó, addig a fedő-fekü homokkövekben inkább a káliföldpát. A P_2O_5 – koncentráció nagyrészt az apatit tartalommal függ össze: a hidrodinamikai osztályozódás következtében az agyagkövekben, így a finomszemű BAF-ban feldúsul az apatit.

A BAF-3 jelű fúrás által harántolt KHF Kővágótöttösi Homokkő Tagozatból vett minták is elkülönülnek főelem geokémiai szempontból az alatta levő Bakonyai Homokkő Tagozat mintáitól, amit az oxidációs viszonyok változása is okozza az ásványos összetétel mellett. Az alacsonyabb főelem koncentrációjú, szürke színű Kővágótöttösi Homokkő reduktívabb környezetbe került, mint az alatta fekvő vörös színű, oxidatívabb Bakonyai Homokkő, ezt a vas oxidációs viszonyai (FeO- és Fe_2O_3-tartalmak) is igazolták. BAF kőzettípusai közül az MnO, MgO, CaO, Na_2O tekintetében a dolomitok, szürke színű reduktív agyagkő, és karbonátos aleurolitok tűnnek ki. A magas MgO-tartalmat, a reduktív rétegben, a megnövekedett mennyiségű klorit okozza, a többi kőzettípusban pedig a magas dolomit-tartalom. A magas CaO és MnO tartalmat egyértelműen a karbonátok okozzák, a Mn helyettesítő elem a karbonátokban. A Na_2O tartalmak kiemelkedő koncentrációjáért a kőzetek albitosodása felelős.

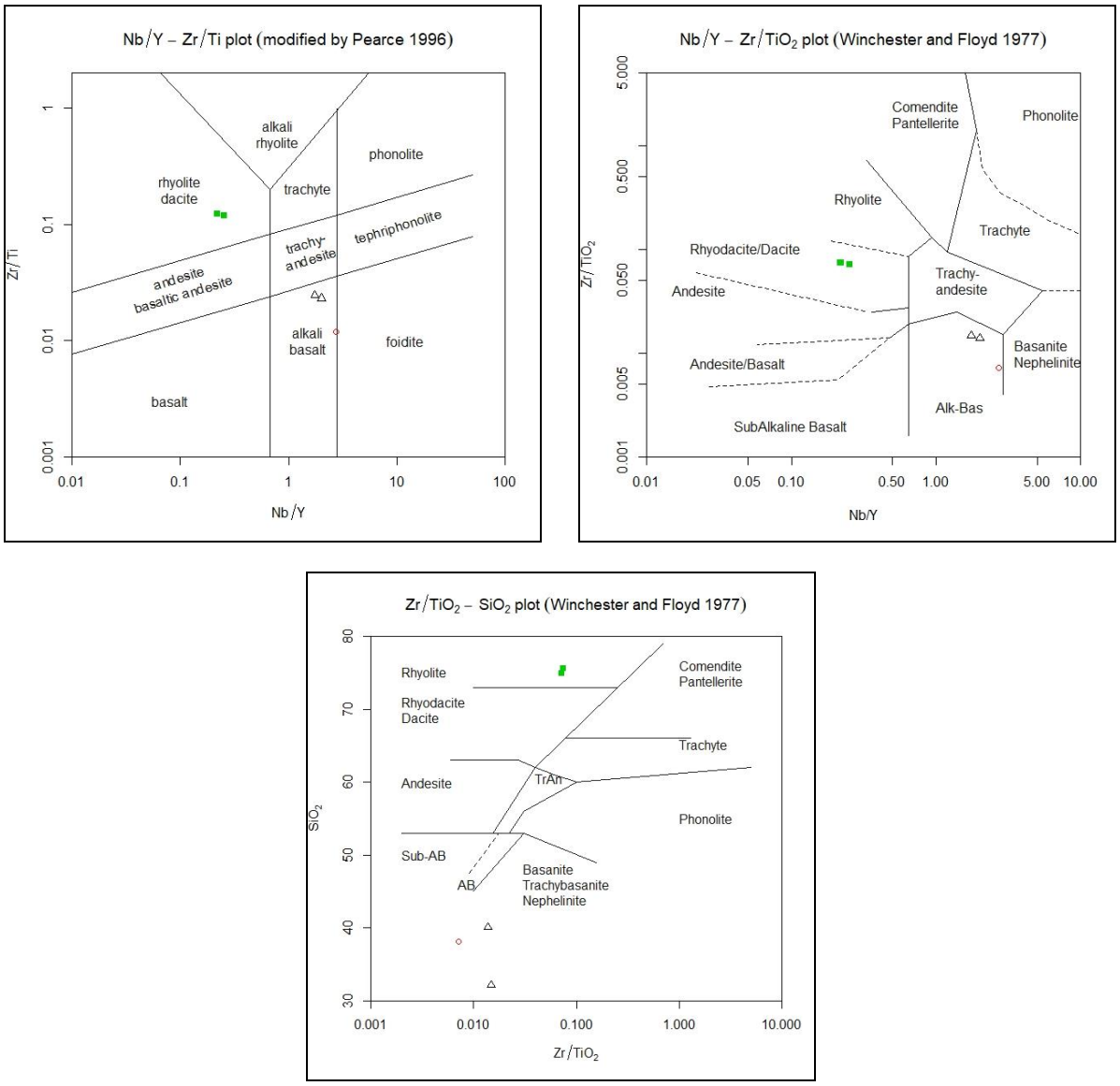
Az eltérő geokémiai tulajdonságú nyomelemek (Rb, Sr, Ba, Pb, Th, U, Zr, Nb, Y, V, Cr, Co, Ni, Zn) jellemzésére is hasonló metodikát követtünk. A Rb és a Zr az erősen csillámos és törmelékes cirkonban gazdagabb fedő és fekü homokkövekben nagyobb – referenciaértékeket és BAF kőzettípu-

sokat meghaladó – mértékben dúsul. A magasabb cirkon-tartalom miatt az U-értékek is kiemelkedőbbek, ámbár a reduktív Kővágótöttösi Homokkő esetében a magasabb koncentrációkért a szervesanyagdús rétegek is felelősek. A redox frontokból vett mintákban a kalkofil és a litofil elemek jó része a Cr kivételével egyaránt erősen dúsulnak. Ilyen redox front található a KHF tagozatainak határánál, a reduktív BAF rétegekben, valamint a BAF alsó átmeneti szakaszában lévő tarka agyagkőben, a BAF-4 jelű fúrás esetében. Az első kettőben szulfidok (pirit) is dúsulnak. A Ba értékek is széles tartományban 100-3145 ppm között mozognak. A legmagasabb értéket a KHF tagozatainak határában lévő minta valószínűleg hidrotermális eredetű barit-gazdag erezései adják. A BAF kőzetben (különösen a BAF-3A jelű fúrás) a megemelkedett koncentrációit pedig az anhidrites átalakulás és anhidrites erezések okozzák. A Sr a kalcitban gazdag karbonátos aleurolitokban és az anhidrites szakaszokban dúsul a legerősebben.

A magmás kőzettípusok geokémiai összetétele alapján való besorolására legjobban az utólagos átalakulásokra (karbonátosodás, K-metaszomatózis, kloritosodás, albitosodás) kevésbé érzékeny ritkaföldfém- nyomelem geokémiai adatok felhasználása a legcélszerűbb. A Winchester és Floyd (1977) [12] és Pearce (1996) [10] által módosított klasszifikációs diagramokon a Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció mintái a riolit, illetve riodácit mezőbe, míg a BAF-4 és a korábban mélyített BAF-1Af fúrás magmás telérei minden esetben az alkáli bazalt mezőbe esnek.



2. ábra: Fúrásokkal harántolt eltérő fáciesű képződmények átlag főelem geokémiai összetétele a PAAS-hoz viszonyítva dúsulási tényező alkalmazásával. A halványszürke zóna a BAF képződményeit fedi le.



3. ábra: Klasszifikációs diagramok a magmás és vulkáni kőzetekről Winchester és Floyd (1976) valamint Pearce (1996) módosítása után. Zöld négyzetek: Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció; fekete háromszögek: BAF-4 magmás telérek; Piros kör: BAF-1Af magmás telér

2.3. Korvizsgálatok

A fúrások BAF szelvényeiből 11 db K-Ar korvizsgálat került kivitelezésre, a minták reprezentálják a jelentősebb tektonikai zónák erősen igénybevett és átalakult kőzeteit, illetve az üde albitos agyagköveket. A mintaelőkészítés (a ≤0,5 mikrométeres szemcseméretű illit dús szeparátumok előállítása), valamint az előállított szeparátumokból a K-Ar kormérések az MTA ATOMKI K-Ar laboratóriumában készültek. A meghatározott K-Ar korok változatosak, 230,9 ± 3,2 és 128,5 ± 1,82 millió év közötti tartományt fognak át. Közös jellemzőjük, hogy nem a BAF képződési (felhalmozódási) korával egyeznek meg, változó mértékű fiatalodást mutatnak. A legfiatalabb kor a BAF-3 fúrás BAF és a fedő Bakonyai Homokkő Tagozat tektonikus határzónájának tektonikailag erősen igénybevett kőzetanyagából származik, a BAF oldal, amely valószínűleg a tektonikai esemény korával egyező. A K-Ar kormérések mellett radiokarbon és U-soros kormeghatározási vizsgálatok is készültek a makroszkópos szerkezeti és szöveti jellegeik alapján fiatalnak ítélt karbonát kitöltésekből, lehetőleg ugyanazon mintákból. A BAF-3A fúrás két mintájából az egymást kiegészítő vizsgálatok eredményei között nincs ellentmondás, vagyis a vizsgált érkitöltések nem nagyon fiatalok, az egyik ér kora valószínűen pleisztocén korú (974,75 m; 0,5-1,0 millió év), míg a másik kora >1,5 millió év (871,75-871,95 m). A BAF-

4 fúrás felszín közeli (31,90-32,00 m) karbonát érkitöltésének kora jóval fiatalabbnak adódott, 202 000 ezer év. A BAF-3 fúrás szelvényéből kiválasztott két minta közül csak az egyik volt korolható (189,90-190,02 m), mely 413 000 +75000/-44000 évet adott

2.4. Diagenezis

A fúrások által feltárt képződmények átalakultsági fokának (diagenezisének) megismerésére a komplex agyagásvány vizsgálatokkal párhuzamosan az előállított agyagásvány szeparátumokból (<2 µm szemcseméretű frakció) elkészültek az illit (Kübler index) és klorit (Árkai index) kristályossági indexmérések is. A meghatározások a fúrásszelvények BAF szakaszaiból készültek. A Kübler index értékek a BAF-3A fúrásban 0,295 és 0,459, míg az Árkai index értékek 0,197 és 0,334 Δ º2Θ értékek között változnak. Hasonló értékek adódtak a BAF-4 fúrás mintáin is, 0,291-0,439 Δ º2Θ (Kübler index), míg az Árkai index értékek 0,241 és 0,285 Δ º2Θ közöttiek. A BAF-3. sz. f. 5 mintájánál a Kübler index minimum értékei kissé alacsonyabbak (0,283 Δ º2Θ), a maximum értékek viszont kissé magasabbak (0,494 Δ º2Θ). Az Árkai index adatok az előző két fúrás értékei közé esnek (0,205-0326 Δ º2Θ). értékek között változnak. A nemzetközileg elfogadott Kübler-féle (IC) illit kristályossági skálán a diagenetikus zóna/anchizóna határa 0,42 Δº2Θ, az anchizóna/epizóna határ 0,25 Δº2Θ értéknél van. A BAF-ban mért értékek döntően 0,25 és 0,42 közé esnek, illetve néhány minta meghaladja a 0,42-es IC értéket. A mért értékek a mélydiagenetikus és az anchizónát jelölik. A klorit kristályossági értékekből ezzel megegyező következtetések vonhatók le.

3. Következtetések

A BAF-3 fúrás által feltárt Kővágószőlősi Homokkő F. két tagozata rendkívül hasonló ásványos összetétellel bír, a magas földpát mennyiségek következtében a homokkő rétegek arkózának tekinthetőek. A geokémiai jellegbeli (vas-oxidok) és ásványos összetételbeli különbségek (pirit és hematit) a „szürke homokkő” és a „tarka homokkő” közötti a redox állapotbeli eltérésből adódnak.

A BAF-4 fúrásban megismert Gyűrűfűi Lapilli F. ásványos összetétele, geokémiai és szöveti jellegei nagymérvű átalakulásra (alapanyag átkristályosodás), albitosodásra, káliföldpátosodásra (kálimetaszomatózis) és kovás oldatok általi átitatódásra utalnak.

A BAF-4 fúrásban harántolt két vulkanit telér változó mértékben átalakult, a felső telér erőteljesebben, az eredeti mafikus alkotó eltűntek, az alsó telérben az amfibolok (kaersutit) még üdék. Koruk egyértelmű tisztázására, vagyis az alsó-kréta korú Mecsekjánosi Bazalt F.-hoz vagy esetleg Nédli et al. (2009) [8] által részletesen vizsgált Villányi-hegységbeli lamprofír telérekhez sorolható, kor és részletesebb geokémiai vizsgálatok szükségesek.

A Cserdi Formáció és a BAF ásványos összetételében (a kvarc nagyobb aránya és a karbonát hiánya a Cserdi F.-ban) legfontosabb különbség a földpátok jellegében van. A BAF-ban uralkodó, még a fekvő Cserdi Formáció felé való átmeneti szakszán is, a sztöchiometrikus összetételű autigén albit, míg a fúrásban feltárt vékony Cserdi szelvényben törmelékes eredetűek a plagioklászok és albit-oligoklász összetételűek. A vizsgált négy minta alapján a két formáció határa az ásványos összetétel és a geokémiai jellegek alapján 844,5 és 847,30 m között van.

A fúrások által feltárt BAF szelvények ásványtani vizsgálata a meghatározó ásványok tekintetében nem hozott a korábbi ismeretekhez képest új adatokat. A meghatározó ásványok: agyagásványok, kvarc, autigén albit, karbonátok, hematit. Ezek mennyiségi arányait társítva a szöveti szerkezeti bélyegekkel a következő alap kőzettípusok jelölhetők ki: albitos („albitfészkes) agyagkő, „igazi” (karbonátos, albitos) aleurolit, albitolit, (albitos) dolomit, (karbonátos, albitos) homokkő. Természetesen az alaptípusok mellett számos átmeneti típus megjelenik. A korábbi ismeretekhez képest új eredmény a BAF-3A fúrás csaknem teljes BAF szelvényére (894,01m-es mintával kezdődően) jellemző anhidrit jelenlét (anhidritesedés). Az anhidrit jelen van átitatódásként, albitos fészkekben, önálló, valamint változatos ásványos összetételű erek formájában. Korábban a BAT-4 és BAT-5 fúrások alsó átmeneti szakaszáról ismerünk változatos vastagságú anhidritből és albitból álló ereket, illetve a BAF-2 fúrás szelvényében megjelenő összetett ásványos összetételű erek egyik alkotója [2], [3]. A BAF-3A fúrás

BAF szelvényének másik jellegzetessége a kloritnak az eddig nem észlelt megjelenési formái. A formációra általánosan jellemző kőzetalkotó klorit fázis mellett az albitos pórus kitöltések közepén, valószínűleg utolsó kiválásként, megjelenő kristályos klorit, a tektonikailag igénybe vett kőzetek szétesési felületein megjelenő méregzöld színű klorit bevonat, ér, valamint a több ásvány alkotta változó vastagságú erekben azonosított klorit. Ezek a fázisok későbbi folyamatok eredményei. A BAF legteljesebb, fedővel való tektonikai érintkezés ellenére is, szelvényét a BAF-3, -3A fúráspár tárta fel. Megvan reduktív réteg és a fedő felőli átmeneti zóna is, melyet a jóval magasabb agyagásvány tartalom (elsősorban illit), az autigén albit hiánya vagy igen alacsony értéke és a dolomit jelenléte jellemez. Ezen szakasz alsó határának a kijelölése nagyszámú kis mintaközű vizsgálattal húzható meg. Viszont a Cserdi F. felőli alsó átmeneti szakasz legalsó szelvénye hiányzik a fúrásból. Az ásvány-kőzettani és geokémiai jellegek alapján tagozatok nem különíthetők el. A BAF-4 fúrás alsó szakaszának jellegzetessége a megismert mini redoxfrontokhoz kapcsolódó U-anomáliák.

Irodalom

[1] Andrea R. V. (2005): Az őskörnyezeti viszonyok jellemzése a törmelékes üledékes kőzetek kémiai összetétele alapján. Földtani Közlöny 135/3, 433-458 p

[2] Ervin Hrabovszki, Emese Tóth, Tivadar M. Tóth, István Garaguly, István Futó, Zoltán Máthé, Félix Schubert (2022): Geochemical and microtextural properties of veins in a potential high-level radioactive waste disposal site. Journal of Structural Geology 154 (2022), 104490.

[3] Hrabovszki, E., Tóth, E., Tóth, M. T.. Máthé Z., Schubert, F. (2020): Potential formation mechanisms of early diagenetic displacive veins int he Permian Boda Claystone Formation. J. Struct. Geol. 138, 104098.

[4] Kovácsné Kis Viktória, Horváth Ákos (2022): Vizsgálati jegyzőkönyv a BAF-3A mélyfúrásból származó két minta transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatáról. Vizsgálati Jegyzőkönyv, MECSEKÉRC Zrt. Adattár, Pécs.

[5] Kovácsné Kis Viktória, Horváth Ákos (2022): Vizsgálati jegyzőkönyv a BAF-4 mélyfúrásból származó két minta transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatáról. Vizsgálati Jegyzőkönyv, MECSEKÉRC Zrt. Adattár, Pécs.

[6] McLennan, S. M. (2001): Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 2, 2000GC000109, 24 p.

[7] Nance, W. B. and Taylor, S. R. (1976): Rare earth patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta 40, 1539-1551 p.

[8] Nédli Zsuzsanna, M. Tóth Tivadar, Schubert Félix (2009): A Villányi-hegység felső-kréta lamprofir telérei. In: M. Tóth Tivadar (Szerk.): Magmás és metamorf képződmények a Tiszai Egységben, GeoLitera kiadvány, Szeged, 219-244.

[9] Német Tibor, Demény Attila (2022): Vizsgálati jegyzőkönyv „a BAF-3 fúrásból származó két minta transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálata”. Vizsgálati Jegyzőkönyv, MECSEKÉRC Zrt. Adattár, Pécs.

[10] Pearce, J. A. (1996). A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D. A. (ed.) Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79–113.

[11] Sipos Péter, Demény Attila (2022): Vizsgálati jegyzőkönyv „a BAF-3A számú fúrásból származó kőzetminták elektronmikroszondás vizsgálata” témakörben végzett elektronmikroszkópos elemzésekről. Vizsgálati Jegyzőkönyv, MECSEKÉRC Zrt. Adattár, Pécs.

[12] Winchester, J. A. & Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology 20, 325–343.

A BAF-3, -3A és BAF-4 fúrásokból származó vízminták laborvizsgálati eredményei

Formation water characterization of BAF-3, -3A, -4 exploration drilling sections

CSURGÓ GERGELY[1], FÖLDING GÁBOR[2], PALCSU LÁSZLÓ[3]

[1]*MECSEKÉRC Zrt., csurgogergely@mecsekerc.hu,*
[2]*MECSEKÉRC Zrt., foldinggabor@mecsekerc.hu,*
[3]*ISOTOPTECH Zrt., palcsulaszlo@isotoptech.hu*

Abstract

The investigations in drilling section BAF-3, BAF-3A and BAF-4 revealed that TDS, trace elements and radiocarbon age increases with depth, the sampled fissure water originates mostly from rainwater. Groundwater of BAF-4 infiltrated in a slightly colder climate, and the water sample taken from the deepest test section of BAF-3A may contain diagenetic component.

Összefoglaló

A vízvizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy mind a BAF-3 és BAF-3A, mind a BAF-4 fúrási szelvény a mélységgel növekedő oldott anyag tartalmú, többnyire idősödő, csapadékvíz eredetű repedésvizeket tárt fel. A BAF-4 vizei valamivel hidegebb klímán szivárogtak be, továbbá a BAF-3A legmélyebb vizsgálati szakaszából vett vízminta diagenetikus vizet is tartalmazhat.

Kulcsszavak: mélységi víz, víztípus, vízkor

Bevezető

A mélyfúrásokból történő vízmintavételek és vízvizsgálatok alapvető célja, hogy a jelenlegi I. földtani kutatási fázis során megfelelő vízkémiai információkat szerezzünk a kutatási terület vízföldtani viszonyainak pontosabb megismeréséhez.

1. Elvégzett mintavételek és vizsgálatok

A fúrások arra alkalmas hidrogeológiai vizsgálati szakaszaiból a tartós víztermelés során, a reprezentatív vízminták megvételéhez megfelelő – a kiindulási érték 3–5%-a alá csökkentett – nyomjelzőanyag-tartalom elérését követően szivattyúval, mélységi mintavevővel, illetve dugattyúzással történtek a vízmintavételek (1. táblázat). A víz- és gázmintavételeket a MECSEKÉRC Zrt. Vizsgálólaboratórium, a Geo-Log Kft. és az Isotoptech Zrt. munkatársai végeztek el a Rotaqua Kft. és a Golder Kft. közreműködésével.

1. táblázat: A fúrásokból elvégzett mintavételek alapadatai

Fúrás jele	*Vizsgálati szakasz [m-m]*	*Pakkeres teszt jele*	*Mintakód*	*Mintavétel dátuma*	*Mintavétel módja*
BAF-3	260,25-276,08	BAF3t05	A-73465	2020.11.30	szivattyú
BAF-3	714,29-739,15	BAF3t26	A-74720	2021.03.19	mélységi mintavevő
BAF-3	714,29-739,15	BAF3t26	A-74721	2021.03.19	dugattyú

Fúrás jele	*Vizsgálati szakasz [m-m]*	*Pakkeres teszt jele*	*Mintakód*	*Mintavétel dátuma*	*Mintavétel módja*
BAF-3A	1221,50-1319,02	BAF3At06	A-76348	2021.09.11	mélységi mintavevő
BAF-3A	1221,50-1319,02	BAF3At06	A-76349	2021.09.11	dugattyú
BAF-3T	19,30-22,39	-	A-72809	2020.10.07	szivattyú
BAF-4	197,50-215,96	BAF4t02	A-73977	2021.04.19	szivattyú
BAF-4	328,05-352,95	BAF4t03	A-74873	2021.05.13	mélységi mintavevő
BAF-4	545,99-572,80	BAF4t15	A-75573	2021.06.23	szivattyú
BAF-4	702,31-727,19	BAF4t30	A-76309	2021.09.01	szivattyú
BAF-4	864,00-901,14	BAF4t23	A-76287	2021.08.22	szivattyú
BAF-4T	7,0-12,0	-	A-74517	2021.03.10	szivattyú

A kutatási programban a 2. táblázatban szereplő víz- és gázvizsgálatok kaptak helyet, a mérések, vizsgálatok elvégzésében az itt felsorolt intézmények vettek részt. A laboratóriumok az adott mintavételekre, vizsgálatokra akkreditáltak, amennyiben nem, úgy megfelelő jártassággal rendelkeznek a speciális, egyedi módszerekkel elvégzett vizsgálatok terén, illetve nemzetközi összemérésen megfeleltek a szükséges követelményeknek.

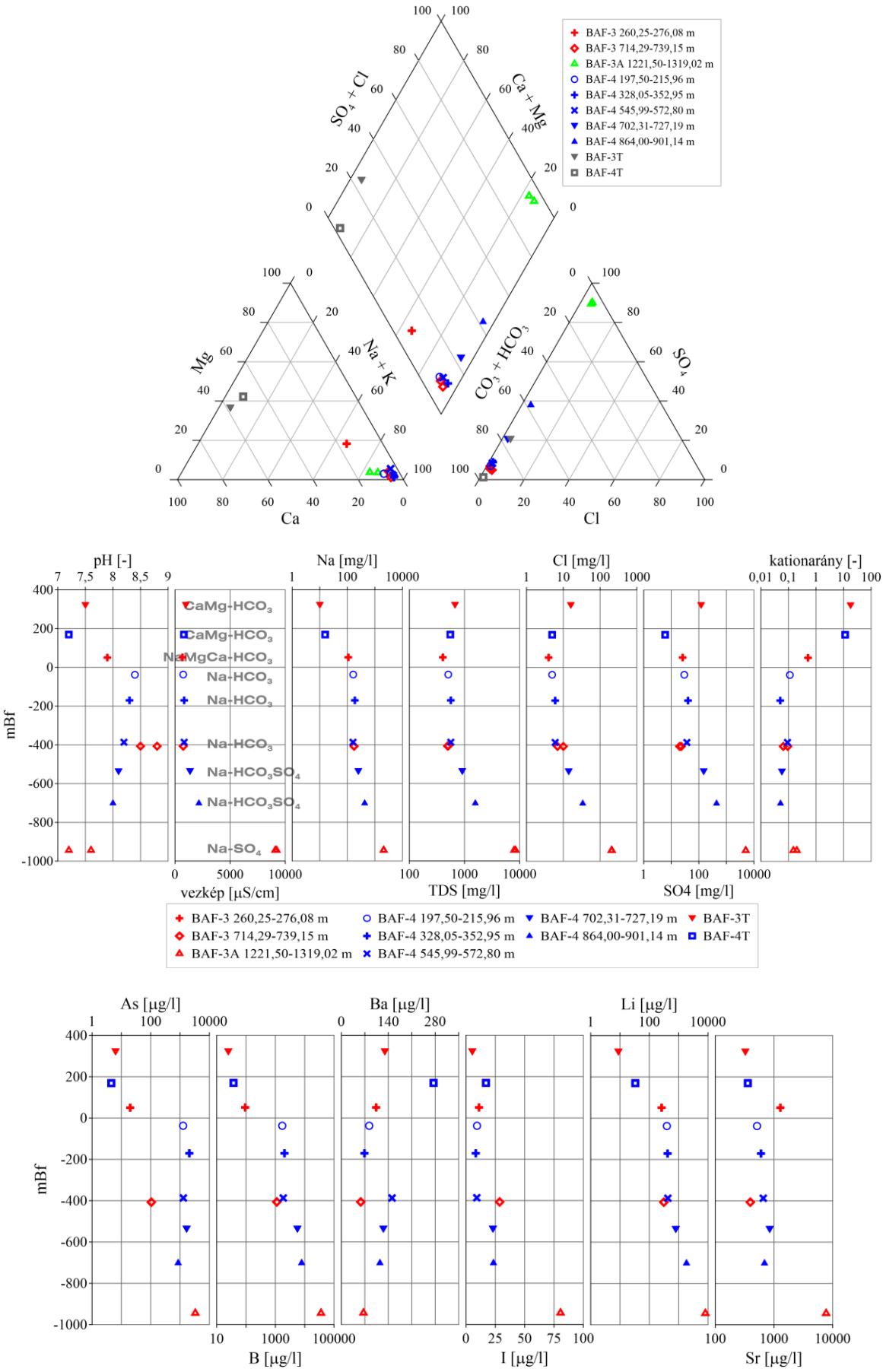
2. táblázat: A vízmintákon elvégzett vizsgálatok

Vizsgálatok	*Elemző laboratórium*
helyszíni paraméterek	MECSEKÉRC Zrt.
általános vízkémia	MECSEKÉRC Zrt., Tettye Forrásház Zrt.
nyomelemek	MECSEKÉRC Zrt.
$\delta^{18}O$, δD	ELKH CSFK FGI
radon	MECSEKÉRC Zrt.
trícium	Wessling Hungary Kft.
$T/^{3}He$	Isotoptech Zrt.
^{14}C, $\delta^{13}C$	Isotoptech Zrt.
$\delta^{18}O_{SO4}$	Isotoptech Zrt.
$\delta^{34}S$	Isotoptech Zrt.
$\delta^{15}N$	Isotoptech Zrt.
nemesgáz koncentráció és izotóparány	Isotoptech Zrt.
$^{87/86}Sr$	Isotoptech Zrt.
$^{234/238}U$	Isotoptech Zrt.
^{81}Kr	Isotoptech Zrt.
általános gázvizsgálatok	Vízkutató Vízkémia Kft.
^{36}Cl	Purdue University (USA)

2. Eredmények

2.1. Általános vízkémiai és nyomelem vizsgálati eredmények

A mintázott repedésvizek főkomponens eloszlása a két fúrási szelvény esetében a mélységgel nagyjából hasonló mintázatot mutat (1. ábra). A BAF-3T és BAF-4T talajvizes kutakból származó vizek Ca-Mg-HCO_3-os összetétellel jellemezhetők, majd a mélységgel mindinkább a nátrium és a szulfát lesz a domináns kation és anion. Ezzel párhuzamosan az összes oldott anyag tartalom is monoton növekszik, a BAF-4 esetében a talpról származó (864,00-901,14 m) mintában már 1570 mg/l, míg a BAF-3A talpi mintájában (1221,50-1319,02 m) extrém magas, ~8000 mg/l körüli értéket vett fel. Utóbbi esetében a nátrium ~2000 mg/l, a szulfát ~5000 mg/l volt a vizsgálatok szerint. A vizekre jellemző kationarány a mélységgel ugyancsak csökkenő tendenciát mutat. Összességében az is elmondható, hogy a BAF-3 és BAF-3A fúrásokból, azonos vizsgálati szakaszokból származó mélységi és dugattyús minta eredményei között nincs érdemi különbség.



1. ábra: Általános vízkémiai- és nyomelem vizsgálati eredmények

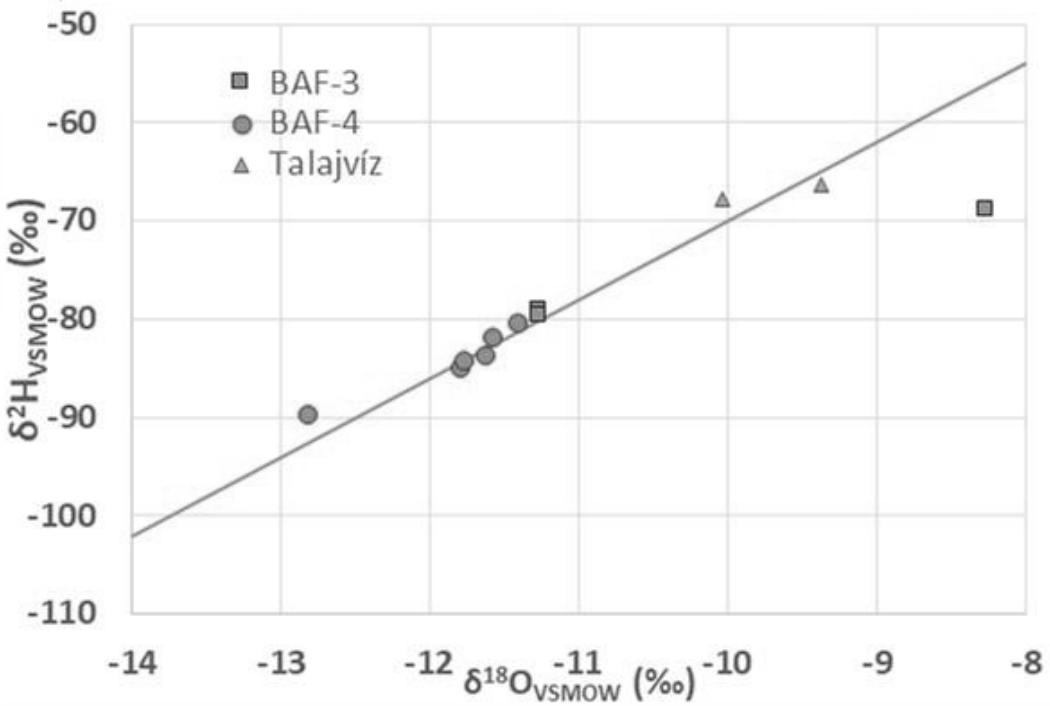
A kutatási terület mélységi repedésvizeiben jellemző nyomelemek közül a bór, lítium, stroncium, illetve kisebb mértékben a jód koncentrációja is a mélységgel növekvő tendenciát mutat, mindkét fúrásban elsősorban a talpközeli vizsgálati szakaszokban ugranak meg jelentősen az elemtartalmak (bór: BAF-3A~35 000 µg/l, BAF-4~5-8000 µg/l, lítium: BAF-3A~8000 µg/l, BAF-4~800-1900 µg/l). Az arzént a BAF-4 teljes szelvényében, mind az 5 db vizsgálati szakasz vizében ~1000-2000 µg/l koncentrációban mérték, míg a BAF-3A esetében a legmélyebb vizsgálati szakasz vizében ugrott meg jelentősen a koncentrációja (3300 µg/l). A bárium a mélységgel markáns trendet nem mutatott: a BAF-4 esetében leginkább stagnálás, míg a BAF-3A esetében minimális csökkenő tendencia észlelhető.

