

EDZ vizsgálati szelvények adatainak komplex hidromechanikai újraértékelése a Bábaapáti NRHT-ban

Complex hydromechanical re-evaluation of data of EDZ test profiles in the Bábaapáti NRWR

Kovács Boglárka

Kőmérő Kft., kovacsboqlarka@komero.hu

Kovács László

Kőmérő Kft., kovacslaszlo@komero.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A Paksi Atomerőmű kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékainak végleges elhelyezésére szolgáló Bábaapáti NRHT-ban környezetbiztonsági szempontból elengedhetetlen az üregképzések által roncsolt, illetve megzavart zóna (EDZ/EdZ) zóna minél pontosabb ismerete. A cikkben ismertetett vizsgálat a korábban csak hidrogeológiai szemléletben feldolgozott transzmisszivitási adatok kőzetmechanikai és statisztikai szempontú újraértelmezésére irányult. Az először elvégzett egyváltozós elemzések, amelyek külön-külön vizsgálták a mérés időpontjának, a tesztszakasz vágatfalán elfoglalt helyzetének, illetve a vágattól való távolságnak a transzmisszivitási értékek eloszlására gyakorolt hatását, nem adtak erre kielégítő magyarázatot. A többváltozós elemzések alkalmasak voltak a változók hatásának közös elemzésére: ezek informatívabb módszernek bizonyultak, segítségével pontosabban magyarázható a transzmisszivitás eloszlása. A hidrogeológiai mérések extenzométeres adatokkal való összevetése rávilágított arra, hogy a változások jelentős része nem zajlik le egy év alatt, így szükséges lehet a rendszeres, egy éven túli ismételmérések kivitelezése is.

Kulcsszavak: NRHT, EdZ, transzmisszivitás, statisztikai elemzés, kőzetmechanika

ABSTRACT: In the NRWR at Bábaapáti – designed as the final disposal of LLW and ILW originated from Paks NPP – the proper knowledge of Excavation Damaged- and Disturbed Zones is crucial for ensuring the environmental safety. The aim of the research was to analyse and re-evaluate the transmissivity data from rock mechanical and statistical aspects. The impact of three factors on the distribution of transmissivity data were studied by different methods. These factors were the date of the measurement, the position of the test interval on the tunnel wall and the distance of the test interval from the tunnel. The single-factor analysis didn't give satisfying explanation for the differences among the measured values. The multi-factor analysis could handle the effects of the factors together: they gave more information about the distribution of transmissivity. Common evaluation of the hydrogeological test values and extensometer measurement results enlightened the fact that a remarkable proportion of the changes in the rock mass does not take place in one year. Therefore the regular, long-term monitoring of the transmissivity changes seems to be necessary.

Keywords: NRWR, EdZ, transmissivity, statistical analysis, rock mechanics

1 BEVEZETÉS

1.1 A Bábaapáti Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló

A Paksi atomerőműben keletkező kis- és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezésére a Bábaapáti térségében, a granitoid befogadó képződményben (Mórágy Gránit Formáció) kialakított Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló (NRHT) szolgál. Az NRHT építésével és üzemeltetésével kapcsolatos feladatok szervezéséért és végrehajtásáért a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Nonprofit Kft. a felelős szervezet. Az NRHT építését mintegy 8 éves kutatás, illetve előkészítő munka eredményeként 2005 elején kezdték meg. A felszíni létesítményeket a 0 mBf szinten kialakított tárolókamrákkal két párhuzamos

zamos, mintegy 1750 m hosszú lejtősakna, illetve az azok talpánál kialakított közel szintes hurokvágat-rendszerek kötik össze. Eddig két tárolókamrát építettek már meg; az elsőben (I-K1 jelű kamra) – az összes szükséges engedély beszerzését követően – 2012. december 5-én megkezdődhetett a konténeresített radioaktív hulladékok betárolása.

A feltáró lejtősaknák, a szintes vágatok és a tárolókamrák bányászati kialakítását fűró-robbantó technológiával végezték el. Ennek kapcsán – tekintettel a létesítmény céljára – kiemelt figyelmet fordítottak a jövesztés által roncsolt, illetve megzavart zóna ellenőrzésére, illetve minimalizálására. A jövesztés által roncsolt zónán belül ugyanis több nagyságrenddel megnőhet a transzmisszivitás, és ezáltal a majdan lezárásra kerülő tárolóban a vágatok tengelyével párhuzamos, nem kívánt szennyeződésterjedési útvonalak alakulhatnak ki. Ezek megelőzése, a feltáró lejtősaknák hatékony lezárása csak akkor valósítható meg, ha már a kialakítás során is figyelmet fordítunk az EDZ csökkentésére, illetve megismerjük annak mélységét, kiterjedését és időbeli fejlődését. Ezért már a lejtősaknák kialakításának első fogásaitól kőzetköpeny-kímélő robbantólyuk-kiosztást, illetve robbantási módszert alkalmaztak, majd speciális hidrogeológiai és geofizikai mérések végrehajtásával (a cikk tárgyát képező vizsgálati szelvényeken túlmenően pl. szeizmoakusztikus mérőrendszerek telepítésével és üzemeltetésével) minősítették az EDZ mélységét és eloszlását. A vizsgálati eredmények iteratív módon, több fázisban is visszahatottak a robbantási technológiára, ami mostanra a befogadó képződmény adottságai mellett optimálisnak tekinthető. Nyilvánvalóvá vált azonban az is, hogy a fejlődéstörténete során tektonikailag erősen igénybe vett Mórággyi Gránit esetében az EDZ minimalizálására irányuló törekvések csak egy bizonyos mértékig lehetnek sikeresek.

1.2 Az üregképzés által zavart, illetve roncsolt zóna

Egy felszín alatti térben a létesítési munkálatok megkezdéséig a kőzettest egyensúlyban van – ezt az állapotot primer állapotnak nevezzük. A kőzettestben végzett munkálatok megváltoztatják a kőzetben kialakult feszültségmezőt, a primer egyensúly megszűnik. A kőzetköpenybe tervezett objektum létesítésekor a legfőbb cél az új, számunkra megfelelő egyensúlyi, szekunder állapot létrehozása. Az objektum és a környezet hosszú távú biztonsága érdekében gondoskodni kell arról is, hogy a létesítmény felhagyása után kialakuló tercier állapotban is a legbiztonságosabb, a létesítmény számára optimális egyensúly, tercier állapot jöjjön létre.

Az objektum létesítése során elengedhetetlen a megváltozott kőzetviszonyokkal jellemezhető térrész tulajdonságainak – például a zóna kiterjedésének, konnektivitásának, idő- és térbeli változásának – minél pontosabb ismerete. Ezen zónák kutatása és minél pontosabb leírása nemzetközi szinten is egyre hangsúlyosabbá válik.

A 2003-ban megrendezésre kerülő CLUSTER (*Club of Underground Storage, Testing and Research*) konferencián az addigi eredmények alapján javaslatot tettek a módosított zóna felosztására és egységes definíciójára. A definíció megkülönbözteti az „üregképzés által zavart zónát” (EdZ) és az „üregképzés által károsított zónát” (EDZ). Az EdZ a kőzettest azon zónája, melyben a hidromechanikai és geokémiai viszonyok megváltoznak ugyan, azonban ez az áramlási és transzport viszonyokat nem befolyásolja számottevően. Az EDZ az a zóna, amelyben a megváltozott hidromechanikai és geokémiai tulajdonságok az áramlási és transzport viszonyokban jelentős változásokat okoznak. Ilyen változás lehet például a permeabilitás egy vagy több nagyságrenddel való megnövekedése (Korpai et al. 2010). Az EDZ az EdZ részeként értékelhető, hiszen az „üregképzés által zavart zóna” értelemszerűen magában foglalja az „üregképzés által károsított zónát” is. Meg kell jegyezni, hogy a fenti definíció szerint az EDZ határait igen nehezen lehet pontosan, szabatosan meghatározni, hiszen számos faktor (pl. elhelyezési koncepció, létesítmények geometriája, a befogadó kőzet adottságai, stb.) függvénye lehet az, hogy egy-egy adott esetben mit tekinthetünk „jelentős változás”-nak.

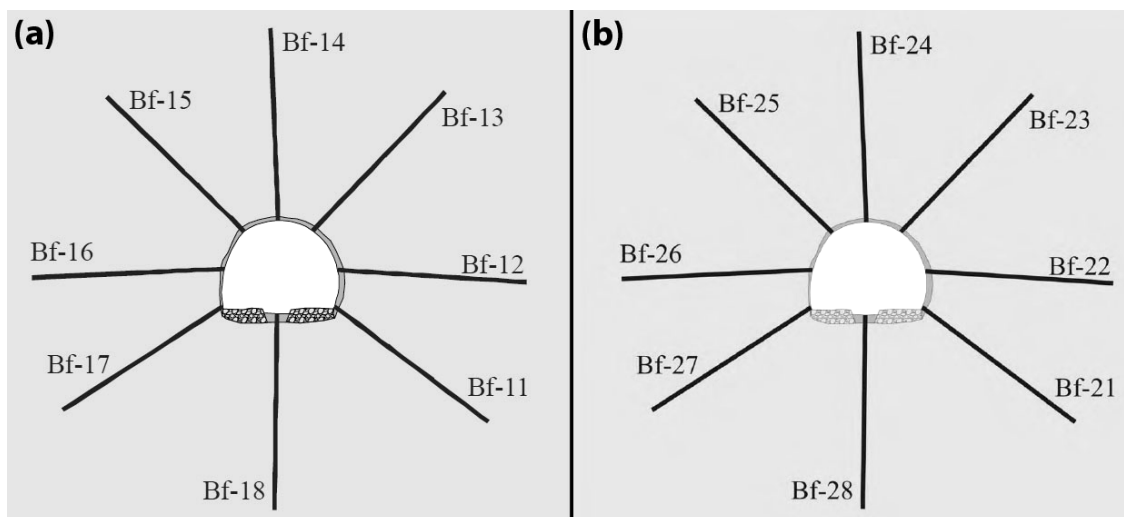
Az előző, inkább hidrogeológiai szempontú felosztással szemben a mechanikai szempontú felosztás szerint három fő zónát különítenek el. Az EIZ (*Excavation Influenced Zone*) – hasonlóan a hidrogeológiai szempontú EdZ-hez – olyan zóna, melyben csak elasztikus deformációt előidéző feszültségváltozások mennek végbe. Nem jelenik meg új tönkremenetel a kőzetben, de a pórusterfogatot és a meglévő repedéseket az alakváltozás módosíthatja. Az EDZ mechanikai megfogalmazás szerint egy olyan zóna, amelyben a szemcseméret skáláján új tönkremeneteli jelenségek jelenhetnek meg, repedések és kisebb határfelületek nyílhatnak. Elméleti mechanikai szempontok szerint a zóna két részre osztható: külső EDZ (EDZo) és belső EDZ (EDZi). A HDZ-ben (*Highly Damaged Zone*) – hasonlóan a hidrogeológiai szempontú EDZ-hez – új makroszkopikus repedések alakulnak ki, melyek összekapcsolódása révén a vízvezető képesség számottevően növekedhet (Kovács et al. 2012). Ez a nomenklatúra a hidrogeológiai értékelések során kevésbé elterjedt az előzőnél, így a továbbiakban a kettős felosztású rendszert használjuk jelen cikk során.

