

Időfüggő deformációs jelenségek a Bátaapáti NRHT térségeiben és azok lehetséges okai

Time-dependent deformations in the underground openings of NRWR at Bátaapáti and their possible causes

Kovács László

Kőmérő Kft., kovacslaszlo@komero.hu

Mészáros Eszter

Kőmérő Kft., meszaroseszter@komero.hu

Deák Ferenc

MVM PaksII Atomerőműfejlesztő Zrt., deakf@mvmpaks2.hu

Somodi Gábor

Kőmérő Kft., somodigabor@komero.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A Bátaapáti térségében a Paksi Atomerőmű kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékainak végleges elhelyezésére kialakított NRHT felszín alatti térségeiben 2006-tól kezdődően egy szisztematikus deformációs monitoring rendszer került kialakításra. Az e rendszerből (elsősorban a radiális elmozdulások kimutatására alkalmas extenzométerekből és a vágatfal síkjában fellépő deformációkat rögzíteni képes háromszöges elrendezésű mérőhelyekből) származó, a cikkben ismertetésre kerülő adatsorok azt mutatják, hogy a korábbi feltételezésekkel ellentétben hosszú távon is számolni kell a kőzetköpeny időfüggő deformációival, illetve – kedvezőtlen esetben – az ezekből eredő esetleges tönkremeneteli jelenségekkel. A cikk bemutatja a reológiai jelenségek különböző típusait és kísérletet tesz ezek értelmezésére. A Montavid Termodinamikai Kutatócsoport munkája azt is igazolta, hogy az extenzométerekkel rögzített radiális elmozdulások – a hőmérsékleti hatások figyelembe vételével – jól közelíthetők a klasszikus Poynting-Thomson anyagmodellel. Azt is vizsgáljuk, hogy milyen jelenségek és folyamatok tehetők felelőssé azért, hogy az elméleti várakozásoknál magasabb szintű, a reológiai jelenségeket kiváltani képes terhelések jelennek meg a kőzetköpenyben. A primer feszültségmérések eredményei alapján erre elsősorban a Mórággyi Gránit diszkontinuum-jellegű viselkedése és az ebből adódó feszültségblokkosodási jelenség adhat választ.

Kulcsszavak: NRHT, geotechnikai monitoring, reológia, feszültségblokkosodás

ABSTRACT: NRWR at Bátaapáti is designed as the final disposal of LLW and ILW originated from Paks NPP. The development of a systematic deformation monitoring network for controlling the stability of underground openings of NRWR started in 2006. The data sets gained by that system (mainly by radial multipoint borehole extensometers and special triangular measuring stations, which are suitable for controlling the deformation occurring in the plane of tunnel wall) clearly prove that – in contrast with previous assumptions – the time-dependent deformation and failure of rock wall cannot be left out of account even in longer term. The paper shows the different types of discovered rheological phenomena and attempts their interpretation. Montavid Thermodynamical Research Group has also proved that – taking into account the modifying effects of thermal changes as well – the radial displacements measured by the extensometers can be fitted correctly using the classic Poynting-Thomson rheological model. It is also analysed, which effects and processes are responsible for the occurrence of loads of higher level than the theoretical expectations, which can be the main cause of measurable rheological phenomena. According to the results of initial stress measurements mainly the discontinuities of Mórággy Granite Formation and – as their consequences – the discontinuous stress field can give the explanation for the time-dependent deformations of rock wall.

Keywords: NRWR, geotechnical monitoring, rheology, discontinuous stress field

1 BEVEZETÉS

A hazai atomerőművi eredetű kis- és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezésére a Bataapáti térségében, granitoid befogadó képződményben, bányászati módszerekkel kialakított Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) szolgál. Az Atomtörvényben foglalt felhatalmazás alapján az NRHT építésével és üzemeltetésével kapcsolatos feladatokat a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhatalmú Nonprofit Kft. (RHK Kft.) szervezi. A jelen cikk tárgyát képező mérési adatok, illetve értékelések is az RHK Kft. megbízása alapján jöttek létre.

1.1 Az NRHT építése és várható működési időtartama

A NRHT felszín alatti létesítményeinek építése 2005 elején indult. Az eddig elkészült több mint 5 km hosszúságú lejtőszakna-, illetve szintes vágatrendszer egyrészt a 0 mBf magassági szint térségében, modulárisan kialakítandó tárolókamrák zónáját (az ún. I. kamramezőt) tárta fel, másrészt pedig ezekben a vágatokban kerültek kialakításra az NRHT infrastrukturális ellátó rendszerei (pl. a vízemelés, villamosenergia- és sűrített levegő-ellátás, stb. objektumai). Az első két tárolókamra kialakítását követően 2012. december 5-én megkezdődött a radioaktív hulladékok betárolása az I-K1 kamrába. Az NRHT üzemszerű működése értelemszerűen az üzemeltetési engedélyben foglaltak szerint, igen szigorú biztonsági előírásoknak megfelelően folyik. Ezek egyik legfontosabb eleme, hogy a létesítményt ellenőrzött és építési zónára kellett felosztani, ahol a két zóna közötti átjárás kizárólag havária-helyzetben engedélyezett. A kamramező további bővítésével összefüggő építési munkálatok időben elhúzódva, az NRHT üzemeltetésével párhuzamosan, az építési zónában folytatódhatnak majd.

Az RHK Kft. által kiadott tervezési diszpozíció szerint a tárolókamrákat 50 éves nyitvatartási időszakra kellett tervezni. A további térségek szükséges nyitvatartási idejével kapcsolatban nincs egyértelmű, végleges adat. Az RHK Kft. által 2012-ben kiadott 12. közép és hosszú távú terv [RHK Kft. (2012)] még azzal számol, hogy az eredetileg tervezett 17 db tárolókamra kialakítása 2041-ben fejeződik majd be, majd – az üzemeltetési időszakot követően – a 2080-as évek elején történik meg az NRHT végleges lezárása. E dokumentum számításainál már figyelembe vették a Paksi Atomerőmű reaktorai esetében a 20 éves élettartam-hosszabbítást, illetve azt is, hogy az erőművi primerkör 20 éves védett megőrzést követően kerül majd leszerelésre. A betárolási rendszer RHK Kft. által időközben elvégzett optimalizálása miatt a szükséges kamrák száma – és ezzel az építés időigénye – valószínűleg csökkenni fog, viszont az esetleges új erőművi blokkok építése minden bizonnyal az NRHT jóval hosszabb nyitva tartását fogja szükségessé tenni. Mindezek alapján tehát nem zárható ki a főfeltárási térségek jelenleg tervezettnél jóval hosszabb, akár 120-130 éves nyitva tartásának igénye sem.

Az ismertetett helyzetnek és időtávoknak megfelelően különösen fontos, hogy a tárolókamrák, valamint az NRHT további főfeltárási és infrastrukturális ellátó térségei – különösen az ellenőrzött zónában – úgy kerüljenek kialakításra, hogy az üzemeltetési időszakban – egészen a tároló végleges lezárásáig – azokon csak minimális bányászati karbantartási igény merüljön fel. Az üregrendszer hosszú távon is stabil közetköpenyének fenntartása azonban más szempontból is fontos: az esetleges tönkremeneteli folyamatok jelentősen módosíthatják a jövesztés által roncsolt/megzavart közetzóna (EDZ/EdZ) kiterjedését, eloszlását és hidrodinamikai adottságait. Ezáltal műszakilag nehezebbé válhat a tároló végleges lezárása, illetve megnőhet a vágatok tengelyével párhuzamos, nem kívánt szennyeződésterjedési útvonalak kialakulásának valószínűsége [Kovács & Kovács (2013)]. A hosszú távú radiológiai biztonság szempontjából tehát nem csak az ellenőrzött, hanem az építési zóna térrészeinek stabilitása is kiemelt fontosságú kérdés.

1.2 Az időfüggő deformációs jelenségek lehetséges okai és típusai

Az első két tárolókamra kiviteli tervezését megalapozó Geotechnikai Értékelő Jelentés [Kandi et al. (2010)] című dokumentum – egyrészt nemzetközi szakirodalmi információkra, másrészt pedig az NRHT szintes vágatrendszerében elvégzett rövid idejű Plate Jacking mérések adatainak elemzésére alapozva – úgy foglaltak állást, hogy a reológiai tulajdonságok számításba vétele a tervezés során nem szükséges. A dokumentumban a szerzők a reológiai viselkedést a kúszással azonosították. Hoek et al. (1995) alapján a kúszás fogalmát helyesen definiálták, és megadták az elsődleges, másodlagos, illetve harmadlagos kúszási folyamatok jellemzőit is. A reológiai folyamatok irrelevanciáját az NRHT-ban elsősorban azzal a nemzetközi tervezési szakirodalomban általánosan alkalmazott és széles körben elfogadott „ökolószabállyal” támasztották alá, miszerint a közetben kúszási folyamatok csak akkor indulhatnak meg, ha a fellépő terhelés meghaladja az intakt közetek egytengelyű nyomószilárdságának (UCS) 40%-át. Az NRHT-t befogadó granitoid képződmények esetében ez a reláció – a viszonylag alacsony felszín alatti mélység mellett – szekunder esetben is vitathatatlanul fennáll.

Ezt a leegyszerűsített képet célszerűnek látszik azonban további szakirodalmi utalásokkal tovább árnyalni. Alagútépítési szempontból a reológiai hatásokat a vágat (alagút, kamra, stb.) közvetlen közet-

környezetének megváltozott, módosult adottságú külső zónájából és a biztosítószerkezetekből álló komplex rendszerben kell vizsgálni és értelmezni. (Ezt a rendszert a hagyományosnak nevezhető szemlélet szerint az EDZ-vel, illetve – tágabb értelemben – az Edz-vel is azonosíthatjuk.) A vágathajtás lezárását követően a vágat körüli módosult zónák időfüggő fejlődésében a következő hatások, illetve folyamatok játszhatnak szerepet [Lanyon (2011)]:

- Kúszás (*creep*), mind kompressziós, mind nyírásos jelleggel; a rövid távú folyamattól a nagyon hosszú távú folyamatokig;
- A tönkrement kőzet relaxációja;
- A biztosítószerkezetek korróziója, degradációja;
- A kőzetköpeny anyagának kémiai átalakulása;
- A pórusnyomás változása;
- Egy radioaktív hulladék-tároló létesítéséből és üzemeltetéséből adódó specifikus, hosszú időtávú változások:
 - a kőzetet érő intenzív hőmérsékleti, illetve besugárzási hatások következtében létrejövő feszültségváltozás (a L/ILW tárolók, így az NRHT esetében ez elhanyagolható);
 - kémiai kölcsönhatások, melyek a befogadó kőzet és a mérnöki gátak között aktiválódhatnak;
 - a tároló lezárásával járó esetleges olyan bányászati tevékenységek, melyek a feszültségtér megváltozásához vezethetnek a vágatfalak környezetében.

Kőzetmechanikai szempontokra leszűkítve a fenti felsorolást, időfüggő deformációkat relaxációs, kőzetkúszási, illetve késleltetett EDZ-viselkedési folyamatok is okozhatnak. Az említett folyamatok eredményeként – alapértelmezésben – a megváltozott adottságú zónában folyamatos extenzió megy végbe. Az arra hajlamos képződmények esetében emiatt – és sok esetben az oldalfeszültség csökkenése miatt is – rideg tönkremenetelre is sor kerülhet a kőzetköpenyben. Rideg tönkremenetel esetében a korszerűnek tekinthető megközelítés szerint az EDZ-t gyakorlati mechanikai alapokon további rész-zónákra is fel lehet osztani. Ezek kívülről befelé haladva a következők: az EDZ_o (outer – külső) zónában új makro-, illetve mikro-repedések képződése figyelhető meg, míg az EDZ_i (inner – belső) zónában a repedések továbbfejlődhetnek, illetve egymással összekapcsolódhatnak [Perras et al. (2012)]. A HDZ-re (Highly Damaged Zone) intenzív közettönkremenetel jellemző. A HDZ-ben a vágathajtással egy időben, illetve azt követően viszonylag rövid idő alatt keletkeznek a repedések. Az EDZ_o területén belül a repedések továbbfejlődése a nemzetközi szakirodalomban leírt tapasztalatok szerint több hétig, hónapig, míg a megváltozott adottságú zóna külsőbb részeiben (EDZ_i) akár több évig, vagy akár több tíz évig is eltarthat. Az említett repedésterjedési folyamatok révén a zóna terhelési viszonyai és deformációs jellegei is folyamatosan változhatnak.