2.2. Izotópvizsgálati eredmények

A $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ vizsgálatok alapján a vizek többnyire csapadékvíz eredetűek (2. ábra), az izotóparányok jelentős módosulást nem mutatnak, csak egy esetben. A két talajvíz izotóp-összetétele a legpozitívabb -9,5 és -10 ‰ közöttiek, ami megfelel a mai leszivárgó csapadékvíznek, noha még a talajvíz is idősebb, mint 70 év. A BAF-3T talajvíz trícium koncentrációja 0,66 TU, ami 1950-es évekbeli beszivárgásra utal. A többi vízben nincs kimutatható mennyiségű trícium, így azok jóval idősebbek. A BAF-4 oxigén (és hidrogén) izotóp-összetétele alapján kijelenthetjük, hogy ezek a vizek egy hidegebb klímán szivárogtak be. A BAF-3 1000 méternél sekélyebb rétegeiből származó vizek is hasonló, bár kissé melegebb klímán szivárogtak be. Ezek a vizek teljesen csapadék eredetűek szemben a BAF-3A 1221,50-1319,02 m közötti vizsgálati szakaszából vett vízmintával, amely diagenetikus vizet is tartalmazhat, mivel az izotóp-összetétele jóval a csapadékvonal alá esik. Ezt alátámasztja a magas oldott sótartalom is (~8000 mg/l), melyért többnyire a nátrium és a szulfát felelős.

A számított radiokarbon vízkorok a mélységgel általában növekednek. A BAF-3 két felső szakasza a korok alapján is jégkorszaki vizet tartalmaz, amely megerősíti a $\delta^{18}O$ értékből levont állítást, miszerint a víz hidegebb klímán szivárgott be. Ezt szintén megerősíti az oldott nemesgázokból számolt beszivárgási hőmérséklet, mely 6,1(±0,7) °C-nak adódott. A BAF-3A koradatai látszólag ellentmondásban vannak. A ^{14}C alapján (1,92 pMC) a vízkor 25 ezer év, illetve hasonló mondható el a BAF-3 ~730 m-ből származó vízmintáról is (1,52 pMC). A BAF-3A ^{81}Kr tartalma viszont nagyon alacsony (60,8 pMKr), még számottevő modern ^{85}Kr szennyezés mellett is (3. táblázat). Ha a ^{81}Kr mért értékét korrigáljuk a szennyező ^{85}Kr-tel együtt jövő modern ^{81}Kr-gyel, akkor a minta ^{81}Kr tartalma 15,1 pMKr-nek adódik. Ez alapján a vízkor 625(±44) ezer év. A 25 ezer éves radiokarbon kor, azaz a magas (1,92 pMC) radiokarbon tartalom valószínűleg a fúróvízzel került a vízmintába, ezért inkább a 625 ezer éves kor tekinthető elfogadhatóbbnak. A BAF-3 legsekélyebb vizsgálati szakaszával nem ennyire elütő a helyzet. A 13,2 pMC és a 90,2 pMKr értékekből 13,4(±0,8) ezer, illetve 34,2(±10,6) ezeréves korokat lehet számolni. Ha szintén feltételezünk egy kis modern radiokarbon szennyezést, akkor a radiokarbon kor valószínűleg magasabb, amely közelít a kripton korhoz.

Ahogy fentebb is említettük, a BAF-4 vizei hidegebb klímán szivárogtak be. Ezt megerősíti a 200 méteren vett vízminta nemesgázokból számolt beszivárgási hőmérséklete, mely 6,8(±0,7) °C-nak adódott, teljesen azonosan a BAF-3 hasonló mélységéből származó vízmintájával. Továbbá 320-350 méteren 11 °C, 550-570 méteren 6,3 °C, míg 700-730 méteren 8,9 °C beszivárgási hőmérsékleteket kaptunk. Ezek a vizek nagyon idősek. A radiokarbon alapján feltételezhetjük (figyelembe véve egy kis fúróvíz szennyezést), hogy a vizek idősebbek, mint 35 ezer év. Célszerű ezért a ^{81}Kr-et segítségül hívni, azonban három esetben magasabb ^{81}Kr-tartalmat kaptunk, mint 100 pMKr. Ezt csak felszín alatti termelődéssel lehet magyarázni, ami egy ritka jelenség, jelenleg is a nemzetközi kutató közösség érdeklődési körében van. Eddig egy dél-afrikai területről publikáltak ilyet, bár más geológiai közegben is egyre gyakrabban, de még mindig nagyon ritkán tapasztalni felszín alatti termelődést. A mélyebb vízminták ^{81}Kr-tartalma kisebb, mint 100 pMKr, azonban ezen esetekben sem zárhatjuk ki a felszín alatti termelődést, így ezekre a mintákra számolt korok minimum kornak tekinthetőek.



2. ábra: $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ eredmények

3. táblázat: A mért és korrigált kripton izotóp aktivitáskoncentrációk és a számolt ^{81}Kr korok

Vizsgálati szakasz	$^{85}Kr_{mért}$ *(dpm/cc)*	$^{81}Kr_{mért}$ *(pMKr)*	$^{81}Kr_{korrigált}$ *(pMKr)*	*Kor (1000 év)*
BAF-3 260,25-276,08 m	13,74	92,3	90,16	34,2 ± 10,6
BAF-3A 1221,50-1319,02 m	35,80	60,8	15,09	625 ± 44
BAF-4 197,50-215,96 m	7,26	125,4	128,60	nem értelmezhető
BAF-4 328,05-352,95 m	37,10	108,2	119,01	nem értelmezhető
BAF-4 545,99-572,80 m	9,92	108,5	110,01	nem értelmezhető
BAF-4 702,31-727,19 m	8,98	84,3	81,85	66,2 ± 10,5
BAF-4 864,00-901,14 m	14,80	95,9	94,72	17,9 ± 10,8

Hagyományos és újszerű kőzetmechanikai laboratóriumi mérések a BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrások maganyagából

Results of traditional and new type rock mechanical laboratory tests from the core samples of boreholes BAF-3, BAF-3A and BAF-4

GÁL VAZUL[1], GELENCSÉR KINGA[1], ZIPFNÉ MÁZIK KINGA[1], HORVÁTH TAMÁS[1], KOVÁCS LÁSZLÓ[1]

[1]*Kőmérő Kft. (7633 Pécs, Esztergár Lajos u. 19, komero@komero.hu)*

Abstract

The most recent phase in the BAF research program created an opportunity for further characterizing the rock mechanical attributes of Boda Claystone Formation (BCF), furthermore utilizing newer technologies a wide array of parameters could be obtained. During the previous research phases the mechanical features were limited by the number of samples and less advanced measurement protocols. Thanks to the in-situ primary stress measurements carried out by Sigra Pty. Ltd. as well as following their guidance, experimental tests were conducted, with the results portrayed on parameter maps. The Kovári-test used to determine the failure envelope of a single rock specimen has also been extended to obtain more parameters, furthermore due to development processes the test results are also more reliable. Now the post-failure mechanical behaviour of samples can also be analysed. For the present research phase, part of the Uniaxial Compressive Strength (UCS) tests were transformed into loading tests combined with hysteresis loops, this way the rheological changes in elastic moduli and Poisson's ratio as a function of stress change can be monitored. Some of the testing methods were used to analyse the anisotropy factors of the formation. These experiments supported our expectations concerning the behaviour of the BCF, since the elastic moduli and Poisson-ratios of the samples yielded different results between the axis of the borehole and the direction perpendicular to it.

Összefoglaló

A BAF kutatási program legújabb fázisa lehetőséget biztosított a formáció további mechanikai jellemzésére, melyhez új technológiák alkalmazása mellett széleskörű paraméterekhez is hozzájutottunk. A korábbi kutatási fázisok által kinyert adatok alacsony mintaszám miatt csak limitáltan álltak rendelkezésünkre, ráadásul a tesztprotokollok is kevésbé voltak kiforrottak. A Sigra Pty. Ltd. primer feszültség vizsgálatainak köszönhetően, és az ő útmutatásuk mellett, kísérleti méréseket végeztünk el, melyek eredményeit paramétertérképeken jelenítettünk meg. Az egymintás tönkremeneteli határgörbe meghatározásra kifejlesztett Kovári mérést is kiterjesztettük további paraméterek meghatározására, és a módszerfejlesztés hatására a teszteredmények is megbízhatóbbá váltak. Ennek hála, a tönkremenetel utáni mechanikai állapot is részletesebben vizsgálható. Az új fázisra az egytengelyű nyomószilárdság (UCS) vizsgálatok egy részét hiszterézis méréssel egybekötött töréstesztekre cseréltük, így a rugalmassági modulus és a Poisson-tényező feszültségváltozás függvényében való, azaz reológiai alakulását is figyelemmel tudtuk kísérni. Bizonyos méréstípusokat a képződmények anizotrópia vizsgálatára is felhasználtunk. Ezek a kísérletek alátámasztották a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) viselkedésével kapcsolatos elvárásainkat, mivel a fúrástengellyel párhuzamos és az arra merőleges irányban vizsgált rugalmassági modulusok és Poisson-tényezők eltérő eredményeket adtak.

Kulcsszavak: BAF, reológia, rugalmassági modulus, paramétertérkép, anizotrópia

Bevezető

A legújabb BAF kutatási fázis első lépései, mint a fúrómagkorrekció, a földtani és geotechnikai dokumentáció, valamint a fúrómagszkennelés és fotózás a magmintavételt megelőzően kerültek sorra. A három fúrásból több fajta, non-destruktív és tönkremenetellel járó vizsgálatokra is vételeztünk intakt kőzetmintákat. A statisztikai értékelést néhol megnehezítették az eltérő kőzetváltozatok, melyeket a harántolt formációk feltártak. Ezt ellensúlyozzák a kísérleti méréstechnológiák melyeknek köszönhetően egy kőzetmintából, egyetlen méréssel paraméterek széles skáláját tudtuk feltérképezni.

1. Célkitűzés

A korábbi kutatási programok során a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) mechanikailag alulreprezentált volt, melynek oka az alacsony mintaszámban és a kevésbé kiforrott laboratóriumi mérésekben rejlik. A kutatás legújabb fejezete azonban lehetőséget biztosított, hogy a három új fúrás maganyagából elegendő mintát vételezzünk. A korábban alkalmazott módszerek szintén fejlesztéseken estek át, melynek hatására egy intakt kőzetmintából paraméterek széles skálája nyerhető ki. Példának okáért, a Young-modulust korábban a lineárisan rugalmas deformációs tartományon vizsgáltuk, ahogy a homogén agyagok esetében ezt a szakirodalom előírja. A heterogén kőzetek azonban másként viselkednek. A feszültség emelésére különböző deformációs szinteket érnek el [3], melyből ugyan (a legtöbb esetben) kijelölhető a lineárisan rugalmas szakasz, a Young-modulus értéke nagy mértékben függ a feszültségtől. Ha pedig a terhelést ciklikusan bocsájtjuk a kőzetre, az ily módon számolt modulus a rendszerben maradó deformációnak köszönhetően szintén megváltozik. A legújabb mintákon végzett kísérletek segítségével ezt, és további mérnöki paraméterek kőzetmechanikai megítélését kívánjuk fejleszteni.

2. Mintavétel

A fúrási maganyag mintázásánál fő szempont volt a BAF tagozatainak reprezentálása, azonban a fúrások által feltárt fedő Kővágószőlősi Homokkő Formáció (KHF), valamint a fekü Gyűrűfűi Riolit Formáció (GyRF) kőzetanyagából is volt lehetőségünk mintázni. A vizsgálatokra kiszedett hengeres maganyagot laboratóriumi előkészítés során véglapoltuk, egyes mérések esetében kifúrással alakítottuk ki. Az előkészített minták geometriai jellemzőit és tömegadatait nagy pontossággal lemértük, így a származási adatok mellé testsűrűség értékeket is tudtunk párosítani. A mintaelőkészítésnél és a nem kísérleti jellegű méréseknél is a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság (ISRM) ide vonatkozó ajánlásait vettük figyelembe [4][5]. A minták vizsgálatok és kőzetváltozatok közötti megosztását az alábbi táblázatban foglaltuk össze (1. táblázat).

1. táblázat: A BAF-3, BAF-3A és BAF-4 jelű fúrások maganyagából kőzetmechanikai laborvizsgálatokra vett minták darabszáma

Vizsgálat megnevezése	*BAF-3 (db)*			*BAF-3A (db)*			*BAF-4 (db)*			
	KHF	*BAF (Dombói Tag.)*	*Σ*	*BAF (Dombói Tag.)*	*BAF (Fűzi Tag.)*	*Σ*	*BAF (Dombói Tag.)*	*BAF (Fűzi Tag.)*	*GyRF*	*Σ*
UCS	14	12	26	-	4	4	3	8	1	12
Brazil – Tengely	7	9	16	-	9	9	6	6	2	14
Brazil – Palást	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-
Kovári	4	4	8	1	3	4	3	3	1	7
Nyírószilárdság	8	8	16	2	7	9	5	7	2	14
Hiszterézis	-	2	2	-	-	-	-	10	-	10
UCS – hiszterézis	-	-	-	3	5	8	5	7	2	14
Triaxiális	-	2	2	-	-	-	1	4	-	5
Hidrosztatikus	-	2	2	-	-	-	1	4	-	5

3. Alkalmazott módszerek

A módszerek részletes bemutatását a kutatási programhoz kapcsolódó átfogó jelentések tartalmazzák, jelen kivonatban csupán a fejlesztett, vagy kísérleti jellegű mérésekről kívánunk szót ejteni, melyek eredményeit később részletezzük.

A Brazil-húzószilárdság vizsgálat indirekt módon állapítja meg a hengeres kőzetminta húzóellenállását. A hagyományos egytengelyű terheléssel ellentétben nem a véglapokat, hanem a minta palástjának két szemközti pontját terheljük törésig, melyből a húzószilárdság számítható.

A hagyományos egytengelyű nyomószilárdság vizsgálatokat (UCS) tapintó érzékelős vagy mérőbélyeges deformációméréssel kiegészítve végezzük el, így a törést megelőző deformációkból a Young-modulust és a Poisson-számot ki tudjuk számolni. Mint ahogy korábban említettük, a kőzetminták ezen paraméterei reológiai értelemben változékony viselkedést mutatnak. Ezt a változást hiszterézis méréssel jobban meg tudjuk vizsgálni és részletesebb képet kapunk a minta valós viselkedéséről. A módszer lényege, hogy a hengeres mintatestet nem törésig, hanem egy előre meghatározott feszültségszintig terheljük, miközben a fellépő deformációk folyamatos monitoringját is elvégezzük. A szint elérését követően teljes leterhelést hajtunk végre, mielőtt egy új, magasabb terhelési szintre hozzuk a mintát. A kutatási fázis során bizonyos számú mintánál a hiszterézis mérést tönkremenetellel végeztük el, míg egyes esetekben az UCS vizsgálatot külön hajtottuk végre. A mérnöki paraméterek változása mellett így a kőzet nyomószilárdságát is meghatároztuk.

Az egymintás tönkremeneteli határgörbe meghatározás módszere, vagy Kovári-teszt paraméterek széles palettáját kínálja. A mérést egy ún. Hoek-cellában végezzük el, ahol a mintára $p_0>0$ MPa palástnyomást és növekvő axiális terhelést bocsájtunk a tönkremenetelt megelőző pontig, melyet a folyamatos feszültség-elmozdulás monitoringnak köszönhetően nagy biztonsággal meg tudunk jósolni. Ezen ponton a palástnyomást pillanatszerűén megemeljük, így a mintát kimentjük a kritikus állapotból és a mérés tönkremenetel nélkül folytatható. Előre megszabott számú ciklust hajtunk végre, mielőtt a mintát végleg eltörjük, ezt követően a „post-failure” mechanikai állapot [1] és a reziduális tönkremeneteli határgörbe is meghatározható.

A Sigra Pty. Ltd. helyszíni primer feszültségméréseivel egybekötött mintázást kísérleti mérésekre használtuk fel. Gray et al. 2018-as publikációjában [2] ismertetett módszertan alapján uniaxiális hiszterézis, triaxiális és hidrosztatikus terhelési méréseket végeztünk el három irányú deformációmérő rozettákkal ellátott mintákon, a rugalmassági modulus és a Poisson-tényező feszültségtér-függő változásainak további megismerése érdekében. A triaxiális mérést az axiális és palástfeszültség váltakozó, lépcsőzetes megemelése és kontrollja mellett végezzük el, egy felterhelési és leterhelési ág kialakításával. A hidrosztatikus mérésekhez a mérőbélyegekkel ellátott és kellően leszigetelt mintát szintén egy speciális cellába zárjuk, melyet követően a fluidumnyomást fokozatosan megemeljük. A rugalmassági paraméterek feszültségtér-függő változása így hidrosztatikus környezetben is megfigyelhető. A kísérletek szintén tartalmazták a korábban részletezett hiszterézis méréseket a triaxiális tesztekre felhasznált mintákon.

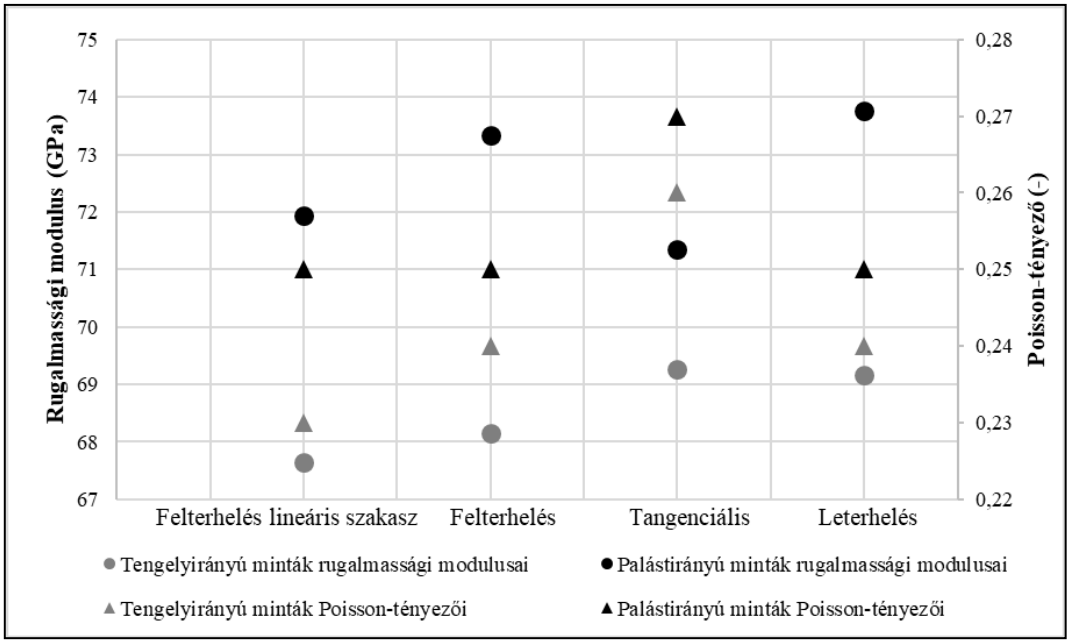
4. Eredmények

4.1. Anizotrópia vizsgálat eredményei

A BAF anizotrópia vizsgálatára két típusú terheléses tesztet végeztünk el: indirekt Brazil-húzószilárdság és hiszterézis méréseket. Előbbire a BAF-3 jelű fúrás hidrorepesztéses szakaszából (667,17-668,50 fm) származó kőzetmagot választottuk, a mintákat a fúrástengelyre merőlegesen és párhuzamosan alakítottuk ki (3-3 db). Az axiális minták átlagosan 7,13 MPa-os, a laterális minták pedig 7,73 MPa-os húzószilárdság értéket adtak, így érdemi különbség a minták húzóellenállásával kapcsolatában nem tapasztalható. A mérési eredmények statisztikai vizsgálata alacsonyabb szórásértékkel járt a laterálisan kialakított minták esetében, azonban a minták alacsony száma bővebb konklúzió kialakítását nem tette lehetővé.

A hiszterézis méréseket tönkremenetel nélkül végeztük el ugyanabból a mintából. A BAF-4 jelű fúrásból vett eredetileg axiális irányú mintán kiviteleztük az első hiszterézis tesztet, melyet követően a mintát palástirányban kifúrtuk és az előkészítés után egy újabb terheléses vizsgálatot végeztünk el. Összesen 3 db ily módon kialakított mintapár vett részt a kísérletben.

A rugalmassági modulusokat és Poisson-tényezőket négyféleképpen határoztuk meg a hiszterézis mérések eredményeiből: a felterhelési szakaszon kijelölhető lineáris szakasz, a felterhelés és leterhelés kezdő és végpontjai között húzott egyenesek és a két szomszédos ciklus csúcspontja között húzott („tangenciális") egyenes alapján. Mivel a Young-modulus csak a lineárisan rugalmas deformációs szakaszon értelmezhető, így a továbbiakban rugalmassági-modulusként hivatkozunk a kísérletek során számolt tényezőről. Az meghatározott eredmények átlagos értékeit az alábbi ábrán szemléltetjük (1. ábra).



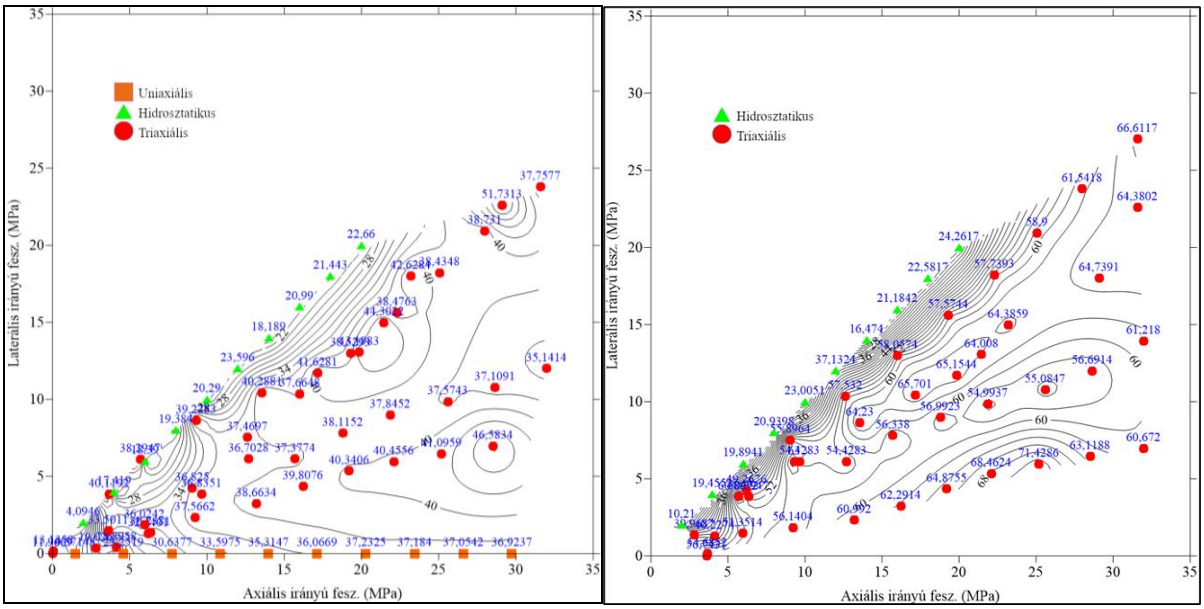
1. ábra: A BAF-4 jelű fúrásból mintázott anizotropikus hiszterézis mérések átlagos eredményei

A fenti ábráról is jól látható, hogy a tengelyirányú minták rugalmassági modulus és Poisson-tényező értékei rendre alacsonyabbak, mint a palástirányú minták esetében számított paraméterek. A Poisson-tényező esetében ez a különbség kevésbé számottevő, a legtöbb esetben csupán néhány század, azonban az agyagkövek anizotropikus viselkedését a mérésekkel sikeresen alátámasztottuk.

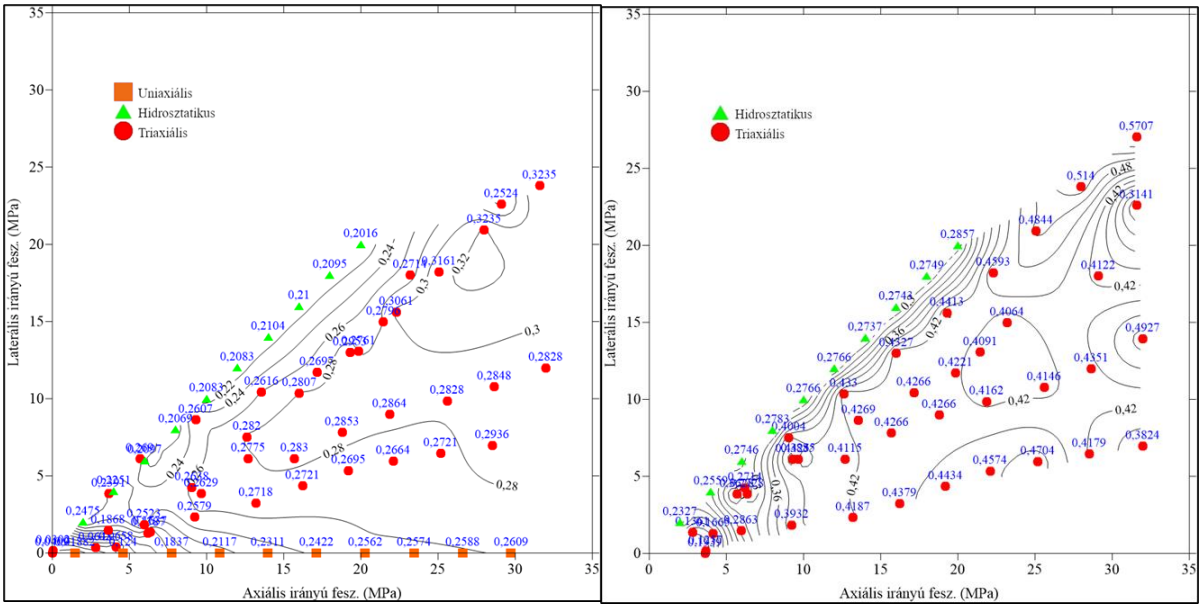
4.2. Kísérleti terheléses mérések eredményei

Jelen alfejezetben a három kísérleti méréssorozat (triaxiális, uniaxiális hiszterézis és hidrosztatikus) eredményeinek együttes ismertetését végezzük el. A mintázást előzetes tervet követve hasonló folyóméterből származó maganyagon végeztük el a helyszíni feszültségmérést követően, így minimalizálva a kőzetváltozatok különbségei és a külső igénybevételek okozta zavaró tényezőket. A kőzetmechanikai kísérletsorozat Magyarországon először a Kőmérő Kft. laboratóriumában lett kivitelezve. A mérések rugalmassági modulus értékeit sikerrel számítottuk ki a kifúrással párhuzamos (E_1), illetve arra merőleges tengelyek mentén (E_3), így a BAF anizotróp viselkedését egy mérés alapján is meg tudtuk figyelni (2. ábra). Ezeket a terheléses méréseket a minták tönkremenetele nélkül végeztük el.

Az ábrákon látható, hogy az axiális irányban számított rugalmassági paraméterek alacsonyabbak, mint a laterális értékek. Ez alátámasztja a vártakat, miszerint a kőzet rugalmasabb, jobban összenyomható az agyagrétegekre merőlegesen. A hiszterézis mérésekből nem végeztük el az E_3 megállapítását, mivel a méréseket csak egytengelyű terhelés mellett végeztük. A legkisebb különbség a két irányban megállapított paraméterek között a hidrosztatikus méréseknél látható, azonban ezt a minden irányban egyenlő feszültségtér okozta.



2. ábra: A BAF-4/OC-002 jelű minták rugalmassági modulus értékeinek paramétertérképei axiális (E_1; bal) és laterális (E_3; jobb) irányban



3. ábra: A BAF-4/OC-002 jelű minták Poisson-tényezőinek paramétertérképei μ_{13} (bal) és μ_{31} (jobb) irányban

A rugalmassági modulushoz hasonlóan kiszámítottuk a Poisson-tényezőt, mely a kőzetanyag feszültség hatására fellépő alakváltozásának arányairól nyújt képet. A Poisson-tényezőt a ráadott terhelés hatására annak irányára merőleges és azzal párhuzamos irányban kialakuló deformációk hányadosaként határozzuk meg. Ennek vizsgálatára az axiális (1) irányból a laterális (3) irányba mutató μ_{13}, valamint laterális irányból az axiális irányba mutató μ_{31} Poisson-tényezőket határoztuk meg és paramétertérképeken (3. ábra) szemléltetjük a feszültségtér módosulására adott változásaikat. Megemlítenénk, hogy az utóbbi paramétert mérési módszertan alapját adó Sigra Pty. Ltd. szakembereivel való egyeztetést követően a Betti-törvény (1. egyenlet) segítségével származtattuk, melyhez a többi közvetlenül számítható tényezőt használtuk fel.

1. egyenlet: μ_{31} számítása a Betti-törvény alapján

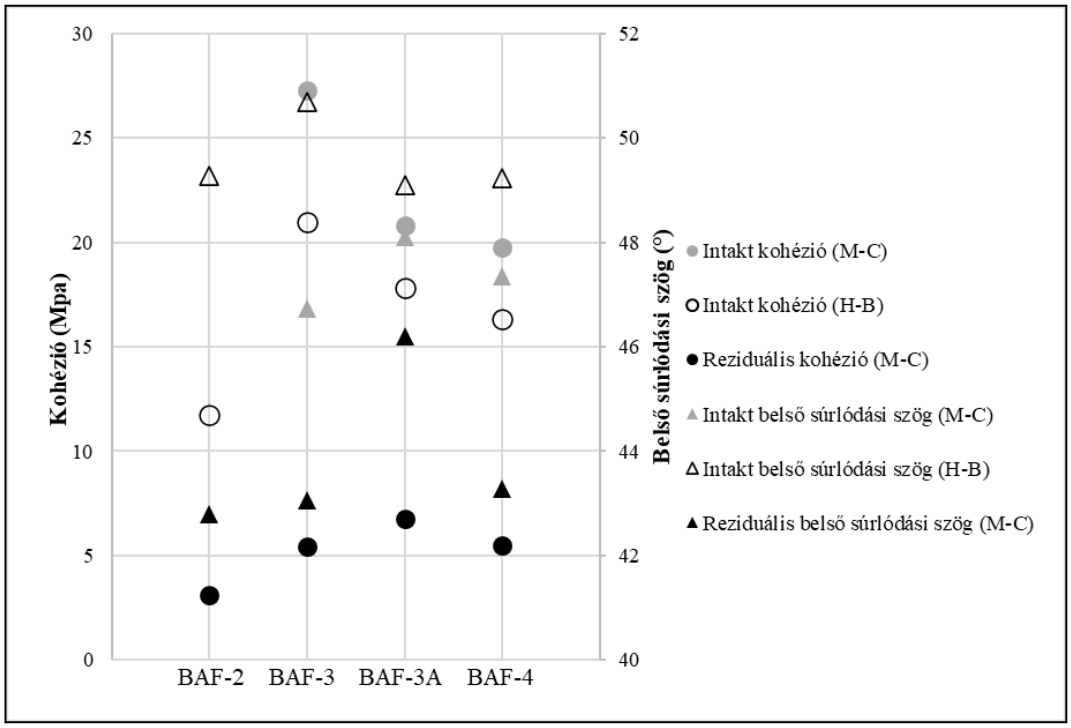
$$\mu_{31} = \frac{E_3}{E_1}\mu_{13}$$

4.3. Kovári módszer új eredményei

A korábbi BAF projektek során a minták vizsgált tönkremeneteli határgörbéinek elemzésénél az intakt állapotot csak a Hoek-Brown (H-B) kritérium szerint értelmeztük. Ugyan ez a megközelítés pontosabb eredményeket hoz természetes kőzetminták esetében, a Mohr-Coulomb (M-C) megközelítéssel való összehasonlítás további hasznos eredményeket hozhat, például input paraméterként numerikus modellezéshez. Módszer fejlesztésének köszönhetően a mérés pontosabbá vált, valamint lehetőségünk nyílt a tönkremenetel utáni mechanikai állapot vizsgálatára is.

