

# Nagyszelvényű tárolókamrák környezetében végbemenő feszültségváltozások mérése

Kovács László

Kőmérő Kft., Pécs, kovacslaszlo@komero.hu

Mészáros Eszter

Kőmérő Kft., Pécs, meszaroseszter@komero.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A Bábaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) beruházási programja keretében 2011-ben megtörtént az első két, több mint 100 m<sup>2</sup> kitörési szelvényű tárolókamra bányászati kialakítása. A kamrák környezetében a vágathajtás hatására létrejövő tranziens feszültségváltozások 3D-s megismerésére az aktuális vágat végéig mélyített hat fúrólukba a Kőmérő Kft. CSIRO HI-cellákat telepített. A cellák a kitörési szelvény kritikus pontjaiban (főtepont és oldalpontok), illetve a két kamra közti pillér középvonalában, a kamrahajtás teljes időszakában üzemeltek. A mérési program eredményei alapján külön-külön meg lehetett határozni a kalott és a talpszelet egyes jövesztési fázisainak feszültségmódosító hatásait, mind a telepítési helyszínt jelentő I-K2 kamra, mind pedig a szomszédos I-K1 kamra vonatkozásában. A cikkben bemutatott mérési eredmények alkalmasak a kamraépítés statikai terveinek ellenőrzésére, illetve a további tervezési fázisokban a pillérméret és az kamraszelvek optimalizálására is.

*Kulcsszavak:* feszültségváltozás, CSIRO HI-cella, Bábaapáti, tárolókamra, pillérméret

## 1 BEVEZETÉS

### 1.1 A Bábaapáti NRHT építése

A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezését a 2003-ban földtanilag alkalmasnak nyilvánított Mórággyi Gránit Formációban (MGF) tervezik. Bábaapáti térségében – több éves előkészítő felszíni kutatásokat követően – 2005. és 2008. között egy 1700 m-t meghaladó hosszúságú kutató lejtősaknapárral jutottak el a tervezett elhelyezési szintre (0 mBf). A létesítmény befogadását megalapozó sikeres helyi népszavazás és parlamenti jóváhagyás (2005) alapján a vonatkozó jogszabályok szerint a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft. lefolytatta a szükséges környezetvédelmi engedélyezési eljárást és megszerezte az ún. I. kamramező kialakítására vonatkozó létesítési engedélyt (2007). 2008. és 2010. között – immár a beruházási program részeként – egy olyan, közel szintes hurokvágat-rendszert alakítottak ki, amelynek célja a létesítmény felszín alatti infrastruktúrális ellátó rendszereinek befogadása (ez az ún. Kishurok), illetve a majdani kamrarendszer térségének feltárása (Nagyhurok). A vágathajtással párhuzamosan megszerzett földtani, vízföldtani és geotechnikai információkra alapozva 2010-ben elkészült a tárolókamrák kialakításának kiviteli tervdokumentációja (Benkovics et al. 2010). Egy közbeszerzési eljárás eredményeképpen a beruházási program fővállalkozójaként kiválasztásra került a MECSEKÉRC Zrt, amely társaság – széles alvállalkozói kör bevonásával – 2011 elején megkezdte a több mint 100 m<sup>2</sup> kitörési szelvényterületű I-K1 és I-K2 jelű tárolókamrák kihajtását. A tárolókamrák szűkebb értelemben vett bányászati kivitelezése 2011. szeptember végére be is fejeződött; azóta a végleges elhelyezéshez szükséges további előkészítő műveletek és az üzembe helyezési engedély megszerzését célzó munkálatok zajlanak.

A statikai tervezésben figyelembe vett adatok, információk validálása, a kivitelezés minőségének ellenőrzése és a további kamrák tervezésének optimalizálása céljából a kamrák kialakításával párhuzamosan többféle in situ mérési program is megvalósult. Extenzométeres, valamint mechanikai és optikai konvergenciamérő szelvek segítségével kontrolláltuk folyamatosan a kőzetköpeny tranziens elmozdulásait. Az EDZ mélységének, jellegének és eloszlásának vizsgálatára több mérési szelvényt alakítottak ki. A szisztematikusan alkalmazott biztosítószerkezetek (lőttbeton és kőzethorgonyok) terhelésének alakulását speciális, automatikus üzemű mérőelemek beépítésével és üzemeltetésével követtük nyomon. Ezen, az építési folyamattal párhuzamosan megvalósított mérési program részeként végezte el a Kőmérő Kft. az alábbiakban részletesen ismertetendő feszültségváltozás-méréseket is.