A fentiek szerint tehát a kúszás csak egy összetevője azoknak az időfüggő, nemlineáris jellegű hatásmechanizmusoknak, amelynek során a vágat kőzetkörnyezetében utólagos – tehát nem a vágathajtás közvetlen mechanikai feszültségátrendező hatásával magyarázható – feszültségváltozások és elmozdulások alakulnak ki, és amelyek következtében a vágatbiztosításban is többlet-igénybevételek, illetve további deformációk jönnek létre. A vonatkozó szakirodalom szerint a különféle tulajdonságú kőzetek reológiai viselkedésének elméleti leírására rendkívül sokféle összetett, viszko-elasztikus, viszko-plasztikus, viszko-elasztó-plasztikus, stb. mechanikai modell született [Asszonyi et al. (1980)]. Ahogy azt a cikk további részében bemutatjuk majd, a viszko-elasztikus modellek közül a legáltalánosabb és leginkább elterjedt Poynting – Thomson-féle ún. standard modell a rideg törésre hajlamos képződmények esetében is jól használható. A Poynting – Thomson-féle modell az ideálisan rugalmas tag mellett a kúszási és a relaxációs viselkedést leíró tagot is tartalmaz.

A kúszás szerepe a rideg törésre nem hajlamos (pl. agyagjellegű) képződmények esetén válik meghatározóvá. Ilyen esetekben az időfüggő tönkremeneteli folyamatok elméleti hátterét szintén összetett viszko-plasztikus reológiai modellekkel lehet leírni [pl. Lemaitre viszko-plasztikus tönkremeneteli törvény – Pellet & Zerfa (2006); Pellet et al. (2009)].

E rövid áttekintés alapján is megállapítható, hogy az időfüggő deformációk kialakulása és fejlődése egy meglehetősen komplex, többtényezős, helyszínenként, illetve képződményenként változó mechanizmus, aminek leírására az említett ökol szabályhoz hasonló egyszerűsített képet legfeljebb csak megfelelő ellenőrzés mellett célszerű alkalmazni.

2 AZ NRHT-BAN ALKALMAZOTT, REOLÓGIAI SZEMPONTBÓL ÉRTÉKELHETŐ MEGFIGYELŐ HÁLÓZAT

2.1 A geotechnikai megfigyelő hálózat elemei

Az NRHT felszín alatti létesítményeinek kialakítása során többféle, nagy felbontású, illetve nagy pontosságú speciális mérőrendszer is telepítésre került. Ezek többségének kettős feladata volt: általában

olyan ütemezésben és geometriában kerültek beépítésre, hogy ne csak a reológiai folyamatok ellenőrzésére, hanem már a vágathajtás kapcsán kiváltott, tranziens deformációs folyamatok nyomon követésére és leképezésére is alkalmasak legyenek. „Tranziens” deformációs szakasznak mechanikai értelemben azt tekintjük, ahol közvetlen összefüggés tapasztalható a mért értékek, valamint a mérőhely és az aktuális vágóvég távolsága között (más szóval, ahol az elmozdulásokat elsődlegesen a hely és nem az idő függvényében lehet leírni). E megfogalmazás szerint tehát a tranziens szakasznak ott van vége, ahol a vágathajtás hatására a kőzetköpenyben mérhető longitudinális deformációs profil (LDP) aszimptotikusan közelít a maximális értékéhez. Kontinuummechanikai megközelítésekre támaszkodó elméleti levezetések szerint [pl. Hoek et al. (1995), Hoek (2000)] egy körszelvényű, D mértékadó méretű vágat esetében általában 2D az a távolság, ahol ez a feltétel már teljesül. Ezt követően tehát a vágatköpenyben mérhető elmozdulások elméletileg már nem függhetnek a vágóvég aktuális helyzetétől. Amennyiben ennél nagyobb vágóvég-távolság esetében is mérünk deformációkat, úgy azokat már nem tranziens (ebben az értelemben helyfüggetlen), hanem reológiai (időfüggő) jellegűeknek tekinthetjük.

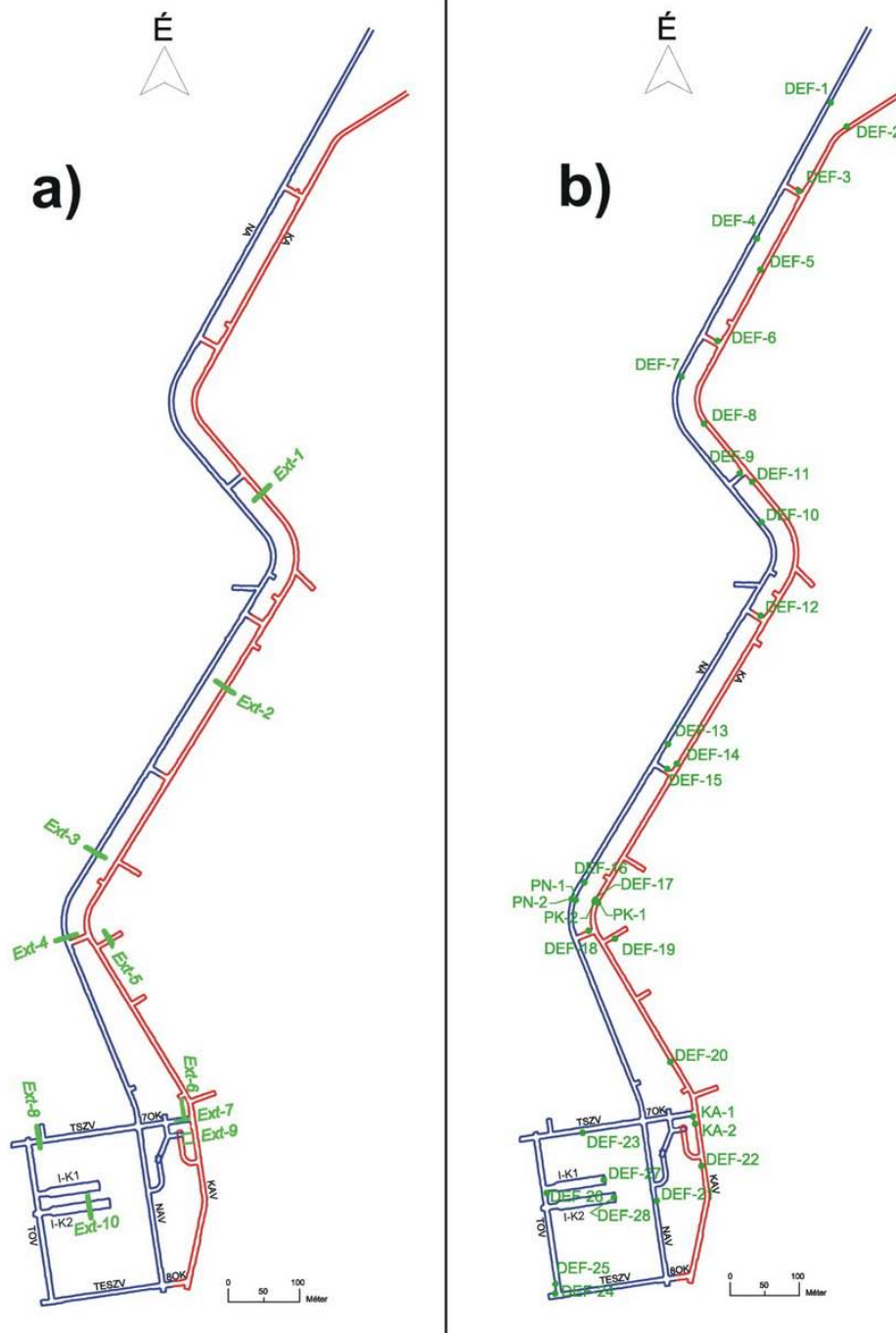
Az NRHT-ban a tranziens folyamatok mérésére telepített mérőrendszerek közül a többpontos *fűrőlyuk-extenzométerek* és – legalábbis részben – a *mechanikai konvergenciamérő szelvények* is alkalmasnak bizonyultak monitoring-jellegű üzemeltetésre, tehát arra, hogy általuk a reológiai deformációs folyamatokról is képet lehessen kapni. Az extenzométeres szelvények telepíthetők ún. sugaras és elhaladásos elrendezésben is. E szelvények geometriáját, műszer- és méréstechnikai hátterét a Kovács et al. (2012) dokumentum mutatja be. A Bátaapátiban alkalmazott ún. nyomott rudas konvergenciamérési módszerrel kapcsolatos legfontosabb információkat a Kovács & Bogár (2010) cikkben közöltük. Mindkét említett méréstípussal a kőzetköpenyben radiális irányban fellépő elmozdulásokat lehet elsősorban meghatározni (bár az extenzométerek axiális elrendezésben is telepíthetők). Technikai okok miatt ezek a mérőhelyek azonban az igazán hosszú, az NRHT főfeltáró térségeinek akár 120-130 éves nyitvatartási idejét is kiszolgáló monitoring-rendszer részeként csak korlátokkal alkalmazhatók. Az extenzométerek esetében ugyanis a szenzorok általában nem cserélhetők, így meghibásodásuk esetén az adott mérőhely tovább nem üzemeltethető. A konvergenciamérő szelvények mérése igen munkaigényes feladat, így ezeket praktikus okokból nem célszerű bevonni az NRHT teljes élettartamát lefedő monitoring-elemek közé.

Az ún. *deformációmérő háromszöges állomáshálózat* minden vonatkozásban eltér az említett mérőhelyektől. Ezek az állomások a falazat síkjában fellépő axiális, illetve tangenciális elmozdulások monitorozására alkalmasak. Az állomások működése a mérőbéllyeges-mérőnyelves deformációmérési technikán alapul. A módszer lényege, hogy a kőzetfalba 1,5 m mélységben becementált, stabil helyzetű mérőcsapok távolságának változását egy olyan, a mérési irányra merőlegesen beépített mérőnyelv segítségével kell mérni, amit egy merev, de az adott irányban szabadon mozgó rudazat deformál. A mérőnyelvre ragasztott mérőbéllyegek, illetve az elektronikus mérőműszeren beállítható ellenállások Wheatstone-hidas elrendezést alkotnak, amelynek hibaaránya arányos a nyelv deformációjának mértékével. A mérőműszeren – megfelelő kalibráció után – 10^{-6} m/m egységben közvetlenül leolvasható a nyelv fajlagos deformációja, amely az egyes nyelvek előzetes laboratóriumi hitelesítése alapján átszámolható a csapok közötti abszolút, illetve fajlagos távolságváltozássá. A robbantások miatt a deformációmérő állomások a tranziens időszakban még nem kerülnek felszerelésre, telepítésük kizárólagos célja tehát eredetileg is a hosszú távú (akár egy évszázadon túl is) deformációs monitoring feladatainak ellátása volt. A mérőhelyek technikai kiépítése és az alkalmazott szenzortípus a hosszú távú üzemeltetés szempontjainak megfelelően került kiválasztásra. A háromszögekben a szenzorok egyszerűen, gyorsan és a referenciapontok elhangolódása nélkül cserélhetők. Bátaapátiban kizárólag ezek a geotechnikai mérőhelyek rendelkeznek ilyen adottságokkal.

Az extenzométeres és a deformációmérő háromszöges mérőhelyek esetében az alkalmazott szenzorok felbontása 10^{-6} m/m, tehát ezekkel a fellépő deformációs folyamatok igen nagy pontossággal határozhatók meg. A konvergenciamérő szelvények felbontása ennél egy nagyságrenddel alacsonyabb.

Az említett mérőhelyek alkotta hálózat 2006 óta, a vágatrendszer kiterjesztésével párhuzamosan folyamatosan bővül. Az eddig telepített 10 db extenzométeres szelvény (mely szelvényenként 3-6 db, általában 5 mért pontos fűrőlyuk-extenzométerből áll) elhelyezkedését az 1. ábra a) képe mutatja be. A deformációmérő háromszöges állomáshálózat jelenlegi kiépítése az 1. ábra b) képen látható. Az üzemelő 28 db háromszöges mérőhely (DEF-01...DEF-28) mellett az ábra bemutatja a már megfigyelhető tönkremeneteli jelenségek ellenőrzésére telepített, hasonló technikára alapozott egyedi mérőhelyeket is (PN-1,-2, PK-1,-2 és KA-1,-2).

Minthogy az alábbiak szerint a konvergenciamérő szelvények reológiai szempontból történő értékelhetősége meglehetősen korlátozott, ezért e mérőhelyek összefoglaló telepítési térképének közlésétől eltekintettünk.



1. ábra. Az NRHT felszín alatti térségeibe telepített extenzométeres szelvények (a), illetve háromszöges és egyedi elrendezésű deformációmérő állomások (b) (*Extensometer sections (a) and triangular or custom designed deformation monitoring stations (b) installed in the underground openings of NRWR*)

2.2 A geotechnikai megfigyelő hálózat reológiai szempontból értékelhető eredményei

Az egyes mérőhelyek, illetve mérőhely-csoportok tranziens időszakban mért adatairól egyedi jelentések készültek, amelyek általában tartalmazzák az első reológiai mérési időszak adatait is. E mérési adatok legutóbb a Csapó et al. (2012) és a Kovács et al. (2012) jelentésekben kerültek rögzítésre és integrált értelmezésre. Az alábbiakban e dokumentumok alapján foglaljuk össze a legfontosabb reológiai megfigyeléseket.