Az új típusú Kovári mérésekkel a fúrások által feltárt képződmények mechanikai jellemzőit tovább pontosítottuk. Az alábbi ábrán láthatóak a BAF-2 jelű fúrásból vett Kovári minták paraméterei az újonnan mélyített fúrásokból mintázottakkal összehasonlítva (4. ábra).

A kőzetek, mint heterogén rendszerek többletinformációval szolgálnak a két kritérium összehasonlításával. A BAF-2 eredményekkel szemben az intakt kohéziónál látható a legnagyobb változás. A paraméter H-B szerinti értelmezése emelkedést mutat, valamint a M-C kohézió alacsony szórással illeszkedik ezen pontokra. Még alacsonyabb szórás figyelhető meg a belső súrlódási szög esetében. A reziduális paraméterek minden fúrás esetében alacsonyabbak, mint az intakt párjaik.

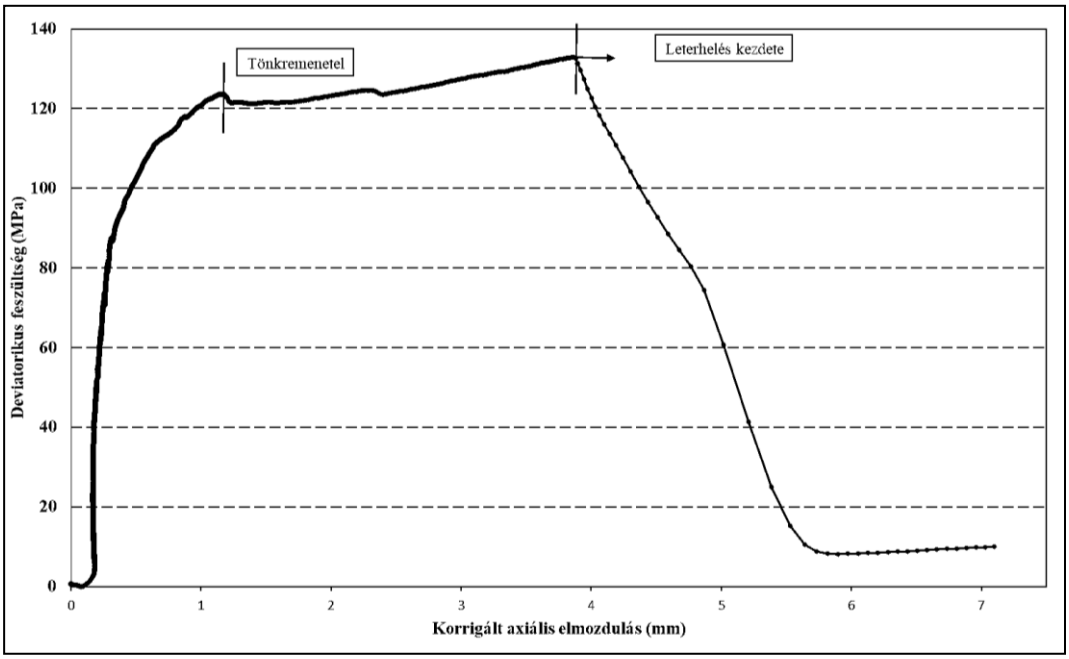


4. ábra: A fúrásokból vett Kovári minták átlagos eredményei

Crowder & Bawden 2004-es publikációjukban [1] az axiális elmozdulás deviatorikus feszültség függvényében végbemenő változását elemezték a minta tönkremenetelét követően. Az elmozdulás tendenciájából kiderül, hogy a törést követően a minta rideg, plasztikus vagy egy átmeneti mechanikai állapotot vesz-e fel. Ezt a módszert némiképp szintén továbbfejlesztettük, így az is vizsgálhatóvá vált, hogy a minták a „post-failure" szinteken stabil, felkeményedő vagy lágyuló képet mutatnak-e.

A BAF-3 jelű fúrásból vett 8 db Kovári minta közül 6 db mintán felkeményedően átmeneti, egy esetben stabil átmeneti viselkedést figyeltünk meg; egy esetben pedig nem volt értelmezhető a „post-failure" állapot. A fúrások maganyagából KHF és BAF mintákat is vettünk, azonban a törést követő viselkedés szempontjából a két formáció között érdemi különbség nem tapasztalható. A BAF-3A jelű fúrásból összesen 4 db Kovári mintát vettünk, mely alapján a „post-failure" állapot értékelését nem végezzük el. A BAF-4 jelű fúrás összesen 7 db Kovári minta állt rendelkezésünkre, ezek közül 5 db

stabilan átmeneti, 1 db felkeményedően átmeneti, 1 db pedig felkeményedően képlékeny viselkedést mutatott. Ez a minta az egész kutatási fázisban egyedi jellegű, azonban a jelenség okát nem sikerült egyértelműen kideríteni (5. ábra). Mindazonáltal szintén ehhez a mintához tartozott a legalacsonyabb H-B konstans m_i paraméter, 8,94-es értékkel. Ilyen alacsony m_i érték hagyományosan kevésbé konszolidált kőzetekhez tartozik, így a BAF kőzetváltozataira nem jellemző. Elképzelhető, hogy a minta mikroszerkezetében található valamilyen szétlazulás vagy a nem megfelelő mintaelőkészítés zavarta meg a szövetet. A kőzetet karbonáterek szőtték át, azonban ez bizonyos BAF minták esetében csak növeli a konszolidáció mértékét. A BAF-4 jelű fúrásból származó egyetlen riolit minta sem mutat egyedi „post-failure" képet, a kőzet viselkedése a tönkremenetelt követően stabilan átmeneti jellegű.



5. ábra: Felkeményedően képlékeny „post-failure" állapotot mutató BAF minta

Irodalom

[1] Crowder, J. J. & Bawden, W. F. (2004). *Review of Post-Peak Parameters and Behaviour of Rock Masses: Current Trends and Research.* University of Toronto, Canada: Lassonde Institute.

[2] Gray, I. Zhao, X. Liu, L. (2018). Determination of Anisotropic and Nonlinear Properies of Rock through Triaxial and Hydrostatic Testing. *10th Asian Rock Mechanics Symposium.* Singapore: The ISRM International Symposium.

[3] Martin, C. D. & Chandler, N. A. (1994). The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, pp. 643-659.

[4] Ulusay, R. & Hudson, J. A. (eds.). (2007). The complete ISRM Suggested Methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006 (The "Blue Book"). Ankara, Turkey: ISRM Turkish National Group.

[5] Ulusay, R. (ed). (2015). The ISRM Suggested Methods for rock chatacterisation testing and monitoring: 2007-2014. (The "Orange Book"). Cham, Switzerland: Springer.

A BAF kutatás 3. fázisának kőzetfizikai eredményei

Petrophysical results of the 3rd phase of BCF research

VIZHÁNYÓ ZSANETT[1], ÁCS PÉTER[1],
FEDOR FERENC[1]

[1]*Geochem Földtani és Környezetvédelmi Kutató, Tanácsadó és Szolgáltató Kft.,*
vizhanyo.zsanett@geochem-ltd.eu

Abstract

In the framework of BCF research, samples from boreholes BAF-3, BAF-4, and BAF-3A were investigated in order to characterize the target formations with respect to the petrophysical properties too. Complex pore structure and ink-bottle-shaped pores can be identified in the case of claystone samples. Low pressure hysteresis refers to restricted diffusion caused by micropores with small diameter. The majority of the samples can be characterized by tight mesopores excluding the Kővágószőlős Sandstone Fromation (KSF) and certain sandstone samples. The permeability of the samples determined basically by the rock type and the pore structure of the formations. Samples from the shallower part of KSF, have 5-6 orders of magnitude greater permeability than BCF samples, while in the case of Bakonya Sandstone, the difference is only 2-3 orders of magnitude. The measurements on BCF samples indicate that the low permeability measured on claystone can be increased by sandy layers, closed or opened veins, weaker surfaces. The continuation of the petrophysical measurements are necessary to characterize the formations. Increase in sample number as well as CT and water content measurements are recommended. An appropriately built up database is an essential criterion to measure the relationship between geophysical and laboratory data.

Összefoglaló

A BAF kutatás ezen szakaszában a lemélyített fúrásokból (BAF-3, BAF-4, BAF-3A) származó minták kőzetfizikai tulajdonságai is meghatározásra kerültek a célképződmények megismerése céljából. Az agyagkő minták esetén komplex pórusszerkezet és tintásüveg alakú pórusokból álló pórushálózat figyelhető meg, az alacsony nyomású hiszterézis kis átmérőjű mikropórusok okozta gátolt diffúzióra utal. A homokkő és aleurolit esetén lemezszerű szemcsék aggregátumaihoz kapcsolható pórusok jellemzők. A KHF és egyes homokkő szakaszokon kívül szűk mezopórus (d<5 nm) jellemzi a mintákat. A kőzettípus és a pórusszerkezet alapvetően meghatározza a képződmény áteresztőképességét. A Kővágószőlősi Homokkő Formáció sekélyebb részéből származó minták permeabilitása 5-6 nagyságrenddel meghaladja a BAF agyagkő permeabilitását, míg a Bakonyai Homokkő Tagozatot képviselő minták 2-3 nagyságrenddel. A BAF képződmények permeabilitás mérési eredményei azt mutatják, hogy az alapvetően kis áteresztőképességű agyagkő képződményekben az áramlás sebességét fokozza a homokos betelepülések, erek, gyengeségi síkok jelenléte. A képződmények megismeréséhez szükséges az eddig elvégzett kőzetfizikai vizsgálatok folytatása. Javasolt a mintaszám növelése mellett CT felvételek készítése, értelmezése és hasznosítása, valamint víztartalom vizsgálatok tervezése és kivitelezése. A megfelelő adatbázis kiépítése alapvető feltétele a laboratóriumi és geofizikai adatok kapcsolatának vizsgálatához..

Kulcsszavak: BAF, pórusszerkezet, permeabilitás

Bevezető

A Bodai Agyagkő Formáció 3. kutatási fázisában a BAF-3, BAF-4 és BAF-3A fúrások maganyagának kőzetfizikai minősítését végezte a GEOCHEM Kft. Az ún. alapcsomag vizsgálat magába foglalja a minta sűrűségének meghatározását (térfogatmérés, He-piknometria), a pórusszerkezet feltárását Hg-porozimetria és fiziszorpciós mérésekkel, valamint a minta gáz-és vízpermeabilitásának meghatározását PPD („*pressure pulse decay*”) módszerrel. A bővített csomag

vizsgálatok ezen felül magukba foglalják az ultrahang terjedési sebesség, fajlagos elektromos ellenállás, relatív dielektromos állandó és a minta mágneses szuszceptibilitásának meghatározását. Jelen tanulmány a vizsgált kőzetek pórusszerkezeti tulajdonságaira, valamint azok áteresztőképességére, az akusztikus és mágneses szuszceptibilitás mérésekre tér ki, az elkészült mérések eredményeit foglalja össze.

1. Minták és módszerek

1.1. Mintavételezés

A fúrásokból vett minták számát a 1. táblázat foglalja össze. A Kővágószőlősi Homokkő Formáció (KHF) a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) fedőjeként jelenik meg a mintázott szakaszok között kizárólag a BAF-3 fúrásban. A felszínhez közelebbi rétegek a Kővágótöttösi Homokkő Tagozat (KHF Kővágótöttösi Hkő T.) részei. A KHF Bakonyai Homokkő Tagozatában (KHF Bakonyai Hkő T.) 5 helyen került sor a mintavételre. A Bodai Agyagkő Formációból összesen 29 alkalommal (15 db – Dombói Tagozat, 14 db – Fűzi Tagozat), míg a Gyűrűfűi Formációból 2 alkalommal történt mintázás.

1. táblázat: Kőzetfizika vizsgálati csomagok száma a fúrásokban

Fúrás az.	*Kővágószőlősi Homokkő Formáció*		*Bodai Agyagkő Formáció*		*Gyűrűfűi Formáció*	*Összesen*
	Kővágótöttösi Homokkő Tagozat	*Bakonyai Homokkő Tagozat*	*Dombói Tagozat*	*Fűzi Tagozat*		
BAF-3	2	5	7	0	0	14
BAF-4	0	0	5	8	2	15
BAF-3A	0	0	3	6	0	9
Összesen	2	5	15	14	2	38

A vizsgálatok elvégzéséhez az eredeti mintákból alminták kerültek kialakításra. Minden esetben a vizsgálati csomag 3 db 1,5” átmérőjű hengeres mintatestet (kőzetdugó, plug) tartalmaz. Vizsgálati csomagonként egy minta levágott véglapjain kerül kivitelezésre a Hg-porozimetria és a fiziszorpciós mérés.

1.2. Pórusszerkezet vizsgálatok

A kialakított d=1,5” kőzetdugók váztérfogatát egy Quantachrome Pentapyc 5200e (PPY-30T) készülékkel határoztuk meg 25 °C-on. A méréseket a BAF-3 és BAF-4 fúrásokból származó légszáraz mintákon végeztük. A kőzetdugók geometriai térfogatát 11-11 független hossz és átmérő mérés eredményéből számítottuk. Geometriai térfogat és a váztérfogat ismeretében a hélium-porozitás (φ_{He}) számítható, meghatározásra került még a vázsűrűség ($\rho_{váz}$) és a fajlagos sűrűség ($\rho_{fajlagos}$) is.

Higany porozimetriás mérések Quantachrome Poremaster-60 GT készülékkel készültek. A maximum (420 MPa) és minimum (1,5 kPa) alkalmazott nyomás hengeres alakú pórusokat feltételezve 3 nm és 800 μm pórustorok átmérőnek felel meg a Washburn-egyenlet alapján [2]. Számításhoz szükséges kontaktszög Quantachrome kontakt anglométerrel, három mérés átlagaként adódott. Felületi feszültség értéke 485,5 erg/cm^2 (485,5 mN/m) volt. Vizsgálat során meghatározásra került az előzetesen szárított (105 °C) törmelékminták pórustorokméret-eloszlása mezo- és makropórus tartományban.

A N_2 (77 K) és CO_2 (273 K) adszorpciós-deszorpciós izotermák mérése egy Quantachrome Autosorb AS-1 készülékkel történt. Szárítás után (105 °C) a BAF-3, BAF-3A és BAF-4 törmelék mintákat további 1 napig ki kellett gázosítani vákuum alatt 105°C-on. Nitrogén gáz esetén a BET

fajlagos felületet (S_{BET}), teljes pórustérfogatot (V_{tot}), pórusméret eloszlást (BJH módszer) határoztuk meg. Szén-dioxid gáz esetén Dubinin-Radushkevich módszerrel a minták mikropórus felülete (S_{mic}) és térfogata (V_{mic}) számolható.

1.3. Permeabilitás mérés

A hengeres mintatestek víz-és gázpermeabilitását ún. nyomáslecsengés elven („*pressure pulse decay*", PPD) határoztuk meg. Nagyon kis áteresztőképességű kőzetek (0,01 D-100 pD nagyságrendű) vizsgálatára fejlesztett RS-PPD műszer a vizsgált minta vizes és gázos permeabilitásának meghatározására alkalmas. A nagynyomású hidrosztatikus cellában elhelyezett mintatesten rezervoár körülmények biztosítása mellett kivitelezhetők a mérések.

A minták permeabilitása a munkatervnek megfelelően a minta légszáraz, ultratiszta vízzel szaturált és 105 °C-on tömegállandóságig kiszárított állapotában is meghatározásra került. A mérések során alkalmazott effektív nyomás a sűrűségszelvényből került kiszámításra [5].

1.4. Akusztikus hullám terjedési sebesség mérése

Az akusztikus hullám terjedési sebességek meghatározása impulzusátviteli módszer segítségével történtek a GEOCHEM Kft. által fejlesztett SRL-A1000 típusú műszerrel. A hengeres mintatest két véglapján elhelyezett jeladó-vevő pár segítségével méri a „P" és „S" hullámok átfutási idejét. A mérés során alkalmazott jeladók középponti frekvenciája 1 MHz volt, a P- és S-hullámok esetén egyaránt. Az átfutási idők meghatározása minden esetben az első letörés („first break") kijelölésével történt a GEOCHEM Kft. által fejlesztett automatikus feldolgozó szoftver segítségével. A kompressziós- és nyíróhullám terjedési sebességek alapján származtatott dinamikus rugalmassági paraméterek (pl. Poisson tényező, Young modulus) minden esetben homogén, izotróp és lineárisan rugalmas anyagmodellt feltételeznek.Az ultrahang terjedési sebesség mérés a mélységnek megfelelő effektív nyomás alkalmazása mellett zajlott [5].

1.5. Mágneses szuszceptibilitás mérés

A mintatestek mágneses szuszceptibilitása Bartington MS3 műszerrel, 40 mm belső átmérővel rendelkező szenzorral került meghatározásra. A módszer alapja, hogy a mágneses térbe kerülő bármilyen anyag a kis intenzitású mágneses tér kialakítására használt oszcillátor frekvenciájában változást idéz elő. A detektálható frekvenciát az adott anyag, a minta mágneses momentuma fogja meghatározni. A referenciaállapotot a szenzor üres állásában a levegő permeabilitása adja. A levegő és a minta permeabilitás értékének ismeretében lehetőség van a minta mágneses szuszceptibilitásának meghatározására. Geológiai minták esetén nem csak a ferromágneses anyagok jelenlétét képes kimutatni, de a Fe^{2+}, Fe^{3+} és Mn^{2+} tartalmú agyag- és karbonát ásványokét is.

2. Eredmények

2.1. Pórusszerkezet

2. táblázat: BAF-3 és BAF-4 fúrás különböző formációhoz és tagozathoz tartozó légszáraz minták He-piknometriás eredményei

Formáció, Tagozat	$\rho_{váz}$	$\rho_{fajlagos}$	φ_{He}
	[g/cm³]	*[g/cm³]*	*[%]*
KHF Kővágótöttösi Hkő T, mállott homokkő (N=3)	2,6455±0,0011	2,264±0,057	14,44±2,18
KHF Kővágótöttösi Hkő T, agyagos homokkő (N=3)	2,6566±0,0040	2,508±0,007	5,59±0,26

Formáció, Tagozat	$\rho_{váz}$	$\rho_{fajlagos}$	φ_{He}
	[g/cm³]	*[g/cm³]*	*[%]*
KHF Bakonyai Hkő T (N=15)	2,6718±0,0139	2,619±0,013	1,98±0,17
BAF Dombói T (N=36)	2,7299±0,0163	2,703±0,021	0,97±0,41
BAF Fűzi T (N=18)	2,7085±0,0216	2,681±0,030	1,00±0,56
BAF Fűzi T, aleurolit (homokos) (N=3)	2,7035±0,0125	2,581±0,035	4,53±1,72
BAF Fűzi T, homokkő (aleuritos, finomhomok) (N=3)	2,7115±0,0016	2,447±0,079	9,74±2,83
Gyűrűfűi F (N=6)	2,6506±0,0090	2,600±0,011	1,91±0,24

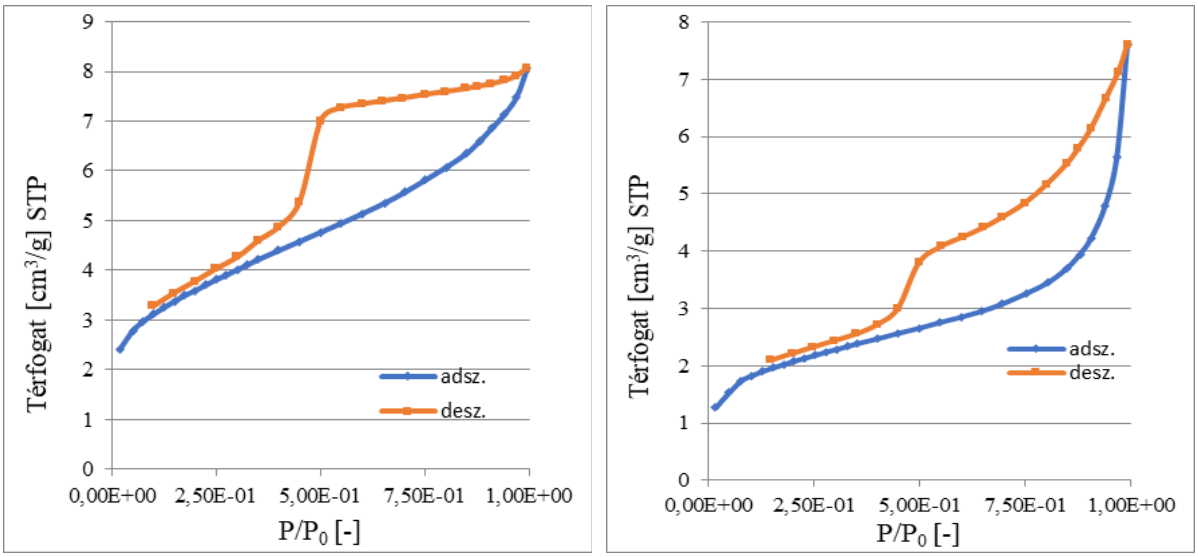
A He-piknometriás eredmények alapján a legnagyobb vázsűrűség a BAF Dombói Tagozat mintáihoz tartozik (2. táblázat). A Kővágótöttösi Tagozat eredményeit kétfelé kellett bontani, ugyanis a mállott homokkő He-porozitása jóval nagyobb, mint az agyagos homokkőé. Ugyanezen okból a Fűzi Tagozat mintáitól is elkülönítettük az aleurolit és homokkő mintákat.

A fiziszorpciós mérésből származó adszorpciós-deszorpciós izoterma alakja alapvető információkat hordoz a pórusszerkezettel kapcsolatban, erre vonatkozóan a IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) osztályozást lehet használni. A vizsgált minták alakja a IV. típushoz mutat hasonlóságot, ez a típus általában mezopórusos, mikropórusos anyagokra jellemző. Minden minta esetén megfigyelhető, hogy az izotermákon az adszorpciós és deszorpciós ág nem esik egybe (1. ábra). Ez a hiszterézis jelensége, amely a kapilláris kondenzációval kapcsolatos és a hozzá tartozó a hiszterézis hurok osztályozása szintén a IUPAC ajánlás alapján történik. A vizsgálatok során kétfajta H2(a) és H3 hiszterézis hurkot azonosítottunk a minták izotermáin (3. táblázat). A H3 típust lemezszerű szemcsék nem merev aggregátumai esetén figyelték meg, illetve olyan makropórusok esetén, amelyek nincsenek teljesen kitöltve a kondenzátummal [7].

3. táblázat: BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrás különböző formációhoz és tagozathoz tartozó minták fiziszorpciós eredményei

Formáció, Tagozat	S_{BET}	S_{mic}	*Pórusszerkezet a hiszterézis hurok alapján*
	[m²/g]	*[m²/g]*	
KHF Kővágótöttösi Hkő T (N=2)	6-9	4-7	H3
KHF Bakonyai Hkő T (N=5)	2-4 8*	2-3 10*	H3, *aleurolitos kőzetnél magasabb S_{BET} és S_{mic}
BAF Dombói T (N=15)	5-21	5-17	H2(a)
BAF Fűzi T (N=14)	1-7 13*	2-9 19*	agyagkő esetén H2(a), aleurolit esetén H3 *746 m (BAF-4) agyagkőnél kiugró értékek
Gyűrűfűi F (N=2)	<1	1	H2(a) és H3

megjegyzés: H2(a): komplex pórusszerkezet, pórusblokkolás, szűk pórustorkok, H3: lemezszerű szemcsék nem merev aggregátumai-hoz köthető pórusok



1. ábra: N_2 gázzal felvett adszorpciós-deszorpciós izoterma BAF-4 G-54818 agyagkő mintán H2(a) (bal) és BAF-3 G-54486 aleurolitos minta H3 hiszterézis hurokkal

A H2(a) osztályhoz komplex pórusszerkezet, tintásüveg alakú pórusokból álló pórushálózat (pore network) köthető. Ebben az esetben a pórustorkok egy kritikus átmérőnél kisebbek, ami N_2 gáz esetén (77 K) ~ 6 nm [1]. A H3 típust homokkő és aleurolit, míg a H2(a) típust agyagkő minták esetén figyeltük meg. Agyagos és aleuritos kőzetek nagy része esetén a N_2 adszorpciós és deszorpciós ág nem záródott P/P_0~0,42 értéknél. Ez a jelenség az alacsony nyomású hiszterézis, melynek oka lehet egyrészt a kis átmérőjű mikropórusok okozta gátolt diffúzió, illetve a nem megfelelő kigázosítási paraméterek alkalmazása [6]. A pórusméret eloszlás eredményekből úgy tűnik a minták általában szűk mezopórusokat (<5 nm) tartalmaznak. Ezt alátámasztják a Hg-porozimetriás pórustorokméret-eloszlás eredmények, ahol a minták nagy részénél 5-6 nm alatt látható Hg beáramlás. Ennél nagyobb pórustorok értékeket a KHF-ben és a BAF Fűzi Tagozat homokkő és egyes aleurolit (homokos) szakaszain figyeltünk meg.

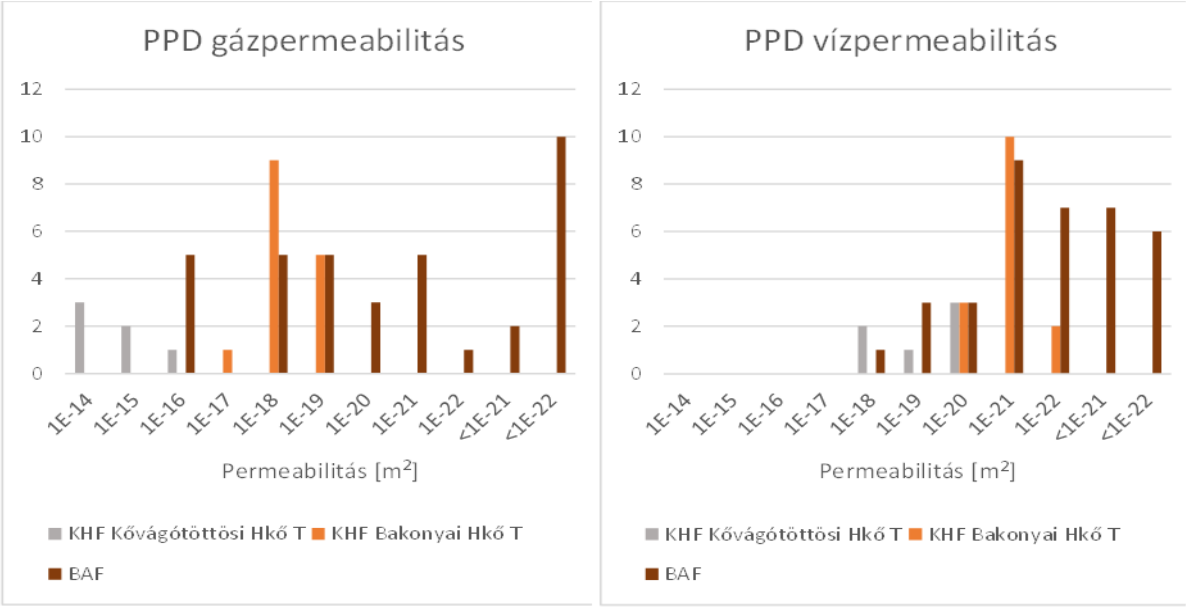
2.2. Permeabilitás

A minta kiszárítását követően a gázpermeabilitás jellemzően 1-2 nagyságrenddel meghaladja a légszáraz állapotban mért értékeket. A legnagyobb permeabilitással rendelkező minták a Kővágószőlősi Homokkő Formáció mintáit képviselik. Ezek között is kiemelkedő permeabilitással rendelkeznek azon mintatestek, melyek sekélyebb mélységből, a mállott zónából származnak (KHF Kővágótöttösi Hkő T.) (2. ábra).

A BAF minták gáz-és vízpermeabilitása a minták felénél a jelenlegi körülmények között nem mérhető tartományba esett, ami azt jelenti, hogy a mérés során a műszer nem rögzített nyomásváltozást, vagy a nyomásváltozást a hőmérséklet ingadozása okozta.

A BAF minták között a legnagyobb gázpermeabilitása a dolomitosodott, erekkel szabdalt mintatesteknek van. Főként ezek az erek, felnyílások határozzák meg az áramlást. Ezen minták vízpermeabilitása a gázpermeabilitásnál nagyságrendekkel kisebb, gyakran esik az általunk nem detektálható tartományba. A minták egy második csoportját alkotják azok, melyek gázpermeabilitása nem volt meghatározható, azonban a vízpermeabilitás mérés során a különbözeti nyomás csökkenését rögzítette az adatgyűjtő szoftver. A nyomás lecsengése valószínűleg a repedéseken keresztül valósulhatott meg. A minták eltérő viselkedése, permeabilitása kőzettani okokra vezethető vissza. Anomálisan nagy áteresztőképességet okozhatnak az üledékes kőzetekben a rétegződéshez köthető

gyengeségi síkok, valamint a mintában lévő repedések, melyek kifejezetten jól azonosíthatók a nedves minták száradásakor.



2. ábra: Egyes litosztratigráfiai egységek PPD permeabilitásának megoszlása (bal: gázpermeabilitás, jobb: vízpermeabilitás)

2.3. Akusztikus hullám terjedési sebesség

A legkisebb ultrahang terjedési sebesség értéket veszi fel a Kővágószőlősi Homokkő Formáció Kővágótöttösi Tagozat mintái, míg a legnagyobb ultrahang terjedési sebességeket a BAF Dombói Tagozatának mintái adták. A Bakonyai Homokkő Tagozat és BAF Fűzi Tagozatának mintáin mért P és S hullám terjedési sebesség értékek közötti különbség csekély (4. táblázat)

4. táblázat: Akusztikus hullámok terjedési sebessége vízzel telített mintán

Formáció, Tagozat	v_p – *vízzel telített*	v_s – *vízzel telített*
	[m/s]	*[m/s]*
KHF Kővágótöttösi Hkő T. (N=3)	3812±146	1962±164
KHF Bakonyai Hkő T (N=6)	4964±105	2975±72
BAF Dombói T (N=9)	5235±202	3027±163
BAF Fűzi T (N=3)	4945±105	2887±72

2.4. Mágneses szuszceptibilitás

A projekt során vizsgált minták között a legkisebb mágneses szuszceptibilitása a Kővágótöttösi Tagozatba sorolt mintáknak van. Lényegesen nagyobb A Bakonyai Homokkő Tagozat és a BAF minták mágneses szuszceptibilitása, míg a mintahalmazban a legnagyobb értékeket a Gyűrűfűi Formáció mintái képviselik.

5. táblázat: A mágneses szuszceptibilitás mérési eredmények

Formáció, Tagozat	*Mágneses szuszceptibilitás (log_{10})*
	[SI]
KHF Kővágótöttösi Hkő T. (N=3)	-4,067±0,049
KHF Bakonyai Hkő T (N=6)	-3,502±0,117
BAF Dombói T (N=18)	-3,366±0,072
BAF Fűzi T (N=12)	-3,275±0,079
Gyűrűfűi F (N=3)	-3,051±0,046

3. A VP, VS geofizikai szelvények, valamint a száraz és vízzel telített mintán mért P és S hullám terjedési sebességének kapcsolata a BAF-3 fúrásban

A kőzetfizikai laboratóriumi adatok és geofizikai szelvények együttes vizsgálatakor több tényezőt is érdemes figyelembe venni. A vizsgálat akkor elvégezhető, ha az adatpontok ugyanazt a mögöttes populációt képviselik. A formáció heterogenitása ebben az esetben kulcskérdés, hiszen a két módszer által vizsgált térfogat között nagyságrendi különbségek vannak [8]. A mintavételezés kőzetfizikai vizsgálatokhoz kizárólag ép szakaszokból történhet, ezáltal ezek a szakaszok felülreprezentáltak a mintahalmazban. A geofizikai és laboratóriumi akusztikus mérések eltérő frekvenciatartományon kerülnek kivitelezésre, ezáltal a mérési eredmények különböző típusú alakváltozásról hordoznak információt [2].