Hosszú távú kutatások igazolták, hogy az EdZ, illetve EDZ nem egy statikus, időben állandó rendszer, bennük idővel külső technogén behatás nélkül is bekövetkeznek változások. Ezek lehetnek negatívak (új tönkremenetelek, repedések keletkeznek, melyek növelik az áteresztőképességet), vagy pozitívak (az új tönkremenetelek hatását a közet idővel képes lehet akár megszüntetni is). Utóbbi jelenséget *self-healing*-nek, vagy *self-sealing*-nek nevezik a nemzetközi szakirodalomban (Kovács 2001).

1.3 Az EDZ vizsgálata Bataapátiban

Az NRHT létesítése során természetesen szintén kiemelt szerepet kapott az EdZ, illetve EDZ kutatása, megismerése. A már említett korai definíció következtében ennek egyik fő megközelítése a hidrogeológiai szempontú vizsgálat. Ehhez többféle eljárást is alkalmaztak (melyek részletezése nem képezi jelen cikk tárgyát), beleértve a már kialakított vágatszakaszokon a vágatfalra merőleges szelvényben lefűrt sugaras EDZ-fúrásokban a vízvezető képesség térbeli és időbeli alakulásának vizsgálatát is.

A módosított tulajdonságú zóna megismerésére két sugaras EDZ-szelvény létesült, melyek szelvényenként nyolc darab, sugárirányú, 10,0 m hosszúságú fűrásból állnak (1. ábra). Először a Bf-1 szelvény (1.a ábra) került kialakításra, a Nyugati-lejtőszakna 417,5 fm-ében. A szelvény fúrásaiban (azok kialakítása és a pakkerek mérete miatt) a méréseket csak a vágatfaltól 0,8 méterre, vagyis körülbelül 0,6-0,7 méterrel a löttbeton réteg és a kőzetköpeny találkozásánál tudták megkezdni. Ebben a szelvényben fűrólyukanként 12 tesztet végeztek, 0,5, illetve 1,0 m-es pakkerekkel (Korpai et al. 2010; Molnár et al. 2006a). A Bf-2 jelű EDZ-szelvény (1.b ábra) kialakítása – a Bf-1 tapasztalatainak felhasználásával – a Keleti-lejtőszakna 717,5 fm-ében történt. Ezekben a fűrólyukakban a vizsgálatokat már a löttbeton alatt átlagosan 0,45 m-rel megkezdheték, így ebben a szelvényben fűrásanként 13 tesztet végeztek el (Molnár et al. 2006c; Korpai et al. 2010). Az áteresztőképességi viszonyok időbeli változásának kimutatására három mérési sorozatot végeztek: az alapmérést követően 2 (*első ismétlődő*), illetve 12 (*második ismétlődő*) hónappal később is történtek mérések.



1. ábra. A (a) Bf-1 és (b) Bf-2 szelvények fúrásainak elhelyezkedése (*The geometry of the (a) Bf-1 and (b) Bf-2 profiles*)

Az EDZ kiterjedésének és mechanikai szerkezetének meghatározását célzó kísérletek már a Bf-1, illetve Bf-2 jelű sugaras EDZ-szelvények kapcsán megkezdődtek. Ennek érdekében a sugaras EDZ-fúrásokban, illetve azok környezetében, a vágatfalon egy kombinált geofizikai vizsgálati program került végrehajtásra. A fúrásokban lyukradar, akusztikus átvilágítás és sebességtomográfias mérések történtek, míg a vágatfalon radar, akusztikus és geoelektromos méréseket végeztek el (Prónay 2008). A második ismétlőmérést követően a szelvényeket felszámolták, további ismétlőmérésekre már nem került sor.

1.4 Problémafelvetés

A Bf-1 és Bf-2 szelvények EDZ-adatainak részletes kiértékelését elsősorban hidrogeológiai szempontok alapján végezték el. Az így kapott eredmények alapján a továbbiakban már nem hoztak létre hasonló mérési szelvényeket, hanem ún. rövid (1,2-2,0 m) fűrólyukas teszt-szakaszokon vizsgálták az EDZ alakulását. Tekintettel a Bf-1 és Bf-2 szelvények ismétlőmérési adatainak ellentmondásos jellegére, e rövid fűrólyukas szelvények kapcsán már egyáltalán nem is került sor ismétlőmérésekre.

Az EDZ, illetve az EdZ mechanikai jellemzésének másik alapvető módja a vágat körüli kőzetöbven fellépő deformációk, elmozdulások nagy pontosságú műszeres mérése. Bataapátiban erre a célra az

extenzométeres és konvergenciamérő szelvények, valamint a háromszöges elrendezésű deformációmérő műszerek szolgálnak. E geotechnikai monitoring rendszer kiépítése azonban csak a sugaras EDZ-szelvények telepítését követően kezdődött meg. A Bf-1 és Bf-2 szelvények kapcsán ilyen vizsgálatok nem történtek, sőt Bátaapátiban azóta sem létesült olyan mérőhely, vagy mérési szelvény, ahol az in situ mechanikai vizsgálatok mellett EDZ-specifikus hidrogeológiai és geofizikai mérések is párhuzamosan történtek volna. Tekintettel a Mórógyi Gránit Formáció inhomogén jellegére, az EDZ-vizsgálatokból származó hidrogeológiai és a kőzetmechanikai adathalmaz így csak igen nehezen vethető össze.

A geotechnikai monitoring rendszer több éves adatsorainak elemzése azonban arra figyelmeztetett, hogy az EDZ mechanikai értelemben egyáltalán nem tekinthető statikus rendszernek (Kovács et al. 2013). Mivel más, szintén az NRHT térségeiben elvégzett vizsgálatok szerint közvetlen kapcsolat mutatható ki a kőzetköpenyben lejátszódó mechanikai változások és a hidraulikai állapot között (Kovács et al. 2009), ezért okkal volt feltételezhető, hogy az EDZ hidrogeológiai jellemzésekor sem elégedhetünk meg a pillanatnyi állapot ismeretével. Mivel a fentiek szerint a Bf-1 és Bf-2 szelvényekben került csak sor ismétlőmérésekre, ezért felmerült az igény a sugaras EDZ-fúrólukak eredményeinek komplexebb, a kőzetmechanikai adatok figyelembe vételével történő újraértékelésére. Jelen cikk célja az EDZ valós komplexitásának megfelelő szemlélettel, a rendelkezésre álló geotechnikai adatokkal együtt, illetve azok tapasztalatai alapján a Bátaapáti NRHT-ban létesített Bf-1 és Bf-2 szelvények hidrogeológiai adatsorainak részletes statisztikai vizsgálata és újraértelmezése.

2 A VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS A KAPOTT EREDMÉNYEK

2.1 Egyváltozós elemzések

2.1.1 Páros tesztek

Az adatok elemzésének első szakaszában, annak eldöntésére, hogy megváltozott-e számottevően egy év alatt az egyes fúrások transzmisszivitása, a páros tesztek mutatkoztak legmegfelelőbbnek. A páros próba akkor alkalmazható, ha a minta összetartozó párokból áll, melyeken egy „kezelés” hatását vizsgáljuk. Ha szignifikáns különbséget találunk a két, összetartozó adatsor között, az azt jelenti, hogy a kezelés hatására megváltozott a vizsgált jelleg. A kezelés jelen esetben – a vágathajtással megzavart viszonyokkal – a rendszer magára hagyása, illetve az egy év alatt végbemenő közetfeszültség viszonyok átrendeződése volt.

A páros vizsgálatok PAST programban, a normáloszlás tesztelését követően, (előbbi kimenetelétől függően) páros t-teszt, vagy Wilcoxon próba segítségével készültek. Az elvégzett páros tesztek eredményeit az 1. táblázat mutatja be. Az „N” sor az egyes minták (fúrások) mintaszámát mutatja. (Megjegyzés: ugyan a Bevezetésben leírtak alapján fúrólukanként 12-13 tesztszakaszon történt transzmisszivitás mérés, azonban ezek intervallumköze eltérő volt, így a statisztikai elemzésekhez szükséges volt előzetes összevonás, egyenközűsítés, ami a mintaszám csökkenését eredményezte.) A „t-test p(same)” a normál eloszlás megléte esetén végezhető, több statisztikai erővel bíró páros t-teszt, míg a „Wilcox. p(same)” a nem parametrikus Wilcoxon-teszt eredményeképpen kapott döntéshozási érték.

1. táblázat. A Bf-1 és Bf-2 szelvények páros tesztjeinek eredményei (*The results of the paired tests of Bf-1 and Bf-2 profiles*)

	Bf-11	Bf-12	Bf-13	Bf-14	Bf-15	Bf-16	Bf-17
N:	8	8	8	8	8	8	8
t-test p(same):	0,453	0,039*	0,721	0,307	0,271	0,139	0,767
Wilcox. p(same):	-	-	-	-	-	-	-

	Bf-21	Bf-22	Bf-23	Bf-24	Bf-25	Bf-26	Bf-27	Bf-28
N:	8	8	9	9	9	9	9	7
t-test p(same):	0,142	0,214	0,845	0,148	0,838	-	0,63	-
Wilcox. p(same):	-	-	-	-	-	0,767	-	0,735

A Bf-18 talpi helyzetű fúrás alkalmatlannak bizonyult a páros tesztre, ugyanis az alapmérést követően elszerűsítetlenedett (Molnár et al. 2006b), ezért nem álltak rendelkezésre az összehasonlító analízishez az egy évvel későbbi adatok. Az elvégzett tesztek által eredményezett döntéshozási értékek azt mutatták, hogy a fúrások többségében nem következett be szignifikáns változás a vizsgált egy éves időszakban. Ezekben az esetekben az adatsorok között fennálló különbség véletlenszerű. Mindössze egyetlen alkalommal, a Bf-12-ben mutatkozott 95%-os valószínűség mellett szignifikáns különbség az alapmérés és a második ismételmérés között (ezt a táblázatban a csillaggal kiemelt érték jelzi).

2.1.2 Egytényezős varianciaanalízis

A transzmisszivitás adatok közetmechanikai szemléletű feldolgozásához szükségesnek látszott a különböző feszültségállapotú csoportok elkülönítése. Ennek alapján öt csoportot különböztettünk meg: vállponti-, oldalponti-, főteponi-, talpponti-, valamint a palást alsó részében elhelyezkedő fúrascsoportokat.