2.2.1 Konvergenciamérő szelvények

A konvergenciamérő szelvények csak a tranziens időszakot követő 5-7 hónapon át (szelvényenként általában 5-6 db reológiai méréssel) működtek. Az eddig telepített 14 db konvergenciamérő szelvény közül 10 szelvény esetében elmondható, hogy a monitoring-időszak végére irányonként észlelt

konvergenciaszintek csak alig (általában mintegy 15 – 30 %-os mértékben) haladták meg a vājvég két-szeres vāgatātēmēronyi tāvolsāgra tōrtēnō elhaladāsa utān, tēhāt a tranziens idōszak vēgēn mērt szinteket. Ezeken a szelvényeken a stabilizālōdās viszonylag gyorsan és magas szinten ment vēgbe. Ezt követően a mērt idōsorokon legfeljebb a szezonālis hōmērsékleti hatāsok szuperpoziciōja vōlt ērzēkelhetō. Hangsúlyozni kell, hogy a vāgat kerületi pontjain telepített konvergenciamērō csapok 55 cm hosszūak, így azok legmēlyebb pontja – a lōttbeton vastagsāgāt is figyelembe vēve – mindōssze 35-45 cm mēlyen kerūlt beépítésre a kōzetkōpenybe. Ez a mēlység a pakkeres EDZ-tesztek szerint mēg a jōvesztēs āltal roncsolt zōnāhoz tartozik. Így ez a megfigyelēs teljes ősszhangban van azzal a szakirodalmi adattal, miszerint az űreghez kōzeli, roncsolt zōna deformāciōs folyamatai viszonylag gyorsan lejātszōdnak.

Az említett nēgy kivēltet a Keleti Alapvāgat és a 7. Ősszekōtō vāgat keresztezōdēsi zōnājāban telepített KON-7 és KON-8, valamint a tārōlōkamrāk nyaktagjaiban telepített KON-13 és KON-14 jelű szelvények jelentettēk, amelyeknēl a stabilizālōdās folyamat jelentōsen megnyūlt. Mindezt elsősorban a szelvények tōbbitōl eltērō telepítēsi kōrűlmēnyei indokoljāk: e szelvényeknēl a mechanikai folyamatokat befolyāsōlō kōrűlmēnyek a megfigyelēs idōszakāban nem maradtak āllandōk. Ez azt jelenti, hogy a szelvények kōrnyezetēben a reolōgiai idōszakban tōvābbi jōvesztō robbantāsokra is sor kerūlt.

Mindezek miatt elmondhatō, hogy a tōbbi mērēsi mōdszernēl rosszabb felbontōkēpessēgű konvergenciamērō szelvények adatai alapjān jelentōs mērtékű és tartōs utōlagos mozgāsokat nem lehetett kimutatni.

2.2.2 Extenzomēteres szelvények

Az eddig telepített 10 db extenzomēteres szelvény kōzűl 8 olyan vōlt, amelyben hosszabb tāvū mērēsekre is sor kerūlt (az elhaladāsos jellegű Ext-6 és Ext-7 szelvényeket a tranziens mērēs vēgeztēvel fel kellett számolni). Ezek kōzűl 7 db szelvény 21 – 33 m²-es szabad szelvényű vāgatszakaszokon, mīg az Ext-10 jelű szelvény a tārōlōkamra mintegy 96 m² szabad szelvényēben kerūlt telepítésre.

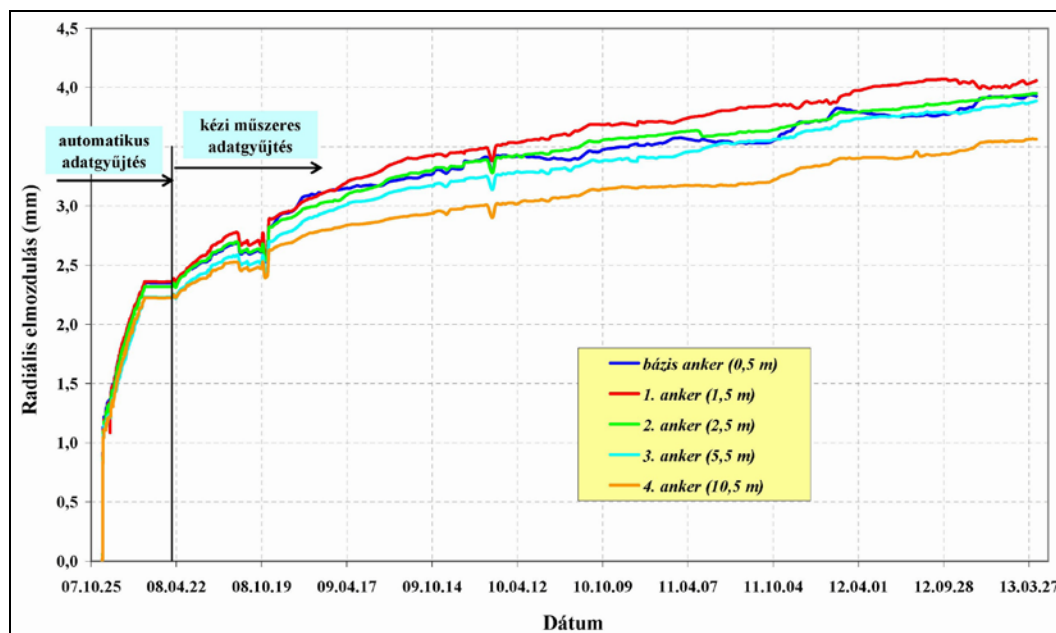
A mērēsi eredmēnyek leginformativabb mōdon idōsoros diagramok formājāban jelenīthetōk meg, ezekbōl azonban itt – terjedelmi kōrlātok miatt – pēldaként csak egyet mutatunk be. A Bx-41 jelű extenzomēter 2. ābrān kōzōlt idōsora jōl mutatja, hogy a teljes stabilizāciō az eddigi mintegy 5,5 ēves megfigyelēs idōszakban sem következett be.

Mivel a tōbb extenzomēterrel pārhuzamosan is lefolytatott konvergenciamērēsok szerint a vājvég eltāvōlodāsātōl számított legkēsőbb 1-3 hōnapon belűl a legkűlsō kōzetkōpeny teljesen stabilizālōdik (ezt követően legfeljebb csak a hōmērsékleti deformāciōk ismerhetōk fel), ezért az első ērtelmezēsok szerint [Kovács & Somodi (2009)] felmerűlt a gyanű, hogy az extenzomēterekben alkalmazott szenzorok illetve a mērō- és adatgyűjtō rendszer hosszū tāvū stabilitāsa nem kielēgītō. Az elhangolōdās (drift) jelensēgek sajátossāga, hogy idōvel egyre intenzīvebben jelentkeznēk; egészen az alkalmazott szenzor teljes tōnkremenetelēig. A tōvābbi űzemeltētēs sorān begyűjtōtt adatok alapjān azonban ezt az eshetōsēget ki lehetett zārni. Idōkōzben a szenzorok gyārtōja, az amerikai GEOKON hosszū tāvū tesztmērēsokkal és szakirodalmi publikāciōkkal [pl. MacRae & Simmonds (1991)] igazoltāk, hogy ilyen szintű drift-jelensēgek a rezgōhűros szenzorok esetēben elkēpzeltetlennēk. Arra is felhīvtāk a figyelmet, hogy a szenzorok alkalmazott telepítēsi geometriāja mellett, ha fel is lēpett volna bārmilyen drift-jelensēg, űgy az ēppen az ellentētes irányban mōdosītotta volna a mērhetō ērtēkeket.

Noha a mērhetō elmozdulās sebessēgek āltalāban 2-3 ēv elteltēvel mindenhol jelentōsen csōkkenni kezdtek, ām a hosszū tāvon jelentkező stabilizālōdās nem minden extenzomēter esetēben bizonyult ugyanolyan jellegűnek és mērtékűnek. A tōvābbi extenzomēteres mērōhelyek reolōgiai viselkedēsének bemutatāsa ērdekēben ősszevetettük egymāssal az egyes extenzomētereken a tranziens idōszakban, illetve a teljes megfigyelēs idōszak vēgēig mērt maximālis elmozdulāsokat, megadva ezek szāzalēkos arányāt. Ezen tūlmenően azt is megvizsgāltuk, hogy bekövetkezett-e mār a teljes stabilizāciō az extenzomēterek egyes ankerein. Amennyiben nem, űgy az utolsō 1 ēvre vonatkoztatva kiszāmítottuk a reolōgiai idōszakban maximālis elmozdulāst szenvedō anker mozgāsának sebessēgēt is. A valamennyi extenzomēterre vonatkozōlag ezen adatokat tartalmazō teljes tāblāzatot a Kovács et al. (2012) dokumentum tartalmazza.

A fentiek szerint számított adatok szerint az extenzomēterek két fō csoportba sorolhatōk. Azon extenzomēterek elmozdulās-idōsoraira, ahol a stabilizālōdās mostanra mār vēgbement, csak a szezonālis termikus deformāciō szuperponālōdik. A mērōhelyek kōzel felēnēl azonban a telepítēs követően mēg ēvekkel kēsőbb sem lehet teljes stabilizālōdāsrōl beszēlni. E mērōhelyek esetēben most is megfigyelhetō az elmozdulāsok szigorűan monoton nōvekvō jellege; ezeknēl az elmozdulās sebessēge āltalāban jelenleg is nēhāny tized mm/ēv nagysāgrendű. A vāgatkōpeny elmozdulāsai tēhāt tōbb ēves idōtāvlatban sem szűnnek meg teljesen mindenhol. A lētesitmēny akár 120-130 ēvre tervezett nyitva

tartási idejét figyelembe véve ez a folyamat bizonyos pontokon akár a teherbírás kapacitás kimerüléséhez is vezethet.

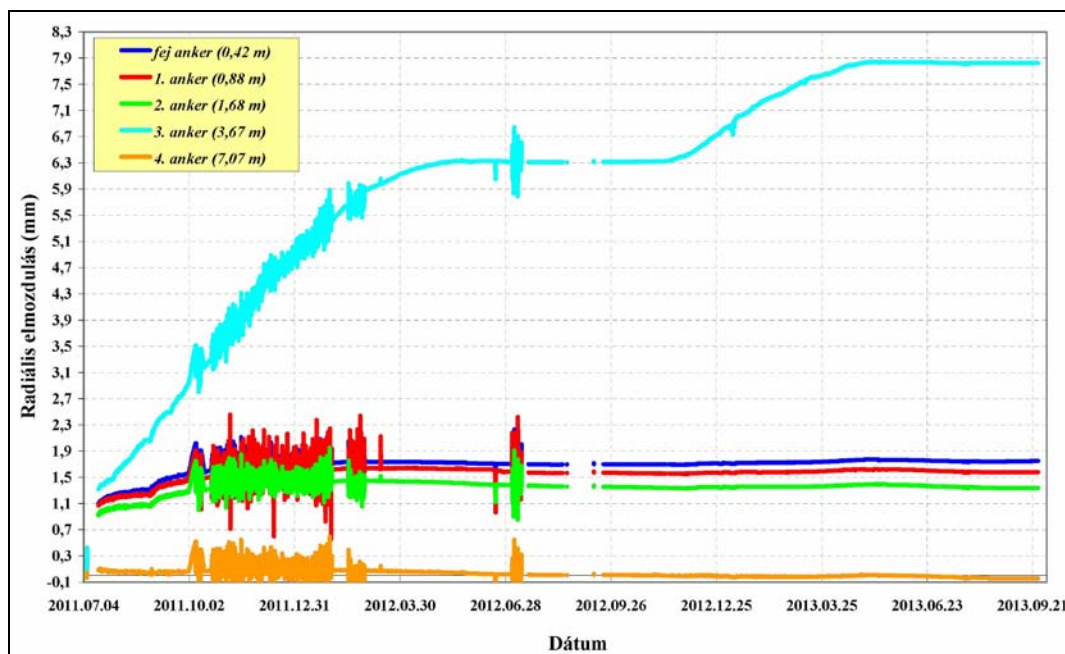


2. ábra. A Bx-41 jelű extenzométer hosszú távú megfigyelési eredményei (*Long term monitoring results of Bx-41 extensometer*)

A másik igencsak szembeötlő tény az, hogy a váratlanul alacsony szintű tranziens elmozdulási értékeket követően a hosszú távú monitoring során szinte valamennyi extenzométer esetében – még a legmélyebben telepített ankeroknál is – fellépett egy konzekvens elmozdulás-növekmény, ami mindig azonos értelmű volt a tranziens időszakban megjelenő trendekkel. Egyes esetekben az utólagos növekmény akár több száz százaléka is lehetett a tranziens időszakban mért értékeknek. Ilyen folyamat játszódtott le például az I-K2 tárolókamra főtéjében telepített Bx-102 extenzométer 3. ankerén is, ahol a tranziens időszakban felvett, mintegy 1,4 mm elmozdulást követően a kumulált érték – mindennemű további vágathajtási tevékenység nélkül – 2013. nyarára már megközelítette a 7,9 mm-es szintet (ld. a 3. ábrán). Ez az extenzométer – amellet, hogy ez az I-K2 tárolókamrában található – különösen azért érdemes kiemelésre, mert itt az említett elmozdulás-növekmény nem folytonosan, hanem két külön fázisban épült ki. Mindkét fázist egy-egy stabilizálódó szakasz követett ugyan, ám az előzmények ismeretében mégsem állítható, hogy most már sor került a végleges stabilizálódásra.