Az alap és bővített csomagok kőzetfizikai eredményei csak korlátozott mértékben hasonlíthatók össze egymással. A legfőbb korlátozó tényező a mintavétel száma és helye, mely a laboratóriumi vizsgálatok esetén jóval a szelvények adatpontjai alatt marad. A mintavétel és a geofizikai szelvény adatpontjainak helye nem minden esetben egyezett meg, ezért a szelvények alapján új értékeket számítottunk ki az adott x mintavételi helyeken.

Kvantitatív változók közötti lineáris kapcsolat irányának és szorosságának felderítésére alkalmas módszer a korreláció [3]. A kapcsolatok nem-paraméteres vizsgálatát rangkorrelációval lehet elvégezni (Spearman-féle rangkorreláció). A vizsgálat nem igényli az összehasonlítandó paraméterek normál eloszlását, ezáltal kevésbé érzékeny a kiugró értékekre.

Az akusztikus hullám terjedési sebesség a bővített csomag vizsgálatai közé tartozik, ezáltal a BAF-3 fúrásban 18 db hengeres minta nedves állapotában történtek mérések. Emellett az akusztikus hullám terjedési sebesség az alapcsomag mintáin is meghatározásra került a minta száraz állapotában, így a korrelációban ezek a paraméterek is szerepelhetnek, növelve ezzel az adatpontok számát.

A 6. táblázatban szerepelnek a korrelációs együtthatók. A vizsgálatban részt vevő paraméterek:

- VP: geofizikai szelvény
- VS: geofizikai szelvény
- Vp V labor: A minta nedves állapotában, laboratóriumban mért P hullám terjedési sebesség.
- Vs1 V labor: A minta nedves állapotában, laboratóriumban mért S hullám terjedési sebesség.
- Vp SZ labor: A minta száraz állapotában, laboratóriumban mért P hullám terjedési sebesség.
- Vs1 SZ labor: A minta száraz állapotában, laboratóriumban mért S hullám terjedési sebesség.

Az összes párosítás esetén az együttható értéke statisztikailag szignifikáns, a változók között lineáris, pozitív irányú kapcsolat van, melynek szorosságát jellemzi a korrelációs együttható.

6. táblázat: A akusztikus hullám terjedési sebesség mérések korrelációs együtthatóinak táblázata

	Vs1 V labor	***Vp V labor***	***VP karotázs***	***VS karotázs***	***Vp SZ labor***	***Vs1 SZ labor***
Vs1 V labor		0,8617	0,6677	0,5170	0,7420	0,8762
Vp V labor	0,8617		0,8844	0,5624	0,9587	0,9174
VP karotázs	0,6677	0,8844		0,6429	0,9546	0,7895
VS karotázs	0,5170	0,5624	0,6429		0,6223	0,5418
Vp SZ labor	0,7420	0,9587	0,9546	0,6223		0,8638
Vs1 SZ labor	0,8762	0,9174	0,7895	0,5418	0,8638	

4. Összefoglaló, javaslatok

A kőzetfizikai laboratóriumi mérések végeztével a kialakuló adatbázis segíti a célképződmények megismerését, megfelelő alapot képez a további mérések és kísérletek, valamint a későbbi projektszakaszok mintázási programjának megtervezéséhez. A kőzetfizikai és geofizikai mérési eredmények összevetésének, a felskálázásnak, amennyiben arra lehetőség van, matematikai alapokon kell megtörténnie. A kőzetfizikai kőzetosztályozáshoz (tipizálás) elengedhetetlen a megfelelő méretű adatbázis kiépítése, a kapcsolatok vizsgálata és kiértékelése. Az ezen alapuló értelmezés elősegíti, hogy a már ismert képződmények a geofizikai szelvényeken beazonosíthatóak legyenek és így a kutató az anomáliák vizsgálatára tud összpontosítani a kutatás későbbi fázisában.

Irodalom

[1] Cychosz, K. A., Thommes, M. (2018): Progress in the Physisorption Characterization of Nanoporous Gas Storage Materials, Engineering, 4, 559–566.

[2] Fedor, F., Máthé, Z., Koroncz, P., Ács, P. (2016): A BAF-2 BAF-1, -1A fúrások kőzetanyagán végzett geokémiai, ásványtani és kőzetfizikai laboratóriumi vizsgálati mérések eredményei, BAF kutatás szakmai előadói nap kiadványa, Pécs

[3] Geiger, J. (2007): Geomatematika – JATEPress Kiadó, Szeged, pp. 34, pp. 87

[4] Giesche, H. (2006): Mercury porosimetry: A general (practical) overview, Part. Part. Syst. Charact, 23, 9-19.

[5] Jaeger, J. C.; Cook, N. G. W. (1969): Fundamentals of Rock Mechanics, 2nd ed.; Chapman & Hall: Place of publication not identified

[6] Silvestre-Albero, A. M., Juarez-Galan, J. M., Silvestre-Albero, J., Rodríguez-Reinoso, F. (2012): Low-Pressure Hysteresis in Adsorption: An Artifact?. J. Phys. Chem. C, (2012), 16652-16655.

[7] Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W. (2015): Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem., 85, 1051-1069.

[8] Zilahi-Sebess L. (2009): A porozitás és permeabilitás, valamint kőzetsűrűség geofizikai úton történő becslésének módszerei és eszközei. State-of-the-art tanulmány – Kézirat, GEOCHEM Kft.

A BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrások földtani jellemzői

Geological properties of the BAF-3, -BAF-3A and BAF-4 boreholes

HÁMOS GÁBOR [1], BENŐ DÁVID [2],
SÁMSON MARGIT [3], SZABÓ RICHÁRD[4]

[1] *MECSEKÉRC Zrt., hamosgabor@mecsekerc.hu,*
[2] *MECSEKÉRC Zrt., benodavid@mecsekerc.hu*
[3]*MECSEKÉRC Zrt., samsonmargit@mecsekerc.hu,*
[4] *szaborichard85@gmail.com,*

Abstract

The publication summarize the geological documentation results of the three recently drilled (BAF-3; -3A; BAF-4) exploratory drillings which aimed to specify the thickness-, stratigraphic characteristics and deposition and structural position of the middle permian age Bodai Agyagkő Formáció (BAF), and situated in the known BAF area, on the northern wing of the Kővágószőlős anticline – between the Hetvehely-Magyarszék and Boda-Büdöskút structural belts. The new learnings fit into the previously established geological- and structural picture about the W-Mecsek, the Kővágószőlős anticline, and verified the BAF thickness development that is more than 800 meters and the stratigraphical build up known so far. On the other hand in the lowest section of the BAF-4, the small, interfracture apparent thickness of the Cserdi Formation, the appearance of the Gyűrűfűi Lapillitufa Formation in high stratigraphical position in its base, as well as the prevailing NNW direction dip of the layers of the BAF in the whole crossection under 20 m indicate a more complex structural position and the varying thickness development and basement morpholgy of the BAF overlaying formations near the Hetvehely-Magyarszék structural belt zone, that bordering the Kővágószőlős anticline from the NW. The BAF-4 drilling crossed two, around 1 meter thick, lower Cretaceous alkaline basalt vein in the Dombói Division of the BAF.

Összefoglaló

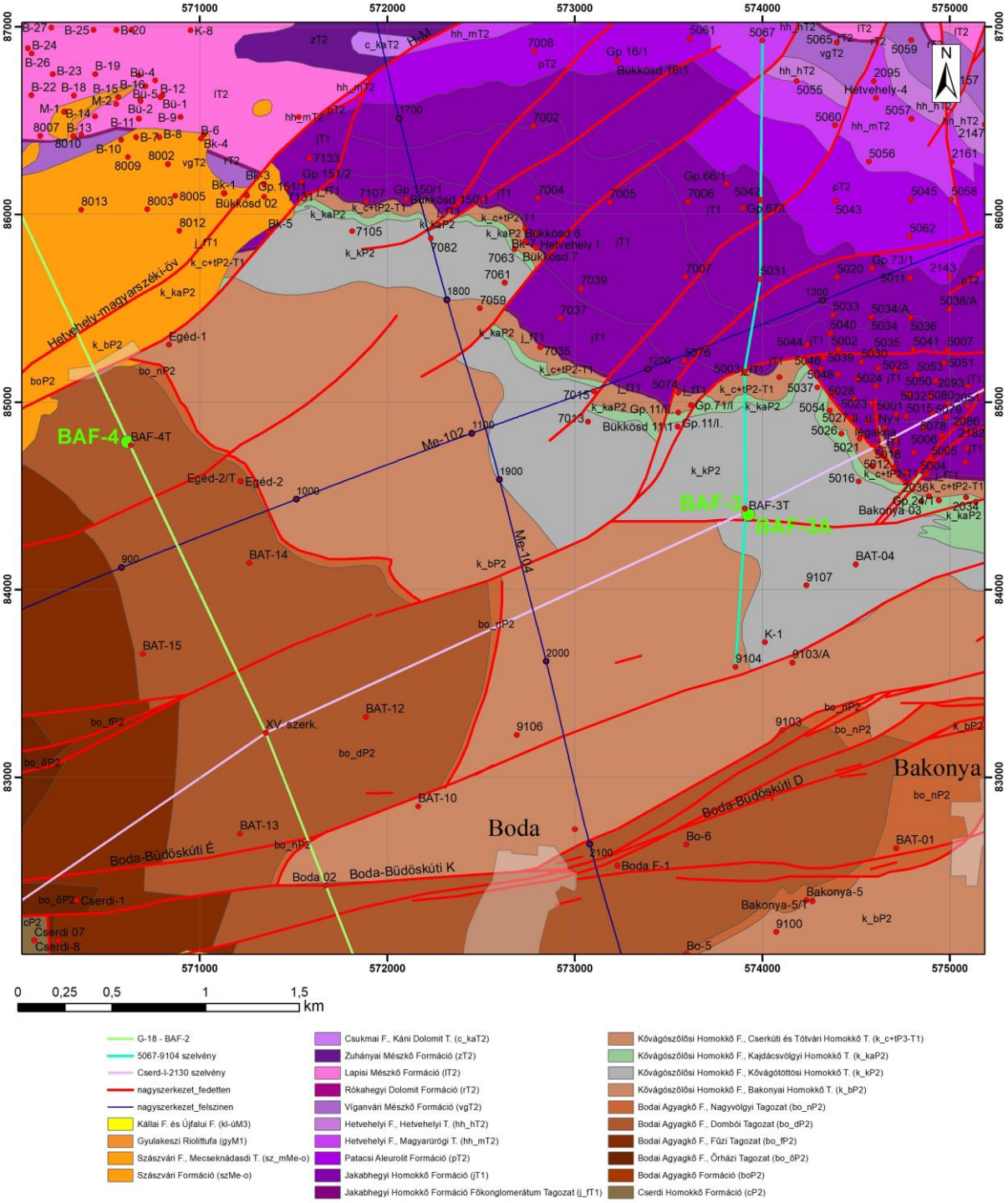
A közlemény a középső perm korú Bodai Agyagkő Formáció (BAF) elterjedési területén belül a kővágószőlősi antiklinális északi szárnyán – a Hetvehely-Magyarszék és Boda-Büdöskúti szerkezeti övek közötti terület – mélyült három új (BAF-3, -3A, BAF-4), a BAF vastagsági, rétegtani jellemzőit és települési, szerkezeti helyzetét pontosító kutatófúrás földtani dokumentálási eredményeit összegzi. Az új ismeretek beleillenek a Ny-Mecsekről, a kővágószőlősi antiklinálisról korábban kialakított szerkezeti és általános földtani képbe, igazolták a BAF 800 métert meghaladó vastagsági kifejlődését, eddig megismert rétegtani felépítését. Ugyanakkor a BAF-4 fúrás legalsó szakaszán a Cserdi Formáció igen vékony, törések közötti harántolási vastagsága és a feküjében magas rétegtani helyzetben feltárt Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció megjelenése, valamint a BAF rétegeinek 20 m alatt, a teljes szelvényben uralkodó ÉÉNy-i irányú rétegdőlései összetettebb szerkezeti helyzetre és a BAF feküképződményeinek változékonyabb vastagsági kifejlődésére, aljzati morfológiájára utalnak a kővágószőlősi antiklinálist ÉNy-ról határoló Hetvehely-Magyarszék szerkezeti övhöz közeli zónában. A BAF-4 fúrás a Bodai Agyagkő Formáció Dombói Tagozatában két 1 m körüli vastagságú alsó-kréta alkáli bazalt telért is harántolt.

Kulcsszavak: BAF-3, BAF-3A, BAF-4 fúrások, kővágószőlősi antiklinális, BAF Nagyvölgyi T., Dombói T., Fűzi T., Őrházi T., Kővágótöttösi Homokkő T., Bakonyai Homokkő T., Cserdi Formáció, Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció, Mecsekjánosi Bazalt Formáció, litofácies

Bevezetés

A BAF projekt kutatási területén az elmúlt 4 évben 3 új, földtani célja szerint alapfúrás mélyült, elsősorban a Bodai Agyagkő Formáció (továbbiakban BAF) településének, belső felépítésének és a ha-

rántolt képződmények hidraulikai tulajdonságainak a megismerésére [7]. A BAF-4 fúrás a kővágószőlősi antiklinális ÉÉNy-i redőszárnyán, a Hetvehely-Magyarszék szerkezeti övtől DDK-i irányban közelítőleg 400 m-re, a BAF-3, -3A fúrások (azonos fúrási alapról mélyített fúráspár) pedig az antiklinális tengelyzónájában, a Boda-Büdöskúti szerkezeti övtől ÉÉNy-ra ~1200 m-re mélyült (1. ábra).



1. ábra: A BAF-3, BAF-3A, BAF-4 fúrások földtani környezete [3], [5]

Mindkét fúrási helyszínen ~92-95%-os magkihozatali %-kal fúrt maganyag (a BAF-3, -3A fúráspárnál 40 m-t meghaladó átfedéssel) tette lehetővé a teljes harántolt rétegsor fotódokumentációjának (helyszíni kiépítés és magládafotók, nagyfelbontású magládafotók) elkészítését, geotechnikai dokumentálásának, magszkenneres felvételezésének és földtani-tektonikai dokumentációjának kivitelezését a felsorolt sorrendben és az ezt követő mintázásokat a tervezett laboratóriumi vizsgálatokhoz [1], [2], [3]. A

helyszíni fotókat a Bátkontroll Kft., a nagyfelbontású magládafotókat a MECSEKÉRC Zrt., a magszkennelést a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (2022 január 1-től Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága), a geotechnikai dokumentációt a Kőmérő Kft., a földtani-tektonikai dokumentációt pedig a MECSEKÉRC Zrt. szakemberei készítették, ill. végezték.

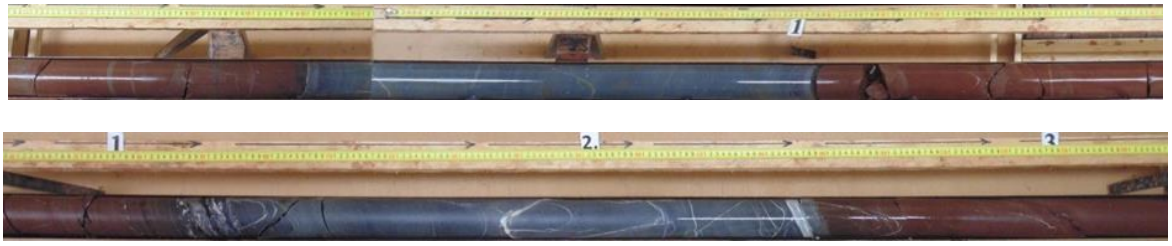
1. A BAF-4 fúrás földtani jellemzői

A BAF-4 fúrás a kővágószőlősi antiklinális északi szárnyának É-i zónájában mélyült 901,14 m-es talpmélységgel, 884,4 m valódi függőleges mélységgel, az uralkodó rétegdőlési iránnyal szembeni (~150° irányú) 134,0 m-es talpeltéréssel (1. táblázat). Vékony fiatal, negyedidőszaki fedő rétegszakasz – 8,08 m vastag agyagos kőzetliszt, lösz anyagú lejtőüledék, az alsó fél méterében BAF törmelékkel – alatt [9] harántolta az alaphegységi középső perm korú BAF tagozatait (Dombói, Fűzi és Őrházi Tagozatok) több mint 840 méter hosszban, annak Dombói Tagozatából indulva. A BAF Őrházi Tagozat tektonikus határral települ a fekü középső perm Cserdi Formáció igen vékony, 849,16-851,41 m közötti breccsás jellegű, kőzettörmelékes, riolitkavicsos homokkő rétegszakaszára (3. ábra). A Cserdi Formáció rétegei alatt pedig a középső-perm Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció (korábban Gyűrűfűi Riolit F.) szürkés-lilásbarna, barnáslila, egyveretű, kristálygazdag, porfiros kőzeteit érintette a 901,14 m-es fúrási talpmélységig (4. ábra). A BAF lepusztult legfelső rétegszakasza kb. 150-200 m vastagságúra becsülhető, benne a földtani térképezések alapján elkülönített legfelső Nagyvölgyi Tagozat rétegeivel [5], [6].

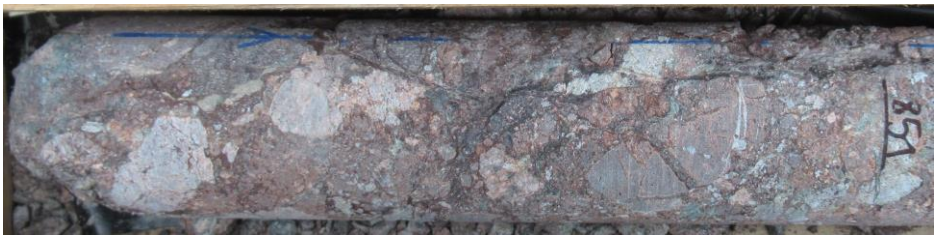
1. táblázat: A BAF-4 fúrás rövid rétegsora

Mélységköz (m)		Kőzet	Litosztratigráfiai egység	Kor
0,00	8,08	agyagos aleurolit, agyagos kőzetliszt (áthalmozott lösz), 7,57 m-től BAF lejtőtörmelékkel		negyedidőszak (Q)
8,08	15,05	tektonizált agyagkő vagy regolit (a Bodai Agyagkő változó mértékben mállott kőzetanyaga vagy törmeléke)	BAF, Dombói Tagozat (?)	középső-perm (?) ($^{bo}{}_{d}P_2$)
15,05	173,67	aleuritos agyagkő dolomitos agyagkő, dolomitos aleurolit, ritkábban dolomit anyagú rétegek ciklusos betelepülésével	BAF, Dombói Tagozat	középső-perm ($^{bo}{}_{d}P_2$)
173,67	174,59	sötét zöldesszürke alkáli bazalt	Mecsekjánosi Bazalt Formáció	alsó-kréta $^{m}K_1$
174,59	426,71	aleuritos agyagkő dolomitos agyagkő, dolomitos aleurolit, ritkábban dolomit anyagú rétegek ciklusos betelepülésével	BAF, Dombói Tagozat	középső-perm ($^{bo}{}_{d}P_2$)
426,71	427,71	sötét zöldesszürke, fehér kalcitérhálós alkáli bazalt	Mecsekjánosi Bazalt Formáció	alsó-kréta $^{m}K_1$
427,71	471,35	aleuritos agyagkő, dolomitos agyagkő, dolomitos aleurolit, ritkábban dolomit anyagú rétegek ciklusos betelepülésével	BAF, Dombói Tagozat	középső-perm ($^{bo}{}_{d}P_2$)
471,35	780,10	aleuritos agyagkő és párhuzamosan sávozott, vékonyréteges finomszemű homokkő, homokos aleurolit, homokos agyagkő, agyagos aleurolit rétegek	BAF, Fűzi Tagozat	középső-perm ($^{bo}{}_{f}P_2$)
780,10	849,15	rosszul rétegzett aleurolit, agyagkő, finomszemű homokkő, gyakran szürkés, zöldes redukáltabb sávokkal, foltokkal	BAF, Őrházi Tagozat	középső-perm ($^{bo}{}_{ö}P_2$)
849,15	851,41	kőzettörmelékes, kavicsos, osztályozatlan homokkő	Cserdi Formáció	középső-perm ($^{cs}P_2$)
851,41	901,14	kristálygazdag földpát- és kvarcporfiros, lilásbarna, vöröses barna riolit, összesült tufa	Gyűrűfűi Lapillitufa Formáció	középső-perm ($^{gy}P_2$)

A fúrás a BAF Dombói Tagozatában harántolt két, rétegszerűen benyomult, erősen karbonátosodott alsó kréta alkáli bazalt telért (Mecsekjánosi Bazalt Formáció) 173,67-174,59 m és 426,71-427,71 m között (2. ábra).



2. ábra: A BAF Dombói Tagozata albitfészkes, dolomitos és aleuritos agyagkő rétegei közé „rétegszerűen" benyomult alsó kréta korú, sötétszürke alkáli bazalt telérek összeillesztett helyszíni kiépítési fotói



3. ábra: A Cserdi Formáció uralkodóan lapillitufa törmelékből, kavicsokból álló, szemcsevázú tektonikus breccsa szakasza a BAF-4 fúrásban 850,75-851,02 m között

4. ábra: Földpát- és kvarcporfirokban dús szürkés-lilás-vörösesbarna lapillitufa nagyfelbontású „vizes" magládafotó részlete a BAF-4 fúrás 860,9-861,1 m közötti szakaszából

A fúrást számos törés, törészóna harántolja, ugyanakkor megállapíthatjuk, hogy a korábban megismert rétegrend zavartalansága, a földtani dokumentációs adatok és az akusztikus lyuktelevíziós mérésekből meghatározott valós rétegdőlések egyveretűsége nem utalnak intenzív gyűrt, meredek, kibillent, átforgatott rétegtani helyzetű kőzettestekre. A fúrás döntő részét kitevő alaphegységi BAF rétegek uralkodó, átlagos rétegdőlési iránya és dőlése a mélység felé haladva a tagozatok sorrendjében rendre közelítőleg 344°/30°, 339°/34°, 341°/41°, lefelé fokozatosan növekvő rétegdőlés tendencia jellemzi. Ez a rétegdőlési irány már egyértelműen a Hetvehely-magyarszéki szerkezeti zóna hatását tükrözi a kővágószőlősi antiklinális központi tengelyzónájában uralkodó ÉK-K-DK-i rétegdőlési irányokkal szemben. A korábbi tapasztalatoknak megfelelően a fúrás az uralkodó ÉÉNy-i rétegdőlési iránnyal szemben ferdült el – szinte egyenes vonal mentén – DDK-i irányba. A BAF-4 fúrás harántolt rétegsora alapján valószínűsíthető az is, hogy a Hetvehely-Magyarszék szerkezeti öv délkeleti irányú dőlése, meredeksége legalább 55-70°, mivel közvetlenül nem érintette a fúrás szelvényét.

A fúrás ferdeség adatait és az akusztikus lyuktelevíziós mérések alapján meghatározott, korrigált rétegdőlés adatokat figyelembe véve, a BAF teljes harántolt valódi vastagsága a

BAF-4 szelvényében ~750 m-re becsülhető. Ez alapján feltételezhető, hogy a teljes BAF rétegösszlet a fúrástól KÉK irányban, a Hetvehely-Magyarszék szerkezeti övtől délre eső zónában eléri a 900-950 m vastagságot [2].

A földtani dokumentáció alapján a fúrásban harántolt BAF tagozatok rétegsorára általában jellemző a szemcseméret fölfelé való fokozatosan finomodó tendenciája a finomszemű homok (ritkán aprószemű) – aleurit – agyag szemcseméret tartományban. Mivel a BAF-on belül elkülönített tagozatok határa nem éles, nem határozható meg pontosan, ezért a litosztratigráfiában alkalmazott módszer szerint a különböző litofáciesek (kőzetnév) első megjelenését vagy kimaradását, illetve azok előfordulásának gyakoriságát, főbb rétegtani jellemzőik változását vettük figyelembe a rétegsorok tagolásakor a BAF-4 és a BAF-3, -3A fúrásokban is [5], [6]. Ez tükröződik pl. a BAF litofácieseinek, betelepüléseinek tagozatonkénti arányaiban is [2] (1. táblázat).

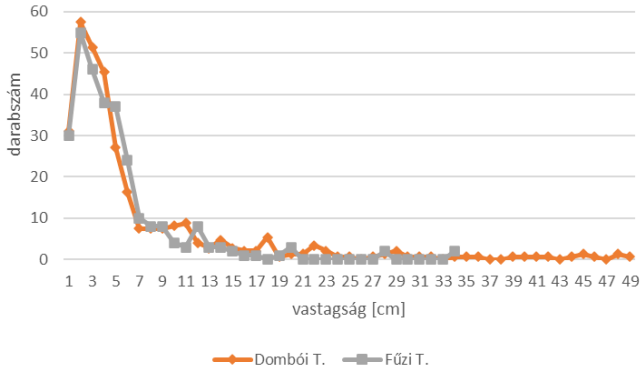
2. táblázat: A dokumentált kőzettípusok („Kőzetnév") tagozatonkénti %-os aránya a BAF-4 fúrás BAF rétegösszletében

BAF Tagozat név	Kőzetnév szerinti összvastagságok %-os aránya					Kőzetnév szerinti rétegszámok %-os aránya					Képződménynév szerint %-os arány
	agyagkő	aleurolit	homokkő	dolomit	breccsa	agyagkő	aleurolit	homokkő	dolomit	breccsa	betelepülés
Dombói	93,7	0,5	–	0,0x	2,8	93,3	1,6	–	0,1	2,9	8,0
Fűzi	59,5	34,0	4,2	0,1	0,8	40,9	50,3	6,2	0,2	1,6	6,0
Őrházi	35,1	49,4	8,7	–	4,0	36,6	51,5	7,1	–	3,7	0,2

A Dombói Tagozatot uralkodóan a horizontális rétegzettségű meszes, albitfészkes, aleuritos agyagkő rétegek jellemzik, gyakori vékony dolomitos aleurolit, dolomitos agyagkő, ritkábban dolomit betelepülések ciklusos megjelenésével.

A rétegsorban lefelé haladva a Dombói és Fűzi Tagozatok határát az első, 1 cm-es vastagságot elérő finomszemű homokkő megjelenésénél (780,1 m) definiáltuk a BAF-3A fúráshoz hasonlóan. A Fűzi Tagozatra jellemzőek elsősorban a bioglifás, helyenként bioturbált, flázeres, finomhomokos rétegek, a ferderétegzettség nagyobb aránya és az idiomorf pirit kristályok, szemcsék (0,1-2 mm méretű), szemcsehalmazok rétegzéshez kapcsolódó megjelenése.

A Dombói és Fűzi Tagozatban is gyakori, jellemző ciklikusan megjelenő vékonyréteges, sávos betelepülések vastagsági eloszlása közel azonos a két tagozatban (5. ábra).



5. ábra: A BAF Dombói és Fűzi Tagozata betelepüléseinek vastagság gyakorisági eloszlása a tagozatok harántolási hosszával súlyozva

Az Őrházi Tagozatra nagyobb rétegvastagságok, rosszabb rétegzettség, szélesebb tartományban szóródó rétegdőlési irányok (közelítőleg 300°-25° közötti) és meredekebb rétegdőlések jellemzők. Az Őrházi Tagozatban gyakorlatilag hiányoznak a Dombói és Fűzi Tagozatokban rendszeresen megjelenő vékony betelepülések, vékony közberétegzések, mindösszesen két db betelepülést dokumentáltak és egyértelműen növekszik az aleurolit, finomszemű homokkő aránya (1. táblázat). Jellemző a változatosabb redox viszonyokra utaló kőzetszínek, színárnyalatok megjelenése (szürke, barna, zöld). Ezek a rétegtani, szedimentációs különbségek megmutatkoznak az összlet egyes mért lyukgeofizikai paramétereinek változásaiban is (pl. változékonyabb, magasabb természetes gamma, mágneses szuszceptibilitás, tektonikusan nem érintett szakaszokon a neutronporozitás csökkenése). Az Őrházi Tagozat alsó határa tektonikus, szemcseméretben, üledékföldtani jellegében is határozottan elkülönül a fekü Cserdi Formáció kavicsos durva-, nagyszemű homokkő, breccsás kőzettörmelék összetételű rétegeitől. A BAF-4 fúrásban harántolt legalsó BAF tagozat szemcseméretében, rétegtani jellegében, tektonizált rétegszakaszával és tektonikus kivékonyodásával (69 m-es harántolási hossz) eltér az antiklinális tengelyzónájában uránkutatási céllal mélyült XV. szerkezetkutató fúrásban 150 métert meghaladó hosszban harántolt, feküjére folyamatos rétegtani átmenettel települő Őrházi Tagozattól [4]. Más fúrási harántolása a tagozatnak a térségben nem ismert.

A fúrásban dokumentált tektonikai elemek számára, gyakoriságára, minősítésére, irányára/dőlésére, jellegére, mélység és képződmények szerinti változásaira részletes elemzések történtek (pl. 2. táblázat, 3. táblázat). Ezek több lépcsőben, különböző korban bekövetkező, eltérő jellegű (feltolódás, vető, oldaleltolódás és ezek átmeneti változatai), egymásra szuperponálódó tektonikai fázisokra utalnak. Elkülönítve is szűrésre, értékelésre kerültek a 35° és 45°-nál meredekebb tektonikai elemek, mert az összesített pólussűrűségi- és rózsadiagramokon a rétegdőlésekkel megegyező, vagy ahhoz közeli irányok és dőlésszögek dominálnak.

A BAF-4 fúrásban tektonikai elemek döntő többsége litoklázis (3. táblázat), de jelentős számú vetőt is harántolt a fúrás. A tektonikai képet jelentősen befolyásoló törészónából (és kapcsolódó elemekből úgy, mint magzóna, kárzóna, stb.) is számosat feltártak. A vetők típus szerinti megoszlásában (4. táblázat) a normál és feltolódás jellegű elmozdulások hasonló arányban fordulnak elő, míg az eltolódásos jelleg kevésbé jellemző. Számos olyan vetőt dokumentáltak, ahol nem, vagy csak nagymértékű bizonytalansággal lehet meghatározni a jellegét. A törések nyíltság (tektonikai dokumentálás során nyíltnak tekintett törések: limonitot, fennőtt kristályokat, esetleg üreget tartalmaz) szerinti osztályozása alapján látható, hogy a dokumentált tektonikai elemek csak kis része bizonyult nyíltnak (365 db), döntő többsége (6058 db) zárt törésnek tekinthető.