Általánosságban elmondható, hogy az oldalponti helyzetben hosszabb távon döntően nyomóirányú igénybevételek alakulnak ki. A kezdeti időszakban fellépő radiális elmozdulások nem egyenletes szelvény menti eloszlásából adódóan azonban átmenetileg – és lokális jelleggel – akár kisebb mértékű húzó-hajlító igénybevételek is jelentkezhetnek. A vállponti helyzetnek közetmechanikai értelemben az átmeneti jelleg felel meg. A vállpont definíció szerint annak a zónának a szélső pontja, ahol már nem zárható ki húzófeszültségek kialakulása. Az elméleti közetmechanikai (kontinuummechanikai) megközelítés szerint a főteponiban (amennyiben a közetkörnyezet Poisson-száma meghaladja a 4-et) mindenképpen húzófeszültségek alakulnak ki. Mivel a Mórágyi Gránitot alkotó közetváltozatok esetében ez a feltétel teljesül, így ezen csoportban számítani kellett húzófeszültségek kialakulására (Kovács & Kovács 2013). Kiemelt szerepű a talppont, mivel itt nem kerültek beépítésre a különböző biztosítószerkezetek, valamint ez a zóna fokozott igénybevételnek van kitéve (például a járművek okozta terhelések, rezgések által). A nemzetközi tapasztalatok is azt támasztják alá, hogy a vágattalpon az EDZ nagyobb kiterjedésű lehet, mint a szelvény többi részén (Molnár et al. 2006b). A vágatpalást alsó részén elhelyezkedő fúrások zónájában ugyancsak nincs beépített biztosítószerkezet, viszont a vágat kerületét alkotó két ív találkozási pontjánál feszültségcsúcsok alakulhatnak ki. Az eltérő feszültségmezőből és helyzetből eredő különbségek miatt célszerűnek tűnt az imént említett öt csoport elkülönített vizsgálata is.

Az elemzés következő lépése a varianciaanalízis (ANOVA) volt, mely a páronkénti összehasonlítások sorozatában rejlő hibalehetőségek minimalizálására alkalmas eljárás. Az egy tényezőt figyelembe vevő vizsgálatokat PAST programban, a normáeloszlás tesztelését követően, (előbbi kimenetelétől függően) egytényezős ANOVA, vagy Kruskal-Wallis teszt segítségével végeztem. Mindkét analízis annak a megválaszolására alkalmas, hogy az összes vizsgált adatsor között van-e különbség. Amennyiben a módszer különbséget jelez, arra a kérdésre, hogy ez mely minták között áll fent, az utólagos, úgynevezett *post-hoc* tesztek segítségével válaszolhatunk.

A különböző közetmechanikai csoportok esetében a mérési időpontok hatásának vizsgálati eredményeit a 2. táblázat összegzi. A „*p(same)*” oszlopokban a normál eloszlás esetén végezhető, több statisztikai erővel bíró egytényezős ANOVA, illetve a nem parametrikus Kruskal-Wallis teszt (a táblázatban dőlt betűvel) eredményeképpen kapott döntéshozási érték látható a Bf-1 és a Bf-2 szelvény adott csoportjára.

2. táblázat. A mérési időpont hatásának vizsgálati eredményei (*The results of testing the effects of measuring date*)

	p(same)	
	Bf-1	Bf-2
palást alsó	0,246	0,788
oldalpont	0,757	0,888
vállpont	0,866	0,663
főtepont	0,439	0,018*
talppont	—	0,026*

A vizsgálat kimutatta, hogy a mérési időpontnak a Bf-2 szelvény esetében mind a főteponi, mind a talpponti fúrascsoportnál kimutatható hatása van (a táblázatban félkövéren szedve, csillaggal jelölve). Előbbi esetében az első és második ismételmérés között látszott eltérés, míg utóbbinál az első ismét-

lőmérés az alapméréstől és a második ismétlőtől is szignifikánsan különbözött (0,05%-os választott szignifikancia szint mellett).

Az előző elemzés elve alapján vizsgálható a különböző kőzetmechanikai helyzetnek az egyes mérési időpontok adatsoraira gyakorolt hatása is. A varianciaanalízisek eredményeit a 3. táblázat mutatja be. A „*p(same)*” oszlopokban a normál eloszlás esetén végezhető egytényezős ANOVA, illetve a nem parametrikus Kruskal-Wallis teszt (táblázatban dőlt betűvel) eredményeképpen kapott döntéshozási érték látható a Bf-1 és a Bf-2 szelvény adott csoportjára.

3. táblázat. A kőzetmechanikai helyzet hatásának vizsgálati eredményei (*The results of testing the effects of rock mechanical position*)

	p(same)	
	Bf-1	Bf-2
alapmérés	0,033*	0,120
első ismétlő	0,091	0,104
második ismétlő	0,016*	0,232

A vizsgálat alapján a Bf-1 szelvény esetében mind az alapmérés, mind a második ismétlőmérés során tapasztalható volt szignifikáns eltérés a csoportok között (táblázatban félkövéren szedve, csillaggal jelölve). Az alapméréskor a palást alsó részén elhelyezkedő csoport eltérést mutatott mind a vállponti, mind a talpponti csoporttól. A talpponti adatsorok továbbá az oldalponti adatoktól is különböztek. A 12 hónapos ismétlőmérés esetében a palást alsó részén elhelyezkedő csoport ezúttal is eltért a vállponti, valamint a főteponttól (a talp vizsgálatára a Bf-18 fúrás elszerezésének miatt jelen esetben már nem volt lehetőség). A vállponti adatsorok a palást alsó csoport mellett az oldalponti adatoktól is szignifikánsan eltértek (0,05%-os választott szignifikancia szint mellett).

2.1.3 Egyedi értékek összehasonlítása

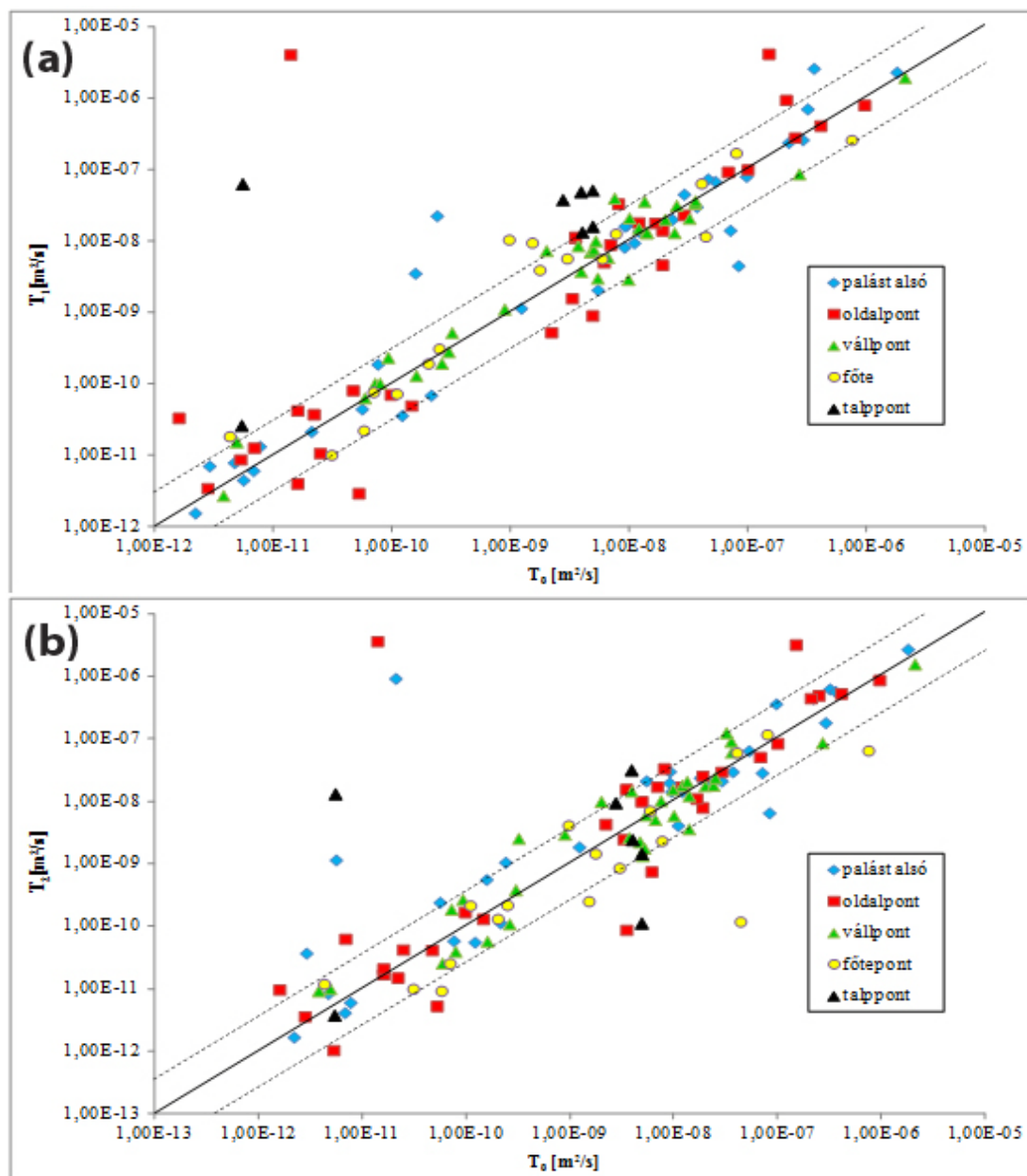
Fontos lehet annak ismerete is, hogy az egyes csoportokon belül pontosan hol történtek számottevő változások. Az egyedi összetartozó (azonos teszszakaszon, különböző időpontban mért) adatpárok egymás függvényében való megjelenítésével teszszakaszonként vizsgálható a mért transzmisszivitás értékek változásának pontos helye és iránya.

A módszer Molnár et al. 2006d és Molnár et al. 2006e alapján került alkalmazásra, az ott látottaktól kissé eltérő módon. Jelen esetben ugyanis a Bf-1 és Bf-2 szelvények transzmisszivitási adatait közösen, a kőzetmechanikai helyzet szerinti öt csoportba osztva kezeltük. Az eredményeket a 2. ábra mutatja be. A diagramok *x* tengelyén az alapmérések áteresztőképességi értékei, míg az *y* tengelyen az első (2.a ábra), illetve a második (2.b ábra) ismétlőmérések adatai láthatóak. Három segédegyenes is feltüntetésre került a diagramokon (szintén Molnár et al. 2006d és Molnár et al. 2006e alapján). Az origóból kiinduló folytonos vonalú egyenes a tengelyekkel 45°-ot zár be, és azon ideális adatpárokat reprezentáló pontok helyét jelzi, melyeknél az alap- és az ismétlőmérés során felvett érték megegyezik. A két szaggatott vonalú egyenes meredeksége megegyezik az origóból kiindulóéval, azonban tengelymetszetük fél nagyságrenddel eltér attól. Ezáltal a két szaggatott egyenes azt a sávot jelöli ki, amelyen belül az alap- és az ismétlőmérések eredménye között fél nagyságrendnél kisebb az eltérés. A fél nagyságrendnyi eltérés azért kiemelt helyzetű, mert „a transzmisszivitás meghatározásának az áramlási modell *a priori* megválasztásából eredő bizonytalansága legfeljebb fél nagyságrend mértékű”. Vagyis a különböző időpontban, azonos helyen mért transzmisszivitás értékek ennél nagyobb különbségét a használt módszerrel már megbízhatóan ki lehet mutatni (Molnár et al. 2006d).