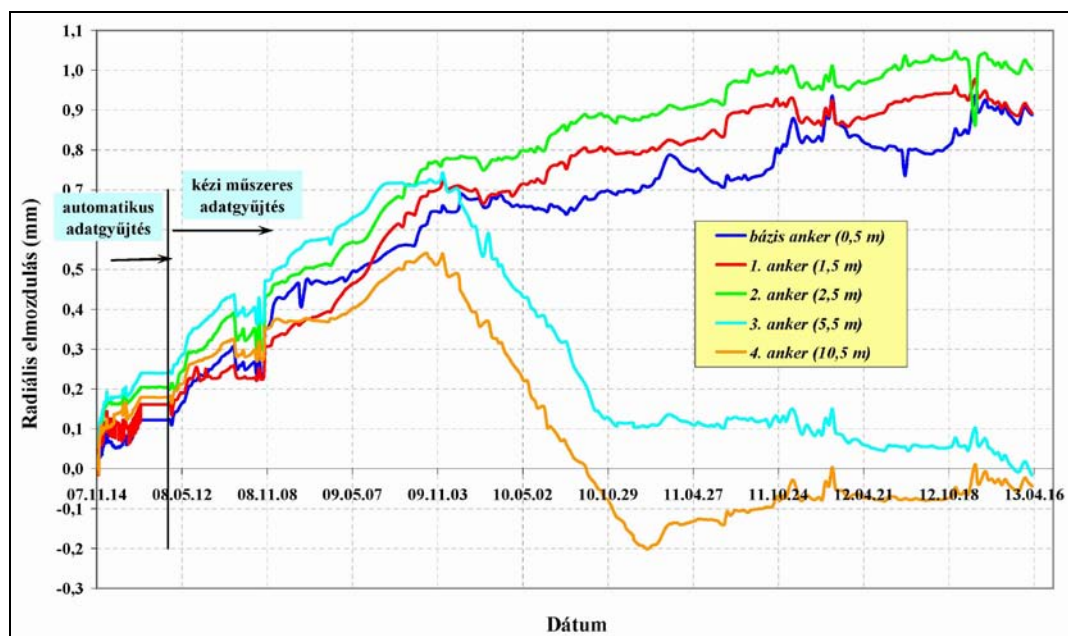
Az extenzométeres adatok értelmezéséhez ki kell emelni azt a tényt, hogy a tranziens időszakban az extenzométerekkel mért radiális elmozdulások igen alacsony szintűek voltak (néhány tized mm-től legfeljebb 2 mm-ig). A mért kumulált elmozdulás-értékeknek a vártnál alacsonyabb értéke döntő részben annak tudható be, hogy az egyes extenzométeres szelvények és az induló vágvégek között általában 2,0 - 3,0 m volt a távolság. Ahogy azt az elhaladásos rendszerű Ext-6, Ext-7 és Ext-9 mérési szelvények eredményei egyértelműen igazolták, ilyen sugaras geometria mellett a fellépő elmozdulásoknak legfeljebb mintegy 25 - 30 %-a válik mérhetővé. A jelenség másik oka az lehet, hogy a szelvény telepítése előtt az aktuális vágvépig a végleges biztosítószerkezeteket is beépítették a szelvény környezetében, sőt – a szelvénytelepítés több hetes időigénye miatt – a vágathajtás újraindításáig a löttbeton héjszerkezet szilárdsága már megközelítette a végső szilárdsági értéket is. A közet-horgonyzás és ez a merev héjszerkezet tovább korlátozta a közetköpeny elmozdulását.

A bemutatott mérési eredményekre a fentiek miatt csak egyetlen racionális magyarázatot lehet adni. Az aktuális vágvégtől 2,0 - 3,0 m-re hazafelé telepített sugaras extenzométeres szelvények esetén a meg-szilárdult löttbetonból és közet-horgonyokból álló, szisztematikusan alkalmazott biztosítószerkezet rövid távon a korábban feltételezettnél lényegesen jobban gátolja a radiális elmozdulásokat, de hosszabb távon – a vágat körül kialakuló közetötvvel együttműködve – olyan reológiai testként viselkedik, amelyben a kúszási és relaxációs folyamatok néhány esetben csak több év alatt zárulnak le.



3. ábra. A Bx-102 jelű extenzométer hosszú távú megfigyelési eredményei (*Long term monitoring results of Bx-102 extensometer*)

Már a tranziens időszakban is a legtöbb extenzométer esetében megfigyelhető volt, hogy a vágatköpenytől való távolság függvényében ábrázolt elmozdulás-értékek lefutása szabálytalanul alakult, sőt számos alkalommal az egyes ankerok az elméleti várakozásokkal ellentétes – definitíve negatív – irányban mozdultak el. A szabályos eloszlás ritka kivétel volt. A hosszú távú üzemeltetés során több esetben az is előfordult, hogy az egyes ankerok időszoraiban hirtelen trendváltás állt be. Az egyik legjellemzőbb ilyen példát a Bx-44 extenzométer időszora szolgáltatja (ld. a 4. ábrán). Az ábrán az is jól megfigyelhető, hogy a trendváltás időpontjában a többi anker elmozdulás-görbéjének meredeksége is megváltozik. (Hasonló, egyelőre még nem lezárt folyamatok indultak meg az I-K2 kamrában telepített Bx-103 extenzométer esetében is.)



4. ábra. A Bx-44 jelű extenzométer hosszú távú megfigyelési eredményei (*Long term monitoring results of Bx-44 extensometer*)

Ezek a jelenségek szintén azt a feltételezést erősítik meg, hogy a vágatok közetköpenyében hosszabb távon is folyik a terhelési viszonyok átalakulása. Ez egyes esetekben az EDZ-ben fellelhető diszkontinuitások nyírószilárdságának kimerüléséhez vezet, így egyes közetblokkok elmozdulhatnak, elfordulhatnak és új egyensúlyi állapotba kerülhetnek. Ez egyrészt azt jelenti, hogy a vágat körüli közetöv egy „élő”, dinamikus egyensúlyban lévő közeg, másrészt pedig azt, hogy ezek az anomális jelenségek valós földtani-tektonikai okokra vezethetők vissza.

2.2.3 A háromszöges és egyedi elrendezésű deformációs mérőhelyek

Ahogy az az 1. ábra b) képen is látható, a *deformációmérő háromszögeket* az NRHT vágatrendszerében nem egyenletes kiosztásban telepítették. Minden mérőhelynek specifikusan meghatározott telepítési célja volt, ami majdnem minden esetben valamilyen kedvezőtlen földtani-tektonikai jelenség megfigyeléséhez, elágazás, illetve lokális alulbiztosítási zóna megfigyeléséhez kötődött. (Az egyes vájvégek geotechnikai dokumentálása alapján meghatározott biztosítási kategória elvileg akár fogásonként változó biztosítási rendszer kialakítását tenné szükségessé. Erre a gyakorlatban azonban – technológiai okokból – nincs lehetőség, hanem egy hosszabb szakaszon egységes biztosítási rendszert kell alkalmazni. Lokális alulbiztosításról tehát akkor beszélhetünk, ha valamely vájvég geotechnikai dokumentálása alapján meghatározott biztosítási kategóriához viszonyítva lokálisan „gyengébb” biztosítószerkezet kerül beépítésre.)

A háromszöges mérőhelyekkel kapcsolatos eddigi tapasztalatok szerint a tranziens időszakon túli, időfüggő deformációs folyamatok három fázisra oszthatók fel [Kovács et al. (2012)]:

- Az első, ún. „helyezkedési” időszakban a mérőhely a beépített biztosítószerkezettel együtt dolgozó, mechanikailag módosult adottságú térrész új egyensúlyi állapotának időben elhúzódó kialakulását képezi le. Ez részben a biztosítószerkezetek (elsősorban a löttbeton) karakterisztikájának időfüggésével, részben a termikus állapotváltozásokkal is összefüggő jelenség, de alapvetően a reális, diszkontinuus kőzetek reológiai jellemzőivel magyarázható. (Hasonló következtetések voltak levonhatók az extenzométeres szelvények már ismertetett mérési adatsoraiból is.) A mérőhelyek idősorain ez a szakasz egy kezdetben jelentős sebességű, majd aszimptotikusan lassuló jellegű deformációs képként jelentkezik.
- A következő, néhány éves, vagy akár néhány évtizedes időszakban stabil egyensúlyi állapot figyelhető meg. Ahol nincs biztosítási probléma, ott ez az állapot hosszabb távon is tartós marad.
- Az ezt követő harmadik fázisban – a létesítmény tervezett nyitvatartási idején belül nem szükségképpen – a terhelések és a teherviselő képesség aránya ismét elérheti azt a határt, ahonnan időben fokozatosan gyorsuló, akár a tönkremeneteli állapothoz is vezető deformációk figyelhetők meg. Ebben a fázisban a maximális és a minimális kumulált deformációk abszolút értéke ismét emelkedő trendet vesz fel, és a görbék ollószerűen kezdenek távolodni egymástól.

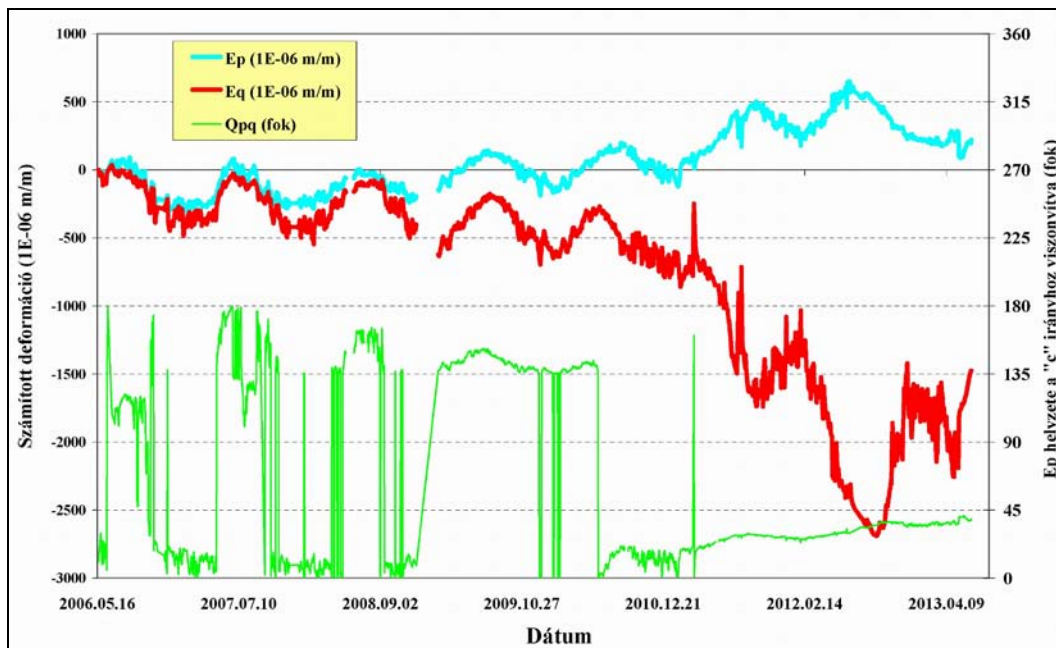
Szembeötlő tény, hogy a fentiekben leírt három fázis a laboratóriumi körülmények között, tartós terhelési teszteknek kitett kőzetminták deformációs idősorain is megjelenik. A tartós terhelés hatására ott sem következik be mindenképp a tönkremenetel, csak egy terhelési küszöbérték felett. Diederich & Martin (2010) szerint egy egytengelyű törési teszt esetében meghatározható az az ún. CD terhelési küszöbszint, ami felett a tartós terhelést fenntartva a kőzetben a mikrorepedések továbbterjedése és összeolvadása nem áll le, tehát a tönkremenetel előbb-utóbb bekövetkezik. Deák et al. (2013) szerint ez az átlagos CD érték a Mórággyi Gránitból származó intakt kőzetminták esetében az egytengelyű nyomószilárdság 82%-a (monzonit minták), illetve 88%-a (monzonit minták). Hangsúlyozni kell azonban, hogy ezek az értékek az ISRM ajánlások szerint elvégzett normál (állandó felterhelési sebességű) terhelési tesztekben származnak. Feltételezhető, hogy tartós terhelési tesztek esetében ez a CD határérték alacsonyabbra adódik.