3. táblázat: A BAF-4 fúrásban dokumentált tektonikai elemek megoszlása

Litoklázis	*Vető*	*Törészóna*	*Mestertörés*	*Magzóna*	*Kárzóna*	*Összes*
5489	900	35	41	55	68	6588
83%	14%	1%	1%	1%	1%	100%

4. táblázat: A BAF-4 fúrásban dokumentált vetők megoszlása

Normál vető	*Feltolódás (inverz)*	*Eltolódás*	*Nem meghatározható*	*Összes*
276	293	120	211	900
31%	33%	13%	23%	100%

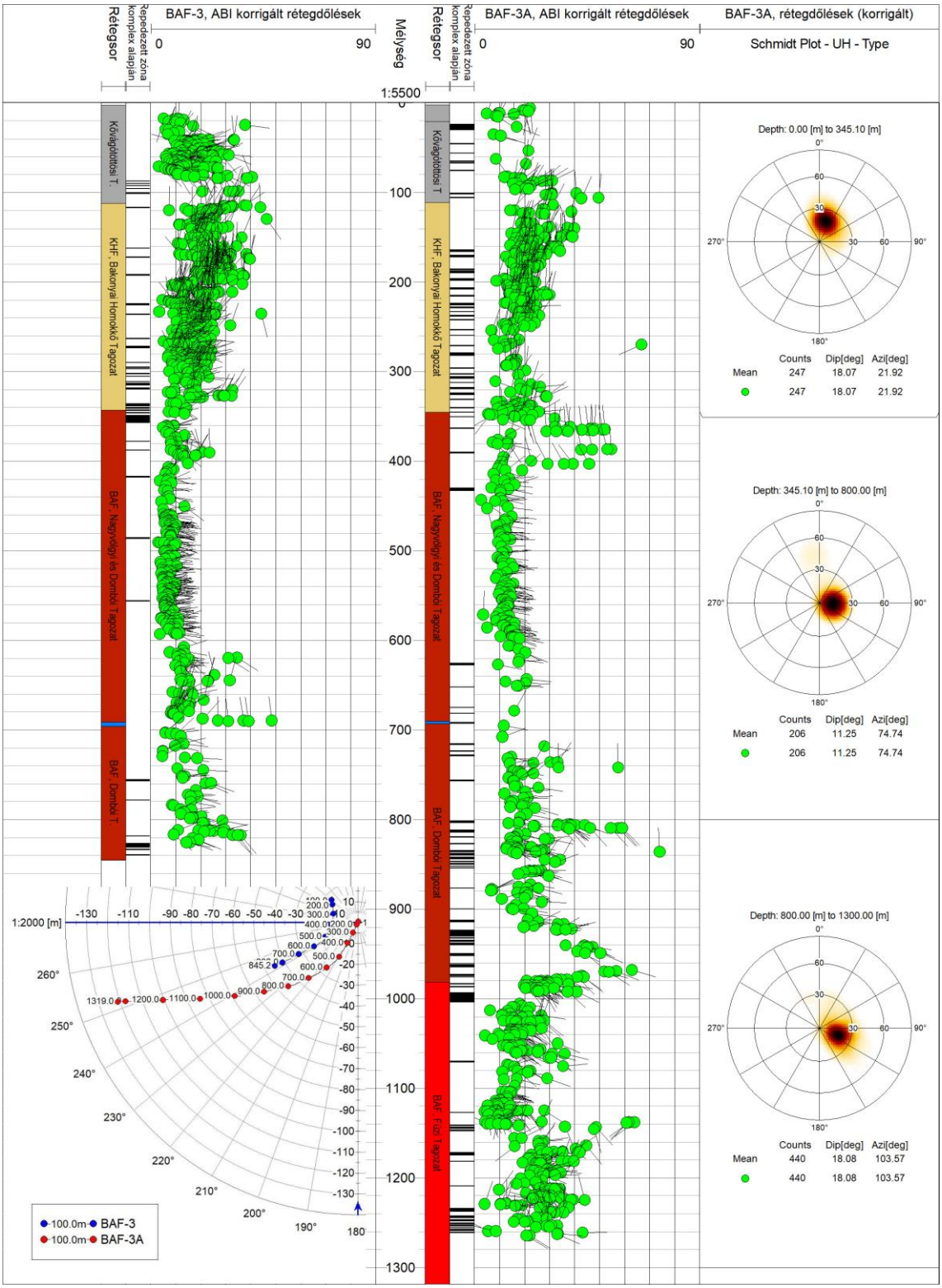
2. A BAF-3, -3A fúrási szelvény földtani képe

Az egymástól ~18 m távolságban 1 cm-es m Bf szintkülönbséggel (318,71 és 318,72 m Bf), 845,18 és 1319,02 m fúrási talpmélységgel, ~45 m-es magfúrási átfedéssel mélyített BAF-3, -3A fúrások közel azonos irányú és párhuzamos ferdülését, valamint a harántolt képződmények közel azonos rétegtani települési helyzetét szemlélteti a 6. ábra. Jól látható, hogy a két fúrásban a fúrási mélységek, a valódi függőleges és abszolút mélységszintek, a főbb rétegtani határok közelítőleg azonos szintekben húzódnak és a BAF-3 fúrás talpmélységénél (845 m) is csak max. 0,6 m szinteltérést mutatnak.

A BAF-3, BAF-3A fúrásokban feltárt rétegoszlop és a harántolt képződmények vastagsági, szedimentológiai jellemzői igazolták az előzetes ismereteket, a két fúrás rétegsora sem mutatott érdemi eltérést, a harántolt jelentősebb törészónák ellenére nem voltak a földtani-szerkezeti képet felborító jelentősebb, gyűrődésekre, kőzetblokk kibillenésekre, rétegdőlési el- és átfordulásokra utaló, dokumentálható jelenségek, bélyegek. A főbb képződményhatárok (Bodai Agyagkő Formáció/Bakonyai Homokkő Tagozat/Kővágótöttösi Homokkő Tagozat), a Dombói Tagozatban harántolt, a korábbi fúrásokból már ismert ún. reduktív rétegszakasz és a legjelentősebb tektonikai elemek mélysége a két fúrás között és a tágabb földtani környezettel is jól korrelálható volt és illeszkedett a korábbi földtani képbe. Ez is arra utal, hogy a fúrásban dokumentált számos elmozdulás jelentős része elsősorban a rétegzettséggel vagy elhelyezkedésük irányával közel párhuzamos vagy kisebb szögű felületek mentén történt és többnyire kisebb mértékű, léptékű volt a két fúrás közötti szelvényben.

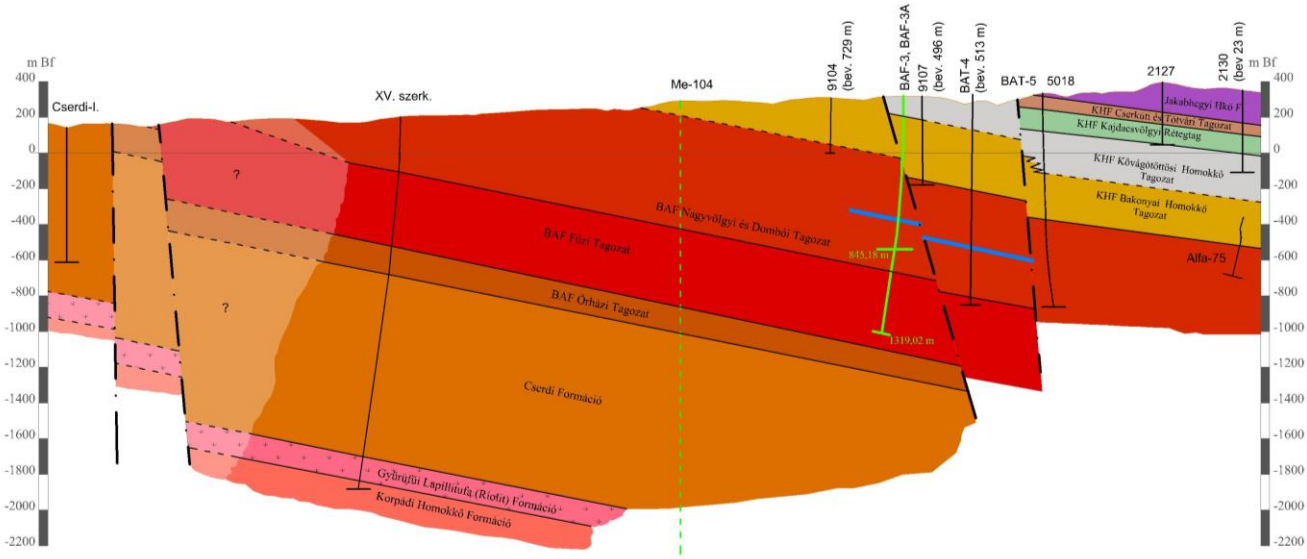
A BAF-3, -3A fúráspár alapvetően három fő képződményt harántolt: a felső, igen vékony, laza, negyedidőszaki löszös fedőképződményt 2,76, ill. 2,02 m-ig, alatta a Kővágószőlősi Homokkő Formáció Kővágótöttösi („szürke homokkő”) és Bakonyai Homokkő („tarka homokkő”) Tagozatait 343,08, ill. 345,1 m-ig, majd a talpig a BAF Nagyvölgyi, Dombói és Fűzi Tagozatait. A fúrási szelvényben a BAF legfelső, legvastagabb, legfinomabb szemű és rétegtanilag legegységesebb rétegszakaszát (Nagyvölgyi és Dombói Tagozatok) mintegy 640 m hosszban harántolta 986,46 m-ig, a korábban mélyített BAT-4 fúráshoz hasonlóan (~540–1138 m között). A BAF-3A fúrás 1319,02 m talpmélységgel fejeződött be. A fúrás erősen tektonizált alsó szakaszán felmerülő fúrástechnológiai problémák okozta többletköltségek miatt a BAF rétegösszletének tervezett átfúrása nem valósulhatott meg. A fúrásokon keresztül szerkesztett, közel Ny – K-i irányú földtani szelvény alapján a fekü Cserdi Formáció eléréséhez feltételezhetően még 200-250 m magfúrási szakasz hiányzott (1. ábra, 7. ábra), amelyre az engedélyes tervben megadott max. 1600 m mélység valószínűleg elégséges lett volna.

A BAF-3A fúrás felső, Kővágószőlősi Homokkő Formációt harántoló szakaszán átlagosan ÉÉK-i irányú és 10-30° rétegdőlés értékek, majd a mélységgel lefelé haladva a BAF felső, kb. 800 m-ig tartó szakaszára K-ies (átlagosan ~75°/11°), alsó szakaszára KDK-i dőlésirány (átlagosan ~104°/18°) jellemző. A mélység felé egy fokozatos, K–DK-i irányba mutató rétegdőlés elfordulási tendencia figyelhető meg, amely a fúrások ferdülési irányában is megmutatkozik (6. ábra). A rétegdőlési adatok szóródási tartományai, változásai jól követik a harántolt képződmények szedimentológiai, szemcseméretbeli, fáciesbeli jellegeit, változásait, valamint a jelentősebb törések szakaszait is (6. ábra).



6. ábra: A BAF-3, -3A fúrások ferdeségeinek felülnézeti képe és az akusztikus lyuktelevíziós mérések alapján korrigált valódi rétegdőlései a rétegsorokkal és az ún. „reduktív” sötétszürke rétegekkel (világos kék csík)

Említésre érdemes, hogy a BAF Dombói Tagozatnak a fúrási szelvénybeli ~400 – 620 m közötti harántolása települési, üledékföldtani szempontból a legnyugodtabb, leghomogénebb, tektonikailag legkevésbé érintett, legépebb és a BAF rétegsorának legfinomabb szemcseméretű, kis porozitású kőzetekből álló része (8. ábra). Ezen a szakaszon a BAF-3 fúrásban 10^{-10} – 10^{-13} m^2/s transzmisszivitás értékeket mértek, határoztak meg [1], [3].



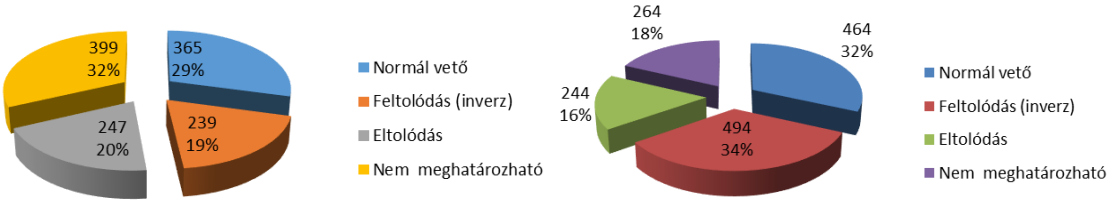
7. ábra: A BAF-3, -3A fúrások NyDNy – KÉK-i irányú földtani szelvénye (nyomvonala az 1. ábrán)

8. ábra: Típusos albitfészkes agyagkő szakasz vékony aleuritos agyagkő, dolomitos aleurolit betelepülésekkel a BAF-3 fúrás Dombói Tagozat 609,07–613,88 m közötti szakaszából

Kis vastagsága ellenére kiemelten foglalkoztunk a BAF-3,-3A fúrásban maggal, ill. teljes szelvényű fúrással (kétméterenkénti furadékmintavétellel is igazolt) harántolt és a természetes gamma szelvényen is jól beazonosítható ún. „reduktív” sötétszürke rétegszakasszal, melyet a kővágószőlősi antiklinális legvastagabb kifejlődésű tengelyzónájában a BAF-2, BAT-4, Delta-9 (Alfa-1 vágatban) korábbi fúrások is hasonló, BAF fedő alatti kb. 310-350 m mélységben tártak fel 2-4 m hosszban [8]. A BAF-3 és BAF-3A fúrás 691,17-695,76 m, ill. 690,0-693,0 m fúrási mélységközben harántolta. A további BAF kutatás esetén ennek a BAF egyveretű, nehezen tagolható, uralkodóan vörösesbarna, barna, erősen oxidált összletén belül fontos szerepe lehet a rétegtani szintek követésében és szerkezeti mozgások megítélésében.

Meg kell jegyezni, hogy a fúrási szelvényben dokumentált valamennyi főbb rétegtani határzóna tektonikusan, törészónákkal érintett volt. A dokumentált tektonikai elemek többsége litoklázis, de jelentős számú vetőt is harántolt a fúrás. A tektonikai képet jelentősen befolyásoló

törészónából (és kapcsolódó elemekből úgy, mint magzóna, kárzóna stb.) is számosat feltártak. Példaként említve a maganyagon dokumentált vetők karcainak statisztikai vizsgálata az alábbi vetőtípus arányokat mutatta a fúrásokban (8. ábra). A tapasztalatok alapján a jelentősebb törések menti elmozdulások mértékére, léptékére elsősorban a rétegösszletek vastagsági adatai, rétegtani jellemzői és a nagyobb léptékű földtani szelvények alapján következtethetünk.



8. ábra: Vetők típusainak megoszlása a BAF-3 és a BAF-3A fúrásban

Irodalom

[1] Hámos G. et al. 2022: A BAF-3 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése – Kézirat. Mecsekérc Zrt. Irattár, Pécs. RHK-N-007/21

[2] Hámos G. et al. 2022: A BAF-4 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. – Kézirat. Paks, RHK Kft. Adattár. RHK-H-007/22M01

[3] Hámos G. et al. 2022: A BAF-3A fúrás dokumentáló és értékelő jelentése – Kézirat. Mecsekérc Zrt. Irattár, Pécs. RHK-N-015/22M01

[4] Istovics K., Horváth J., Máthé Z., Mucsi P., Hámos G., Maros Gy., Halász A. (2018): XV. szerkezetkutató fúrás értékelő jelentése. – Kézirat. Mecsekérc Zrt. Irattár, Pécs. RHK-N-006/18

[5] Konrád Gy. 1998: Jelentés a Bodai Aleurolit Formáció 1995-98. évi kutatásáról. Kézirat, Mecsekérc Zrt. Adattár, Pécs, 102 p.

[6] Konrád Gy., Sebe K. & Budai T. 2017: Magyarázó a Bodai Agyagkő Formáció perspektivikus elterjedési területének 1 : 25 000 méretarányú földtani térképéhez. Kézirat, RHK adattár, RHK-N-014/16

[7] Molnár P., Tungli Gy., Szegő I. 2018: A Bodai Agyagkő Formáció földtani kutatási programja, 2018. – Kézirat, RHK Kft., Paks, SMI-019B/17.

[8] Sámson M. (szerk.) et al. (2018): A BAF-2 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. – Kézirat. Mecsekérc Zrt. Irattár, Pécs. RHK-N-011/14

[9] Sebe K. (2021): A BAF-3A és BAF-4 fúrások fedőüledékeinek és alaphegységi határzónája szakaszának földtani leírása. A Bodai Agyagkő Formáció földtani kutatási programja. – Kézirat. MECSEKÉRC Irattár, Pécs. RHK-N-004/21

A BAF-3, BAF-3A és BAF-4 kutatófúrások geotechnikai képe

Geotechnical image of the BAF-3, BAF-3A and BAF-4 boreholes

GELENCSÉR KINGA[1], GÁL VAZUL[1], ZIPFNÉ MÁZIK KINGA[1], KOVÁCS LÁSZLÓ[1], RÁTKAI ORSOLYA[1, 2]

[1]*Kőmérő Kft., komero@komero.hu,*
[2]*Mecsekérc Zrt., ratkaiorsolya@mecsekerc.hu*

Abstract

In this research, the RMR method was found to be most suitable in terms of area evaluation and comparison from a rock mechanical classification standpoint. We carried out evaluations according to RQD and Kiruna standard fracture analysis systems which are important sub-parameters of RMR. A crack surface classification according to the Q system was also performed in order to determine the GSI value from several aspects. In the section affected by the "core fragmentation" phenomenon observed in the core material of the BAF-3 borehole, the positions of the real cracks were determined based on the geophysical BHTV profiles and the grinding of the separation surfaces. This way the classification of this section was completed by supplementary statistical analysis of previous experiences related to the formation. Based on the results obtained, comparision was made between the previous BAF-2 and the BAF-3, BAF-3A and BAF-4 boreholes deepened in the current phase. According to the RQD, RMR and Q system classifications, the BCF formations intersected by the BAF-3 borehole have the best geotechnical condition among the compared boreholes.

Összefoglaló

Jelen kutatásban a területértékelés és összehasonlítás szempontjából a legalkalmasabbnak az RMR módszer mutatkozott a kőzetmechanikai minősítés terén. Ennek fontos rész-paraméterét jelentő RQD-, illetve Kiruna-rendszerű standard repedezettség-elemzést és a GSI érték több szempontú meghatározása érdekében Q-rendszer szerinti repedésfelület minősítést végeztünk. A BAF-3 fúrásban tapasztalt „magdarabolódásos” szakaszon a geofizikai BHTV szelvények és az elválási felületek lecsiszolódásának vizsgálatával meghatároztuk a valódi repedések helyzetét, így a képződményre vonatkozó korábbi tapasztalatok statisztikai elemzésével kiegészítve el tudtuk végezni ezen szakasz minősítését is. Az eredmények alapján összehasonlítottuk a korábbi BAF-2, és a jelen fázisban mélyített BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrásokat. Mind az RQD, RMR és Q rendszerű minősítés szerint a legjobb geotechnikai állapota a BAF-3 fúrás által harántolt BAF képződményeknek van az egymással összevetett fúrások között.

Kulcsszavak: Geotechnika, RQD, Kiruna, RMR, Q, GSI

Bevezető

A maggal mélyült fúrások standard módszerekkel elvégzendő repedezettség-elemzését a leginkább elterjedt kőzetmechanikai minősítő vizsgálatok közé soroljuk. Az elvégzett repedezettség-elemzések általában egy nagyobb, több paramétert is figyelembe vevő osztályozási rendszer részét képezik. Az empirikus minősítő módszerek közül azon az alapon célszerű választani, hogy melyek a vizsgálandó kőzettípusok kőzetmechanikai adottságait leginkább meghatározó paraméterek, és ezek hogyan illeszkednek az egyes minősítő módszerek belső logikájához. A minősítő eljárások közül a Bieniawski [4] által kidolgozott RMR-módszer a vizsgált kőzetek tulajdonságaihoz leginkább illeszkedő. A területértékelés és összehasonlítás szempontjából is ez a módszer volt a legalkalmasabb, mivel ez szolgáltatja a legkiterjedtebb adatrendszert. A kőzetmechanikai dokumentálás az RMR-rendszerű kőzettest-minősítést és ennek fontos rész-paraméterét jelentő RQD-, illetve Kiruna-rendszerű standard repedezettség-elemzést foglalta magában. Ezen túlmenően a GSI érték több szempontú meghatározása érdekében Q-rendszer szerinti repedésfelület minősítést is elvégeztük.

1. Alkalmazott standard kőzetmechanikai minősítési módszerek

1.1. Repedezettségelemzés RQD-tényező meghatározásával

A Deere [7] által bevezetett RQD-érték (Rock Quality Designation) ma az egyik alapvető mérőszám a kőzettest tagoltságára vonatkozóan, a legtöbb kőzettest-osztályozási eljárás alapadatként használja fel. Meghatározásánál a minimálisan 54,7 mm átmérőjű fúrómagból és a kihozott magmintadarabok hosszának méréséből indultak ki. Maga a mérőszám százalékban adja meg azon daraboknak az összesített hosszát, melyek hosszabbak, mint 100 mm. Tehát az RQD-érték:

$$RQD = \frac{\Sigma h_{10}}{h_b - h_a} 100 \quad [\%]$$

1. képlet: RQD érték számítása Deere (1964) nyomán [7]

ahol: h_{10} a 10 cm-nél hosszabb darabok összhossza, h_b és h_a pedig a vizsgált mélységköz alsó és felső határa.

Az RQD-érték megállapításakor az egyértelműen a fúrási és magkezelési műveletek során keletkezett friss törések figyelmen kívül hagyandók. Ajánlott a fúrómagban előforduló magtengellyel párhuzamos töréseket figyelmen kívül hagyni a töredezettség számításakor, és ép magként kezelni az adott fúrásszakaszt, amennyiben a magot nem harántolja más törés. Az RQD-értékek meghatározása közvetett módon önálló kőzettest-osztályozási módszerként is felfogható. A 1. táblázat a megállapított RQD-értékek és a kőzettest-kategóriák közötti kapcsolatot adja meg, gyakorlati megfigyelések alapján.

1. táblázat: Kőzettestek osztályozása az Eurocode 7–1 szerint a kőzetmechanikai megnevezésekkel

RQD (%)	*Kőzettest minősítése Eurocode 7-1 alapján*	*Kőzettest kőzetmechanikai minősítő megnevezése*
<25	Nagyon gyenge	gyakorlatilag talajként kezelhető
25–50	Gyenge	nagyon töredezett
50–75	Megfelelő	töredezett
75–90	Jó	kissé töredezett
90–100	Kiváló	ép

1.2. Repedezettségelemzés Kiruna (C)-tényező meghatározásával

Elsősorban Svédországban és Magyarországon elterjedt Kiruna-módszer alapján is jellemeztük a kőzettest repedezettségét. Az RQD-érték meghatározásának átmérő függése okozta korlátozások feloldására Hansági [8], [9] ajánlására vezették be az ún. C-tényező számításának módszerét, mely minden fúrási átmérő esetén használható. A C-tényező a C_p ún. próbatest-tényezőnek és a C_m maghosszúság-tényezőnek számtani közepéből adódik. A C_p próbatest-tényező kiszámításakor meghatározzák azt, hogy a magátmérőnél hosszabb hengeres fúrómag darabokból hány *p* darab magátmérő-hosszúságú próbatestet lehetne kialakítani. Ezek a kifűrészelhető próbatestdarabok összegezve *(p*D)* egy fúrómag-hosszúságot adnak, amit arányba állítunk a vizsgálat tárgyát képező fúrólyuk vagy fúrólyukszakasz $(h_b - h_a)$ hosszúságával. A C_m maghosszúság-tényező kiszámítása hasonlóan történik, mint az RQD-érték meghatározása, de szoros kapcsolatba hozva a mindenkori magátmérővel. Ebben az esetben nem a magdarabok összegzett M hosszát, hanem a magdarabok átlagos $\overline{m}$ hosszát viszonyítjuk a teljes $(h_b - h_a)$ fúrólyuk szakaszhoz. A C-tényező az említett összefüggések felhasználásával az alábbi módon is kifejezhető:

$$C = \frac{1}{2(h_b - h_a)}\left(pD + \frac{M}{n}\right)$$

2. képlet: C-tényező számítása Hansági nyomán [8], [9]

ahol: M azon fúrómagdarabok összegzett hossza, azaz $\sum_{i=1}^{n} m_i$, amelyeknek hengeres hossza legalább akkora, mint a magátmérő; *n* azon magdarabok száma, melyek hossza meghaladja a fúrómag átmérőjét.

A C tényező nagysága 0 és 1 között változhat. Ha egyáltalán nem lehetséges szabványos henger alakú próbatestet kialakítani a fúrómagból, akkor a C-tényező értéke az adott repedezettségi intervallumban 0. Ha viszont az adott repedezettségi intervallumban csak egyetlen és olyan ($h_b - h_a$) hosszúságú fúrómagot nyernénk ki, mint a vizsgálat tárgyát képező fúrólyukszakasz hossza, akkor a C-tényező értéke 1 lenne. Ez utóbbi eset csak rendkívül ritkán, igen kompakt, egynemű, szilárd kőzetek esetében fordulhat elő.

1.3. Az RMR-rendszerű kőzetmechanikai minősítés

A maggal mélyített kutatófúrások minősítésére, dokumentálására és értékelésére a Bieniawski [5] publikáción alapuló RMR-rendszert célszerű alkalmazni. Az RMR-módszer, viszonylagos egyszerűsége ellenére, objektív és megfelelő minőségű geotechnikai prognózisok készítését teszi lehetővé. Az RMR-módszer az alábbi hat alapvetően fontos, de viszonylag könnyen meghatározható paraméter alapján jellemzi a kőzettest várható viselkedését: az ép kőzet nyomószilárdsága; RQD-tényező vagy Kiruna-érték; vízáramlási és vízbelépési viszonyok; repedések (litoklázisok, válólapok) egymástól való átlagos távolsága; állapota és kitöltésének jellege; valamint irányuk, orientációjuk.

Az RMR értékelésnél a módszer kidolgozója azt tartotta szem előtt, hogy mind az egyes vizsgált paraméterek lehetséges tartományain belül, mind pedig az eredményként kapott kőzetosztályok tekintetében viszonylag alacsony számú (4-7) csoportot alkalmazzon. Ezzel biztosította a módszer objektivitását, egyértelműségét és viszonylagos egyszerűségét is. Az egyes paraméterek súlyát az egyes paraméterek maximális értékelési számának eltérő meghatározásával érte el. Az első öt tényező összege az ún. RMR-alapérték, míg a hatodik, redukciós paraméter projekt-specifikus, mivel függ a tervezett felszín alatti térség kihajtásának irányától. Az RMR érték a paraméterek értékeinek egyszerű előjeles összege. Az osztályba sorolás rendszerét a 2. táblázat ismerteti. Az egyes előre meghatározott repedezettségi intervallumokra vonatkoztatott RMR-értékek alapján az adott szakaszt az öt kőzettest osztály valamelyikébe sorolhatjuk. Minden további kőzetmechanikai következtetés az osztályba soroláson alapul.

2. táblázat: A kőzettestek osztályba sorolása RMR-értékük alapján

Paraméter	*Kőzettestek jellemzése és összegzett értékelési száma kőzetosztályonként*				
	I.	*II.*	*III.*	*IV.*	*V.*
Jellemzés	nagyon jó	jó	megfelelő	gyenge	nagyon gyenge
Összegzett értékelési szám	100–81	80–61	60–41	40–21	<21

1.4. A Q szerinti kőzettettest minősítés

Az RMR-értékek ismeretében lehetőség van az adott intervallumra értelmezhető egy másik, nem lineáris jellegű minősítő érték, a Q meghatározására is. Ehhez a területre jellemző helyspecifikus képlet hiányában Bieniawski [5] cikkében javasolt képlet alkalmazható:

$$Q = e^{(RMR-44)/9}$$

3. képlet: A Q minősítő érték meghatározása RMR-adatokból Bieniawski nyomán [5]

A kapott Q-értékek alapján az adott szakasz osztályba sorolása is elvégezhető. Ehhez Barton et al. [2] eredeti, 9 kategóriás osztályozási rendszerét alkalmazzuk (lásd a 3. táblázatban).

3. táblázat: Kőzettestek osztályozása az Eurocode 7–1 szerint a kőzetmechanikai megnevezésekkel

Kőzetosztály	*Q-érték*	*Leírás*
I.	400-1000	Különlegesen jó
II.	100-400	Rendkívül jó
III.	40-100	Nagyon jó
IV.	10-40	Jó
V.	4-10	Közepes
VI.	0,4-4	Gyenge
VII.	0,04-0,4	Nagyon gyenge
VIII.	0,01-0,04	Rendkívül gyenge
IX.	0,001-0,01	Különlegesen gyenge

1.5. A GSI-rendszerű kőzetmechanikai minősítés

A kőzettestek leírásánál, modellezésénél elterjed a Geológiai Szilárdsági Index (GSI) használata. Hoek et al. [12] azt kutatták, hogyan lehet a kőzettestet mérnökgeológiai szempontból úgy parametrizálni, hogy annak segítségével a Hoek és Brown [10] által bevezetett törési határgörbe is minél pontosabban meghatározható legyen. Hoek et al. [12] definíciója szerint a kőzettest minősége annak szerkezetétől és a tagoltságok felületi minőségétől függ. A GSI kidolgozói elkészítették az osztályozási rendszer mátrix-táblázat alapú értelmezését is [11], amelynek azóta több, alapjaiban azonos, de más megközelítésű változata született [6], [11]. Ezek többsége mindig valamilyen létező kőzettestosztályozási módszerhez köti a GSI meghatározását. Ezek közül mi a Barton féle Q módszeren alapuló verziót tartjuk a leginkább alkalmasnak a GSI fúrómagokon történő meghatározására. A dokumentálás során ezért az adatlapokon felvettük a Q kőzettest-osztályozáshoz tartozó, Barton-Choubey [1] munkáján alapuló repedésfelület nyírószilárdságát jellemző paramétereket is, Barton [3] munkájában közölt módon. Az RQD érték, a tagoltságok száma (J_n), érdessége (J_r) valamint állapota (J_a) ismeretében meghatározhatóvá válik a GSI értéke. A fúrómagokon történő GSI érték pontos számítására a Hoek et al. [11] által javasolt formulát használtuk:

$$GSI = 0{,}5RQD + (52(J_r/J_a))/(1+J_r/J_a)$$

4. képlet: GSI érték számítása Hoek et al. alapján [11]

2. Eredmények

A kőzetmechanikai értékelés elsősorban a fúrómagok helyszíni kőzetmechanikai dokumentálását jelenti. Ezt egészítik ki a laboratóriumi kőzetmechanikai vizsgálatok, a lyukgeofizikai vizsgálatok, valamint a hidrodinamikai vizsgálatok eredményei és a fúrás mélyítése során tett megfigyelések. A minősítés végeredményeképpen megkapjuk a fúrás szelvénymenti RQD, Kiruna, RMR és Q minősítésének adatait. Mivel standard módszerekről van szó, az egyes képződmények repedezettségi és kőzettest-osztályozási eredményei összehasonlíthatóvá válnak. Ezzel lehetőség nyílik e paraméterek fúrások közötti korrelációjára, mélységfüggéseinek feltárására.

A geotechnikai dokumentálás egyik alapvető lépése, hogy a mechanikai töréseket elkülönítsük a tényleges törésektől. A Bodai Agyagkő Formáció fő tömegét adó vörösesbarna, barna, barnásvörös agyagkő és aleurolit friss törési felülete nem mindig nyújt támpontot ahhoz, hogy biztosan eldöntsük

fúrás során történt mechanikai sérülésről, vagy jelentősebb kitöltőanyag nélküli törésről beszélhetünk. Amennyiben a magcsőben az egyes magdarabok egymáshoz képest is elfordulnak, a törésfelület elkopik és nincs támpont a fenti kérdés eldöntéséhez. Ilyenkor nagy segítséget jelentenek a BHTV felvételek, melyek felhasználhatósága szintén korlátokba ütközik, mivel felbontása miatt a zárt, csak vékony felületbevonattal jellemezhető repedések nem jelennek meg a felvételeken.

A maganyag helyes pozíciójának ismeretében kijelöltük a repedezettségi intervallumokat. Ezek általában 1 és 3 m közötti hosszúságban felveendő magszakaszok, melyeket az határoz meg, hogy az intervallumon belül a maganyag repedezettségi állapota legyen viszonylagosan állandónak tekinthető. Egy erre a célra készített formanyomtatványon rögzítjük a magláda számát, a magátmérőt, a repedezettségi szakasz sorszámát, kezdeti- és végpontjának helyét, valamint az egyes szakaszokon belül a fragmentumok helyét és hosszát. Ezen kívül jelölni kell a javasolt RMR intervallumokat is. Az imént felsorolt adatok az RQD és a Kiruna értékek számításához szükségesek. A kőzetmechanikai dokumentálás során rögzítendő továbbá az adott fúrómag szakasz kőzettípusa (kőzetnév és szín), becsült egytengelyű nyomószilárdsága, az intervallumban jellemző repedésirányok (magtengelyre merőleges síkhoz viszonyítva), átlagos repedéstávolság, a szakaszban megjelenő repedéskitöltő anyagok, a repedések megnyíltsága, valamint a repedésfelületek érdessége és mállottsága. A Q módszerhez tartozó alapparaméterek közül a dokumentálás során a repedésfelület nyírószilárdságát jellemző paraméterek (a J_r és a J_a) közvetlenül kerültek meghatározásra.