Az ábra jól mutatja, hogy az esetek döntő többségében fél nagyságrendnél kisebb, vagy közelítőleg fél nagyságrendnyi változás történt 2, illetve 12 hónap alatt. A csoportokban tendenciózus változás első ránézésre nem állapítható meg, a nagyobb változást mutató teszszakaszok elszórtan jelentkeznek. A fél nagyságrendet meghaladó változások közül a transzmisszivitás növekedése valamivel gyakoribb, és ezen irányú eltérések abszolút értéke jóval nagyobb lehet a csökkenéseknél. Az első ismétlőmérés-kor az alapméréshez képest bekövetkezett csökkenések nem voltak számottevőek, alig néhány esetben haladták meg a fél nagyságrendet és a maximális eltérések is csak egy nagyságrend körüliek voltak. Az alapmérés után 12 hónappal viszont már megnövekedett a nagyobb mértékű csökkenést mutató esetek száma. A csökkenések abszolút értéke is megemelkedett: az egyik főteponi teszszakaszon az alapméréskor detektált transzmisszivitás érték alig több, mint 1/400-át mérték a második ismétlőmérés során. A maximális növekedés abszolút értéke jóval meghaladta a maximális csökkenését. Már az első ismétlőméréskor jelentkezett egy teszszakasz, melyben több, mint öt nagyságrenddel megnövekedett

az áteresztőképesség. Ez a szakasz mutatta egy év elteltével is a legnagyobb változást, azonban megfigyelhető, hogy a második ismétlőmérésre (az első ismétléshez képest) már több tesztintervallumon mértek jelentősen megnövekedett transzmisszivitást.

A különböző közetmechanikai helyzetű csoportokban bekövetkező változásokról elsősorban a második ismétlőméréssel való összehasonlítás alapján kívántunk információt kapni. Az ábrázolt adatok nem mutatnak világos, könnyen kimutatható tendenciát. Az alpmérés után 12 hónappal történt mérési sorozatkor a vállponti adatok gyakorlatilag a fél nagyságrendet nem meghaladó változást jelző sávba estek. A várakozásokkal ellentétben a talpponti adatok sem mutattak tendenciózus változást az alpméréshez képest – a csoportban jelentős csökkenést és növekedést jelző értékeket is lehetett tapasztalni. Utóbbi csoporthoz hasonló viselkedést mutattak az oldalponti adatok is, viszont fontos kiemelni, hogy itt mutatkozott a legnagyobb mértékű növekedés. Általánosságban elmondható, hogy a főteponi értékek esetében inkább csökkenés, míg a palást alsó részén elhelyezkedő csoportnál inkább a transzmisszivitás emelkedése volt tapasztalható az alpmérést követő egy évben.



2. ábra. Az alpmérés és az (a) első, illetve (b) második ismétlőmérés egyedi értékeinek összehasonlítása (Comparison of the unique values of base and (a) first repeating or (b) second repeating measurements)

2.2 Többváltozós elemzések

2.2.1 Kéttényezős varianciaanalízis

Az egytényezős varianciaanalízis segítségével csak egyetlen változó hatása vizsgálható. Két paraméternek a transzmisszivitás értékekre külön-külön, illetve együttesen gyakorolt hatása a kéttényezős varianciaanalízissel elemezhető. Az egy tényezőt figyelembe vevő vizsgálatok szintén PAST programban, a normáloszlás tesztelését követően, kéttényezős ANOVA segítségével készültek.

Az adatsorok normalitásának ellenőrzése ezúttal is szükséges volt, mivel a kéttényezős ANOVA – az egytényezőshöz hasonlóan – csak normál eloszlás esetében alkalmazható. A vizsgált esetek jelentős hányadában ugyan ez a kitétel nem teljesült, azonban Hammer 2012 szerint nem is minden esetben feltétlenül szükséges (ha a vizsgált csoportok mintaszáma megegyezik, a normál eloszlás nem olyan szigorú feltétel). Az elemzések azonos mintaszámúak voltak, ezért tájékozódási szándékkal nem normál eloszlást követő minták esetén is elvégzésre került a teszt. Szem előtt kell azonban tartani, hogy a kapott eredmények pontosságát ronthatja a normál eloszlás hiánya (vagyis az eredményeket némi fenntartással kell kezelni).

A 4. táblázat a fúrólyukak vágatfalon elfoglalt helyzetének, valamint az adott tesztszakasz vágatfaltól való távolságának a transzmisszivitás értékekre gyakorolt hatásának vizsgálati eredményeit mutatja be. A „p” oszlopokban az elvégzett kéttényezős ANOVA eredményeképpen kapott döntéshozási érték látható a Bf-1 és a Bf-2 szelvényre, az adott mérési időpontban. Ezen értékek alapján ezúttal arról dönthetünk, hogy az adott változó szignifikáns hatást gyakorol-e az adatsor alakulására. A „Fact A” az első változót, jelen esetben az intervallum középpontját, míg a „Fact B” a csoport vágatfalon elfoglalt helyzetét jelöli. Az „Interaction” sor azt mutatja meg, hogy a két faktor együttes hatásának milyen szerepe van.

4. táblázat. A kőzetmechanikai helyzet és a vágatfaltól való távolság hatásának vizsgálati eredményei
(The results of testing the effects of rock mechanical position and distance from the tunnel)

	alpmérés		első ismétlő		második ismétlő	
	Bf-1	Bf-2	Bf-1	Bf-2	Bf-1	Bf-2
	p	p	p	p	p	p
Fact A	0,569	0,13	0,272	0,133	0,608	0,138
Fact B	0,056	0,097	0,067	0,055	0,018*	0,222
Interaction	0,383	0,453	0,234	0,243	0,293	0,477

Az eredmények azt mutatják, hogy az intervallum középpontjának a vágattól való távolsága nem alakítja szignifikánsan az adatsorok alakulását. A kőzetmechanikai helyzet jelen (mérési időpont alapján történő) felosztás mellett már jelentősebb hatással bír a transzmisszivitás értékekre, *p* értéke több esetben megközelíti a 0,05-ös határértéket. Látható, hogy a Bf-1 szelvényenél a második ismétlőmérés során a vágatfalon elfoglalt helyzet hatása már szignifikánsnak tekinthető (a táblázatban félkövéren szedve, csillaggal jelölve). Az *Interaction* sor értékei alapján elmondható, hogy a két változó független egymástól.

Az 5. táblázat – a fenti vizsgálati eljáráshoz hasonlóan – a mérési időpont, valamint az adott tesztszakasz vágatfaltól való távolságának a transzmisszivitás értékekre gyakorolt hatásának vizsgálati eredményeit mutatja be. A „p” oszlopokban az elvégzett kéttényezős ANOVA eredményeképpen kapott döntéshozási érték látható a Bf-1 és a Bf-2 szelvényre, az adott vágatfalon elfoglalt helyzetű csoportra. A „Fact A” ezúttal is az intervallum középpontját, míg a „Fact B” jelen esetben a mérési időpontot jelöli. Az „Interaction” sor továbbra is a két faktor együttes hatását jellemzi.

5. táblázat. A mérési időpont és a vágatfaltól való távolság hatásának vizsgálati eredményei
(The results of testing the effects of measuring date and distance from the tunnel)

	palást alsó		oldalpont		vállpont	
	Bf-1	Bf-2	Bf-1	Bf-2	Bf-1	Bf-2
	p	p	p	p	p	p
Fact A	0,108	0,089	7,37E-05*	3,04E-05*	0,021*	2,81E-04*
Fact B	0,942	0,818	0,725	0,682	0,922	0,833
Interaction	1	0,988	1	0,742	1	1

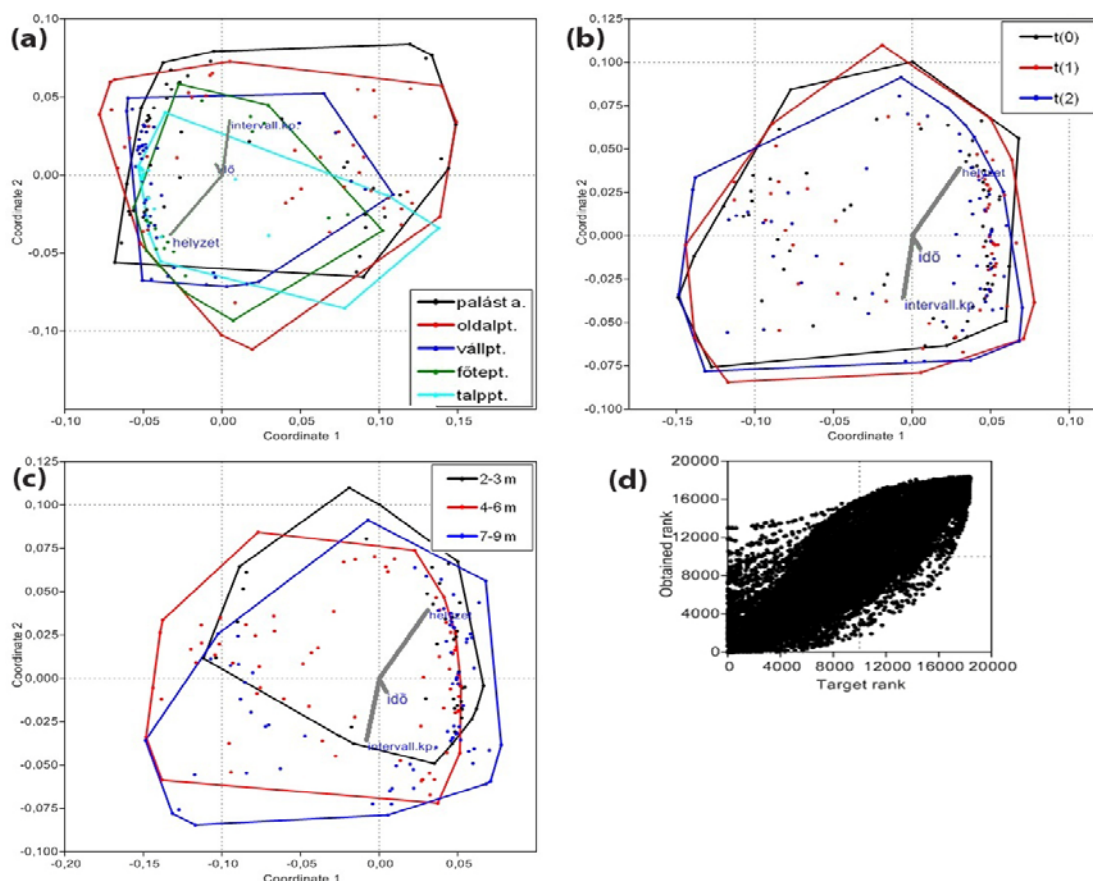
Az eredmények azt mutatják, hogy a mérési időpontnak gyakorlatilag semmilyen hatása sincs a transzmisszivitási adatsorok alakulására. Az intervallum középpontjának vágattól való távolsága jelen (közvetlen mechanikai helyzet alapján történő) felosztás mellett igen jelentős hatással bír az áteresztőképességi értékekre. A vizsgálatok során p értéke hat esetből négyszer is alacsonyabb a 0,05-ös határértéknél (a táblázatban félkövéren szedve, csillaggal jelölve). Ebből három esetben 99%-os valószínűség mellett is szignifikáns a változó hatása. Az *Interaction* sor értékei alapján elmondható, hogy a két változó teljes mértékben független egymástól.