A tárolókamrák kiviteli terve [Benkovics et al. (2010)] a deformációmérő háromszögekre is meghatározta a kumulált fődeformációra, illetve a deformációnövekmények sebességére vonatkozó figyelmeztetési, beavatkozási és riasztási szinteket. A Csapó et al. (2012) monitoring jelentés függelékében megtalálható idősorok szerint, bár a deformációmérő háromszögek kumulált fődeformációi általában még a megadott figyelmeztetési határértékek alatt vannak (ez sem minden mérőhelynél van így), a teljesen stabil, legfeljebb az éves hőmérsékletjárás szezonális deformációs hatásait mutató szakasz egyes mérőhelyeknél már véget ért. Ahogy az alábbiakban bemutatott jellemző példák is látható, a deformációmérő háromszögek egy részénél már az eddigi 2-7 éves működés során is beléptünk a fentiek szerinti 3. fázisba.

A DEF-05 jelű deformációmérő háromszög egy lokális alulbiztosítással kialakított vágatszakaszban üzemel, annak stabilitási tulajdonságait vizsgálja. Az állomás adatsorain a 2006. májusi indítási dátumtól kezdődően egészen 2011. közepéig jobbra csak a szezonális jellegű, mintegy 300-400 $\mu\text{m}/\text{m}$ amplitúdójú termikus deformációk jelentkeztek; azokra csak kis mértékben szuperponálódott egy konzekvens deformációs trend (ld. az 5. ábrán). 2011. közepétől aztán a deformációs folyamatok jelentős mértékű intenzifikálódása figyelhető meg, főképp a minimális fődeformációs értéke(ϵ_q) vonatkozásában. Az adatsor egészen addig a deformációs folyamatok gyorsulását mutatta, amíg az állomás környezetében, a löttbeton falazaton meg nem jelent egy kisebb repedés. Ettől kezdve az idősor jellege kissé megváltozott: mintha egy új, átmeneti egyensúlyi periódus kezdődött volna meg.

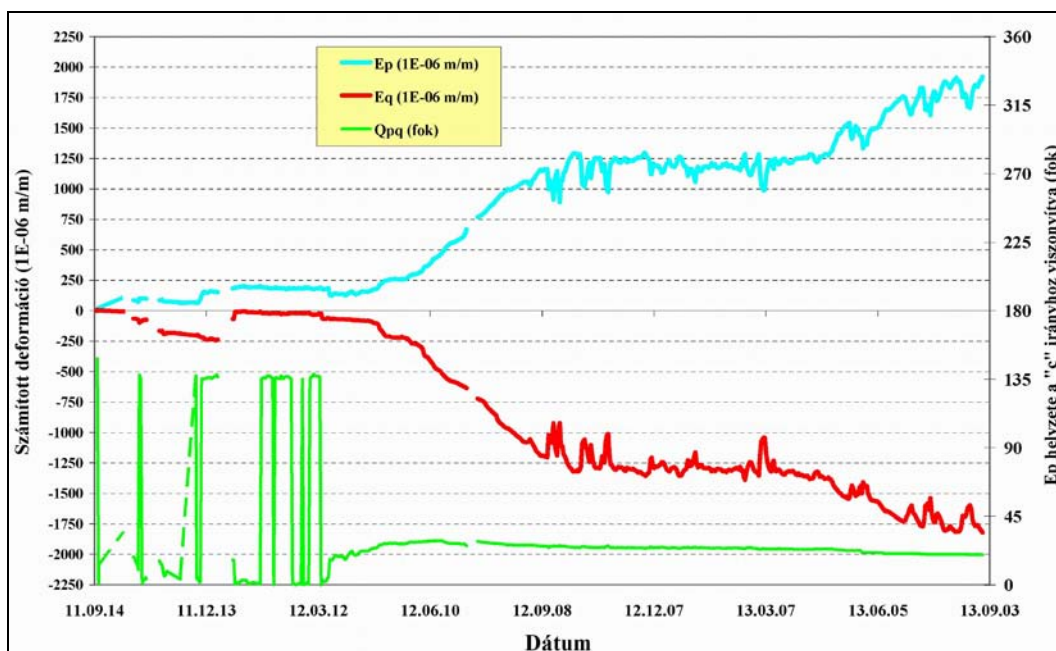
Kiemelésre érdemes, hogy a Benkovics et al. (2010) kiviteli tervben – a korábbi monitoring-üzemeltetési tapasztalatokra alapozott javaslatunk alapján – a figyelmeztetési szintet a következőképpen határozták meg: Figyelmeztetési szintet elérő deformáció a háromszöges mérőhelyeken akkor je-

lentkezik, ha a kumulált maximális fődeformáció (ϵ_p) a 4.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ értéket, vagy a kumulált minimális fődeformáció (ϵ_q) a -2.500 $\mu\text{m}/\text{m}$ értéket éri el. Az 5. ábra szerint az új repedés hozzávetőleg -2700 $\mu\text{m}/\text{m}$ ϵ_q értéknél következett be.



5. ábra. A DEF-05 jelű háromszöges mérőhely számított deformációs idősorai (*Calculated deformation time series of the DEF-05 triangular monitoring station*)

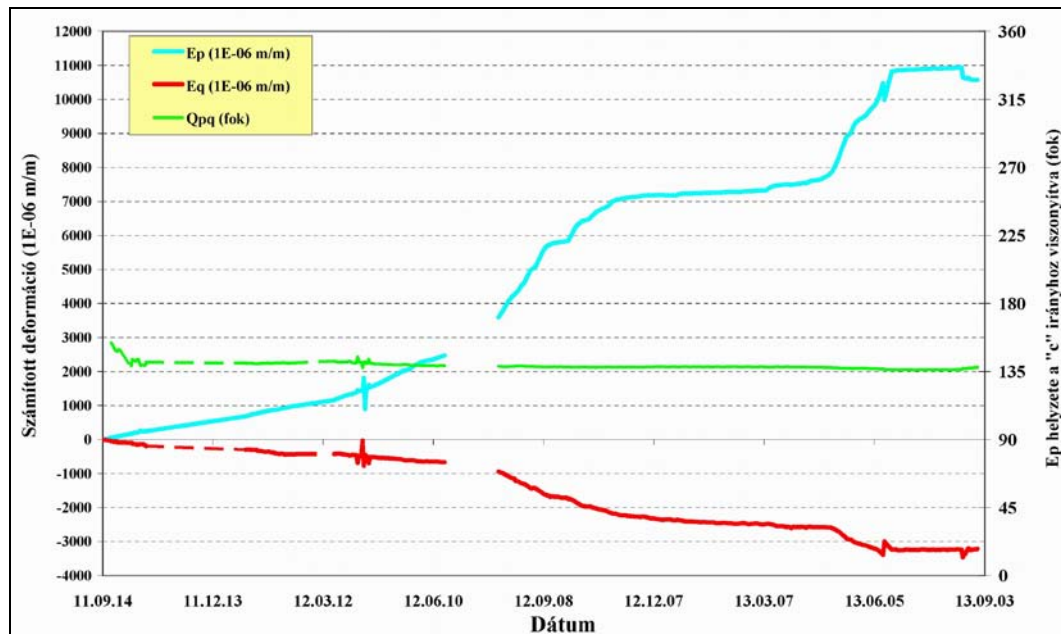
A DEF-22 jelű deformációmérő háromszöges mérőhely elsősorban az ún. Patrik-törés agyagos breccszóna-harántolásának ellenőrzését szolgálja. Az állomás környezetében felerősödött vízelépési helyek (szivárgás, erős csepegés) találhatók. A telepítési helyszín környezetében a vágatfalon és a fötén is repedések alakultak ki. A 2011. szeptemberi telepítést követően az állomás 2012 áprilisáig nyugalomban volt, ezt követően azonban a deformációs folyamatok hirtelen felerősödtek (6. ábra). A 2012 szeptemberében elvégzett kisebb bányászati, illetve víztelenítési beavatkozások hatására ez a folyamat átmenetileg megállt, majd néhány hónap elteltével újraindult.



6. ábra. A DEF-22 jelű háromszöges mérőhely számított deformációs idősorai (*Calculated deformation time series of the DEF-22 triangular monitoring station*)

A DEF-23 jelű deformációmérő háromszöges mérőhely az ellenőrzött zónában, egy trachandezit telér és az I. kamramező K-i pásztájában a kamratelepítés határvonalát is jelentő ún. K-i vízföldtani határszerkezet (hivatalos nevén: 21-ÉÉNy-DDK törés) kombinált harántolási zónáját ellenőrzi. A kérdéses területen 2010 novemberében, egy injektálási beavatkozást követően már észleltek jelentős mértékű betonrepedéseket, majd később a kérdéses szakasz átbiztosítása is megtörtént. A DEF-23 állomás a

telepítést követő mintegy 14 hónapon át folyamatosan konzekvens irányú, gyorsuló ütemű deformációról adott számot (7. ábra). 2012 októberétől átmeneti, viszonylagos stabilizálódás volt megfigyelhető, majd 2013 áprilisától – minden külső beavatkozás nélkül – ismét jelentős deformációnövekmény lépett fel. Ennek következtében a kumulált fődeformáció már meghaladta a kiviteli tervben beavatkozási szintként rögzített 10.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ határértéket.



7. ábra. A DEF-23 jelű háromszöges mérőhely számított deformációs idősorai (*Calculated deformation time series of the DEF-23 triangular monitoring station*)

A radiális elmozdulásokat mérő extenzométerekkel szemben a falazat síkjának axiális és tangenciális deformációit mérő háromszöges mérőhelyek lényegesen érzékenyebbek a kialakuló tönkremeneteli folyamatokra. Ez nyilvánvalóan annak köszönhető, hogy amíg radiális irányú elmozdulások hatására a falazatban általában nem lépnek fel húzó-igénybevételek, addig a falazat síkjában bekövetkező elmozdulások esetén ez a kedvezőtlen eset – valamilyen irányban – mindig bekövetkezik. A húzási irányokban pedig a kőzeteknek, illetve a betonoknak jóval kisebb a szilárdsági tartaléka, mint a nyomó-igénybevételek esetében. A fentiekben bemutatott deformációmérő háromszögekkel kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy üzemeltetésük és rendszeres ellenőrzésük során környezetükben fokozatosan kialakuló, kinyíló betonrepedéseket lehetett megfigyelni. A vágatrendszerben azonban nem ezek jelentik az egyetlen dokumentált betonrepedést: ilyen repedésekre telepítették a PN-1, PN-2, PK-1, PK-2, KA-1 és KA-2 jelű egyedi deformációellenőrző mérőhelyeket is. Az üzemeltetők ezen túlmenően folyamatosan nyilvántartják és rendszeresen frissítik a betonrepedések jegyzékét, amely mostanra több 10 elemből áll már.

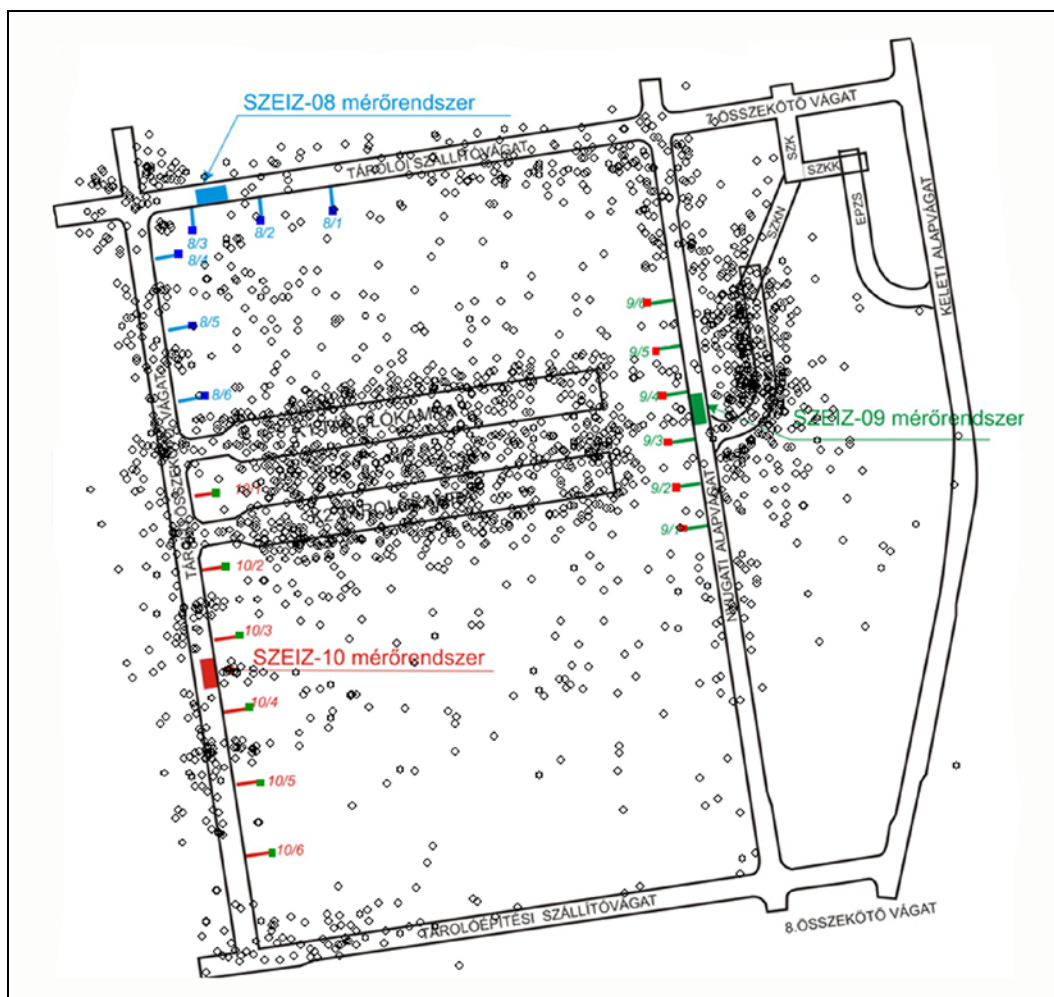
2.3 A geotechnikai megfigyelő hálózat adatainak összevetése a szeizmoakusztikus megfigyelő rendszer adataival