## 1.2 A feszültségváltozás-mérések elvi háttere és módszerei

Közismert tény, hogy bármilyen típusú, orientációjú és tetszőleges technológiával végzett üregképzés következtében a primer feszültségtér átrendeződése mindenképpen végbemegy. A meghatározott irányokban alátámasztását vesztett kőzetköpeny egy rendkívül komplex energetikai folyamat révén jut el az új egyensúlyi állapotig. Az ugrásszerűen megváltozó feszültségtér meghatározott irányokban és mértékben kőzetdeformációt vált ki. A kialakított üreg környezetében létrejön a hely és az idő függvényeként leírható szekunder feszültségmező, ami a kőzetköpeny és az azzal együttműködő biztosítószerkezetek szempontjából meghatározza a stacioner terhelési állapotot. Így a feszültségváltozási folyamat megismerése – a primer feszültségállapot mellett – a statikai tervezés egyik legfontosabb kiinduló, illetve a későbbiek során ellenőrző, validáló paramétercsoportját biztosíthatja.

Kontinuummechanikai megközelítésmódot alkalmazva a feszültségváltozás pontos matematikai értelmezését számos szakkönyv tartalmazza. Ezekből elsősorban az Asszonyi et al. 1980, Asszonyi & Kapolyi 1981 és a Jaeger et al. 2007 publikációkat emeljük ki. (Asszonyi et al. 1980 emellett kísérletet tesz a rendkívül korszerű energodinamikai leírásra is.)

A különböző alakú és orientációjú üregek szekunder feszültségterei az elméleti kontinuummechanikai levezetések alkalmazásával számos, kevésbé igényes gyakorlati feladat esetében kielégítően közelíthetők. Ez a megoldás azonban számos olyan ható tényezőt (pl. a biztosítószerkezetek jelenléte és beépítési üteme, a kőzetek reológiai viselkedése, a földtani okokra visszavezethető inhomogenitások, az ún. EDZ-hatások, stb.) hagy figyelmen kívül, ami jelentősen befolyásolja a feszültségátrendeződés folyamatát. A Kovács 2006 publikáció – többek között Bonne et al 1990, Del Olmo et al. 1996, Kovács 1999 és Somosvári 1987 alapján – részletesen elemzi e megközelítésmód gyakorlati elégtelenségét. Amennyiben az említett módosító hatásokat is figyelembe venni képes, fejlett numerikus modelleket építünk fel, az anyagmodell jó megválasztása, megfelelő paraméterezés és modell-validálás révén a valóságot lényegesen jobban közelítő eredményeket kaphatunk. A végbemenő folyamatok valós fizikai jellege azonban – a kezelhetőséget biztosító leegyszerűsítések és elhanyagolások miatt – általában ezen az úton is rejtve marad. A gyakorlati tapasztalatok szerint a ténylegesen végbemenő folyamatok és a modellszámítási eredmények között kimutatható, sokszor igen jelentős eltérésekre a legtöbb esetben nem adható megfelelő magyarázat.

Az olyan, igényesebb adatgyűjtést és tervezést igénylő alkalmazásoknál, mint amilyen például a radioaktív hulladékok mély geológiai formációban történő végleges elhelyezése, alapvető igény a „hagyományos” bányászati és geotechnikai gyakorlatban elfogadott módszerek meghaladása. Hudson & Feng 2007 szerint ilyen esetekben kiterjedt és összehangolt vizsgálati illetve tervezési programot kell végrehajtani, amely éppúgy magában foglalja a szükséges in situ és laboratóriumi méréseket, mint az eredmények adatbázisba szervezését, fejlett geomatematikai módszerekkel történő értékelését, valamint a kiterjesztett, többszörösen kapcsolt (THMC) numerikus modellezési eljárásokban történő felhasználását. Csakis ezzel a komplex módszerrel érhető el a feltárandó kőzettestek valós viselkedését meghatározó paraméterek, folyamatok, illetve jelenségek mély megértése és csakis így biztosíthatók a megfelelő prognózisok (pl. a kőzettípusok, a mélység és a laterális helyzet, a töredezettség, a mállottsági fok, az anizotropia, stb. függvényében). Ez a szemléletmód biztosíthatja azt is, hogy az elfogadható mértékűre csökkentjük a statikai tervezés és a biztonsági értékelés bemenő paramétereinek bizonytalanságát. Különösen igaz ez az eseménydús tektonikai előtörténettel bíró, és emiatt rendkívül komplex felépítésű Mórágyi Gránit Formáció esetében, ahol a kőzet diszkontinuitásainak a statikai viszonyokra gyakorolt jelentős hatását már több helyszíni mérési program is egyértelműen igazolta (pl. Kovács 2009, Mészáros & Török 2010; Deák et al. 2011). Így egyértelművé vált, hogy a Mórágyi Gránitban gyakorlatilag nincs lehetőség sem a primer sem pedig a szekunder feszültségállapot eleminek tisztán elméleti úton történő pontos meghatározására.