2.2.2 Többváltozós elemzések

A három vizsgált változó hatásának együttes elemzése NMDS (nem-metrikus többdimenziós skálázás) ordinációs módszer segítségével történt. Jelen módszer az általunk választott számú dimenzióban – általában két dimenzióban – iteratív módon ábrázolja az objektumokat megjelenítő pontokat, aszerint, hogy a közöttük lévő távolságok sorrendisége minél jobban megközelítse a távolságok eredeti nagyság szerinti sorrendjét. A leképezés eredményességét a Shepard-diagram, valamint a Stress-érték jellemzi. A diagram esetében pedig minél jobban illeszkednek a pontok az 1:1-es egyenesre, annál „jobb” az ordináció. A Stress-érték 0-1 (vagy 0-100) közötti értéket vehet fel: minél alacsonyabb az értéke, annál jobban „hasonlít” az ordináció eredménye az eredeti rendszerhez.

Az elemzés a PAST program segítségével történt, euklideszi távolságot és kétdimenziós leképezést alkalmazva. A szoftver lehetőséget kínál „környezeti változók” szerepeltetésére is (a vizsgálandó faktorokat is így definiáltuk): ezeket a változókat a program az orientáció során külön kezeli, nem jeleníti meg őket adatpontként. Az egyes változók hatását az ordinációra a koordináta rendszer origójából húzott vektorok jellemzik. A vektorok tényleges hossza nem hordoz információt, csak az ábrázolás módjától függ. Lényeges azonban az irányuk, illetve az egymáshoz viszonyított hosszuk, mely az ordinációra és a vizsgált értékekre gyakorolt hatásukat jellemzi. Az ordináció megjelenítésekor az x és y tengelyek nem az eredeti változók valamelyikét jelölik – ezek az új (az eredeti változók alapján létrehozott) koordináta rendszer tengelyei.

A 3. ábrán az elvégzett NMDS elemzések eredményei láthatóak. A háromféle megjelenítés során minden esetben másik változó alapján csoportosítottuk a transzmisszivitás értékeket (a csoportosítási elv alapján kerültek rájuk a konvex burkológörbék). Az ordinációk Stress-értéke 0,25 volt, a Shepard-diagram a 3.d ábrán látható.



3. ábra. Az NMDS elemzések (a, b, c) ordinációi és (d) Shepard-diagramja (The (a, b, c) orientations and (d) Shepard-diagram of NMDS analysis)

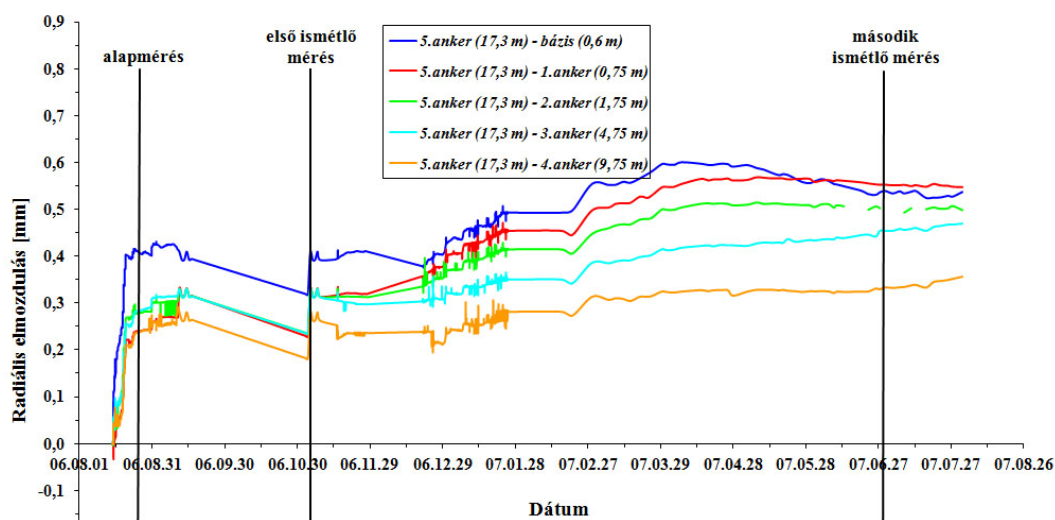
A 3.a ábra a fúrások vágatfalon való helyzete szerinti csoportosításban elvégzett ordinációt mutatja. A csoportok nagy arányban átfednek egymással (nem különülnek el nagy mértékben), de némi szétválás észlelhető. Az idő hatását bemutató vektorhossz a másik két változóéna csak a töredéke. A 3.b ábra a különböző mérési időpontok szerinti bontásban elvégzett ordinációt mutatja. A konvex burkológörbék alapján látható, hogy a három mérési időpont adatsorai szinte teljes átfedésben vannak, jelen csoportosítási elv alapján az értékek egyáltalán nem különíthetők el egymástól. A 3.c ábra a vágatfaltól való távolság alapján három csoportba besorolt transzmisszivitás értékek ordinációját mutatja. Az első intervallum (a vágatfaltól számított 2-3 m közötti szakasz) magában foglalja a közethorgonyokkal biztosított térrészt. A fúrások további hosszát két intervallumra osztottam. A burkológörbék ezúttal is nagymértékű átfedésben vannak egymással, de az időpontok szerinti bontáshoz képest jóval nagyobb mértékű elkülönülés tapasztalható. Megfigyelhető, hogy a vágatfalhoz legközelebbi szakaszok valamelyest elkülönülnek a másik két intervallumnál mért értékektől.

2.3 A Bf-2 sugaras EDZ-szelvény és az Ext-1 extenzométeres szelvény összevetése

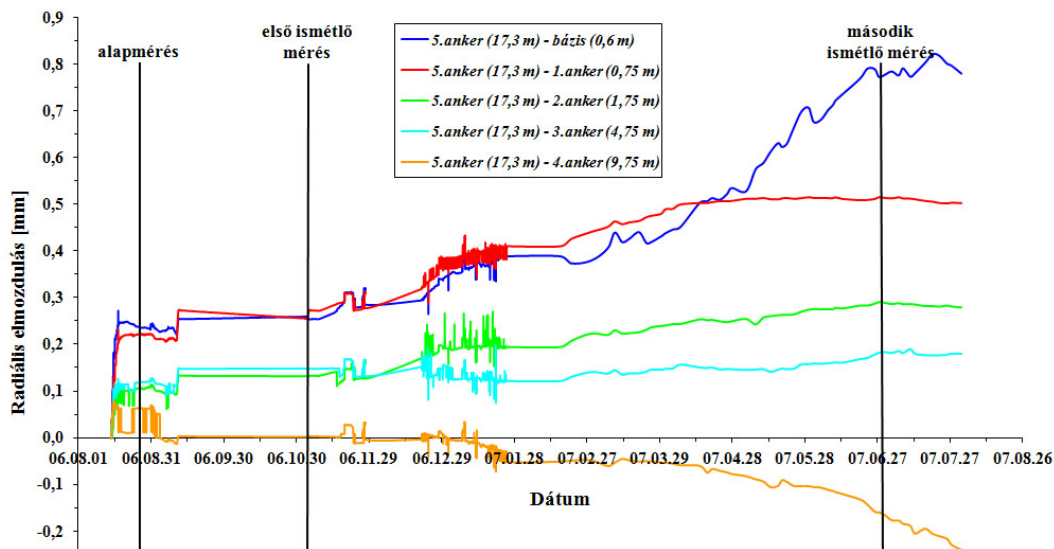
A Bf-1 és a Bf-2 szelvények mérései és kiértékelése óta már rendelkezésre állnak hosszú távú közetmechanikai adatsorok. A transzmisszivitás adatok komplex vizsgálatához felmerült az ezekkel való összevetés igénye. A Bf-1 és a Bf-2 szelvényekben nem történtek közetmechanikai jellegű vizsgálatok. A Mórággyi Gránit Formáció inhomogén jellegéből adódóan a nem teljesen azonos helyen mért adatok csak fenntartásokkal vehetők össze. Az Ext-1 extenzométeres szelvény, valamint a Bf-2 sugaras EDZ-szelvény között lévő 10 méteres távolság azonban lehetővé tette, hogy a két szelvény adatait tájékoztató szándékkal együtt kezeljük.

Az Ext-1 a Bataapátiban vágat körüli kőzetöbven fellépő deformációk, elmozdulások nagy pontosságú műszeres mérésére telepített extenzométeres szelvények egyike. Ez a szelvény – a már bemutatott Bf-2 EDZ-szelvényhez hasonlóan – radiális elrendezésű, azonban az extenzométerek térbeli eloszlása eltérő. Az Ext-1 hat sugárirányú fúrólukát tartalmaz: két oldalponti, két vállponti, valamint egy fúrás jellemzi a főte- és egy a talpponti (a palást alsó részének vizsgálatára ezen szelvényben nem mélyült fúrás). A különböző elrendezésből adódóan a fúrólukák nevezéktana is más a Bf-2 szelvényben megszokotthoz képest. Az Ext-1 szelvény fúrásai „Bx” jelölésűek.

Az elemzés alapjául a Kovács 2008a jelentésben szereplő grafikonok szolgáltak, a Bf-2 EDZ-szelvény mérési idejét lefedő tartomány leválogatásával. Az összevetésről készült példákat a 4. és 5. ábra mutatja be. Az x tengelyen a mérés dátuma, míg az y tengelyen a detektált radiális irányú elmozdulás mm-ben kifejezett értéke látható. Az öt adatsor öt anker relatív (az elvileg mozgásmentes, vágatfaltól legtávolabb elhelyezkedő ankerhez viszonyított) elmozdulásait jelöli. A feltüntetett három függőleges vonal a Bf-2 EDZ-szelvény három mérési időpontját jelzi. Az értékelésnél természetesen figyelembe kell venni azt, hogy a két szelvény zónájában nem ugyanakkor történt a vágathajtás. Mivel azonban a szelvények közti kevesebb, mint 10 m vágat kihajtása két és fél nap alatt megtörtént, az egyes időpontok megjelenítésének helyzetében ez a hiba elhanyagolható.