A már említett Diederich & Martin (2010) szerint az egytengelyű törési teszt másik jellegzetes pontját, az ún. CI jelű terhelési küszöbszintet elérve (a lineáris rugalmas tartomány felső határán) olyan repedésképződés indul meg, amely akusztikus emisszióval jár együtt. A mérhető akusztikus emissziós jelszint a terhelés növekedésével először közel lineáris jelleggel, majd a CD jelű küszöbszint elérése után exponenciálisan nő. [Deák et al. (2013) szerint a Mórággyi Gránit kőzetváltozatai esetében a CI küszöbszint átlagosan az egytengelyű nyomószilárdság 31-32%-a körül alakul.] Minthogy a hosszú távú deformációmérések adatai és a laboratóriumi küszöbszintek között a kapcsolatot már sikerült meghatározni, ezért az értelmezés során – a kvázi-statisztikus jellegű, elmozdulás- és deformációmérésre alapozott geotechnikai megfigyelő hálózat mellett – a fentiek miatt mindenképpen célszerű figyelembe venni az in situ szeizmoakusztikus megfigyelő hálózat adatait is, amennyiben erre lehetőség van.

Az NRHT-ban, szintén már a lejtősáknak kihajtásának időszakában megkezdődött a szeizmoakusztikus megfigyelő rendszer telepítése és üzemeltetése. Eddig 10 db komplex mérőrendszer (SZEIZ-01, ..., SZEIZ-10) került kialakításra. Ezek közül a SZEIZ-07, ..., SZEIZ-10 jelű rendszerek a kamramező zónájában jelenleg is üzemelnek.

A szeizmoakusztikus jelek monitoring jellegű folyamatos megfigyelésével leképezhetővé váltak az akusztikus emissziós jelek tér- és időbeli paraméterei (hipocentrum-eloszlás, spektrális jellemzők) is. A 8. ábrán a SZEIZ-08, SZEIZ-09 és SZEIZ-10 jelű rendszerek által a tárolókamrák kihajtása során,

illetve azt követően felvett akusztikus emissziós jelek hipocentrum eloszlása látható [Szűcs & Bakai (2012) nyomán].



8. ábra. A SZEIZ-08-10 jelű szeizmoakusztikus megfigyelő rendszerek által a tárolókamrák kihajtása során, illetve azt követően felvett akusztikus emissziós jelek hipocentrum eloszlása (*Spatial distribution of hypocentres determined from the data gained by SZEIZ-08-10 seismoacoustic monitoring stations during and after the construction of two repository chambers*)

A hálózat üzemeltetésének legfontosabb eredményeit Szűcs & Bakai (2012) alapján az alábbiak szerint foglalhatjuk össze:

- A meghatározott hipocentrumok térbeli eloszlása alapján elmondható, hogy a kamramező térségein belül a legintenzívebb dinamikai folyamatok a vágatkereszteződésekben, a két tárolókamra zónájában, a Tárolóösszekötő vágat és a Tárolói szállítópályát egyes szakaszain, valamint az Ellenőrzött Zsomp geotechnikai szempontból gyengült zónájában mentek végbe (ld. a 8. ábrán).
- A térkiképzés során mért intenzitás-szinthez és gyakorisághoz képest a már kialakított objektumok környezetében a későbbiekben detektálható szeizmoakusztikus jelek csökkenő tendenciát mutatnak. Ez a csökkenés azonban nem monoton folyamat; az egyes csökkenő szakaszokat kisebb intenzitás-növekedések szakítják meg.
- A hosszabb időszakon (éveken) át üzemelő rendszerek tapasztalatai alapján elmondható, hogy az intenzitás-, illetve gyakoriságcsökkenés soha nem a zérus szintet, hanem általában a kezdeti szint harmadát, negyedét közelíti aszimptotikusan.
- A tárolókamrák kihajtása során, illetve azt követően is hasonló a helyzet: a jel-intenzitás és jel-gyakoriság görbék alapján a térkiképzéshez kapcsolódó közzefeszültség-átrendeződés 2012 márciusában, mintegy fél évvel a kamra-hajtás lezárását követően még biztosan nem fejeződött be. Napi átlagban 40-50 db akusztikus eseményt rögzített a rendszer.

A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a szeizmoakusztikus megfigyelő rendszerek adatai teljes összhangban vannak a deformáció- és elmozdulásmérésre alapozott geotechnikai monitoring adatokkal. A vágatok környezetében több éven át is fennmaradó, állandósuló intenzitás- és gyakorisági szintű akusztikus emissziós jelek arra utalnak, hogy a kőzettestre ható terhelési szint sok területen vitathatatlanul meghaladja a CI küszöbértéket. A nagyobb szelvényterületű kamrák, a tektonikai okok miatt gyengült zónák, illetve a vágat-elágazások környezetében fellépő intenzívebb feszültségátrende-

zöldési folyamatok megnövelik az akusztikus emissziós jelek gyakoriságát és intenzitását. Az átmenetileg tapasztalható intenzitásnövekedések lokális tönkremeneteli jelenségek kialakulására, tehát a kérdéses helyeken a CD küszöbszint átlépésére is utalhatnak, ahogy azt egyes deformációmérő háromszögek kapcsán is bemutattuk. A jelszint és a gyakoriság igen lassú csökkenése pedig az extenzométerek igen lassan stabilizálódó elmozdulás-adataival hozható közvetlen összefüggésbe.

3 KÍSÉRLET AZ EXTENZOMÉTERES ADATOK ELMÉLETI REOLÓGIAI MODELLEL VALÓ KÖZELÍTŐ LEÍRÁSÁRA

Az fentiekben ismertetett jelenségek alapján felmerült annak lehetősége, hogy a mért adatrendszer analitikus módszerekkel történő elemzésével vizsgáljuk meg, hogy a kőzetköpeny viselkedése leírható-e valamely standard reológiai modellel. Ennek sikere esetén ugyanis a monitoring-adatsorokból közvetlenül is nyerhetők reológiai paraméterek. Az elemzést a Montavid Termodinamikai Kutatócsoport szakértői (Ván Péter, Fülöp Tamás és Asszonyi Csaba) végezték. Az elemzésbe néhány olyan extenzométerek adatsorait vontuk be, amelyek a fentiek szerint nem, vagy csak jelentős idő elteltével stabilizálódtak (Bx-16, Bx-22, Bx-26, Bx-33, Bx-41, Bx-42 és Bx-44).

3.1 Elméleti háttér – üregnyitás izotróp kontinuumokban

Fülöp & Béda (2010) megadja a hidrosztatikus környezetben nyitott henger alakú vágat körül a deformáció, feszültség, sebesség és elmozdulás időfüggését tetszőleges véges rendű időderiváltat tartalmazó rugalmas reológiai közegmodell esetén. A nemegyensúlyi termodinamika elmélete szerint, ha a közeg belső, strukturális változásait egyetlen szimmetrikus tenzoriális belső változóval jellemezzük, akkor a *tehetetlenségi* Poynting-Thomson-modellt vezethetjük le a reológiai változások jellemzésére [Asszonyi (2006)]. Vagyis, az összes lehetséges véges rendű időderiváltat tartalmazó reológiai modell közül ez adja a legegyszerűbb, termodinamikailag teljes és a második főtételeknek megfelelő reológiai anyagtörvényt. Ha a leggyorsabb tranzienstől eltekintünk, akkor az anyagtörvény a klasszikus Poynting-Thomson anyagmodellre egyszerűsödik. Ezek az elméleti érveken felül több évtizedes bányászati tapasztalat mutatja, hogy ez az anyagmodell kielégítően jellemzi a vágatok és alagutak hosszútávú időbeli folyamatait [Asszonyi et. al. (1980)]. Fülöp és Béda (2010) szerint ezzel az anyagtörvénnyel jellemzett kőzetkontinuumban történő vágatnyitás esetén az elmozdulásmező időfüggése a következő:

$$u_r(r, t) = -\frac{p_0}{2G} \left[1 - \frac{\eta - \tau G}{\eta} e^{-\frac{G}{\eta}(t-t_{ny})} \right] \frac{R^2}{r}, \quad (1)$$

ahol r a vágat falától mért távolság, t az idő, t_{ny} a vágatnyitás időpontja, R a vágat sugara, p_0 a primer hidrosztatikai nyomás, G a nyírási modulus, η a viszkozitás, τ pedig a feszültségkésések relaxációs ideje. Ez a megoldás egy $t_{kúszás} = \eta/G$ karakterisztikus idejű exponenciális csillapodást ír le. Ez a képlet az alapja az extenzométeres mérések kiértékelésének.

Az alagút hengertől eltérő geometriája, a kőzethorgonyzás és a löttbeton hatása, valamint az anizotrop és inhomogén in-situ feszültségkörnyezet miatt a fenti formula $1/r$ -es távolságfüggése csak alkalmas módosításokkal alkalmazható a mért adatokra. Az időfüggést viszont sokkal kevésbé befolyásolják ezek a körülmények. Ezért a kiértékelés céljára az (1) képlethez képest általánosabb helyfüggést engedtek meg, az időfüggést viszont az (1) képlet szerintinek tekintették. Számottevő továbbá a hőmérséklet hatása, mely elsősorban a mérőpont helyzetétől, illetve a kőzettömeg hővezető és hőtágulási tulajdonságaitól függ, és várhatóan egy éves periodikusságú változást szuperponál az exponenciális kúszásra.

Ezek alapján az extenzométeres adatokat a következő formula illesztésével értékelték ki:

$$u_{ill.}(t) = A \left[1 - e^{-\frac{t-t_0}{t_{kúszás}}} \right] + B \sin \left(\frac{2\pi}{t_h} t - \varphi \right), \quad (2)$$

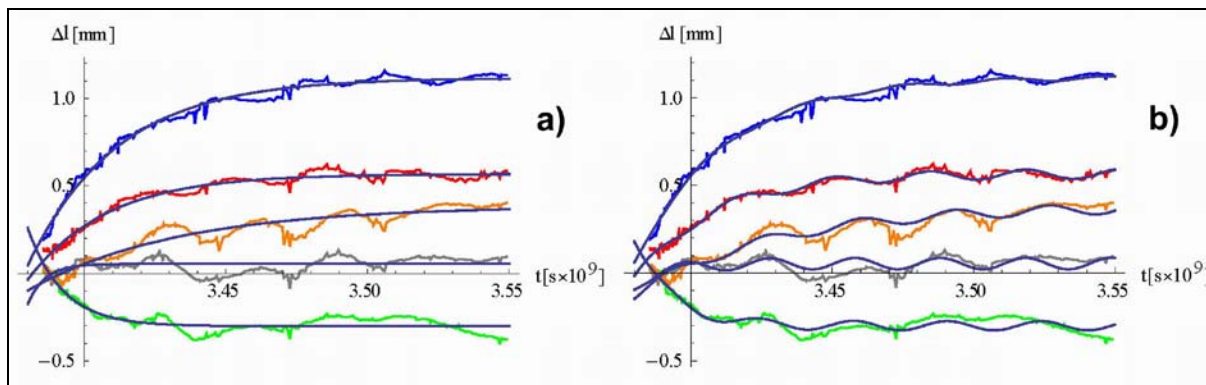
ahol A a kúszás aszimptotikus amplitúdója, $t_{kúszás}$ a karakterisztikus ideje, t_0 az effektív kezdeti ideje, továbbá B a hőtágulás amplitúdója, t_h a periódusideje, φ pedig a fázisa. Felírható továbbá a következő összefüggés is:

$$\left(e^{\frac{t_0}{t_{kúszás}}} = \frac{\eta - \tau G}{\eta} e^{\frac{t_{ny}}{t_{kúszás}}} \right) \quad (3)$$

3.2 Az elemzés gyakorlati kivitelezése és az eredmények

Az elemzések előkészítéseként a kezdeti, a hosszú távú reológiai viselkedés szempontjából tranzienst-nek tekinthető értékek az adatsorokról eltávolításra kerültek, mert ezek az adatok a vágvég-hatás, illetve a lőttbeton réteg fokozatos szilárdulása miatt biztosan nem illeszthetők egy elméleti reológiai modellhez. Az elemzések során a tisztán reológiai viselkedést modellező exponenciális ($B=0$) és a hőmérsékleti hatásokat is figyelembe vevő periodikus plusz exponenciális (szinusz-exponenciális) illesztéseket ($B \neq 0$) vizsgálták meg. Általában a reológiai viselkedést jellemző exponenciális tag paramétereit nem változtatta lényegesen a periodikus rész figyelembe vétele. Az elemzés szempontjából releváns paraméterek (A , $t_{kúszás}$, B és t_h) számított értékeit táblázatokban adták meg, amelyekben a nemlineáris illesztés jóságára jellemző statisztikai paraméter (R^2 – determinációs együttható) is feltüntetésre került. Ez utóbbi kapcsán meg kell jegyezni, hogy az alkalmazott nemlineáris regresszió esetén ez a paraméter kevésbé jellemzi az illesztés jóságát, mint lineáris esetben.