A feszültségátrendeződés mérésére közvetett és közvetlen módszerek is ismertek. Közvetett meghatározásról akkor beszélünk, ha a feszültségváltozás hatására a kőzetköpenyben végbemenő nagy léptékű deformációk méréséből (pl. inklinométeres, extenzométeres mérések illetve konvergenciamérés) származó adatokból analitikus vagy numerikus módszerekkel kalkuláljuk vissza az azokat létrehozó feszültségváltozásokat. E módszerek nagy hátránya, hogy a megfelelő eredményhez viszonylag pontosan kell ismerni a primer feszültségállapotot, illetve minden olyan lehetséges ható tényezőt is, ami a feszültség-deformáció kapcsolatot befolyásolhatja. Közvetlen mérésnek azokat tekintjük, amikor egy speciális, fúrólukba épített és a fúrólukfal (illetve fúróluktalp) elmozdulásait detektáló mérőszonda jeleinek feldolgozásából azonnal számíthatóvá válik a feszültségváltozás időbeli lefolyása (az abszolút értékek és irányok tekintetében is). Bár ebben az esetben is deformációmérésből vezetjük vissza a feszültségváltozásokat, de ebben az esetben nincs feltétlenül szükség a primer feszültségállapot ismeretére. Jól telepített mérőműszerek esetében az egyértelmű geometria, valamint a diszkontinuitások és biztosítószerkezetet hiánya miatt a feszültség-deformáció összefüggés sokkal egyértelműbb, ahhoz csak néhány anyagállandót kell ismerni. E módszerek alapvető előnye az is, hogy általuk – a legtöbb-

ször a Descartes-i vagy hengerkoordináta-rendszernek csak egyetlen irányában alkalmazható elmozdulás és/vagy deformációmérésekkel ellentétben – közvetlen módon 3D-s feszültségváltozási információkhoz jutunk.

## 2 AZ NRHT TÁROLÓKAMRÁI KAPCSÁN TELEPÍTETT MÉRÉSI SZELVÉNY JELLEMZŐI

### 2.1 Az alkalmazott mérőeszköz

A feszültségátrendeződés mérésére szolgáló közvetlen mérési módszerek közül az NRHT tárolókamrái kapcsán (csakúgy, mint korábban, a BAF föld alatti kutatólaboratóriumában és Bátaapátiban, az ún. HGM-kamra komplex mérőrendszerének részeként is) egy háromdimenziós, tehát a feszültségváltozások térbeli leképezésére alkalmas mérőrendszert alkalmaztunk. A szondát és a mérési elvet az ausztrál Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) cég fejlesztette ki. Az ún. CSIRO-cellákon belül is több változat ismert; Bátaapátiban az ún. Worotnickytípusú, üreges epoxy-szondák – Hollow Inclusion (HI) Cells, a továbbiakban CSIRO HI-cellák – kerültek beépítésre (ld. az 1. ábrán).



1. ábra. A CSIRO HI-cella a telepítés előtt

A CSIRO HI-cellák felépítését és működési elvét Worotnický & Walton 1976 ismerteti részletesen. A henger alakú cellákban 12 db, meghatározott helyzetű (axiális, körívmenti, valamint a cella tengelyével  $45^\circ$  illetve  $135^\circ$  szöget bezáró) deformációmérő bélyeg és egy hőmérséklet-érzékelő elem (termisztor) található. A szonda azonos orientációval általában több bélyeget is tartalmaz. A duplikálás oka kettős: így egyrészt csökkenthető az egyes csatornák esetleges meghibásodásából származó adatvesztés lehetősége, másrészt viszont a többlet-adatok birtokában kiegyenlítő számításokra is mód van.

A cellákból származó jelek egy 16 eres árnyékolt jelkábelben kerülnek kivezetésre a fúrólukból. A mérőbélyegek deformációs válaszjeleit egy megfelelő, a Wheatstone-híd elvén működő elektronikus mérőeszköz alkalmazásával, akár kézi üzemmódban, akár automatizáltan is meg lehet határozni.