4. ábra. A Bx-11 adatsora a Bf-2 EDZ-szelvény mérési ideje alatt (The data lines of Bx-11 during the measuring interval of Bf-2 profiles)



5. ábra. A Bx-15 adatsora a Bf-2 EDZ-szelvény mérési ideje alatt (The data lines of Bx-15 during the measuring interval of Bf-2 profiles)

Megfigyelhető, hogy az első ismétlőmérések időszakában minden ankeren anomális viselkedés mutatkozik, a kapott görbék „túl egyenesek”. Ennek oka, hogy 2006. 09. 10-én, röviddel a Bf-2 szelvény alapméréseit követően az üzemeltetők a korábban alkalmazott 10 perces adatgyűjtési gyakoriságról 24 órára tértek át, és ezt gyakorlatilag a Bf-2 szelvény első ismétlőmérésének időpontjáig fenn is tartották. A későbbiekben észlelték, hogy ez a gyakorlat nem megfelelő és november elején 1 órás adatgyűjtési gyakoriságra tértek vissza (Kovács & Somodi 2009). Emiatt az alap- és az első ismétlőmérés között végbement mechanikai változásokról nem állnak rendelkezésre megbízható adatok.

A Bx-11 jelű extenzométeres fúrás adatsorát bemutató 4. ábrán látható, hogy a Bf-22 alapmérése az extenzométerek telepítését követő, mind az öt ankeren észlelhető meredek emelkedést mutató tranzien szakszáz lezáródása, vagyis az elmozdulások sebességének mérséklődése után történt. A második ismétlőmérés időpontjára az extenzométerekkel detektált elmozdulások némileg magasabb értéket vettek fel az alapméréskor fennállt állapotnál. Az 5. ábra a Bx-15 oldalponti helyzetű extenzométeres fúrólukban detektált relatív elmozdulásokat és a Bf-26 jelű hidrogeológiai célú fúrás mérési időpontjait jeleníti meg. Kezdetben ezúttal is minden ankeren gyors, pozitív irányú elmozdulást észleltek, azonban az alapmérések időpontjakor az elmozdulások értéke már közel állandósult. Megállapítható, hogy a vágatfaltól legtávolabbi vizsgált anker 0 mm körüli stagnálását követően jelentősnek tűnő, egyre gyorsuló ütemű csökkenést, vagyis a vágatfaltól való távolodást mutat. Ez az anker 9,75 m-re található a vágattól – a Bf-26 vágatfaltól legtávolabbi tesztintervallumának vége hasonló helyzetű. A vágatfaltól közepes távolságban lévő ankerek esetében stagnálás, vagy kisebb növekedés figyelhető meg a vizsgált egy évben. A vágathoz legközelebbi szakaszokon viszont nagymértékű növekedés látható az alapméréskor fennállt állapothoz képest, és abszolút értelemben is igen magas értékű, pozitív irányú elmozdulást mutattak ki a második ismétlőmérés időpontjában.

3 ÉRTÉKELÉS

3.1 Egyváltozós elemzések

A páros tesztek eredményei azt mutatták, hogy mind a Bf-1, mind a Bf-2 EDZ-szelvény fúrásaiban az alapmérés és a második ismétlőmérés során detektált értékek között jelentkező különbségek 95%-os valószínűség mellett nem számottevő mértékűek és véletlenszerűek, vagyis – ebben a megközelítésben, az adatok csoportosítása nélkül – nem a rendszer magára hagyásának, illetve a bekövetkező közzetfeszültség átrendeződésnek hatására következtek be. Mindössze egyetlen esetben, a Bf-1 szelvény Bf-12 jelű oldalponti helyzetű fúróluk adatsorában mutatkozott a 0,05-ös határérték alatti p-érték, mely jelzi, hogy két mérési időpont adatsorai szignifikánsan különböznek.

A mérési időpont hatását vizsgáló egytényezős varianciaanalízisek eredményei alapján a palást alsó részén elhelyezkedő-, az oldalponti- és a vállponti fúrascsoportok adatsorai között sem a Bf-1, sem a Bf-2 szelvény esetében nem lehetett szignifikáns különbséget kimutatni. A Bf-1 jelű szelvényben ugyan a főteponi csoport sem mutatott számottevő különbséget, azonban a kissé mélyebb helyzetben elhelyezkedő Bf-2 szelvény főteponi csoportjánál viszont már szignifikáns különbséget mutatott az analízis. Az eltérést az első- és a második ismétlőmérések különbözősége okozta. Az azonos helyzetű

extenzométeres fúrólyuk (Bx-13) adatsorát is figyelembe véve az első ismétlmérésről ugyan nincs információ (a 2.3. fejezetben ismertetett okok miatt), azonban a második ismétlmérést megelőzően még a korábban negatív irányt mutató ankerek esetében is számottevő pozitív elmozdulás következett be. Szignifikáns különbség mutatkozott továbbá a Bf-2 talpponti csoportjánál is. Mivel az alap- és a második ismétlmérés között meglehetősen magas p -érték adódott, azonban az első ismétlmérés mindkét másik mérési időponttól eltérést mutat, elmondható, hogy a különbséget a középső mérés okozta, a teljes egy éves időszak kezdete és vége között – 95%-os valószínűség mellett – nem fedezhető fel szignifikáns különbség.

A közetmechanikai helyzet hatását vizsgáló egytényezős varianciaanalízisek eredményei alapján nem vonható le olyan következtetés, mely szerint a csoportok, vagy valamelyik fúráscsoport konzekvensen, minden esetben eltér. Az elemzések során előfordult olyan eset is, hogy a varianciaanalízis nem mutatott szignifikáns különbséget, azonban a post hoc tesztek kimutattak 1-1 jelentős eltérést. Ezen eredményeket összegezve elmondható, hogy a leggyakoribb szignifikáns eltérés az oldal- és vállponti adatsorok között látható: hat vizsgálatból négyszer volt kimutatható jelentős eltérés. A vállponti csoport továbbá két esetben mutatott szignifikáns eltérést a palást alsó részén elhelyezkedő adatsoroktól is. Feltételezhető, hogy a talpponti helyzetű adatsorok is több eltérést mutattak volna (a Bf-1 szelvényénél az alpmérés esetében két csoporttól is szignifikánsan különbözött), azonban ez a csoport adathiány következtében nem volt megfelelően vizsgálható.

Azokban az esetekben, mikor az adatok normáeloszlást követtek, lehetővé téve az egytényezős ANOVA alkalmazását, a program rendelkezésre bocsátotta az adatsorok teljes varianciáját, valamint ennek a csoportokon belüli hányadát és a csoportok közötti varianciát. Ezen értékekről elmondható, hogy a teljes variancia döntő hányadát a csoportokon belüli eltérések okozták, ami azt jelenti, hogy a fúrások mentén (tehát radiális irányban) a változékonyság nagyobb, mint a vágatpaláستtal párhuzamosan (vagyis a különböző helyzetű csoportok között). Az egytényezős varianciaanalízisek eredményei alapján önmagában sem a mérés időpontja, sem a közetmechanikai helyzet szerinti csoportokba való besorolás nem magyarázza a mért értékek közötti eltéréseket.

Az egyedi értékek vizsgálata során az alap- és a második ismétlmérés összehasonlításakor a pontok nagyobb szórást mutattak, mint az első ismétléskor. Ugyan a legtöbb szimbólum még mindig a fél nagyságrendet nem meghaladó változást jelentő sávba esett, az ennél nagyobb eltérést mutató értékek-nél a változások abszolút értékei átlagosan megnövekedtek. A második ismétlmérés során két meglehetősen kiugró érték látszott. A legmagasabb eltérést mutató oldalponti szakasz a Bf-26-ban jelentkezett (hasonló mértékű növekedés mutatkozott már az első ismétlméréskor is). Az extenzométeres adatok alapján a fúrás e szakaszán az alpméréskor kiugróan alacsony értéket mértek, a mellette lévő intervallum viszont viszonylag magas áteresztőképességű volt. Az első ismétlmérésre utóbbi szakasz transzmisszivitása is jelentősen megnőtt. Valószínűsíthető tehát, hogy a vágattól legtávolabbi részek egy enyhén repedezett zónát harántoltak, melyben egy új repedés jött létre, vagy egy meglévő nyílt fel, megnövelve ezzel az eleve is magas transzmisszivitású, illetve a következő, az alpméréskor még igen alacsony értéket mutató szakasz áteresztőképességét. A másik kiugró érték a Bf-21 esetében adódott. Itt az alpméréskor (és az első ismétlméréskor) kiugróan alacsony transzmisszivitású, a vágattól közepes távolságban lévő szakaszok egyike a második ismétlméréskor meglehetősen magas értéket mutatott. Valószínűsíthető, hogy lokális, csak azt az egy méteres intervallumot érintő változás (deformáció, repedés) történt.

3.2 Többváltozós elemzések

A fúrások vágatfalon elfoglalt helyzetét és az adott tesztszakasz vágatfaltól való távolságát együttesen figyelembe vevő vizsgálatoknál az első változó esetében jelen felosztás mellett nem lehetett számottevő hatást kimutatni. A vágattól való távolság szinte mindig igen alacsony p -értéket eredményezett, azonban mindössze egyszer mutatott a teszt 0,05-nél alacsonyabb értéket. Ez alapján elmondható, hogy a mérési időpont szerinti bontásban vizsgált adatsorok szétválásában a fúrások vágatfalon elfoglalt helyzete nem igazán, míg a vágatfaltól való távolság viszonylag nagyobb mértékben játszik szerepet. A két vizsgált változó független volt egymástól. A csoportosítás eredményességéről elmondható, hogy az adatok között meglévő változékonyság csaknem kétharmada magyarázható a két vizsgált változó segítségével.

A mérések időpontját és az adott tesztszakasz vágatfaltól való távolságát együttesen figyelembe vevő vizsgálatok azt mutatták, hogy a teszt időpontja gyakorlatilag semmilyen hatással sincs a transzmisszivitás értékek alakulására. A vágatfaltól való távolság ezúttal is alacsony p -értékeket mutatott, az oldal-, valamint a vállponti csoportokban mind a Bf-1, mind a Bf-2 szelvény esetén erősen szignifikáns hatást lehetett kimutatni. Ezekben az esetekben – a Bf-1 vállponti csoportjától eltekintve – a vágattól való távolság 99%-os valószínűséggel szignifikánsan meghatározta a csoportok szétválását. A két változó teljesen függetlennek bizonyult egymástól. Azokban az esetekben, mikor a vágatfaltól

való távolság szignifikáns hatása kimutatható volt, a variabilitásnak akár 60-70%-át lefedte a két változó hatása (ennek döntő többségét azonban az intervallum-középpont helyzetének hatása tette ki).