Az alábbiakban, pusztán csak az eljárás szemléltetése érdekében egy extenzométer (a Bx-22) esetében – a 9. ábrán grafikusán, az 1. táblázatban pedig adat-szerűen – bemutatjuk a kétféle illesztési mód alkalmazásával adódó eredményeket. (A 9. ábra vízszintes tengelyeinek időskálája a megfelelő függvényillesztés miatt egységesen 1900. január 1-től másodpercben értendő.)



9. ábra. A Bx-22 jelű extenzométerrel gyűjtött hosszú távú adatsorok közelítése exponenciális (a), illetve szinusz-exponenciális (b) függvény-illesztéssel (*Approximation of long-term data sets gained by Bx-22 extensometer using exponential (a) and sinusoidal-exponential (b) fitting method*)

1. táblázat: A Bx-22 jelű extenzométerrel gyűjtött hosszú távú adatsorok elemzési eredményeinek összefoglalása (*Summary of results of analysis of long-term data sets gained by Bx-22 extensometer*)

anker (mélység)	Exponenciális illesztés			Szinusz-exponenciális illesztés				
	A [mm]	$t_{kúszás}$ [év]	R^2	A [mm]	$t_{kúszás}$ [év]	B [mm]	t_h [év]	R^2
fej (0,5 m)	1,118	0,998	0,9991	1,119	1,015	0,012	1,111	0,9992
1. (0,75 m)	0,568	0,886	0,9967	0,5667	0,856	0,027	1,073	0,9985
2. (1,75 m)	-0,301	0,386	0,9825	-0,3001	0,407	0,027	1,049	0,9868
3. (4,75 m)	0,054	0,193	0,6279	0,0541	0,345	0,032	0,956	0,7476
4. (9,75 m)	0,385	1,665	0,9644	0,3817	1,547	0,029	1,059	0,9711

A 9. ábra és az 1. táblázat alapján egyértelműen megállapítható, hogy a hőmérsékleti hatásokat is figyelembe vevő szinusz-exponenciális közelítés lényegesen jobb illeszkedést eredményez, mint az exponenciális. Fel kell hívni a figyelmet arra is, hogy ennél az extenzométernél a 3. anker elmozdulása zérus körül ingadozik, ezért az arra vonatkozó illesztési adatok exponenciális része megbízhatatlan. A 2. anker anomális, negatív irányú elmozdulása és az egymástól eltérő kúszási idők nem magyarázhatóak kizárólag a közethorgonyzással, ezt minden bizonnyal diszkontinuitás jelenléte okozza.

A további extenzométerek hasonló eredményeinek összefoglaló elemzése szerint háromféle jellemző karakterisztikus idő-tartomány figyelhető meg:

- *Rövid kúszási idő* ($t_{\text{kúszás}} \approx 1$ év). Az extenzométerek, illetve az azon belüli ankerek többségénél ez tekinthető tipikusnak (pl. Bx-22, Bx-33, Bx-16 és Bx-41 jelű extenzométerek).
- *Közepes kúszási idő* ($t_{\text{kúszás}} \approx 2,5 - 3$ év). (Ilyen pl. Bx-42 és Bx-44 jelű extenzométerek).
- *Hosszú kúszási idő* ($t_{\text{kúszás}} \approx 5 - 10$ év). (Ilyen a Bx-26 extenzométer).

Ilyen időtartamú és a közettömegre jellemző reológiai tulajdonságok meghatározására a standard laboratóriumi módszerek nem lennének alkalmasak. Mivel az exponenciális csillapodás lényegileg a karakterisztikus idő ötszöröséig tart, ezért a jelenlegi, néhány év hosszúságú idősorok még rövidek a hosszabb idejű változások előrejelzésére.

A reológiai változásokhoz hozzáadódik a hőmérséklet hatása, egy jellemzően kb. 1 éves periódusidejű ingadozás formájában, melynek amplitúdója az esetek többségében számottevő. Ez a csak néhány éves időtartamú adatok reológiai kiértékelését megnehezíti, illetve a hosszabb lefutású anomális hatásokat elfedheti. A hőmérsékleti ingadozás közelebb is segítheti a közeget a tönkremenetelhez, ami tovább nehezíti az elméleti alapú előrejelzést.

A bemutatott kiértékelések – minden, már említett bizonytalanság ellenére – egyértelműen azt igazolják, hogy a mért extenzométeres adatok túlnyomó többsége a hőmérsékleti hatások figyelembe vételével jól közelíthető a Poynting-Thomson standard reológiai modellből levezetett analitikus összefüggésekkel.

4 A REOLÓGIAI JELENSÉGEKET KIVÁLTÓ, ANOMÁLIS TERHELÉSI VISZONYOK OKAI

Amint azt a bevezetőben említettük, az elméleti adatokon és kontinuummechanikai alapuló statikai számítások szerint az NRHT térségében elvileg nem alakulhatnának ki a fentiekben bemutatott reológiai jelenségek; főleg nem ilyen gyakoriságban és mélységben. A bemutatott jelenségek legfőbb oka minden valószínűség szerint az elméletileg számíthatónál magasabb szintű terhelések kialakulása. A következőkben az NRHT kapcsán elvégzett primer feszültségmérések legfontosabb tanulságaira alapozva, a Kovács et al. (2012) dokumentumban foglaltak alapján kísérletet teszünk arra, hogy ezt a jelenséget értelmezzük.

Bátaapátiban eddig három felszíni sekélyfúrásban, valamint a lejtőszaknak, illetve a Nagyhuork-vágatrendszer építésének időszakában három-három föld alatti fúrásban, illetve a kamramező belsejében egy fúrásban került sor – először csak 2D-s Doorstopper-cellás módszer, majd a későbbiekben a legkorszerűbb 3D-s CSIRO HI-cellás módszer alkalmazásával – primer feszültségmérésekre. [A Doorstopper-cellás és a CSIRO HI-cellás feszültségmérések alapelvét, kivitelezési és értékelési gyakorlatát a Kovács & Bogár (2007) és az Asszonyi et al. (2012) mutatja be.] Ezen mérések eredményei alapján közelítő képet alkothattunk a regionális léptékű recens feszültségtérrel és annak az alábbiakban ismertetésre kerülő anomális eloszlásáról is.

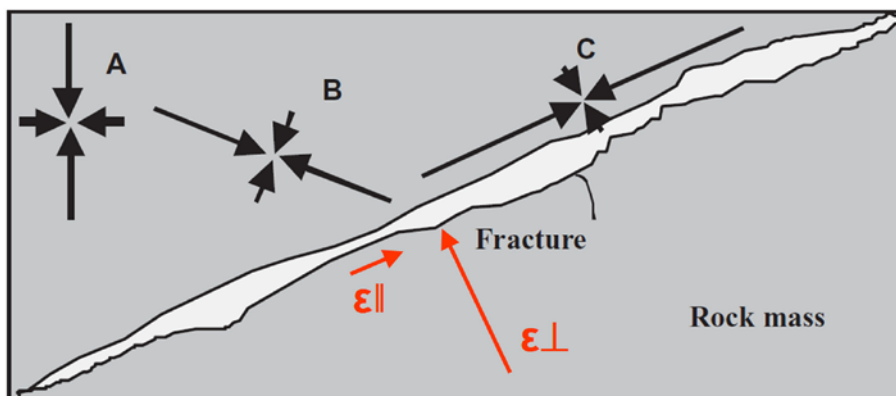
Az elvégzett mérések rámutattak arra a tényre, miszerint a horizontális feszültségkomponensek magnitúdója bizonyos irányokban meghaladja a vertikálit. A kamramező szintjén az ún. k-tényező 1,3-1,4 körül van. Ez tekinthető az elméleti és gyakorlati adatok közti eltérések egyik okának, ugyanis a statikai számításokhoz a Kandi et al. (2010) dokumentum szerint a $k=1$ értéket fogadták el.

A mérési eredmények alapján megfogalmazásra került a feszültségtér blokkosodásának koncepciója is, tehát az, hogy a Mórágai Gránitban a feszültségtérre is jellemző lehet a diszkontinuum-viselkedés. Önmagában már ez a fogalom is magyarázhatná az anomális terhelési szintek lokális kialakulását, ám egyes mérések még a jelenség fél-kvantitatív értelmezését is lehetővé tették.

A bányászati gyakorlatban közismert az ún. „áthárított feszültség”, vagy „áthárított nyomás” fogalma, amivel a harántolandó, a feszültségváltozások felvételére nem, vagy csak részben képes tektonikus zóna két oldalán megnövekedő terheléseket írják le. Az NRHT térségeiben végzett primer feszültségmérések – a nemzetközi szakirodalomban közölt tapasztalatokkal teljes összhangban – arra is felhívták a figyelmet, hogy ez a jelenség nem csak az első-, vagy másodrendű tektonikai övek környezetében játszódik le: a teszt-fúróluk környezetében előforduló, bármilyen léptékű diszkontinuitások alapvetően befolyásolják a mérhető feszültségállapotot, mind az abszolút értékek, mind pedig az irány tekintetében.

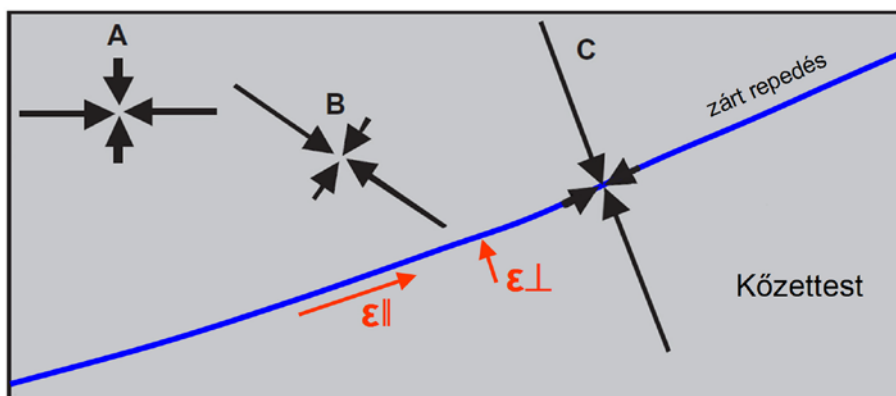
Hudson (2010) konkrét feszültségméréseken alapuló megfigyeléseket, illetve azok értelmezését alátámasztó levezetést közöl (ld. a 10. ábrán). Az ábra lokálisan nyitott, megtámasztás nélküli diszkontinui-

tás (a szöveg szerint egy karsztüreg) környezetében ábrázolja a síkbeli feszültségkomponensek változásait. Jól látható mind az említett „forgási jelenség”, mind pedig a regionális feszültségtérre jellemző abszolút értékek intenzív megváltozása is. A nyitott repedéshez közeledve a legnagyobb feszültségkomponens fokozatosan annak síkjával párhuzamos irányba fordul be. Ennek oka az, hogy a nyitott repedés síkjában az elmozdulás $\epsilon_{\parallel}$ korlátozott, míg arra merőleges irányban ($\epsilon_{\perp}$) szinte tetszőleges mértékben végbemehet.



10. ábra: Nyitott repedés hatása a primer feszültségek térbeli eloszlására [Hudson (2010) nyomán, kiegészítve] (*The effect of an open fracture on the spatial distribution of virgin rock stresses [after Hudson (2010), complemented]*)

A Mórággyi Gránitban elvégzett mérések eredményei szerint megtámasztott (nem nyitott), ám a repedésirányú elmozdulásra hajlamos diszkontinuitások esetében azonban éppen ennek ellentéte játszódik le (ld. a 11. ábrán): a diszkontinuitás síkjában végbemenő nagyobb elmozdulások $\epsilon_{\parallel}$ miatt abban az irányban a feszültség csak korlátozottan tud felépülni, míg a maximális főfeszültség éppen a repedés-síkra merőleges lesz, mert abban az irányban alakulhat ki kisebb elmozdulás ($\epsilon_{\perp}$).