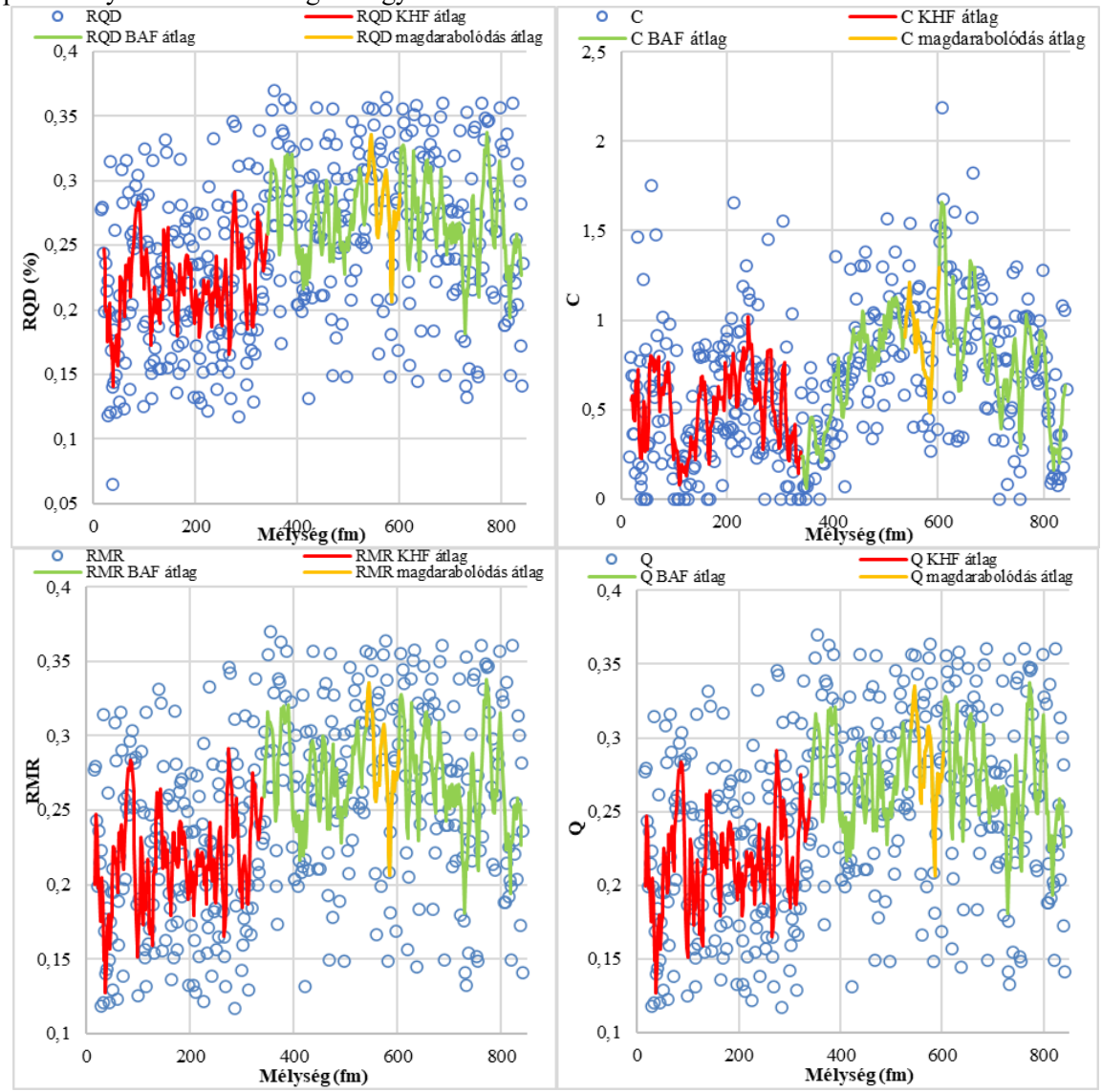
2.1. „Magdarabolódás” kezelése

A „magdarabolódásos” jelenséget a BAF-3 fúrás 537,70-604,92 m-e között vizsgáltuk és mivel a szokásostól eltérő, egyenközű darabokból álló magkihozatalt láttunk, így egy speciális eljárással egészítettük ki a geotechnikai dokumentálást. Ehhez előzetesen a korábbi évek tapasztalataiból statisztikát készítettünk a BAF-2 148,55-913,60 fm közötti szakasz, illetve a BAF-3 fúrás által BAF képződményt ért „magdarabolódásos” részt megelőző és követő szakaszairól készült standard kőzetmechanikai minősítés értékeiből. A geofizikai szelvények alapján megvizsgáltuk, hol található ténylegesen töredezett zóna, illetve egyértelmű repedés. A Mecsekérc Zrt. munkatársai által készített „Magdarabolódásos táblázat” alapján megvizsgáltuk a kiépítésekben található magdarabok geometriai tulajdonságait és az elválási felületek lecsiszolódásának mértékét, hogy meghatározzuk a valódi repedések helyzetét. A geofizikai BHTV szelvényén látható töredezett zónákban a magládában található magdarabokat külön-külön fragmentumokként vettük fel (töredezett zónák: 573,0-573,4 m; 575,6-575,8 m; 578,0-578,6 m). A geofizika alapján látszólag zavartalan szakaszok esetében a lecsiszolódással nem érintett elválási felületekig, valamint a BHTV szelvényen látható egyértelmű törési felületekig általában egységes szakaszokként kezeltük a fúrás anyagát. A BAF-3 fúrásra kapott eredményeket az 1. ábra szemlélteti, melyen külön kiemeltük a magdarabolódásos szakaszra kapott eredményeket. Ezen eredmények alapján mind az RQD, C, RMR és Q minősítés szerint a „magdarabolódásos” szakasz szépen belesimul a BAF képződményre kapott többi eredménybe, azonban a kiemelt szakaszt követő jobb geotechnikai állapotú BAF képződményekre jobban hasonlít.

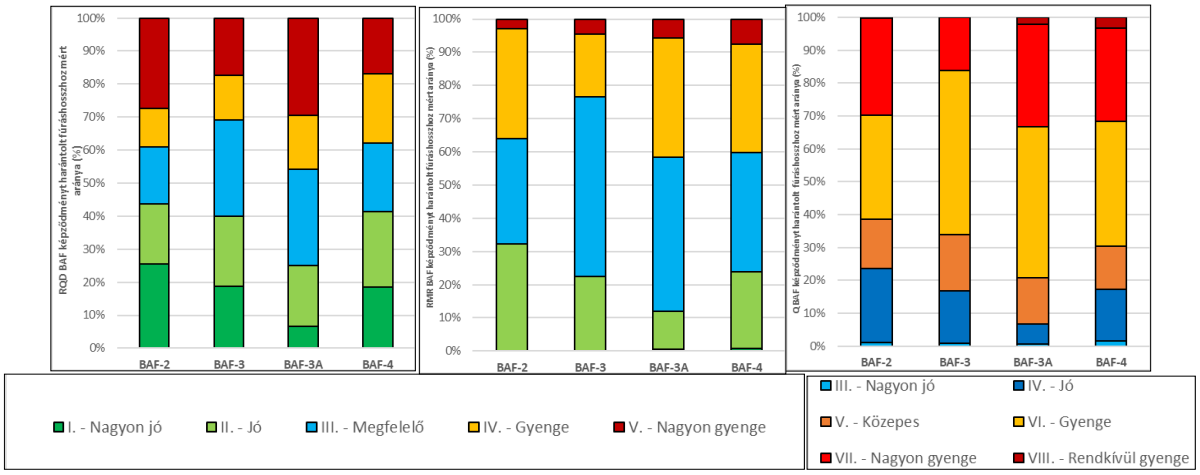
2.2. BAF geotechnikai állapota

A kapott eredmények alapján összehasonlítottuk a korábbi BAF-2, és a jelen fázisban mélyített BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrásokat (2. ábra). Mind az RQD repedezettség elemzés, mind az RMR módszer szerint a BAF képződményben kijelölt intervallumok leggyakrabban „megfelelő” minősítést kaptak. RMR szerinti „nagyon jó” kategória csak a BAF-3A és BAF-4 esetében fordult elő, azonban nem számottevő mértékben. Legnagyobb arányban a BAF-3 fúrás BAF képződményei értek el 50% feletti RQD minősítést, összesen a fúrás 69,19%-án. Q szerinti kőzettettest minősítés alapján „különlegesen jó”, „rendkívül jó” kategóriák nem fordultak elő egyik fúrásban sem. A BAF képződmény sehol nem érte el a „különlegesen gyenge” kategóriát sem, azonban a BAF-2, BAF-3A és BAF-4 esetében „rendkívül gyenge” elenyésző számban előfordult. Ezen minősítés szerint legnagyobb arányban a „gyenge” kategóriába sorolhatók a BAF képződményben kijelölt intervallumok. Mindhárom minősítés szerint a legjobb geotechnikai állapota a BAF-3 fúrás által harántolt BAF

képződményeknek van a vizsgált négy fúrás közül.



1. ábra: BAF-3 fúrásmenti geotechnikai minősítése (balra fent: RQD; jobbra fent: Kiruna; balra lent: RMR; jobbra lent:Q minősítés szerint)



2. ábra: Minősítési kategóriák aránya az egyes fúrásokban BAF képződményt harántolt fúráshosszhoz viszonyítva (balról jobbra: RQD, RMR, és Q minősítés szerint)

GSI értékelés eredményei jól korrelálnak az előzőekben bemutatott Repedezettség és Geotechnikai minősítés módszereinek értékeivel. A BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrásban a két leggyakoribb kategória alapján a maganyag töredezettsége és felületminősége változatos. A BAF-3 esetében az ép, alig mállott, kevésbé töredezett kőzetekre jellemző kategória is igen gyakori. BAF-3A és BAF-4 fúrás egyik leggyakoribb kategóriája a blokkos, részlegesen töredezett kőzettestekre jellemzőek. Ebben a két fúrásban a több rendszerű, széteső, töredezett kőzettest sok helyen puha, kloritos-agyagos kitöltéssel rendelkezik.

3. Összefoglalás

A fúrómagok helyszíni kőzetmechanikai dokumentálása, a laboratóriumi kőzetmechanikai vizsgálatok, a lyukgeofizikai vizsgálatok, valamint a hidrodinamikai vizsgálatok eredményei és a fúrás mélyítése során tett megfigyelések alapján a minősítés végeredményeképpen megkaptuk a fúrás szelvénymenti RQD, Kiruna, RMR és Q minősítésének adatait. Mivel standard módszerekről van szó, az egyes képződmények repedezettségi és kőzettest-osztályozási eredményei fúrások között összehasonlíthatók, korrelálhatók. A GSI érték több szempontú meghatározása érdekében Q-rendszer szerinti repedésfelület minősítést is végeztünk. A BAF-3 fúrásban tapasztalt „magdarabolódásos” jelenséggel érintett szakaszon a geofizikai BHTV szelvények és az elválási felületek lecsiszolódásának vizsgálatával meghatároztuk a valódi repedések helyzetét, így a képződményre vonatkozó korábbi tapasztalatok statisztikai elemzésével kiegészítve el tudtuk végezni e szakasz minősítését is. A BAF-2, BAF-3, BAF-3A és BAF-4 fúrásokra kapott eredményeket összehasonlítottuk. A négy fúrás közül mind az RQD, RMR és Q rendszerű minősítés szerint a legjobb geotechnikai állapota a BAF-3 fúrás által harántolt BAF képződményeknek van.

Irodalom

[1] Barton N., Choubey V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics 1/2, Vienna, pp. 1-54.

[2] Barton, N, Lien, R., Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of the tunnel support. —Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6. No. 4. pp. 189–236.

[3] Barton, N. (2002): Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 39. No. 2. pp. 185-216.

[4] Bieniawski Z. T. (1976): Rock mass classifications in rock engineering. Proceedings of International Symposium on Exploration for Rock Engineering, A. A. Balkema, Johannesburg, Vol. 1, pp. 97–106.

[5] Bieniawski Z.T. (1989): Engineering rock mass classifications. John Wiley and Sons, Pennsylvania.

[6] Cai M.; Kaiser P.K. (2006): Visualization of rock mass classification systems. Geotech Geol Eng 24(4):1089–1102.

[7] Deere D.U. (1964). Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes Rock Mechanics and Engineering Geology 1 (1), pp. 17–22.

[8] Hansági L. (1986): Gyakorlati kőzetmechanika az ércbányászatban. Budapest, Műszaki könyvkiadó, 172 p.

[9] Hansági, L. (1965): Numerical determination of mechanical properties of rock and of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2 (2), 219–223.

[10] Hoek, E. & Brown, E. T. (1980): Underground Excavation in Rock. London: Institution of Mining and Metallurgy, 527 p.

[11] Hoek, E., Marinos, P. (2000): Predicting Tunnel Squeezing. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 – November 2000, Part 2 – December, 2000.

[12] Hoek, E.; Kaiser, P.K., Bawden, W.F. (1995): Support of Underground Excavations in Hard Rock. Fourth Edition. Balkema, Rotterdam.

Bodai agyagkövet harántolt fúrások magszkennelési eredményei – Új adatok a Mecsek hegység szerkezetfejlődésének megértéséhez

Corescanning results of boreholes penetrated in Boda Claystone Formation – New data to the deformation history of the Mecsek-mountains, S-Hungary

MAROS GYULA[1], HÉJA GÁBOR[1], LANTOS ZOLTÁN[1], MARKOS GÁBOR[1], PALOTAI MÁRTON[1], KOVÁCS JÓZSEF[2], HATVANI ISTVÁN GÁBOR[3], BENKÓ ZSOLT[4]

[1]*Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH),*
[2]*Midori-Öko Kft.,*
[3]*Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK FGI),*
[4]*Atommagkutató Intézet (ATOMKI, DE)*

Abstract

In this study the Boda Claystone Formation (BCF) was investigated in the territory of the Western-Mecsek anticline and Gorica block. The cores of the Ibafa, Ib–4, the Boda, BAF–3, BAF–3A, BAF–4 boreholes were corescanned, evaluated and oriented in its original position based on BHTV measurements. The orientation distributions of different evaluated geological and tectonical phenomena were analised on stereoplots and tad-pole diagrams. Cyclicity investigation was made in BCF parts of the boreholes and the determined cycle lengths were localized in depth. A 3D model was constructed for the Western-Mecsek with a cross-section to analyse and demonstrate the geotectonic situatuion of the boreholes. Based on the structural geologic and absolute age (K/Ar) results a sort of tectonic events could be distinguished.

Összefoglaló

A Nyugat-mecseki antiklinális és a Goricai blokk területén felszínen és mélyfúrásokban előforduló Bodai Agyagkő Formáció fúrómagjait vizsgáltuk. Munkánkban az Ibafa, Ib–4, a Boda, BAF–3 és a folytatásaként mélyült BAF–3A valamint a Boda, BAF–4 fúrás maganyagát magszkenneltük, értékeltük, majd eredeti térbeli helyzetébe forgattuk akusztikus lyukfaltelevíziós mérések alapján. Elemeztük a különböző földtani, szerkezeti jelenségeket sztereografikus és mélységi eloszlásuk alapján. Ciklicitásvizsgálatot végeztünk a fúrások Bodai Agyagkő Formáció szakaszaira, periódushosszakat állapítottunk meg és a periódusokat lokalizáltuk a fúrásokban. 3D modellt és szelvényt szerkesztettünk a Nyugati-Mecsek területére, amelyben értelmeztük a fúrások helyzetét. Szerkezeti eseményeket különítettünk el, amelyek közül egyet K/Ar mérésekkel datáltunk.

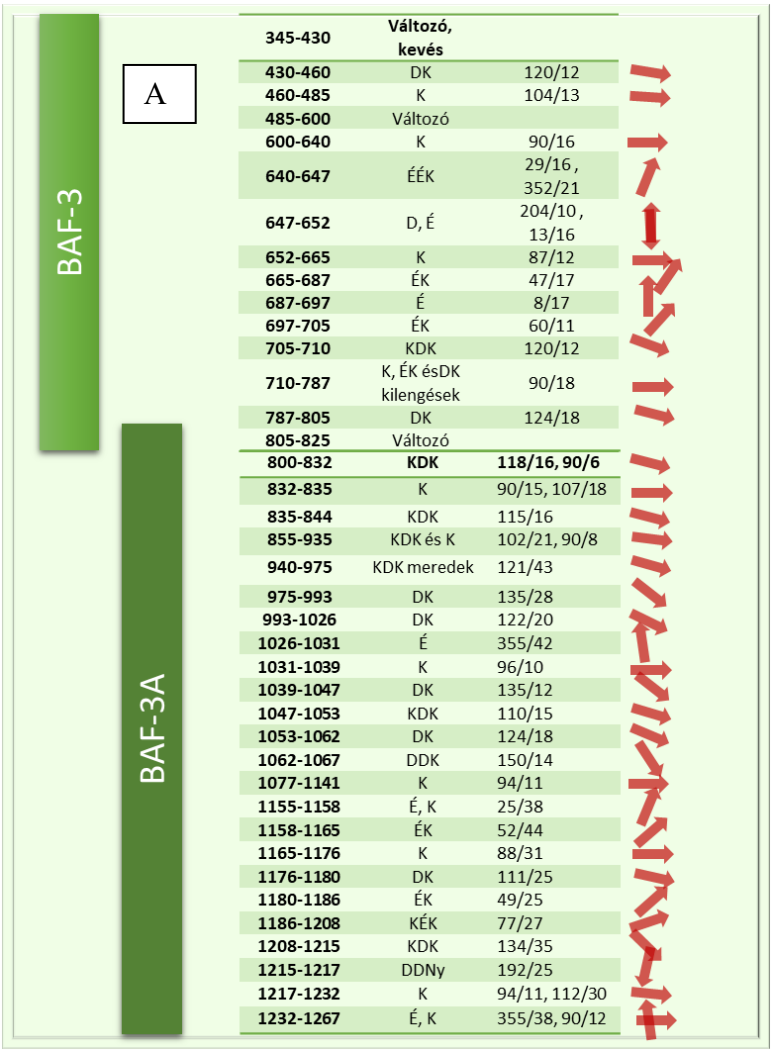
Kulcsszavak: Mecsek-hegység, Bodai Agyagkő, ciklussztratigráfia, redő, fold accommodation fault

Bevezetés

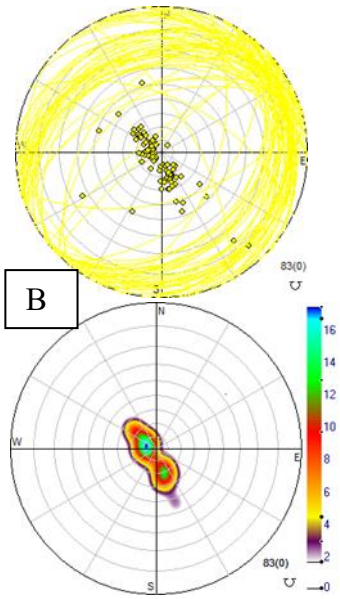
A Nyugat-mecseki antiklinális és a Goricai blokk területén, felszínen és mélyfúrásokban előforduló Bodai Agyagkő Formáció [1], [2] fúrómagjait vizsgáltuk. Munkánkban az Ibafa, Ib–4 [3], a Boda, BAF–3 és folytatásaként mélyült BAF–3A, valamint a Boda, BAF–4 fúrás maganyagát magszkenneltük ImaGeo magszkennerrel, értékeltük ImaGeo CoreDump szoftverrel, majd eredeti térbeli helyzetébe forgattuk a Geo-Log Kft. által mért akusztikus lyukfaltelevíziós mérések alapján. A térben orientált földtani objektumok száma a fúrásokban 37 163 db.

1. Elvégzett elemzések, vizsgálatok

A szkennelés, az eredeti térbe forgatás és kiértékelés módszertanát [4] tartalmazza. Az értelmezett objektum-sereget sztereogramokon és pólussűrűségi diagramokon ábrázoltuk alsó félgömb vetületben. Ezek az eloszlásokat mutató ábrázolások az értékelt adatbázis egyes jelenségeire (pl. rétegzés, zárt törések) vagy azok részhalmazaira vonatkoznak. Az értelmezett jelenségek térbeli eloszlásának mélységfüggését tad-pole diagramokon elemeztük. Az elmozdulásokat orientált vetőkarcok és a szkennelt képeken értelmezett kinematikai indikátorok alapján rögzítettük. A törészónák között voltak szkennelhető és nem szkennelhető magállapotú szakaszok. Ez utóbbiak dőlését a BHTV adatok segítségével a határoló mester törések alapján, részben a zónákban található törési síkok statisztikai elemzésével becsültük meg. A dolomitos aleurolit rétegeknek a talpát és tetejét is rögzítettük, amelyeket a szoftver számára rétegzónaként értelmeztünk. Ez alapján geomatematikai módszerekkel vizsgáltuk a dolomitos aleurolit rétegek mélységének, réteglapjaik dőlésirány és dőlésszög értékének ciklusosságát. A magas konfidencia-szintű (0,99) periódushosszakat periodogramokon, a szignifikáns periódushosszak fúrásokon belüli mélység-lokalizációját wavelet-diagramokon vizsgáltuk. Mintáztuk a tektonikai dokumentáció során észlelt törészónák magzónáit és agyagosabb kitöltésű kárzónáit, a mintákon K/Ar abszolút korvizsgálatokat végeztünk a SZTFH GeoCore laboratórium és az ATOMKI kivitelezésében.



345-430	Változó, kevés	
430-460	DK	120/12
460-485	K	104/13
485-600	Változó	
600-640	K	90/16
640-647	ÉÉK	29/16, 352/21
647-652	D, É	204/10, 13/16
652-665	K	87/12
665-687	ÉK	47/17
687-697	É	8/17
697-705	ÉK	60/11
705-710	KDK	120/12
710-787	K, ÉK és DK kilengések	90/18
787-805	DK	124/18
805-825	Változó	
800-832	**KDK**	**118/16, 90/6**
832-835	K	90/15, 107/18
835-844	KDK	115/16
855-935	KDK és K	102/21, 90/8
940-975	KDK meredek	121/43
975-993	DK	135/28
993-1026	DK	122/20
1026-1031	É	355/42
1031-1039	K	96/10
1039-1047	DK	135/12
1047-1053	KDK	110/15
1053-1062	DK	124/18
1062-1067	DDK	150/14
1077-1141	K	94/11
1155-1158	É, K	25/38
1158-1165	ÉK	52/44
1165-1176	K	88/31
1176-1180	DK	111/25
1180-1186	ÉK	49/25
1186-1208	KÉK	77/27
1208-1215	KDK	134/35
1215-1217	DDNy	192/25
1217-1232	K	94/11, 112/30
1232-1267	É, K	355/38, 90/12



1. ábra. A) A BAF–3 és –3A fúrások rétegdőlés doménjei, B) A BAF–4 fúrás alkáli bazalt teléreinek sztereogramja és pólussűrűségi diagramja

2. Következtetések az eloszlásokból

A sztereografikus és tad-pole eloszlások vizsgálata alapján a következő eredmények szűrhetők le.

A rétegdőlés eloszlások nagy vonalakban megfelelnek a térképi rajzolatnak. A BAF–4 fúrás az Antiklinális szárnyának, a BAF–3 és –3A fúrás az Antiklinális magzónájának várható eloszlását mutatja. Az Ib–4 fúrás dőléseloszlása szintén jó közelítéssel ÉK felé dől.

A törések eloszlása az Antiklinálisban mindkét fúrásban hasonló. Ha az eloszlásból eltávolítjuk a rétegmenti töréseket, akkor széles tartományokat lefedő, de maximumhelyeit tekintve egyszerű kép marad, két konjugált, diagonális töréspár KÉK–NyDNy és ÉÉNy–DDK csapással. A nyílt és a zárt törések eloszlása eltérő hangsúlyokkal, de hasonló ehhez. A törések eloszlása a Goricai blokkban ettől kissé eltérő. A nyílt törések a rétegzéssel párhuzamos csapásban, de meredekebb dőlésszöggel és a rétegekre merőlegesen, a zárt törések pedig széles sávban, É–D csapásmaximummal jelentkeznek.

A rétegdőlések mélységi eloszlása változékonysága az Ib–4 és BAF–4 fúrásokban kicsi, a BAF–3 és BAF–3A fúrásokban nagy (1. ábra-A).

A kréta telérek 3 csoportban jelennek meg, a rétegekkel párhuzamosan és konjugált párként. A geometria feltolódás-pár kinematikára utal. (1. ábra-B)

A törések mélységeloszlásában a zártak általában alárendeltek a nyíltakhoz képest. A gyakoriság mélységben a törészónák kivételével átlagban állandó, a BAF–4-es fúrás kivételével, amelyben lefelé nő. Az Antiklinálisban a törésgyakoriság kissé nagyobb, mint az Ib–4 fúrásban.

3. Ciklicitás vizsgálat

A BAF ciklusos felépítését már korábbi munkákban is vizsgálták [5, 6]. Jelen tanulmányunk eredménye szerint a BAF Füzi Tagozata nagy megbízhatósággal igazoltan ciklusos felépítésű mind a dolomitos aleurolit rétegek mélysége, mind azok dőlésiránya és dőlésszöge alapján. A vizsgált fúrások dőlésiránya, dőlésszöge és dolomitos aleurolit rétegei mélységi eloszlásának ciklikus megjelenéséhez elemzéséhez más-más spektrum analízisre alkalmas módszer volt szükséges. A dőlésirány és dőlésszög adatsorok módosítatlanul, nem-egyenközűen kerültek vizsgálatra, míg a dolomitos aleurolit rétegek esetében egyenközűvé tétel érdekében újra mintavételezés történt.

A dőlésirányokat és dőlésszögeket módosított Lomb– Scargle–Fourier [7, 8] periodogrammal vizsgáltuk, mely képes konfidencia intervallumot is rendelni a számított periodogramhoz és csúcsait egy elsőrendű autoregresszív folyamathoz (AR[1]) viszonyítja, ezáltal meghatározhatóvá válnak az adott folyamatban lényeges szerepet játszó adott periódus idejű folyamatok (REDFIT [9]). A dolomitos aleurolit rétegek periodikus viselkedésének meghatározása wavelet spektrum analízissel (WSA) történt [10, 11].

A statisztikai elemzéseket az R statisztikai környezetben, a sávszűrést az astrochron csomag bandpass() függvényével [12],.a wavelet spektrumelemzést a WaveletComp csomag analyze.wavelet függvényével végeztük [13], a redfit-et a dplR csomag [14] redfit() függvényével számítottuk, egyéb üledékes képződmények esetében pl. cseppkövek periodicitás-vizsgálatánál alkalmazott beállításokkal (pl. [15, 16]. Az eredmények minden esetben a = 0.01 szinten voltak szignifikánsnak tekinthetők.

4. Szerkezeti és sztratigráfiai eredmények

A Mecsekérc Zrt-től kapott prekainozoos földtani térkép, a területen mélyült fúrások és szakirodalmi tanulmányok (pl. [17, 18, 19], Horváth et al. 2018, Cserkész-Nagy et al. 2020) alapján 3D modellt szerkesztettünk a Nyugati-Mecsek területére. Modellünkben elhelyeztük a vizsgált fúrásokat, valamint azok értelmezett adatait és mindezek alapján egy vázlatos szelvényt szerkesztettünk É–D-i irányban a BAF–3 és –3A fúráson keresztül (2. ábra-B). Szerkezeti modellünk és a fúrások komplex vizsgálata alapján több szerkezeti esemény különíthető el:

- késő-triász riftesedés (2. ábra-A) abszolút kor adatok alapján 207 és 210 Mév korokkal,
- kora-kréta feltolódásokhoz és rétegmenti elmozdulásokhoz kapcsolódó alkáli bazalt telér
- benyomulások mai helyzetben, feltételezett ÉNy–DK-i csapású összenyomással
- késő-kréta redőződéshez kapcsolódó feltolódások, parazita redők és/vagy fold accommodation
- fault-ok képződése (2. ábra-B)
- feltehetően kainozoos feltolódások, ferde normál vetők majd eltolódások.

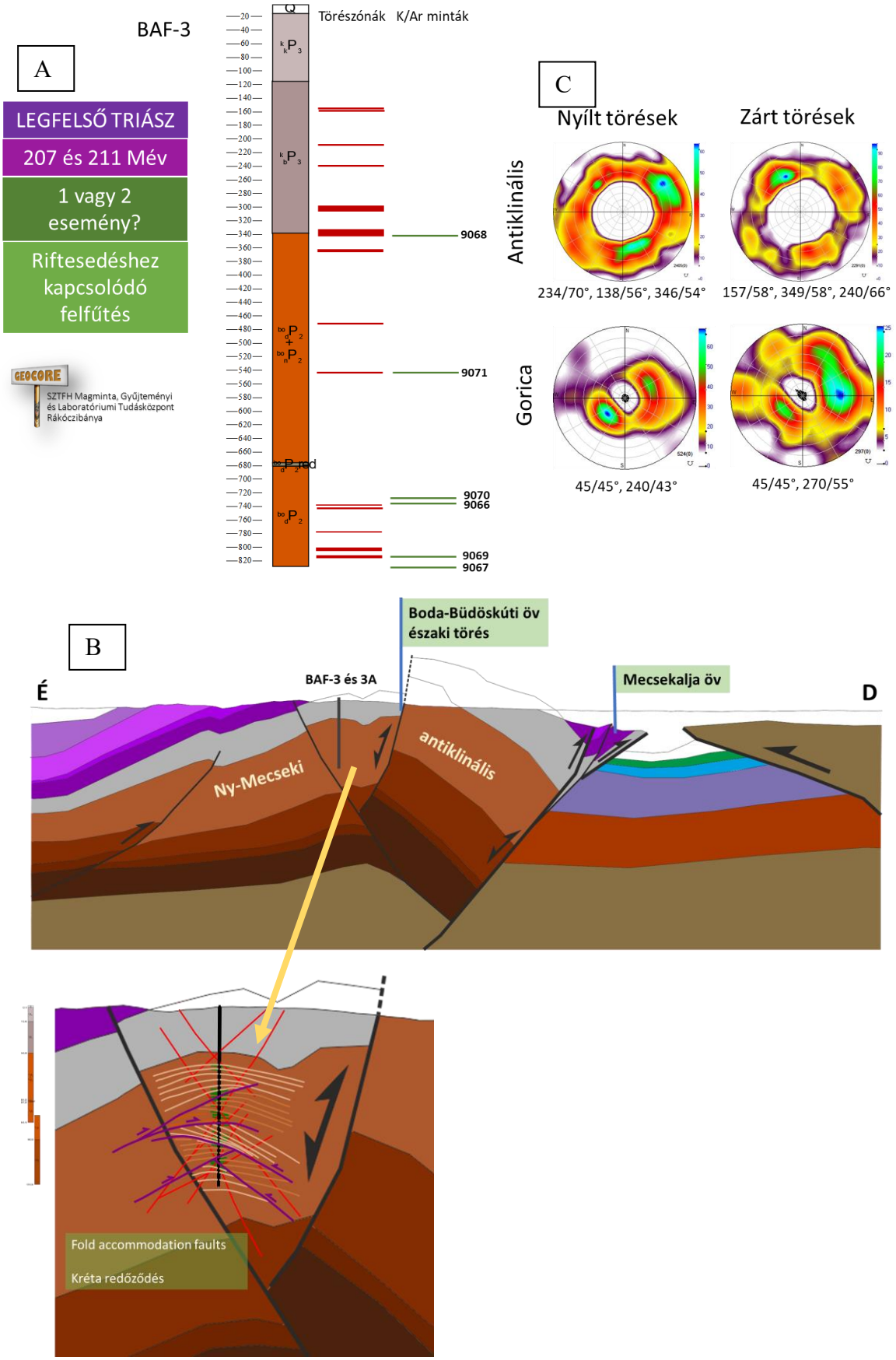
Eltérő deformációk jellemzik az Antiklinális redőszárnyán, annak magjában és a Goricai blokkban mélyült fúrások maganyagát (2. ábra-C).

Igazoltuk a szerkezeti zónák többszörös felújulását.

A BAF Füzi Tagozata nagy megbízhatósággal igazoltan ciklusos felépítésű mind a dolomitos aleurolit rétegek mélysége, mind azok dőlésiránya és dőlésszöge alapján. A dolomitos aleurolit rétegek mélység szerinti ciklusainak periódushossza 0,5 m és 4,1 m. Előbbi az Antiklinális fúrásaira jellemző, utóbbi mindhárom vizsgált fúrásra. A 4 m körüli periódushossz megegyezik a Jakabhegyi Homokkő Formációra hasonló módszerrel kimutatott ciklushosszal [4]. A dőlésirányokra és dőlésszögekre jellemző periódushossz 6 m és 20-25 m körüli. Ezek csak az Antiklinálisban mélyült fúrásokban találhatók meg. Földtani hátterük tisztázása további vizsgálatokat kíván, munkahipotézisünk szerint ezek feltehetően a gyűrődéshez kapcsolódnak. [6] munkájában meghatározott több ciklushossz között szintén említésre kerül ~0,6 m és ~6 m körüli ciklushossz kőzetszín és természetes gamma mérések alapján.