A változók hatását egyszerre vizsgáló NMDS elemzések alapján elmondható, hogy a csoportok kialakításában a fúrások vágatfalon elfoglalt helyzete és a tesztszakasz középpontjának vágattól való távolsága közel azonos mértékben játszik szerepet. Az adatok elkülönítésében a mérési időpontnak elenyésző hatása volt. A fúrás helyzete szerinti csoportosítás során az illesztett konvex burkológörbék alakja és helyzete szerint három nagyobb csoportot lehet megkülönböztetni: az elsőbe a palást alsó részén és az oldalpontban elhelyezkedő fúrások adatai tartoznak, a másodikba a váll- és főteponiak, míg a harmadik csoportot a talpponti adatok teszik ki. A három csoport nem különül el túl élesen, azonban láthatóan megkülönböztethetőek. A mérési időpont szerinti bontásban elkészített ábra beigazolta, hogy ennek a változónak gyakorlatilag semmilyen konzekvens hatása sincs a transzmisszivitás értékek elkülönülésére, a burkológörbék szinte egybeesnek. A tesztintervallum középpontjának vágatfaltól való távolsága alapján megkülönböztetett három csoport sem mutatott teljes elkülönülést, azonban a csoportok szemmel láthatóan nem esnek egybe. A vágatfaltól 2-3 m-es távolságban lévő tesztszakaszok viszonylag jól elválnak a másik két csoporttól – ebben a zónában valószínűleg a biztosítószerkezetek (elsősorban a 2,4 m-ig behatoló közethorgonyok) hatása okozta az eltérést.

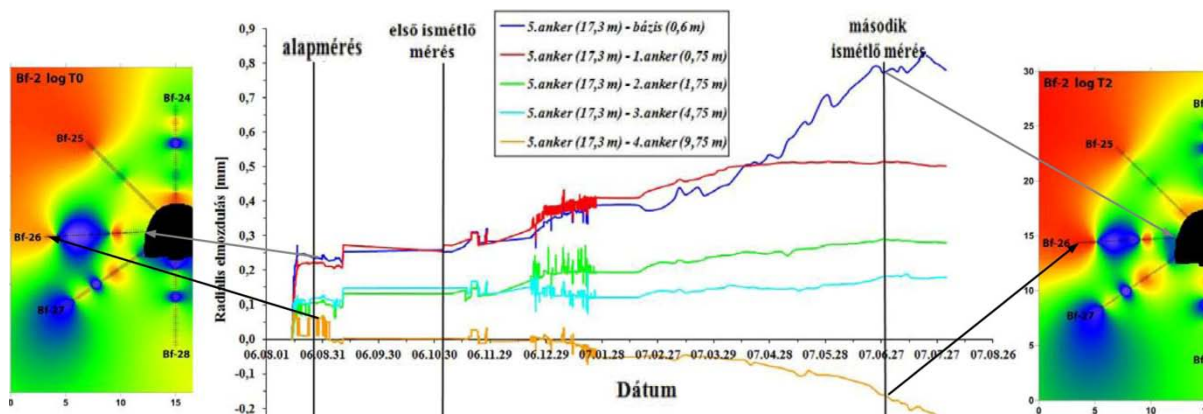
3.3 A Bf-2 sugaras EDZ-szelvény és az Ext-1 extenzométeres szelvény összevetése

Az Ext-1 és Bf-2 szelvények együttes értékelésekor figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a két szelvény kialakítása nem egy helyen és nem egy időben történt meg. A Molnos et al. 2007 dokumentumban rögzített vágathajtási időadatok szerint a Bf-2 szelvény alapméréseinek időpontjában a Keleti-lejtőszakna vágátvége 719,6 m-ben, tehát az Ext-1 szelvénytől 11,7 m távolságra volt. Ez azt jelenti, hogy az Ext-1 szelvényben a tranziens mozgások döntő hányada eddig az időpontig már le is zajlott. Ezzel szemben a Bf-2 szelvényben akkor végezték el a transzmisszivitás alapméréseket, amikor a vágátvég még a szelvény közvetlen közelében, attól mindössze 2,1 m-re volt. Bár Molnár et al. 2006c alapján megállapítható, hogy a Bf-2 szelvény alapmérése csak néhány héttel az adott vágatszszakasz kihajtását követően történt meg, valamint a tranziens elmozdulási folyamatok már a vágátvég előtt, a kőzet belsejében is megkezdődnek (Kovács et al. 2012), mégsem mondhatjuk azt, hogy a két szelvény az alapmérés időpontjában azonos mechanikai állapotban volt. Ezért az a megállapítás, hogy a transzmisszivitási alapmérések az Ext-1 szelvényben detektált kezdeti gyors elmozdulást követően történtek, nem bír valós információ tartalommal. A második ismételmérés időpontjában azonban már egyértelmű, hogy a két szelvény mechanikai helyzete azonos. Ezen túlmenően a két szelvényben lejátszódó változások jellege is – azok mindössze 10 m-es távolsága miatt – hasonlóan tekinthető. Ezért a két szelvény adatai tájékozódási szándékkal összehasonlíthatók, azonban ennek kapcsán a leírt korlátokat mindig figyelembe kell venni. Tekintettel a Mórágai Gránit Formáció inhomogén jellegére, melynek következtében a két szelvény adatsorai csak nehezen vethetőek össze, pontos következtetések levonása a lokális módosító tényezők (például az adott szelvény mentén megjelenő törések) miatt nem lehetséges. Nagyobb léptékű folyamatokra azonban rámutathat a két szelvény összevetése.

Az egyedi értékek összehasonlításakor többször is említett kiugróan nagyarányú transzmisszivitás növekedés a Bf-26 jelű oldalponti helyzetű fúrás egyik tesztszakaszán jelentkezett. A Bx-15 oldalponti extenzométeres fúróluk adatsorait (lásd az 5. ábrán) áttekintve látható, hogy a vágathoz legközelebbi ankeren az alapmérést követő egy év során jelentős pozitív irányú elmozdulás történt. A Bf-26 jelű fúrásban ezzel párhuzamosan a vágathoz legközelebbi, az alapméréskor még átlagos transzmisszivitású részek áteresztőképessége a második ismételmérésre nagymértékben lecsökkent. Ezzel szemben a vágattól távolabbi anker számottevő negatív irányú elmozdulást mutatott ki – eközben a Bf-26 fúrás vágattól legtávolabbi részén az alapmérést követően a transzmisszivitás jelentősen megnőtt (2. ábra). A folyamatot a 6. ábra mutatja be.

Amennyiben feltételezzük, hogy a kétféle mérési szelvényben hasonló folyamatok játszódtak le, ezek a változások a következőképpen értelmezhetők. A konvergenciamérő szelvények szerint a legkülső néhány 10 cm-es kőzetköpeny – ami a rövid fúrólukas EDZ-vizsgálatok szerint a hidrogeológiai értelemben vett EDZ-vel azonosítható – általában már mintegy fél év elteltével stabilizálódik. A kissé távolabbi kőzetzónák elmozdulása azonban ehhez képest késleltetett lehet. Ebben a vonatkozásban már a 0,6 m mélységű bázis anker is a „kissé távolabbi” zónában helyezkedhet el, mivel a vágatradarvizsgálatok szerint a vágat tengelyével közel párhuzamos, vágathajtás okozta repedések 0,6-0,7 m mélységben már szisztematikusan kimutathatók voltak. Feltételezhető tehát, hogy az említett, vágathoz közeli szakasz transzmisszivitásának lecsökkenését e térrészek pozitív irányú, vagyis a vágat felé irányuló mozgása eredményezhette, mely a radiális kőzetfeszültség megemelkedését és ezzel az említett repedések záródását okozta. A negatív értelemben elmozduló, tehát a „vágattól távolodó” térrészek esetében eltérő a helyzet. A negatív irányú mozgás ugyanis általában nem jelent valódi távolodást, hanem azt, hogy az adott kőzetblokk egy kritikussá váló terhelési szinten elfordulhat.

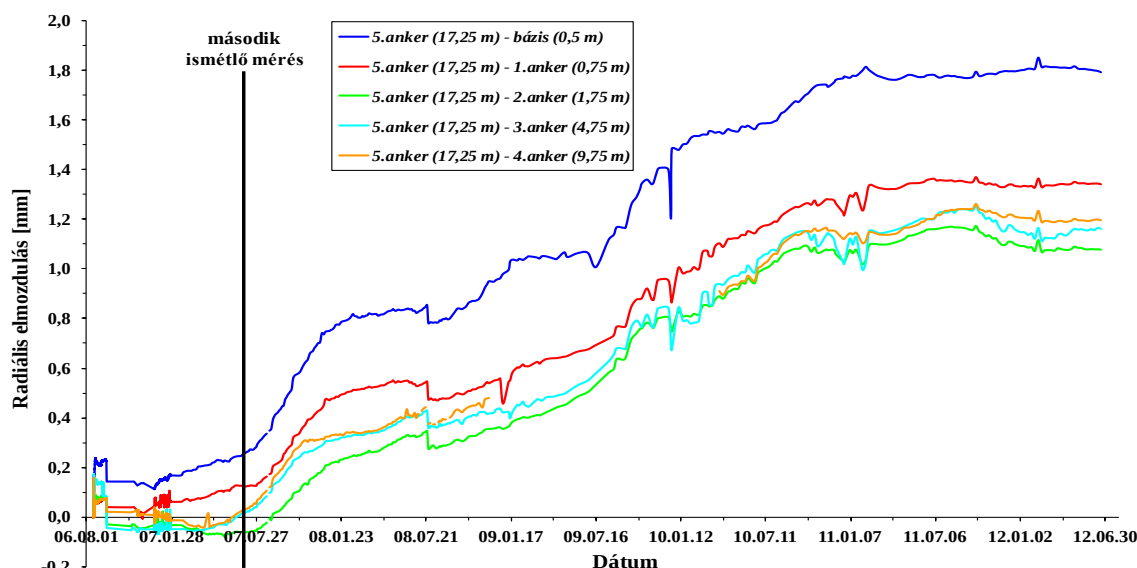
Ezáltal viszont a kőzetblokkot határoló egyes repedések nyitottsága jelentősen megnövekedhet, ami valószínűleg ezeken a szakaszokon az áteresztőképességet is nagymértékben megnövelte.



6. ábra. A Bx-15 és a Bf-26 adatainak összehasonlítása (*Comparing the data of Bx-15 and Bf-26*)

Mindenképpen ki kell hangsúlyozni, hogy a leírt összefüggés csak feltételezés, ugyanis a két szelvény közt meglévő 10 m-es távolság miatt az inhomogén kőzetben az extenzométerekkel és a transzmisszivitás tesztekkel detektált folyamatok nem feleltethetők meg kellő biztonsággal egymásnak. A feltevés igazolásához a kétféle mérés egy helyen történő megvalósítására lenne szükség.

Fontos viszont megemlíteni az egy éven túli, hosszú távú változások jelentőségét is. A korábban bemutatott ábrák az extenzométeres adatsoroknak azon szakaszait mutatták be, melyek lefedik a Bf-2 EDZ-szelvényben történt alap- és második ismétlőmérések között eltelt nagyjából egy éves intervallumot. Az Ext-1 szelvény esetében azonban ennél jóval hosszabb időintervallumról állnak rendelkezésre feldolgozott adatok (lásd: Csapó et al. 2012 – e jelentésben található grafikonok némiképpen módosított formája látható az alábbiakban). A 7. ábrán a Bx-12 vállalponti extenzométeres fúrás eddig feldolgozott adata sora látható. A grafikonon ezúttal csak a második ismétlőmérés időpontja került feltüntetésre. Látható, hogy ebben az esetben a transzmisszivitás mérések befejezését követően indulnak meg a nagyobb léptékű változások. A legnagyobb elmozdulást mutató bázis anker is csak körülbelül 0,2 mm-es elmozdulást mutatott a transzmisszivitás mérések időszakában, azonban a vizsgált időszak végére az elmozdulás mértéke megközelítette a 2 mm-t. Ez alapján a második ismétlőméréskor fennálló állapothoz képest csaknem tízszeres emelkedés történt.