11. ábra: Zárt repedés hatása a primer feszültségek térbeli eloszlására (*The effect of a closed fracture on the spatial distribution of virgin rock stresses*)

Mivel a feszültségkép és az elmozdulások kapcsolata a fenti levezetés szerint nyilvánvaló, ezért hangsúlyozni kell azt is, hogy a feszültségtér anomális forgási, illetve blokkosodási jelenségei leginkább a nagy szilárdságú, de erőteljesen repedezett, tektonizált, mechanikai szempontból tehát erősen inhomogén képződményekben jellemzők. A térség eseménydús tektonikai előtörténete miatt a Mórággyi Gránit kőzettípusaira igencsak jellemzők a változékony orientációjú, kitöltőanyagú, multigenerációs tektonikai zónák, litoklázisok és egyéb diszkontinuitások rendkívül sűrű, minden léptékben jelentkező hálózata és az ezzel összefüggő ásványátalakulási jelenségek is. Az eddig feltárt kőzetblokkok többségében a repedéssűrűség általában magas (a diszkontinuitások jellemző távolsága a néhány cm-től a néhány dm-es nagyságrendig terjed), ezért a fűrőlyukak tesztelt zónái közelében nagy valószínűséggel található a regionális feszültségtérre módosító diszkontinuitás. (Meg kell azonban jegyezni, hogy mechanikai inhomogenitást nem csak tektonikai jelenségek eredményezhetnek, hanem akár nagyfokú kőzettani különbségek is. A Mórággyi Gránit esetében ebben a vonatkozásban elsődlegesen a telérközetekeket kell megemlíteni, mivel ezek mechanikai – elsősorban deformabilitási – paraméterei jelentősen eltérnek a környezetükben jelen lévő kőzettípusokétól.) Ilyen esetekben az említett jelenségek – csakúgy, mint a dokumentálható tektonikai elemek is – számos különböző léptékben ismerhetők fel. Mivel

a különböző léptékű tektonikai hatások egymásra is szuperponálódhatnak, sajnos számos esetben igen nehéz ezeket szétválasztani és tisztán, önállóan értelmezni.

Egyes szerkezeti jellegek speciális feszültségképpel jellemezhetők. A 2002-ben és a 2007-ben végzett mérések eredményei például azt is egyértelművé tették, hogy az oldaleltolódásos szerkezetek hatás-övezetében rövid távolságon belül is intenzíven forgó feszültségirányokat, illetve – egy bizonyos mélységi szintig – akár még negatív síkbeli normál feszültség-komponenst is lehet mérni [Kovács & Bogár (2007)].

A fenti ábrákon – a saját méréseinkkel teljes összhangban – az is megfigyelhető, hogy a kérdéses zónában a legnagyobb és a legkisebb feszültségkomponens abszolút értéke ellentétesen, ám egymástól egyáltalán nem függetlenül változik. Egy, a kamramező szintjében elvégzett Doorstopper-cellás mérésorozatban például a diszkontinuitások által megzavart, anomálisnak tekinthető, zérus körüli elmozdulás-értékeket is produkáló Doorstopper-cellás mérések esetében a maximális mért deformáció 170 és 190 $\mu\text{m}/\text{m}$ körül alakult, szemben a zavartalan mérésekkel, ahol hiányoztak az alacsony deformációs szintek, és a maximális érték 110 és 120 $\mu\text{m}/\text{m}$ volt. Ez úgy értelmezhető, hogy a tér egy-egy elemi cellájára jellemző, a gravitáció és a regionális tektonikai jelenségek által befolyásolt „belső energiaszint” az, ami az adott területen/mélységtartományban állandó és független a lokális tektonikai jelenségektől.

A közölt mérési adatok viszont egyúttal azt is jelentik, hogy a lokális tektonikai jelenség hatására a maximális feszültségkomponens lokálisan mintegy másfélszerese volt a regionális, zavartalan feszültségtér megfelelő komponensének (ami a mérések szerint szintén erősen eltér az elméletileg, az önsúlyterhelésből számítható értékektől). Egyes mérések esetében a diszkontinuitás által kiváltott eltérés a 100%-ot is meghaladta. Amennyiben ilyen mértékű terhelésnövekménnyel számolunk, az már mindenképpen indokoltá teszi a fentiekben bemutatott reológiai jelenségek kialakulását. A CI, illetve a CD terhelési küszöbszint elérése esetén a kőzetben idővel kialakuló és esetleg tovaterjedő, összekapcsolódó új repedések lokális léptékű feszültségmódosító hatása miatt pedig a kőzetköpeny (az EDZ és az EdZ) terhelési jellege és deformációs képe is folyamatosan változhat.

5 KONKLÚZIÓ

Az NRHT-ban telepített hosszú távú geotechnikai és szeizmoakusztikus megfigyelőrendszer 2-7 éves adatai szerint a föld alatti térségek kőzetköpenyében csaknem minden esetben megfigyelhetők olyan időfüggő deformációs folyamatok, amelyeket a korábbi tervezési feltételezések nem indokoltak. Ezek a hosszabb távon lejátszódó, időfüggő folyamatok sokszor nagyságrendileg magasabb elmozdulási, deformációs értékeket eredményeztek, mint a vágathajtás közvetlen mechanikai hatásából eredő tranziens hatások.

Az in situ megfigyelési adatok teljes mértékben összefüggésbe hozhatók voltak azokkal a nemzetközileg is újszerű módszerekkel, amelyek a laboratóriumi terhelési tesztek adatai alapján határozzák meg a különböző terhelési küszöbszinteket, amelyek átlépése esetén a kőzetben bekövetkező folyamatok jellege megváltozik. Az extenzométeres adatokon elvégzett értékelések emellett azt is igazolták, hogy az adatainak túlnyomó többsége jól közelíthető a Poynting-Thomson standard reológiai modellből levezetett analitikus összefüggésekkel. Az NRHT-ban végzett primer feszültségmérési eredmények pedig arra is magyarázatul szolgálnak, hogy miért alakulhatnak ki azok az elméletileg várhatónál magasabb terhelési szintek, amiket a mérhető reológiai kőzetviselkedés alapvető okainak tekinthetünk.

Mindezen, konzisztens rendszert alkotó mérési és értékelési eredmények alapján végérvényesen kijelenthető, hogy az NRHT térségeibe telepített megfigyelő rendszerekkel valós reológiai jelenségeket sikerült rögzíteni. A vágatok környezetében lévő kőzettömeg tehát valóban jelentős, jelenleg is zajló reológiai viselkedést mutat. Ebből adódóan az is egyértelművé vált, hogy a Bataapáti NRHT kőzetköpenyében a reológiai jellegű deformációs folyamatok – különösen az NRHT főfeltárási térségeinek akár 120-130 éves nyitvatartási ideje mellett – nem tekinthetők elhanyagolhatónak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton mondanak köszönetet a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Nonprofit Kft-nek a geotechnikai monitoring rendszer kiépítésének és üzemeltetésének lehetővé tételéért, a cikk tárgyát képező további vizsgálatok megrendeléséért valamint a publikáció engedélyezéséért. Külön köszönet illeti a Montavid Termodinamikai Kutatócsoport tagjait, Ván Pétert, Fülöp Tamást és Asszonyi Csabát, akik felvetették a mérési eredmények illesztésének lehetőségét az elméleti modellhez és el is végezték ezt az elemzést.

IRODALOMJEGYZÉK

- Asszonyi Cs. (szerk.) (2006): Izotróp kontinuumok anyagtörvénye, Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár 3., Műegyetemi Kiadó, Budapest.
- Asszonyi Cs. et. al. (1980): A bányászat mechanikai rendszere I-II., Veszprémi Akadémiai Bizottság, Veszprém.
- Asszonyi Cs., Szarka Z., Kovács L. (2012): A primer feszültségállapot in situ meghatározásáról. Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kkt. 13. – A képlékenység termodinamikájáról (Szerk.: Asszonyi Cs.): 91-124.
- Benkovics I., Barabásné Rebró K., Berta J., Csicsák J., Hogyor Z., Ropoli L., Szabéni G., Tamás P., Tóth P., Varga M., V. Miskolczi R., Vrászlai F.; Takáts F., Kulcsár L.; Thomas A., Hersvik D., Németh Gy.; Lowson A. (2010): A Bábaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló feltáró vágatai térképészete. Kiviteli terv II. ütem 3. szakasz. I-K1 és I-K2 tárolókamra. Kézirat, 2010. szeptember. RHK Kft. Adattára. RHK-K-123C/09.
- 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; Pécs, 2012. március. RHK Kft. Irattára, RHK-K-090/11.
- Deák F., Kovács L., Vásárhelyi B. (2013): A töréses tönkremenetel keletkezésének és fejlődésének azonosítása rideg kőzetek laboratóriumi mérése során. In: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B. (szerk.) Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2013, Hantken Kiadó, Budapest, 121-138.
- Diederich M. S., Martin C. D. (2010): Measurement of spalling parameters from laboratory testing. Zhao, Labiouse, Drudt & Mathier (eds) – EUROCK2010, 323-326.
- Fülöp T., Béda Gy. (2010): Hidrosztatikus környezetben nyitott hengersizmetrikus alagút körüli reológiai időfüggés. A „Kontinuummechanikai feladatok megoldásáról” c. kötetben (szerk.: Asszonyi Cs.) Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár 9., Műegyetemi Kiadó, pp. 99-114.
- Hoek E., Kaiser P. K., Bawden W. F. (1995): Support of Underground Excavations in Hard Rock, A. A. Balkema, Rotterdam, Reprinted in 2005, 215 p.
- Hoek E. (2000): Rock Engineering, Course Notes, Chapter 12.1-12.3
- Hudson J. A. (2010): Stresses in rock masses: A review of key points. Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst – Vrkljan (ed).
- Kandi E., Hersvik D., Váró Á., Bicskei D., Viszoly R., Arató P. (2010): Geotechnikai értelmező jelentés. (Bábaapáti nemzeti radioaktív hulladék-tároló kiviteli terv II. ütem 3. szakasz – 2 db tárolókamra c. dokumentum 22. függelék). Kézirat – Mott MacDonald Magyarország Kft., Budapest, 2010. április. RHK Kft. Irattár. RHK-K-059/10.
- Kovács B., Kovács L. (2013): EDZ vizsgálati szelvények adatainak komplex hidromechanikai újraértékelése a Bábaapáti NRHT-ban. In: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B. (szerk.) Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2013, Hantken Kiadó, Budapest, 139-154.
- Kovács L., Somodi G. (2009): Értékelő jelentés a geotechnikai eredmények értelmezéséről. Kézirat, 2009. március, RHK-K-171/08
- Kovács L., Bogár I. (2007): Felszínközeli kőzettestekben uralkodó primer feszültségállapot meghatározása továbbfejlesztett Doorstopper cellás, mag-túlfúrásos in situ feszültségmérésekkel. In: Török Á., Vásárhelyi B. (szerk.) Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2007, BME Kiadó, Budapest. 281-300.
- Kovács L., Bogár I. (2010): Nagy pontosságú nyomott rudas konvergenciamérési módszer alkalmazása a hazai radioaktív hulladék-elhelyezést előkészítő kutatásokban. In: Török Á., Vásárhelyi B. (szerk.) Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2010, BME Kiadó, Budapest 251-270.
- Kovács L., Mészáros E., Deák F., Somodi G., Máté K., Jakab A.; Vásárhelyi 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. RHK Kft. Irattár, RHK-K-032/12
- Lanyon G. W. (2011): OPG's Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste – Excavation Damaged Zones Assessment. Report prepared by Fracture System Ltd., March 2011, 95 p.
- MacRae, J. B. & Simmonds, T. (Geokon Inc.) (1991): Long-term stability of vibrating wire instruments: One manufacturer's perspective. Field Measurements in Geotechnics, Sorum (ed.): 283-293.
- Pellet F., Zerfa Z. (2006): Modelisation numerique du comportement differe des ouvrages souterrains. Journées Nationales de Geotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – JNGG' 2006 Lyon (France), pp. 65-71.
- Pellet F., Roosefild M., Deleruyelle F. (2009): On the 3D numerical modelling of the time-dependent development of the damage zone around underground galleries during and after excavation., *Tunneling and Underground Space Technology* 24: 665-676.
- Perras M., Langford C., Ghazvinian E., Diederich M. (2012): Numerical deliniation of the excavation damage zones: From rock properties to statistical distribution of the dimensions. ISRM, EUROCK2012, Stockholm, 14 p.
- RHK Kft. (2012): A Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft. tizenkettedik közép- és hosszú távú terve a Központi Nukleáris Pénzügyi Alapból finanszírozandó tevékenységekre. Paks, 2012. május. (www.rhk.hu/wp/wp-content/uploads/2012/10/KHTT_2012.pdf)
- Szűcs I., Bakai J. (2012): A Bábaapáti 1-2 tárolókamra környezetének szeizmoakusztikus monitoring rendszere. „A Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) első két kamrája kialakításának földtudományi, bányászati és technológiai eredményei” c. előadói nap (2012. június 13. Pécs, PAB Székház) kiadványa. pp. 69-73.