A ciklusok korrelációs célú lokalizációja a fúrásokon belül kisebb megbízhatóságú, de a Füzi Tagozatra korlátozódik. A dolomitos aleurolit rétegek mélység-eloszlásának korrelációja további vizsgálatok tárgya és célja. Előzetesen azonban megállapítható, hogy a dokumentált dolomitos aleurolit rétegek eloszlásának változékonysága nagy. Ezt indolkolhatja a képződési körülmények változatossága, a playa fácies egységek lokális elterjedése is. Ugyanakkor felmerülhet, hogy az üledékképződés hasonló körülmények között, térben több tóban és/vagy időben több tóban ment végbe, amelyek mai helyzetben szerkezeti határok mentén kerültek egymás közelébe.

Az Ib–4 fúrás deformációs tulajdonságai és ciklusztratigráfiai jellemzői alapján eltér az Antiklinálisban mélyült fúrásoktól. Orientálható törészónái lapos ÉK–DNy-i irányú összenyomással jellemezhető feszültségmezőre engednek következtetni, ami majdnem merőleges az Antiklinálisban ható, törészónákból kimutatott összenyomás irányokra. Feltehetően a Goricai blokkot jelentős kréta feltolódás vagy kisebb takarós elmozdulás választja el az Antiklinálistól és a blokk későbbi blokk-rotáció története is eltérő.



2. ábra: A) A BAF–3 fúrás rétegsora, törészónái, K–Ar mintavételi helyei és koradatai, B) É–D-i szelvény és nagyított részlete a BAF–3 és –3A fúrásokban meghatározott fold accommodation fault-okkal, C) A Ny-Mecseki antiklinális és a Goricai blokk töréseloszlásainak pólussűrűségi diagramjai

Irodalom

[1] Chikán G., Konrád Gy. 1982: A Nyugat-Mecseki földtani térképezés újabb eredményei. — A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1980-ról, 169–186.

[2] Konrád, Gy., Sebe, K., Halász, A., Babinszki, E. 2010: Sedimentology of a Permian playa lake: the Boda Claystone Formation, Hungary — Geologos, 2010, 16 (1): 27–41. doi: 10.2478/v10118-010-0002-1

[3] Hámos G., Sámson M., Bernáth Gy., Csurgó G., Darvas K., Konrád Gy., Kovács A. Cs., Kovács L., Krupa Á., Ludmann L., Maros Gy., Máthé Z., Rőczei N., Somodi G., Szegő I. 2017: Ib–4 fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. — Kézirat, RHK-N-004/17, RHK Kft. Adattár, Paks, 228 p.

[4] Maros Gy., Szabadosné Sallay E., Ádámné Incze Sz., Hatvani I. G., Palotás K., Kovács J., Gyenis Á., Gróf Gy., Pásztor Sz., Andrássy L., Mara J., Vihar L., Szongoth G. 2020: Az ImaGeo-magszkennelés módszerei egy mecseki fúrás nagy felbontású értelmezésének példáján — Földtani Közlöny, 150/1, pp. 81–102., DOI: 10.23928/foldt.kozl.2020.150.1.81

[5] Halász A. 2011: A Bodai Aleurolit Formáció ciklussztratigráfiai vizsgálata. — Kézirat, PhD Doktori értekezés, Pécsi Tudományegyetem, 129 p.

[6] Halász A., Halmai Á. 2012: Homogén kőzetek színalapú elemzésének módszere az Ibafa Ib-4 fúrásban harántolt Bodai Agyagkő Formáció példáján, Földtani Közlöny 142:(2) pp. 125-135.

[7] Lomb, N. R. 1976: Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. — Astrophysics and Space Science 39, 447–462. https://doi.org/10.1007/bf00648343

[8] Scargle, J. D. 1982: Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. — Astrophysical Journal 263, p. 835. https://doi.org/10.1086/160554

[9] Schulz, M., Mudelsee, M.: Redfit: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. — Computers & Geosciences 28, pp. 421–426. https://doi.org/10.1016/s0098-3004(01)00044-9

[10] Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S. 2004: Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series Nonlinear Processes Geophys., 11, pp. 561-566.

[11] Kovács, J., Kiszely-Peres, B., Szalai, J. & Kovácsné, Székelyi. 2010: Periodicity in shallow groundwater level fluctuation time serieson the Trans-Tisza Region, Hungary. — Acta Geographica AC Geologica et Meteorologica Debrecina4–5, 65–70.

[12] Meyers, S.R. 2014: Astrochron: An R Package for Astrochronology

[13] A. Roesch, H. Schmidbauer 2014: WaveletComp: A Guided Tour Through the R-package p. 38

[14] Bunn, A. G. 2008: A dendrochronology program library in R (dplR). — Dendrochronologia 26, 115–124. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002

[15] Holzkamper, S., Mangini, A., Spotl, C. & Mudelsee, M. 2004: Timing and progression of the Last Interglacial derived from a high alpine stalagmite. — Geophysical Research Letters 31, L07201. https://doi.org/10.1029/2003gl019112

[16] Hatvani, I. G., Kern, Z., Leél-Őssy, S., Demény, A. 2018: Speleothem stable isotope records for east-central Europe: resampling sedimentary proxy records to obtain evenly spaced time series with spectral guidance. — Earth System Science Data 10/1, 139–149. https://doi.org/10.5194/essd-10-139-2018

[17] Wéber B. 1977: Nagyszerkezeti szelvényvázlat a Ny-Mecsekből — Földtani Közlöny, 107. pp. 27-37.

[18] Horváth J., Hámos G., Benő D., Menyhei L., Sámson M., Szamos I., Halász A., Konrád Gy., 2018: A BAF kutatási terület földtani-szerkezeti alapvonásai — Bodai Agyagkő Formáció kutatás szakmai előadói nap kiadványa 2018. november 14. Pécs, pp. 81-88.

[19] Cserkész-Nagy, Á., Bauer, M., Takács, E., Csabafi, R., Gúthy, T., Kóborné Bujdosó, É., Török, I., †Redlerné Tátrai, M., Szőts, G., Kovács, A. Cs., Hegedűs, E. 2020: A szeizmikus reflexiós módszerek szerepe a nem szénhidrogénipari kutatásokban Magyarországon – Példák a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat és elődei tevékenységéből — Földtani Közlöny, 150/1, pp. 151–168., DOI: 10.23928/foldt.kozl.2020.150.1.81

A Bodai Agyagkő Formáció kőzetmintáin végzett nanopermeabilitás mérések eredményei
Results of measuring nanopermeability of Boda Claystone Formation coreplugs

SZILÁGYINÉ SEBŐK SZILVIA[1], BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN[2],
HORVÁTH GÁBOR[3], DÓCS ROLAND[4]

1Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, szilvia.szilagyine@uni-miskolc.hu,

2 Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, baracza@uni-miskolc.hu,

3 Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, afkgabor@uni-miskolc.hu

4 Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Kőolaj- és Földgáz Intézet, afkdocs@uni-miskolc.hu

Abstract

The increase of oil and gas prices in the worldmarket and the issues of radioactive waste disposal have brought ultra-low-permeability storage rocks into the focus of industrial and economic interest. This process has also necessarily led to the development of measuring methods suitable for determining petrophysical parameters of ultra-low-permeability rocks. The development of measuring equipments and methods have made it possible to measure gas flow rates on a scale previously was impossible, paving the way for the development of new methods such as the Nano-K permeameter presented in this study. In our investigation, the results of measurements of samples belonging to the Boda Claystone Formation were compared with results of extremely low permeability rocks from other unconventional hydrocarbon reservoir rocks.

Összefoglaló

A kőolaj és a földgáz világpiaci árának növekedése, valamint a radioaktív hulladék elhelyezés témakörét érintő és megoldásra váró kérdések, illetve a kapcsolódó intézkedések miatt az extrém kis áteresztőképességgel rendelkező tárolókőzetek az ipari- gazdasági érdeklődés fókuszába kerültek. Ez a folyamat az extrém alacsony permeabilitású kőzetek kőzetfizikai paramétereinek meghatározására alkalmas mérési módszerek fejlesztését is szükségképpen maga után vonta. A méréstechnikai berendezések fejlesztésében történt előrehaladás segítségével lehetőség nyílt a korábban nem mérhető mértékű gáz térfogatáramok mérésére is, utat nyitva olyan új módszerek kifejlesztésére, mint amelyet a tanulmányban bemutatásra kerülő Nano-K permeameter is alkalmaz. Vizsgálataink során a Bodai Agyagkő Formációba tartozó minták mérési eredményeit vetettük össze egyéb, nem konvencionális szénhidrogén tározó kőzetből származó, extrém alacsony permeabilitású kőzetek mérési eredményeivel.

Kulcsszavak: nanopermeabilitás, áteresztőképesség, Nano-K permeameter, Bodai Agyagkő, Bodai Aleurolit, BAF, radioaktív hulladék, nem konvencionális,

Bevezető

A Bodai Agyagkő – 2011 előtt még Bodai Aleurolit – Formáció már több, mint három évtizede fokozott érdeklődésre tart számot a magas radioaktivitású hulladékok elhelyezésének megoldását célzó kutatások körében. A geológiai formációban történő elhelyezés alapfeltétele a befogadó közeg izolációs képessége, ami a kőzetek esetében olyan alacsony áteresztőképességet jelent, mely kizárja az advektív felszín alatti vízáramlás lehetőségét [2].

A radioaktív hulladékok elhelyezésére alkalmas, kis áteresztőképességű kőzetek mellett a nem konvencionális tárolókőzetek esetében is kritikus fontosságú a porozitás- és permeabilitás viszonyok, szemcseközi teret leíró tulajdonságok és az abban lejátszódó folyamatok megismerése. A palagázt

tároló finomszemcsés üledékes kőzetek pórusméret tartománya a nanométeres nagyságrendet közelíti. Porózus közegek permeabilitásának meghatározására számos empirikus- analitikai és a Darcy törvényen alapuló labor- és experimentális módszert dolgoztak ki, melyek közül több mind a mai napig használatban van. A mérési módszerek részletes ismertetésétől terjedelmi okokból eltekintünk, de hivatkozunk Christiansen & Howarth [1] valamint Sharma & Siginner [2] műveire, melyek átfogó historikus képet nyújtanak a permeabilitás mérés metódusait illetően. A nano mérettartományban megjelenő permeabilitás mérésére alkalmas módszerek és eszközök kifejlesztésére azonban csak a növekvő ipari-gazdasági igények talaján kifejlődő tudományos kutatások eme tartomány felé fordulását követően kerülhetett sor.

A kőzetminták laboratóriumi permeabilitás meghatározása során használható eljárásokat két nagy csoportba sorolhatjuk. Ezek a térfogat, illetve tömegáram mérésén, valamint a nyomásváltozás vizsgálatán alapuló módszerek. Azon minták esetében, ahol a permeabilitás értékek kellően magasak ($>10^{-3}$ mD), alacsonyabb differenciális nyomások mellett van lehetősége a fluidumok (beleértve a gázok is) átáramoltatására. Ebből következtetően magasabb térfogatáramok kialakítására van lehetőség a lamináris áramlási viszonyok megtartása mellett, mely alapvető feltétele a mérési módszereknek. Ilyen módszerek esetében a fluidum adott differenciál nyomás mellett a kőzeten keresztül kialakult és stabilizálódott térfogat/tömegáramát mérve meghatározható a minta permeabilitása.

Azon minták esetében, ahol a fluidumok áramlása során fellépő nyomásveszteségek ezen tartományon kívül esnek, a lamináris áramlási viszonyok megtartása mellett kialakuló térfogat, illetve tömegáramok a mérhetőnél alacsonyabbak. Ilyen esetekben kerülnek alkalmazásra a nyomás lecsengési (PPD= Pressure Pulse Decay) valamint nyomás felépülési (PB= Pressure Buildup) technikákon alapuló mérési módszerek. A két technika ugyanazon elven működik, egy állandó nyomáson lévő rendszerben előidézett ismert mértékű nyomásváltozás kiegyenlítődéséhez szükséges idő intervallum kerül meghatározásra. A lecsengési, illetve felépülési görbék felvételét követően a minta permeabilitása meghatározható válik.

A PPD elven működő berendezések esetében a mérési kör három részre tagolható: a minta előtti ismert térfogat, a minta utáni ismert térfogat, illetve a minta pórus térfogata. A mérés kezdetén a nyomás állandó a három szakaszban majd ezt követően a minta előtti szakasz leválasztásra kerül egy szelep segítségével. A leválasztott szakaszban ezután a nyomás fokozására kerül sor, melyet összenyitva az alacsonyabb oldali nyomással nyomás kiegyenlítődés veszi kezdetét. A nyomás lecsengés sebessége a kőzet áteresztőképességének a függvénye. A PB módszer elve hasonló abban az esetben nyomás csökkentés történik és a kiegyenlítődés iránya megfordul.

1. Általános jellemzők

A Bodai Agyagkő -korábbi nevén Bodai Aleurolit- Formáció kőzetanyagában uralkodóan agyagkő, aleurolit, finomszemű homokkő és dolomit kőzettípusok jelennek meg, melyben kősó utáni pszeudomorfózák formájában pátos karbonát kitöltések is előfordulnak [2]. Ezt, mint őskörnyezeti markert sós iszaplapályokra jellemző intenzív bepárlódással és korai diagenetikus kősóképződéssel hozták kapcsolatba. A rendelkezésre álló BAF magmintákat a formációból már jól ismert vörösesbarna agyagkő alkotja, mely változó mértékben albitfészkes megjelenésű (2. ábra).

2. A Nano-K permeaméter bemutatása és a mérés menete

Az eszköz tranziens áramlási viszonyok között képes meghatározni a kőzetmagok pórusrendszerében jelentkező ellenállást. A mérőeszköz segítségével meghatározhatóvá vált a rendkívül kis (10^{-3}-10^{-9}) mD áteresztő képesség tartományba eső kőzetminták permeabilitása, amelyre mindezidáig nem volt lehetőség. A mérőberendezés beszerzésével, a jelenleg rendelkezésre álló eszközpark műszereivel együttesen értelmezhető mérési tartomány, jelentősen kiterjeszthetővé vált. A Nano-K permeabilitás mérő elsősorban a nem hagyományos szénhidrogén tároló rétegekből származó

kőzetminták, valamint olyan geológiai formációkból származó kőzetek záró képességének elemzése végezhető el, amelyek alkalmasak lehetnek kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére. A GEOCORE Magminta, Gyűjteményi és Laboratóriumi földtani tudásközpont fejlesztése című projekt keretin belül beszerzett eszközök üzembeállítása lehetővé teszi a projektben résztvevő másik két intézménnyel (MBFSZ- újabb nevén SZTFH és ATOMKI) történő szinergikus együttműködést az adott kutatási területen, megalapozva a közös kutatómunkát.

A mérőeszköz elülső oldalán található két horizontális irányban elhelyezett mintabefogó, melyekhez egy-egy áramlásmérő, regulátorok és a mintatartók feltöltését, leeresztését, illetve a bennük történő áramlást szabályozó szelepek, valamint a nitrogén gáz áramlását szabályozó szelepek tartoznak kiegészítve egy digitális kijelzővel. A nitrogén utánpótlásért felelős port, a Swagelok kompressziós szerelékek, a mintatartók járulékos fluidumait elvezető drain portok és hálózati dugaljak, adatátviteli modulok és USB portok a bal oldali panelen kaptak helyet, míg maga az áramlásmérő bemenete a jobb oldali panelen helyezkedik el. A berendezés 1” és 1,5” átmérőjű hengeres testek mérésére alkalmas, amelyek hossza 2-8 cm-ig terjedhet. A mintát gumiköpenybe helyezzük és beszereljük a magbefogó cellába. A rendszer köpeny oldalát desztillált víz segítségével légtelenítjük, majd a mintára 100 bar köpenynyomást adunk, hogy megakadályozzuk mérés során a gáz minta melletti elszivárgását. A mérést nitrogén gáz segítségével végezzük. A belépő oldalra maximum 32 PSI nyomást állítunk be a reduktor segítségével a kiáramlási oldalt pedig a légkörre nyitva hagyjuk és megvárjuk amíg a gázáramlás állandósul. Nagy tömörségű minta esetében ez akár több napba is telhet. Arról, hogy az áramlás állandósult, a piknométer segítségével győződünk meg. Felszereljük a nagy pontosságú Nano-Q áramlásmérőt a kiáramlási pontra és elindítjuk a mérést. Bemenő adatként szükséges a minta hossza, átmérője, valamint a légköri nyomás, így kimenő adatként megkapjuk a permeabilitást.

3. Mérési eredmények

3.1. Abszolút permeabilitás és porozitás mérések eredményei

A mérésre alkalmas minták kiválasztását, majd a minták 3D scannelését és archiválását követően a permeabilitás mérést megelőzően héliumos porozitásmérést hajtottunk végre. A mérési eredményeken feltáró statisztikai vizsgálatokat végeztünk, a kis mintaszám miatt azonban a kiugró vagy extrém mérési értékeket felvevő mintákat sem távolítottuk el az adatsorból. Ennek megfelelően a magok eredményeinek leíró statisztikai paramétereit az 1. táblázat mutatja be. Héliumos porozitás szempontjából a mért agyagkő minták 0,00423 és 1,19 % közé esnek, középértékük 0,603%.

A BAF minták permeabilitása 0,00312 és 4,366 μD közé esik. A minimum érték megfelel az agyagkövekre jellemző átlagos alacsony áteresztőképességnek, maximuma viszont némiképp eltér az elvárttól. Ezzel az értékkel a BAF 3/4/1 jelű minta extrém magas értékként jelentkezik a box ploton, melyet a 3. ábra szemléltet. Az alacsony mintaszám miatt nem került eltávolításra az adatok közül ez a mérés, így a középérték az átlagos eltérés és a szórás értéke is csak tájékoztató jellegű.

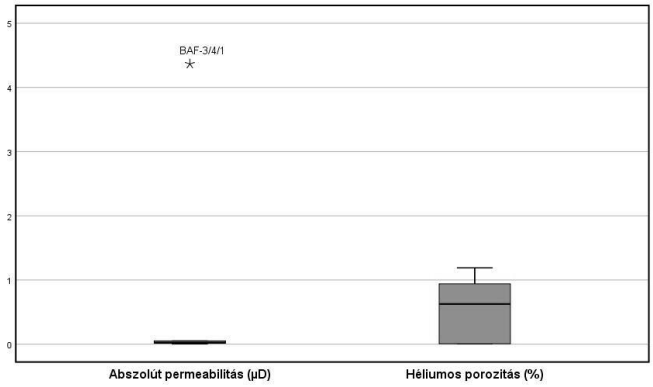
Egy kibővített mintaállományt vizsgálva, melybe kis áteresztőképességgel rendelkező, eltérő litológiájú minták is tartoztak, a BAF 3/4/1 jelű minta permeabilitása már nem mutatkozik extrém értéknek. A kibővített, eltérő litológiájú mintaállomány porozitás és permeabilitás értékeinek kapcsolatát vizsgálva az 5. ábra látható diagramot kapjuk. A vizsgált BAF minták mellett a márga, mészmárga, illetve ezek változó arányú összetételével jellemezhető mintákon túl aleurolitként, breccsaként, homokkőként meghatározott minták is szerepeltek az adatsorban. Egyértelműen pozitív, erős korreláció – nem meglepő módon- csak a homokkövek porozitása és permeabilitása között jelölhető ki, melyek esetében a porozitás mértékének növekedésével a permeabilitás értéke is nő. Ezzel szemben a márgák, márgaszerű kőzetminták között ilyen jellegű kapcsolat nem írható le, a porozitás kis mértékű emelkedését nem követi az áteresztőképesség növekedése, vagy a viszonylag magasnak mondható áteresztőképesség is alacsony porozitással párosul.

1. ábra: Nano-K permeabilitásmérő

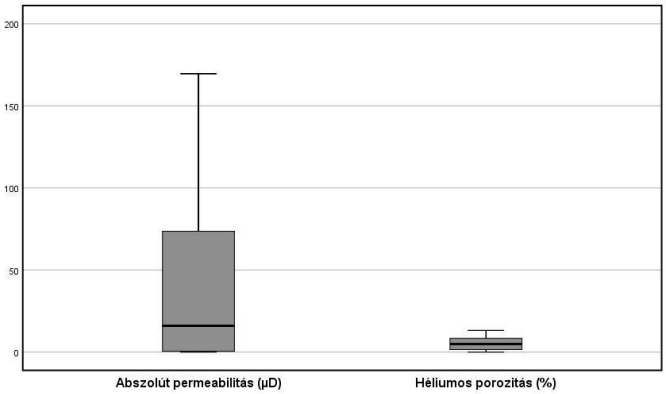
2. ábra: Bodai agyagkőből kialakított plugok NanoK méréshez

1. táblázat: Leíró statisztikai paraméterek a BAF minták jellemzőivel

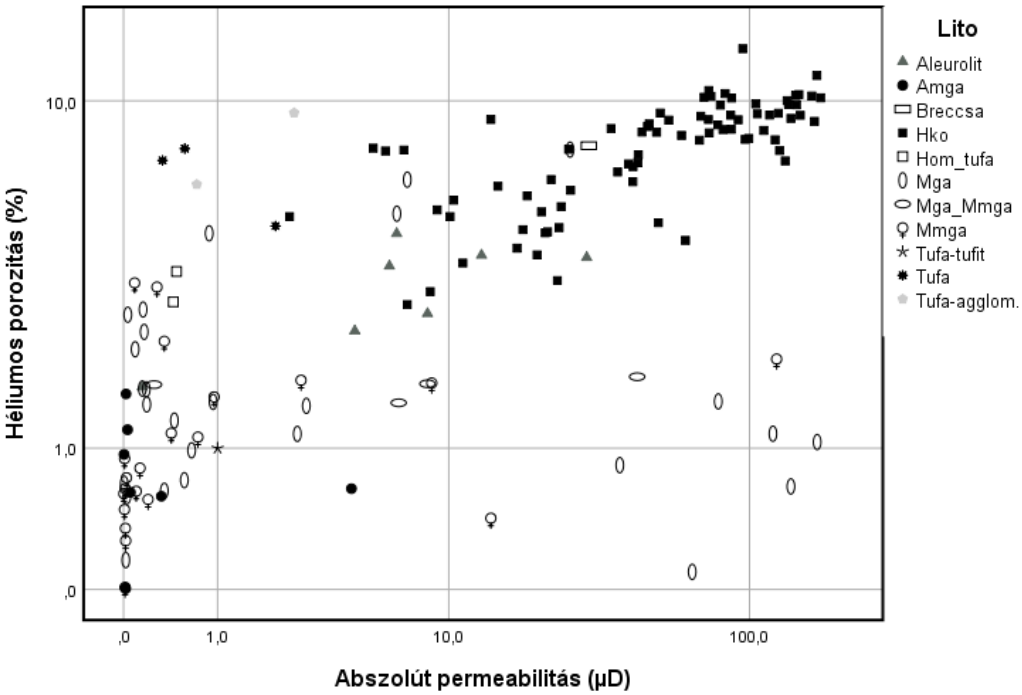
Fejléc	*Minimum*	*Maximum*	*Középérték*	*Átlagos eltérés*	*Szórás*
Abszolút permeabilitás	0,00312	4,366	0,835	1,116	1,654
Héliumos porozitás	0,00423	1,190	0,603	0,4827	0,341
Mintaszám	7	7	7	7	7



3. ábra: BAF minták permeabilitás és porozitás mérésének eredményei



4. ábra: Alacsony áteresztőképességű, eltérő litológiájú minták permeabilitás és porozitás mérésének eredményei



5. ábra: Eltérő litológiájú alacsony áteresztőképességű magminták permeabilitásának és porozitásának kapcsolata

4. Összefoglalás

A minták előkészítése és a mérés kivitelezése során néhány alapvető feltételnek kell eleget tennünk a pontos mérési eredmények érdekében. Ezek közül a legfontosabb, hogy a mintákat tömegállandóság eléréséig szükséges szárítani a mérés megkezdése előtt. A minta kialakítása során figyelemmel kell lenni az esetleg megjelenő mikrorepedésekre is, melyek főleg az agyagkő minták esetében nagyobb arányban alakulhatnak ki. A mintaelőkészítés során, vagy akár a mérés közben létrejött repedések a mérési eredményeket torzíthatják, téves értékelésre adhatnak alapot, így szükségszerűvé válhat újramérésük, illetve új minta kialakítása. A bemeneti nyomás megválasztása során törekedni kell a turbulens áramlás lehetőségének elkerülésére. A mért BAF minták mind porozitás, mind permeabilitás alapján az elvárásoknak megfelelően beilleszthetők az ultra alacsony áteresztőképességű kőzetek közé.

Irodalom

[1] Christiansen, Richard L., Howarth, Susan M. (1995): Literature review and recommendation of methods for measuring relative permeability of anhydrite from the Salado Formation at the waste isolation pilot plant, Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico, Livermore, California, USA

[2] Sharma, Sanjay, Siginner, Dennis A. (2008): Permeability measurement methods in porous media: A review, Proceedings of IMECE2008, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2008, Boston, Massachusetts, USA

[3] Szűcs István (2013): A nukleáris ipar hulladékkezelési kihívásai, Pannon Egyetem Környezetmérnöki Intézet, Veszprém

[4] Máthé Zoltán, Varga Andrea (2012): „Ízesítő” a permi Bodai Agyagkő Formáció őskörnyezeti rekonstrukciójához: kősó utáni pszeudomorfózák a BAT-4 fúrás agyagkőmintáiban, Földtani Közlöny, 142/2. 201-204. Budapest

A középső perm Bodai Agyagkő (Ny-Mecsek) kutatásának rétegtani eredményei
Stratigraphic results of the research of the Middle Permian Boda Claystone (West Mecsek)

KONRÁD GYULA[1], HALÁSZ AMADÉ[2],
HÁMOS GÁBOR[3] , SEBE KRISZTINA[4], MOLNÁR PÉTER[2]

[1]*konradgyula@t-email.hu,*
[2]*Radioaktív Hulladékkezelő (RHK) Kft.*
[3]*Mecsekérc Zrt.*
[4]*Pécsi Tudományegyetem Földtani és Meteorológiai Tanszék*

Abstract

The Boda Claystone Formation was divided into four member based on the results of several decades of research. The conglobreccia of the BAF-1Af borehole record was separated as a new formation in the West Mecsek Permian sequence.

Összefoglaló

A Bodai Agyagkő Formációt a több évtizedes kutatási eredmények alapján négy tagozatra osztottuk. A BAF-1Af fúrásban harántolt konglobreccsát új formációként különítettük el a Ny-mecseki perm rétegsorban.

Kulcsszavak: perm, rétegtan, Mecsek

Bevezető

A Bodai Agyagkő Formáció (BAF) nagy aktivitású radioaktív hulladékokat befogadó képességének kutatása során merült fel a gyakorlati igény a mintegy ~800-1000 m vastagságú formáció sztratigráfiai tagolására. A képződmény előnyös tulajdonsága az egyveretűség, homogenitás, ezek a jellemzők ugyanakkor megnehezítik a rétegtani egységek elkülönítését, amelyek nélkülözhetetlenek a szerkezeti elmozdulások felismeréséhez és minősítéséhez.

A BAF-1Af fúrásban harántolt konglomerátumot Begykúti Konglobreccsa néven új formációba soroltuk. A tárgyalt litosztratigráfiai egységek képződési környezete alapján üledékképződési modellt szerkesztettünk.

1. A Bodai Agyagkő tagolása

A BAF első részletes leírását Jámbor [1] adta. Az azóta mélyült magfúrások és földtani térképezési munkák ([2], [3], [4], [5]) eredményei alapján nagyrészt alátámasztjuk és részleteiben kibővítjük Jámbor megfigyeléseit.

Az elkülönített Őrházi, Fűzi, Dombói és Nagyvölgyi Tagozat egymással összefogazódók, ezért a határok kijelölésében a litosztratigráfiában hasonló esetekben alkalmazott módszerekkel éltünk: egy jellemző litofácies első megjelenését vagy kimaradását, illetve a formációt felépítő litofáciesek előfordulásának gyakoriságát vettük figyelembe. A BAF-kutatás során a kialakított litosztratigráfiai felosztás alkalmazhatónak bizonyult.

2. A Begykúti Konglobreccsa jellemzői

A Ny-mecseki antiklinális déli szárnyán mélyített BAF-1A és BAF-1Af fúrásban nagy vastagságban harántolt, az ismert permi formációktól eltérő litológiájú törmelékes képződményt célszerűnek látszott – Begykúti Konglobreccsa néven – új formációként elkülöníteni [6]. A formáció legfontosabb megkülönböztető üledékszerkezeti és -szöveti tulajdonságai a rétegzetlenség, osztályozatlanság és rossz koptatottság. Ezen tulajdonságok alapján ebbe a formációba soroljuk azokat a konglobreccsa betelepüléseket is, amelyeket a mecseki permi folyóvízi, tavi és vulkanoszediment rétegsorban korábban megfigyeltek.

3. A mecseki permi üledékgyűjtő modellje

A perm–alsó-triász, jellemzően folyóvízi eredetű [7] rétegsor (Korpádi, Cserdi, Kővágószőlősi Formációk) lerakódását két esemény szakította meg: a riolitvulkanizmus (Gyűrűfűi Lapillitufa) [8], [9] és a szárazabbá váló klíma hatására kialakuló playa tavi üledékképződés (Bodai Agyagkő) [10]. A medenceperemeken mindeközben a Begykúti Konglobreccsa időszakos vízfolyások, gravitációs törmelékmozgások által szállított kolluviális-proluviális hordalékkúp-üledéke rakódott le, heteropikus kifejlődésben a folyóvízi-tavi üledékgyűjtő medence valamennyi formációjával.

Irodalom

[1] Jámbor Á. 1964: A Mecsek hegység alsópermi képződményei. Jelentés. Mecsekérc Zrt. Adattár, Pécs, 113 p.

[2] Jámbor Á. & Szabó J. 1967: Magyarország földtani térképe, 10 000-es sorozat, Kővágószőlős MÁFI kiadvány, Budapest.

[3] Konrád Gy. 1998: Jelentés a Bodai Aleurolit Formáció 1995-98. évi kutatásáról. Kézirat, Mecsekérc Zrt. Adattár, Pécs, 102 p.

[4] Konrád Gy., Sebe K., Halász A. & Babinszki E. 2010: Sedimentology of a Permian Playa Lake: Boda Claystone Formation, Hungary, Geologos, Poland. Vol. 16, No. 1, 27-41.

[5] Konrád Gy., Sebe K. & Budai T. 2017: Magyarázó a Bodai Agyagkő Formáció perspektivikus elterjedési területének 1 : 25 000 méretarányú földtani térképéhez. Kézirat, RHK adattár, RHK-N-014/16

[6] Horváth J. & Istovics K. szerk. 2018: BAF-1Af fúrás dokumentáló és értékelő jelentése. — Mecsekérc Zrt. Adattár, Pécs, 270 p.

[7] Barabás A. & Barabásné Stuhl Á. 1998: A Mecsek és környéke perm képződményeinek rétegtana. – In: Bérczi I. & Jámbor Á. (szerk.): Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana, MOL Rt. - MÁFI kiadvány, Budapest, 187-210.

[8] Fazekas, V., Majoros, Gy. & Szederkényi, T. 1987: Lower Permian volcanic sequences of Hungary /Part. I./ Acta Geol. Hung. 30 /l-2/, 21-34.

[9] Szemerédi M., Varga. A, Lukács R. & Pál-Molnár E. 2016: A Gyűrűfűi Riolit Formáció kőzettani vizsgálata a felszíni előfordulások alapján (Nyugati-Mecsek) Földtani Közlöny, 146/4, 335–354.

[10] Árkai, P, Balogh, K., Demény, A., Fórizs, I., Nagy, G. & 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.