7. ábra. A Bx-12 hosszú távú adata sora (*The long term data lines of Bx-12*)

Az extenzométeres adatsorok alapján elmondható, hogy a fellépő feszültségváltozások és a következményükként létrejövő elmozdulások a vágathajtást követő egy év alatt nem érnek el állandó szintet. A stabilizáció legtöbbször csak évekkel később következik be (az Ext-1 szelvénynél a stabilizációt megelőző leghosszabb időszakot a Bx-12 esetében észlelték: itt csaknem öt év kellett az új egyensúlyi állapot kialakulásához (Kovács et al. 2012)). A stabil állapot kialakulásáig azonban jelentős változások következhetnek be, és egy év tapasztalatai alapján nem, vagy csak nagy bizonytalanságokkal terhelve lehet következtetni az új egyensúlyi állapot jellemzőire. Fontos továbbá az a tény is, hogy a Bf-1 és a

Bf-2 sugaras EDZ-szelvények a lejtősaknak felső részein, hozzávetőleg 145-150 m-rel a helyi felszín alatt helyezkednek el – ez a zóna még alacsony terhelési szintűnek tekinthető. A mélyebben elhelyezkedő extenzométeres szelvények esetében a reológiai utómozgások nagysága és időbeli hossza is fokozatosan növekedett. Ez a hatás annál intenzívebben jelentkezett, minél mélyebben került kialakításra az adott extenzométeres szelvény (Kovács et al. 2012). A felszínhez képest mélyebben elhelyezett extenzométerekben esetenként detektált nagyobb mértékű elmozdulásoknak már biztosan lenne kimutatható hidrogeológiai hatása is.

A fentiek szerint a Bf-1 és Bf-2 EDZ-szelvények mérései által felölelt egy év tapasztalatai alapján egyáltalán nem állítható bizonyosan az, hogy a hidrológiai jellemzők időben változatlanok. A hosszú távú kőzetmechanikai folyamatok ismeretében célszerűnek tűnik a transzmisszivitás egy éven túli vizsgálata is, ugyanis az új egyensúlyi állapot csak később alakul ki. Bár a hosszú fúrólyukas módszert az EDZ vizsgálatához alkalmatlannak találták (Korpai et al. 2010), az is megfontolandó, hogy a szelvényeken azok helyzete miatt nem tapasztaltak számottevő változást. Elképzelhető, hogy a kamratérben, ahol annak mélységéből adódóan a két létesített EDZ-szelvény környezetéhez képest jóval magasabb kőzetfeszültségek lépnek fel, a vágathajtás következtében fellépő feszültségváltozások is jelentősebbek, így azok a sugaras EDZ-szelvények segítségével is vizsgálhatóak lennének.

3.4 Konklúzió

A hidrogeológiai szempontú kiértékeléseket követően a Golder Zrt. munkatársai az EDZ és EdZ vizsgálatára alkalmatlannak nyilvánította a hosszú fúrólyukas módszert és helyette a későbbiekben rövid fúrólyukakból álló lyukpárok, illetve lyukhármak segítségével vizsgálták a vágathajtás következtében módosított, illetve roncsolt zónát. Továbbá teljesen elhagyták az ismétlőméréseket, mivel a Bf-1 és a Bf-2 adatsorainak vizsgálatakor nem tapasztaltak számottevő időbeli változást (Korpai et al 2010).

A korábban bemutatott vizsgálatok alapján feltételezhető, hogy a kamraterek mélységében fellépő magasabb feszültség szintek mellett a hosszú fúrólyukas, radiális kialakítással is kimutathatóak lennének a változások. A vágat közvetlen környezetében kialakuló erősen roncsolt zóna vizsgálatára azonban mindenképpen a rövid fúrólyukas mutatkozik megfelelőnek, ugyanis a hosszú fúrólyukas módszer esetében a teszteket csak a vágatfaltól 0,8; illetve a Bf-2 esetében 0,45 m-re tudták megkezdni. Ez a nemzetközi tapasztalatok alapján az erősen roncsolt zóna határát, vagy azon túli térrészt jelenti, az EDZ vizsgálatára tehát a hosszú fúrólyukas kialakítás nem alkalmas. Szintén a rövid fúrólyukas módszer látszik célravezetőnek a vágattalp vizsgálatára, a vágathoz közeli szakaszokról ugyanis a Bf-1, illetve a Bf-2 mérései alapján gyakorlatilag nincsen információnk. Elengedhetetlennek tűnik viszont az ismétlőmérések kivitelezése. Az EDZ, illetve az EdZ időbeli (és térbeli) változékonysága miatt ugyanis a vágathajtást követő időszakban elvégzett egyetlen mérési sorozat nem adhat pontos képet a vizsgált kőzetrészről. Számolni kell a hosszútávon jelentőssé váló feszültségváltozások, elmozdulások hatásaival, melynek következményeként a transzmisszivitás is nagymértékben megváltozhat. Ez azt jelenti, hogy a vágathajtást követően megtörtént mérési sorozatokhoz képest a kőzetkörnyezet áteresztőképessége a reológiai folyamatok következtében számottevő eltérést mutathat. A hosszú távú áramlási viszonyok ismerete környezetbiztonsági szempontból elengedhetetlen, ezért törekedni kell az EDZ, illetve EdZ ezen térrészek komplexitásának megfelelő szemléletű vizsgálatára.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönettel tartoznak az RHK Kft.-nek, amiért lehetővé tette jelen cikk megírását az adatok rendelkezésre bocsátásával. A cikk a TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0005 *Jól-lét az információk társadalomban* program támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

- Csapó Á., Csurgó G., Gorjánác Z., Ország J., Turger Z; Deák F., Kovács L., Mészáros E., Somodi G; Jenei A., Moskó K., Szűcs I., 2012: Összefoglaló jelentés készítése, adatszolgáltatás az értékelő jelentést készítő vállalkozó részére. Kézirat, MECSEKÉRC Zrt.; Pécs, 2012. március. RHK Kft. Irratára, Paks, RHK-K-090/11.
- Hammer, Ø., 2012: PAST PAleontological STatistics Version 2.17. Reference manual. Natural History Museum, University of Oslo.
- Korpai F., Andrassy M., Benedek K., Darvas K., Ludmann L., Molnár P., Sidló T. G., 2010: Az EDZ jellemzése. Kézirat, Golder Associates Zrt., Budapest, 2010. decemeber. RHK Kft. Irratára, Paks, RHK-K-149/10

- Kovács L., 2001: Partial Self-Healing Effects of a Highly Indurated Claystone Formation (BCF) Discovered by In Situ Measurements. Self-Healing Topical Session Proceedings organised by OECD NEA/RWM/Clay Club. Proceedings. pp. 47-57. 2001.
- Kovács L., 2008a: Értékelő jelentés az Ext-1, Ext-2, Ext-3 és Ext-4 jelű extenzométeres szelvények mérési eredményeiről. Kézirat, Kútfej Bt., Pécs, 2008. június. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-089/08.
- Kovács L. Molnár P., Szabéni G.: Összefoglaló jelentés a HGM-kamra vizsgálatairól. Kézirat. Kőmérő Kft., Pécs, 2009. május. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-053/09.
- Kovács L., Somodi G., 2009: Értékelő jelentés a geotechnikai eredmények értelmezéséről. Kézirat, Kőmérő Kft., 2009. március. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-171/08.
- Kovács L., Mészáros E., Deák F., Somodi G., Máté K., Jakab A. Vászrhelyi B.; Geiger J.; Dankó Gy., Korpai F., Mező Gy., Darvas K. ; Ván P., Fülöp T., Asszonyi Cs., 2012: A Geotechnikai Értelmező Jelentés (GÉJ) felülvizsgálata és kiterjesztése. Kézirat, Kőmérő Kft. Pécs, 2012. december. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-032/12.
- Kovács L., Kovács B., 2013: Jelentés a löttbeton vágatbiztosítás terhelésének ellenőrzésére szolgáló mérőszelvény telepítéséről, üzemeltetéséről és eredményeiről. Kézirat, Kőmérő Kft., 2013. február. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-025/12.
- Kovács L., Mészáros E., Deák F., Somodi G. 2013: Időfüggő deformációs jelenségek a Bátaapáti NRHT térségeiben és azok lehetséges okai. In. Török Á., Görög P. & Vászrhelyi B. (szerk.) Mérnökgeológia-Közetmechanika Kiskönyvtár 2013., 177-194.
- Molnár P., Dr. Benedek K., Szűcs N., Andrassy M., Korpai F., 2006a: A vágatból történő kutatás — A Bf-11 – 18 jelű sugaras EDZ fúrások kútvizsgálata. Alapmérés. Kézirat, Golder Associates Kft., Budapest, 2006. május. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-021/06.
- Molnár P., Szűcs N., Andrassy M., Korpai F., Mező Gy., 2006b: Monitoring — A Bf-11 – 18 jelű sugaras EDZ fúrások kútvizsgálata. Első ismétlő mérés. Kézirat, Golder Associates Kft., Budapest, 2006. október. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-048/06.
- Molnár P., Andrassy M., Korpai F., Sidló T., 2006c: A vágatból történő kutatás — A Bf-21 – 28 jelű sugaras EDZ fúrások kútvizsgálata. Alapmérés. Kézirat, Golder Associates Kft., Budapest, 2006. december. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-104/06.
- Molnár P., Korpai F., Sidló T., 2006d: Monitoring — A Bf-21–28 jelű sugaras EDZ-fúrások kútvizsgálata. Első ismétlő mérés. Kézirat, Golder Associates Kft., Budapest, 2006. december. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K–114A/06.
- Molnár P., Andrassy M., Korpai F., 2006e: Monitoring — A Bf-11–18 jelű sugaras EDZ-fúrások kútvizsgálata. Második ismétlő mérés. Kézirat, Golder Associates Kft., Budapest. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K–147A/06.
- Molnos I., Deák F., Jakab A., Somodi G., Szamos I., Vászrhelyi B., Gyalog L., Gulácsi Z., Maros Gy., Musitz B., Király E., Oláh I., Szabéni G. 2007: Jelentés a Bátaapátiban mélyített Nyugati lejtőszakna 600,00 – 1309,50 és Keleti lejtőszakna 599,40 – 1254,10 m-es szakaszán elvégzett földtani-tektonikai, geotechnikai és vízföldtani dokumentálási munkákról. Kézirat, Mecsekérc Zrt., Pécs, 2007. október. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K–079/07.
- Prónay Zs., 2008: EDZ geofizikai monitoring értékelő jelentése. Kézirat, MÁELGI, Budapest, 2008. január. RHK Kft. Irattára, Paks, RHK-K-006/08.