A Bodai Agyagkő Formáció ásványos ereinek petrográfiai jellemzői

Petrographic characteristics of mineral veins in the Boda Claystone Formation

HRABOVSZKI ERVIN[1,2], TÓTH EMESE[1], M. TÓTH TIVADAR[1], SCHUBERT FÉLIX[1]

[1]*Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék,*
[2]*Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék*
ervin.hrabovszki@geo.u-szeged.hu, tothemese@geo.u-szeged.hu,
mtoth@geo.u-szeged.hu, schubert@geo.u-szeged.hu

Abstract

Four tectonic vein generations with various appearances can be distinguished in the core samples from boreholes (BAF–2, –3, –3A, –4, BAT–4, Delta–3) of the Boda Claystone Formation. Each of the four observed vein generations consists of several mineral phases and has a complex development history of diagenetic and tectonic processes. The unique microstructure of veins rich in wall rock inclusions indicates that their formation took place in a low-cohesion sediment, so this vein generation can be considered the oldest. The original fibrous cement minerals of these veins were replaced by calcite, albite (±K-feldspar), sulphates and sulphides, etc. Another vein generation consists of straight veins. Based on the elongated blocky crystal morphology, the vein-forming calcite and sulphate phases of the straight veins were precipitated from advectively migrating fluids. On the other hand, the fibrous calcite and sulphate crystals of the en-echelon vein generation suggest diffusional material transport during the vein development. In addition, the microstructure of the youngest, breccia-like calcite veins indicates hydraulic fracturing and mineralisation.

Összefoglaló

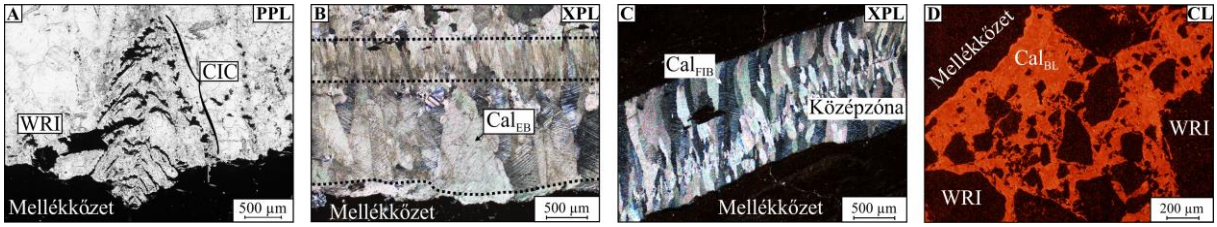
Kis porozitású és permeabilitású kőzetekben számottevő fluidumáramlás törések, ásványos erek mentén történhet. Ezen szerkezeti elemek menti permeabilitás nagyságrendekkel meghaladhatja a kőzetre jellemző értéket [1], amely jelentősen befolyásolja a képződmény izolációs tulajdonságait. Kutatásunk célja a Bodai Agyagkő Formációt ért tektonikai hatások és fluidummigrációs események megismerése, jellemzése. Ebben a tanulmányban a BAF–2, –3, –3A, –4, BAT–4 és Delta–3 fúrásokból származó ásványos erek petrográfiai jellemzőit mutatjuk be, amelyeket polarizációs mikroszkópia, Raman mikrospektroszkópia, valamint katódlumineszcens és elektronmikroszkópia alkalmazásával ismertünk meg. Az így nyert szerkezeti, szöveti és ásványtani adatok — valamint, a további munkáinkban bemutatott fluidumzárvány mikrotermometriai és stabilizotóp-geokémiai adatok együttes értelmezése — diagenetikus és tektonikus eseményekről, a képződményben egykor jelenlévő, eltérő genetikájú fluidumokról nyújtanak információt.

A legtöbb fúrásban megjelenő kőzetzárványos érgeneráció tagjainak fő cementásványa kalcit, kisebb mennyiségben földpát (Ab±Kfs), barit-cölesztin, anhidrit, pirit-kalkopirit, galenit és klorit van jelen, míg alkalmanként (BAF–3A, –4 fúrások) dolomit, illetve kvarc figyelhető meg. Kivételt képez a BAT–4 fúrás, amelyben a fő éralkotó ásvány rostos morfológiájú anhidrit. A kalcit általában mozaikos (puzzle-szerű) vagy szubhedrális, ritkábban rostos megjelenésű. A legtöbb kalcit cement sötét narancssárga katódlumineszcens (CL) színű, azonban a szubhedrális kristályok egy korai, érfalakhoz közeli változata világos narancssárga CL színt mutat. A szubhedrális földpát szemcsék érfalakat és kőzetzárványokat körülvevő szegély formájában jelennek meg klorit lemezek társaságában. A tűs barit-cölesztin, és szubhedrális vagy térkitöltő anhidrit kristályok az erek pórusaiban gyakoriak; míg a szulfidok egyaránt megfigyelhetők a pórusokban, illetve a földpát alkotta peremekben. Ezen érgeneráció esetében kiemelt jelentőségű a mikroszerkezet. Az erekben megjelenő kőzetzárványok alakja általában megnyúlt és hajlott, gyakran sorokba, valamint sávokba rendeződnek. Esetenként megfigyelhetők az erek közepe felé mutató ún. kúp-a-kúpban szerkezetek [2][3] (1. ábra, A).

Az egyenes erek általában több (3–5) zónából állnak, amelyek határát az erek faláról leszakadt kőzetzárványok jelölik ki (1. ábra, B). A fő cementásvány kalcit, alárdendelten barit-cölesztin, anhidrit és kvarc jelenik meg. A szemcsék alakja többségében megnyúlt vagy megnyúlt tömbös, az érfalak mentén olykor azonban finomszemcsés kvarc és kalcit figyelhető meg. A különböző zónákban megjelenő kalcit eltérő, sötét és világos narancssárga árnyalatú CL színt mutat.

A kulisszás elrendeződésű erek keskeny nyírási zónákban találhatók meg. Az erek alakja gyakran hajlott, szigmoidális. A cementáló ásvány rostos megjelenésű kalcit, barit-cölesztin, anhidrit és ritkán — az erek középzónájában — tömbös kvarc. Az anhidrit szemcsék határvonala a többi ásványhoz képest kevésbé határozott, és gyakran tartalmaznak rostos kalcit maradványokat. Az éralkotó ásványrostok alakja gyakran hajlott, az erek felnyílási pályáját jelezve (1. ábra, C).

A breccsa erek nagy mennyiségű szögletes, egymáshoz jól illeszthető kőzetzárványt tartalmaznak (1. ábra, D). A fő cementásvány kalcit, amely általában megnyúlt tömbös, tömbös vagy térkitöltő szemcsékből áll. A kalcit szemcsék egy kőzetzárványokat cementáló halvány rózsaszín és egy pórusok mentén elhelyezkedő fehér alcsoportra bonthatók. A kalcit mellett kis mennyiségben esetenként kvarc, dolomit és barit jelenik meg.



1. ábra: Ásványos érgenerációk a Bodai Agyagkő Formációban [4][5]. A – Kúp-a-kúpban mikroszerkezet (CIC) a kőzetzárványokat (WRI) tartalmazó érgenerációban. B – Több zónából álló egyenes érgeneráció, amelyet megnyúlt tömbös kalcit (Cal_{EB}) szemcsék alkotnak. C – Rostos kalcit kristályok (Cal_{FIB}) a kulisszás érgenerációban. D – Szögletes, egymáshoz jól illeszthető kőzetzárványok, amelyeket tömbös kalcit (Cal_{BL}) cementál a breccsa érgenerációban. PPL – síkban polarizált fény; XPL – keresztezett polarizált fény; CL – katódlumineszcencia.

Összegezve, a Bodai Agyagkő Formáció BAF–2, –3, –3A, –4, BAT–4 és Delta–3 fúrásaiból származó mintákban négy eltérő megjelenésű ásványos érgeneráció különül el. A megfigyelt négy érgeneráció mindegyike több ásványgenerációból áll és komplex, diagenetikus, valamint tektonikus folyamatok alkotta fejlődéstörténettel rendelkezik. A metsződési viszonyok alapján legidősebb, kőzetzárványos érgeneráció mikroszerkezete arra utal, hogy kialakulása kis kohéziójú üledékben ment végbe. Az eredeti rostos cementásványokat többek között kalcit, albit (±káliföldpát), valamint szulfátok és szulfidok helyettesítették. Az egyenes ereket kalcit és szulfátok alkotják, amelyek — a szemcsék megnyúlt tömbös morfológiája alapján — advektíven áramló fluidumból váltak ki. A kulisszás elrendeződésű erek rostos kalcit és szulfát ásványai az érfejlődés során uralkodó, diffúziós anyagtranszport folyamatot jeleznek. Mindemellett, a legfiatalabbnak vélt breccsa jellegű, főként kalcit alkotta erek mikroszerkezete hidraulikus breccsásodásra utal.

Kulcsszavak: Ásványos erek, repedéscementáció, éralkotó ásványok, mikroszerkezet

Irodalom

[1] Landry C. J., Eichhubl P., Prodanovic M., Wilkins S. (2016): Nanoscale grain boundary channels in fracture cement enhance flow in mudrocks. — Journal of Geophisical Research: Solid Earth 121, 3366–3376.

[2] Franks P. C. (1969): Nature, origin, and significance of cone-in-cone structures in the Kiowa Formation (Early Cretaceous), North-Central Kanses. — Journal of Sedimentary Research 39, 1438–1454.

[3] Kolokol'tsev V. G. (2002): The cone-in-cone structure and its origin. — Lithology and Mineral Resources 37, 523–535.

[4] 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.

[5] Hrabovszki E. (2022): Szerkezetfejlődési és fluidummigráció-történeti rekonstrukció a Bodai Agyagkő Formáció ásványos erei alapján. PhD értekezés, SZTE Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, Szeged, 103.

A Bodai Agyagkő Formáció ásványos ereinek geokémiai jellemzői

Geochemical characteristics of mineral veins in the Boda Claystone Formation

HRABOVSZKI ERVIN[1,2], TÓTH EMESE[1], M. TÓTH TIVADAR[1], SCHUBERT FÉLIX[1]

[1]*Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék,*
[2]*Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék*
ervin.hrabovszki@geo.u-szeged.hu, tothemese@geo.u-szeged.hu,
mtoth@geo.u-szeged.hu, schubert@geo.u-szeged.hu

Abstract

Following the petrographic observation of mineral veins from different boreholes (BAF–2, –3, –3A, –4, BAT–4, Delta–3) of the Boda Claystone Formation, the analysis of C and O stable isotope ratios (n=44) of vein forming calcite generations appearing in the BAF–2 borehole was carried out, as well as the microthermometric measurements (n=248) — i.e. homogenisation temperature (T_h) and final ice melting temperature (T_mIce) — of fluid inclusions [1]. In addition, microthermometric measurements of another 149 fluid inclusions were performed on the vein-forming mineral generations of the BAF–3 (calcite), BAF–3A (calcite, dolomite) and BAF–4 (calcite, dolomite, quartz) boreholes. Based on the combined interpretation of T_h values and stable isotope ratios of vein-forming calcite cements from the BAF–2 borehole, the composition of most parent fluids match the composition of basinal brines ($\delta^{18}O_{fluid}$ V-SMOW between –2.80 and +4.67‰). An exception is the calcite generation, which is believed to be the youngest, of the breccia veins, and which — mainly due to its low T_h values — is presumably of meteoric origin. Regarding the T_h values, a great similarity can be discovered between the vein-forming calcite cements of the BAF–2, –3, –3A, –4 boreholes and the vein-forming dolomite of the BAF–3A borehole. On the other hand, the vein-forming calcite generations in boreholes BAF–3A and –4 also contain fluid inclusion assemblages with low (45–95 °C) T_h values, while the vein-forming quartz in the BAF–4 borehole contains fluid inclusion assemblages with high (160–265 °C) T_h values. Compared to borehole BAF–2, there is another significant difference in the T_mIce values of the calcite generation of BAF–3 and dolomite generation of BAF–3A borehole. In conclusion, based on fluid inclusion microthermometry, as well as textural, structural and mineralogical similarities of veins presented in our further work, there is a possibility that the cement minerals of the fracture systems in the BAF–3, –3A, –4, BAT–4 and Delta–3 boreholes originate from the parent fluids identified in the BAF–2 borehole, however, further petrographic and geochemical studies are required to verify this assumption.

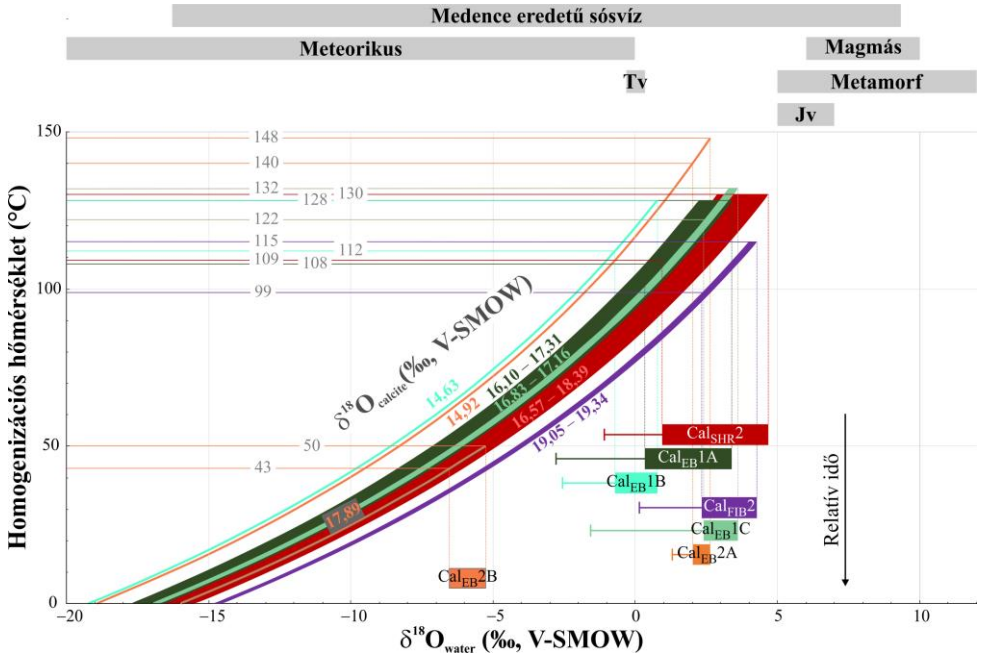
Összefoglaló

A Bodai Agyagkő Formáció BAF–2, –3, –3A, –4, BAT–4 és Delta–3 fúrásaiból származó ásványos erek, petrográfiai jellemzőik alapján, négy generációba sorolhatók [1][2][3]. A négy érgenerációban 26 cementfázis — többek között karbonátok, földpátok, szulfátok és szulfidok — azonosítható, amely közül 11 eltérő szövetű kalcit. Az azonos ásványgenerációkból származó homogenizációs hőmérséklet (T_h) és stabilizotóp-arány adatok alapján, elfogadva a T_h értékeket, mint bezáródási hőmérsékleteket, az egyensúlyi izotóp frakcionációs faktort [4] alkalmazva kiszámítható az egyes cementfázisokkal egyensúlyban lévő paleofluidumok $\delta^{18}O$ értéke, amely az ásványgenerációk szülőfluidumainak eredetére utal. Ebből adódóan meghatároztuk a BAF–2 fúrás 7 eltérő kalcit cementjében lévő fluidumzárványok homogenizációs (nT_h=166) és végső jégolvadási hőmérsékleteit (nT_mIce=82), amelyeket C (n=22) és O (n=22) stabilizotóp-arány adatokkal együttesen értékeltünk. Mindezt a BAF–3, –3A és –4 fúrások éralkotó kalcit, dolomit és kvarc kristályain végzett 88 db T_h és 61 db T_mIce méréssel egészítettük ki.

A fent említett fúrások minden olyan éralkotó kalcit fázisában történt mikrotermometriai vizsgálat, amely mérhető, elsődleges vagy álmásodlagos genetikájú fluidumzárvány-együtteseket tartalmaz. A BAF–2 fúrásra jellemző T_h értékek 99 és 148 °C között változnak (min. T_h=80 °C), míg a T_mIce értékekből számított sótartalom általában 3,6 és 13,9% (wNaCl$_{eq}$) között mozog. Emellett jól elkülönül egy T_h=43–50 °C értékekkel jellemezhető, kis sótartalmú (0,0–0,4%) zárványokat tartalmazó kalcit fázis a breccsás kifejlődésű erekben. A BAF–3, –3A, –4 fúrások éralkotó kalcit, és a BAF–3A fúrás dolomit szemcséiben megjelenő elsődleges

fluidumzárvány-együttesek T_h értékei 100–160 °C közé esnek, jó egyezést mutatva a BAF–2 fúrásban megfigyeltekkel. A BAF–3A és BAF–4 fúrások éralkotó kalcit cementjében lévő zárványok jellemző T_h értékei mellett 45–95 °C közötti adatok is megjelennek. Külön figyelmet érdemel a BAF–4 fúrás ásványos ereiben megjelenő kvarc, amely fluidumzárvány-együtteseinek jellemző T_h értéke 160–265 °C között mozog (max. T_h=305 °C). Sótartalom tekintetében gyakoriak a BAF–2 fúrásra jellemző értékek, kivételként a BAF–3 fúrás éralkotó kalcit (általában <0,7%), valamint a BAF–3A fúrás dolomit (16,5–26,8%) cementje említhető.

A BAF–2 fúrásban megjelenő éralkotó kalcit fázisok T_h értékeinek, illetve az ásványokra jellemző $\delta^{18}O$ (V-SMOW) adatoknak az együttes értelmezése alapján a BAF–2 fúrás legtöbb éralkotó kalcit fázisának szülőfluiduma medence eredetű sósvíz (*basinal brine*) összetétellel mutat egyezést (1. ábra; –2,80 és +4,67‰ közötti $\delta^{18}O_{fluidum}$ V-SMOW). Ezzel ellentétben, breccsa érgeneráció legfiatalabbnak vélt kalcit cementjének szülőfluiduma feltehetően alacsony hőmérsékletű (<50°C) és sótartalmú (<0,5%), meteorikus eredetű fluidum volt.



1. ábra. A BAF–2 fúrás éralkotó kalcit generációinak homogenizációs hőmérséklet-δ^{18}Owater (‰, V-SMOW) diagramja [1][3]. A diagram fölötti szürke, vízszintes $\delta^{18}O$ tartományok eltérő eredetű fluidumok összetételét ábrázolják. Jv – juvenilis víz; Tv – tengervíz.

Összegezve, szöveti, mikroszerkezeti, ásványtani, továbbá fluidumzárvány mikrotermometriai jellemzők alapján feltételezhető, hogy a BAF–2 fúrásban azonosított szülőfluidumokból váltak ki a BAF–3, –3A, –4, BAT–4 és Delta–3 fúrásokban megjelenő törésrendszerek cementásványai. Emellett azonban a BAF–3 és –3A fúrások éralkotó kalcit és dolomit szemcséiben megjelenő fluidumzárványok kis, vagy éppen kiugróan nagy sótartalma, valamint a BAF–4 fúrásban megjelenő kvarc fluidumzárványainak magas T_h értékei olyan kérdéseket vetnek fel, amelyek tisztázásához további petrográfiai és geokémiai vizsgálatok szükségesek.

Kulcsszavak: Ásványos erek, fluidumzárvány mikrotermometria, stabilizoróp-arány, paleofluidum migráció

Irodalom

[1] Hrabovszki E. (2022): Szerkezetfejlődési és fluidummigráció-történeti rekonstrukció a Bodai Agyagkő Formáció ásványos erei alapján. PhD értekezés, SZTE Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, Szeged, 103.

[2] 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.

[3] Hrabovszki E., Tóth E., M. Tóth T., Garaguly I., Futó I., Máthé Z., Schubert F. (2022): Geochemical and microstructural properties of veins in a potential high-level radioactive waste disposal site. — Journal of Structural Geology 154, 104490.

[4] O'Neil J. R., Clayton R. N., Mayeda T. K. (1969): Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. — The Journal of Chemical Physics 51, 5547–5558.

A Bodai Agyagkő Formáció töréshálózatának geometriai és hidrogeológiai tulajdonságai a BAF–2, BAF–3, BAF–3A és BAF–4 fúrások alapján

Geometrical and hydrogeological properties of the fracture network of the Boda Claystone Formation based on the BAF–2, BAF–3, BAF–3A and BAF–4 wells

TÓTH EMESE[1], HRABOVSZKI ERVIN[1,2] SCHUBERT FÉLIX[1], M. TÓTH TIVADAR[1]

[1]Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék
[2]Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék
tothemese@geo.u-szeged.hu, ervin.hrabovszki@geo.u-szeged.hu
schubert@geo.u-szeged.hu, mtoth@geo.u-szeged.hu

Abstract

Fractures can play an important role in fluid flow in impermeable rocks such as the Boda Claystone Formation. Therefore, the study of the fracture network geometry and the hydrogeological evaluation of the fractures in the Boda Claystone as a potential host rock for nuclear waste repositories in Hungary is important. The geometry of the fracture network was modelled using the discrete fracture network (DFN) modelling approach with Infress software in wells BAF–2, BAF–3, BAF–3A and BAF–4 [1, 2]. BAF–3A is the continuation of well BAF–3 and was modelled as a single unit. The DFN modelling approach allowed the geometry of the communicating fracture clusters to be modelled based on the geometric properties of the individual fractures, such as orientation, fracture length, aperture, and fracture density. The basis of the hydrogeological evaluation of the fracture network is the determination of the fracture aperture with aperture calibration based on hydraulic well tests. Reservoir rocks are often described by the flow zone index (FZI), which depends on the covariation of porosity and permeability and determines hydraulic units. In these hydraulic units, the fluid flow controlling properties are internally uniform.

The primary basis for a spatial correlation between wells is fracture density. The fracture density pattern along BAF–3 and BAF–4 is very similar. The fracture density increases continuously with depth without a significant jump in both cases. On the other hand, the fracture density of the BAF–2 well differs significantly from the other two studied wells. Based on the fracture density log of the BAF–2 well, the rock body can be divided into two blocks with a boundary at 400 m. The upper part of the borehole is highly fractured, and after a sharp boundary, the fracture density decreases significantly in the lower part of the borehole. This boundary is not evident in the fracture density logs of boreholes BAF–3 and BAF–4.

Despite the differences in fracture density between wells, the geometry of the fracture networks in all three wells shows a similar pattern regarding their connectivity. The main horizons where the connectivity of the fracture system changes are 100, 400, and 700 m in borehole BAF–2. In this well, weathering could alter the uppermost 100 m of the formation. At 400 m, a large-scale structural boundary is located based on the change in fracture density pattern and other geophysical properties. At 700 m, the main parameter affecting fracture formation is the coarsening of the average grain size, but the influence of a large-scale structural boundary cannot be ruled out either. These boundaries at 100, 400 and 700 m also occur at about the same depth in well BAF–4. In borehole BAF–3, the upper part of the rock body can be divided into communicating fracture clusters at 100 and 300 m. In contrast, the lower part (below 400 m) is interconnected in all model runs.

The hydrogeological characteristics of the fracture networks were described using the FZI. The main part of the rock body shows an average trend in all wells with elevated FZI in a few narrow zones. These zones coincide with the boundaries of the communicating fracture networks. In boreholes BAF–2 and BAF–4, the elevated FZI values are around 100, 400, and 700 m, respectively. In borehole BAF–3, only the 400 m horizon can be detected based on the FZI log.

Despite the different fracture densities in the wells, a strong correlation could be established between the fracture networks of the studied wells based on the fracture network geometry, hydrogeologic properties, and hydraulic units of the wells. The characteristics of the fracture network could be extended, and large-scale structural elements of the formation can be traced in each well studied.

Összefoglaló

A törések fontos szerepet játszanak a fluidumáramlásban az egyébként impermeábilis kőzetek esetében. Ezért kiemelten fontos a repedéshálózat geometriájának tanulmányozása és a repedések hidrogeológiai értékelése a Bodai Agyagkő Formációban, a magyarországi nagy aktivitású nukleáris hulladéktároló lehetséges befogadó kőzetében. A töréshálózat geometriáját diszkrét törésekből felépülő (DFN) modellezési megközelítéssel az Infress szoftver segítségével modelleztük a BAF–2, BAF–3, BAF–3A és BAF–4 fúrásokban [1, 2]. A BAF–3A a BAF–3 fúráspárja, így ezt a két fúrást egy egységként modelleztük. A DFN modellezés alapját az egyes törések geometriai tulajdonságai képezik, amelyek többek között a törések orientációja, hoszúsága, térbeli sűrűsége és nyitottsága (apertúrája). Ezek alapján modellezhető a töréshálózatban elhelyezkedő geometriailag kommunikáló töréscsoportok helyzete, valamint a rendszer porozitása és permeabilitása. A rezervoárokat gyakran az áramlási zóna indexszel (FZI) jellemzik, amely a porozitás és permeabilitás együtt változását mutatja, és hidraulikus egységeket határoz meg. Ezekben a hidraulikus egységekben a fluidumáramlást befolyásoló tulajdonságok egységesnek tekinthetők.

Az egyes fúrásokban megtalálható töréshálózatok töréssűrűségének vizsgálatával a fúrások töréshálózata összehasonlítható. A BAF–3 és a BAF–4 töréssűrűsége nagyon hasonló, mindkét esetben a mélységgel folyamatosan növekszik, nagy ugrás nélkül. A BAF–2 fúrás töréssűrűsége jelentősen eltér a másik két vizsgált fúrástól. A BAF–2 fúrás töréssűrűsége alapján a kőzettest két tömbre osztható, amelyek határa 400 m–es mélységben található. A fúrás felső része erősen repedezett, majd éles határvonal után a fúrás alsó részén jelentősen lecsökken a töréssűrűség. Ez az éles váltás a BAF–3 és BAF–4 fúrások töréssűrűségében nem látható.

A fúrások közötti töredezettségi kép különbségei ellenére a töréshálózatok geometriája – a törések konnektivitását illetően – mindhárom fúrásban hasonló mintát mutat. A főbb horizontok, ahol a repedésrendszer konnektivitása megváltozik, 100, 400 és 700 m-en vannak a BAF–2 fúrásban. Ebben a fúrásban a 100 m-en elhelyezkedő határfelület kialakulásában elsősorban a mállás játszhatott fontos szerepet. A töréssűrűség-mintázat és egyéb geofizikai tulajdonságok változása alapján egy nagyléptékű szerkezeti határ feltételezhető 400 m-es mélységben. A fúrás alsó szakaszában, 700 m-en a törésképződést elsősorban a megváltozott litológia befolyásolta, az átlagos szemcseméret a mélységgel egyre durvul, azonban nem zárható ki egy nagyléptékű szerkezeti határ hatása sem. Ezek a 100, 400 és 700 m-es határok a BAF–4 fúrásban is megtalálhatók, körülbeül azonos mélységekben. A BAF–3 fúrásban a kőzettest felső része 100 és 300 m-es mélységben egymással nem kommunikáló töréscsoportokra osztható, míg az alsó rész (400 m alatt) minden modell futásban egységes.

A repedéshálózatok hidrogeológia tulajdonságait az FZI segítségével írtuk le. A kőzettest fő része minden fúrásban egy átlagosnak tekinthető trendet követ, amelytől néhány keskeny zóna tér el, megemelkedett FZI értékekkel. Ezek a zónák egybeesnek a kommunikáló töréscsoportok határaival. A BAF–2 és BAF–4 fúrásokban a megemelt FZI értékekkel rendelkező zónák 100, 400 és 700 m körül helyezkednek el. A BAF–3 fúrásban az FZI értékek alapján csak a 400 m-es horizont volt kimutatható, a fúrás többi szakasza a BAF-ra jellemző hidrogeológiai tulajdonságokkal rendelkezik.

A fúrások eltérő repedéssűrűsége ellenére a repedéshálózatok között a repedéshálózat geometriája, hidrogeológiai tulajdonságai és a kutak hidraulikai egységei alapján szoros összefüggés állapítható meg. A töréshálózat jellemzői kiterjeszhetők a fúrások között, minden vizsgált kútban nyomon követhetők a képződmény nagyléptékű szerkezeti elemei.

Kulcsszavak: töréssűrűség, törésrendszer, töréshálózat geometria, DFN modellezés, flow zone indicator

Irodalom

[1] 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.

[2] 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.

A Bodai Agyagkő Formáció töréssűrűségének becslése lyukgeofizikai adatok alapján

Estimation of the fracture density based on geophysical log data in the Boda Claystone Formation

TÓTH EMESE[1], HRABOVSZKI ERVIN[1,2], SCHUBERT FÉLIX[1], M. TÓTH TIVADAR[1]

[1]Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék
[2]Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék
tothemese@geo.u-szeged.hu, ervin.hrabovszki@geo.u-szeged.hu
schubert@geo.u-szeged.hu, mtoth@geo.u-szeged.hu

Abstract

The host rock of potential high-level nuclear waste repository in Hungary, the Boda Claystone Formation contains fractures and veins in high number. One of the most crucial step of the characterization of a fractured rock body is the accurate detection of fractures. Acoustic borehole televiewer measurements provide precise method to detect the fractures in a borehole, but older wells usually lack these data. However, conventional geophysical log data are often available even in older wells. In this study, regression analysis was used to find the relationship between the fracture density and the geophysical log data in two boreholes, which penetrated the Boda Claystone Formation. In the upper part of the BAF–4 well, which was the learning section of the analysis, a strong linear correlation can be established, with a fit of R^2 = 0.803. The main factors which influence the fracture density is the resistivity (e10, e40, ll3), the neutron porosity, the density, and the natural gamma ray values. Regression function computed in the upper part of the BAF–4 well could predict the fracture density with high accuracy in the lower part of the BAF–4 (R^2 = 0.624) and in the BAF–2 (R^2 = 0.689) boreholes as well. However, in some sections, where the lithology differs from the typical lithology of the formation, goodness of the prediction decreases, due to the anomalous change of the well log data. For example, in sandy intervals, the algorithm underestimates the number of fractures, while the presence of reductive layers causes an overestimation. The established linear regression function of the Boda Claystone Formation may be utilized to estimate the fracture density in older wells that intersected the formation without BHTV. By involving more boreholes, this approach could give greater details about the spatial extendibility of the interconnected fracture clusters and significant structural components, like fault zones.

Összefoglaló

A magyarországi nagy aktivitású radioaktív hulladéktároló befogadó képződménye a Bodai Agyagkő Formáció, amelyben nagy számban találhatók törések és ásványos erek. A töredezett kőzettestek jellemzésének egyik legfontosabb lépése a törések pontos észlelése. Fúrólyukakban az egyik legpontosabb módszer a törések helyzetének meghatározására az akusztikus lyukfaltelevízió (BHTV). BHTV adatok gyakran nem állnak rendelkezésre régi fúrások esetében, azonban hagyományos lyukgeofizikai mérések igen. Munkánkban két fúrás adatai alapján regressziós analízis segítségével határoztuk meg a töréssűrűség és a lyukgeofizikai adatok közötti kapcsolatot a Bodai Agyagkőben. A BAF–4 fúrás felső szakaszában, amely az analízis tanító szakaszaként szolgált, erős lineáris összefüggés állítható fel, igen jóilleszkedéssel, R^2=0,803. A töréssűrűséget elsősorban a képződmény ellenállás (e10, e40, ll3), neutron porozitás, sűrűség és természetes gamma értékei befolyásolták. A regressziós egyenletet felhasználva a töréssűrűség nagy pontossággal megbecsülhető a BAF–4 fúrás alsó szakaszában (R^2=0,624) valamint a BAF–2 fúrásban (R^2=0,689) is. Egyes szakaszokban ahol a képződmény litológiája eltér a tipikustól, a becslés pontossága csökkenhet. A képződmény alsó szakaszában, ahol a homokkő betelepülések száma megnő, a regressziós egyenlet alulbecsüli a töréssűrűséget a mért adatokhoz képest, míg a reduktív rétegek esetében túlbecsül. A Bodai Agyagkő regressziós egyenletével a jövőben megbecsülhető olyan fúrások töréssűrűsége, amelyekben nem készültek BHTV mérések Több fúrás bevonásával vizsgálható a törésrendszer tulajdonságainak kiterjeszthetősége, a kommunikáló töréscsoportok helyzete, valamint a nagyléptékű szerkezetek elhelyezkedése és kiterjedése.

Kulcsszavak: töréssűrűség, regresszió analízis, lyukgeofizika, BHTV