A gyárilag előkészített cella üreges részébe kerül a megfelelő ragasztóanyag, amely a fúrólukban automatikusan és egyenletesen kerül a cella külső felülete és a fúrólukfal közé; ezzel egyenletes és igen jó minőségű kapcsolatot biztosítva. A fúrólukba ily módon beragasztott, ismert rugalmasságtani paraméterekkel jellemezhető mérőcella vékony epoxy falába installált mérőbélyegek a feszültségváltozás hatására különböző irányokban eltérő mértékben deformálódnak. E deformációkat folyamatosan felvéve, a Fama & Pender 1980 publikációban közölt algoritmus szerint számíthatók a térbeli fő- illetve normálfeszültség-változások.

### 2.2 A CSIRO HI-cellákat befogadó fúrólukok telepítése és kialakítása

A tárolókamrák kialakítása kapcsán hasonló telepítési geometriát alkalmaztunk, mint ami a Kovács 2006 publikációban részletesen ismertetésre került: a CSIRO HI-cellák szelvényyszerűen, az aktuális kamravájtógépek elé mélyített fúrásokba kerültek, a kiinduló vájtó végétől olyan távolságra, amelyben a vájtógép feszültségmódosító hatása még biztosan nem érvényesül. Így ezekkel a cellákkal a vágathajtás hatására a kőzetköpenyben fellépő feszültségváltozások nagyságáról, irányáról, időbeli lefolyásáról és vágatszelvény menti eloszlásáról egyaránt információt nyertünk.

A tárolókamrák kőzetkörnyezetében végbemenő kőzetfeszültség-változások 3D-s mérésének elsődleges célja a pillérméret ellenőrzése illetve a pillérméret gyakorlati megfelelőségének igazolása volt. A műszertelepítés geometriájának megfelelő megválasztásával emellett azt is el kellett érni, hogy a CSIRO HI-cellák mind a telepítési helyszínül szolgáló kamra (I-K2), mind pedig az annak szomszédságában megépülő kamra feszültségmódosító folyamatait is mérhetővé tudják tenni. Ez a követelmény azt jelentette, hogy az elől haladó kamra nem osztott felső kalottal kialakítandó szakaszáról kiindulva kellett a telepítést végrehajtani.

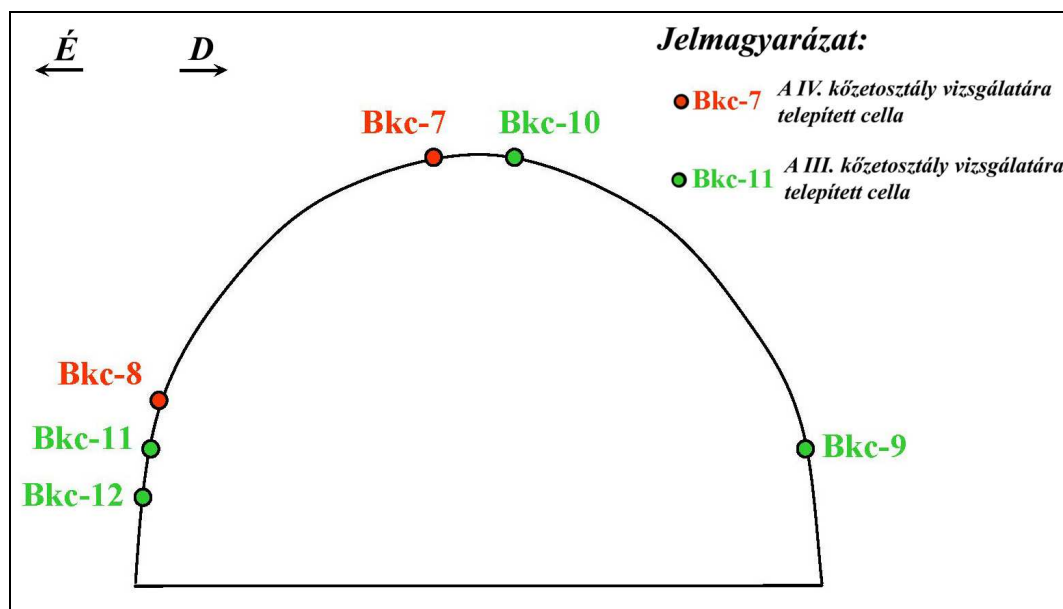
Az eredeti tervek szerint 2 db, egyenként 4-4 cellából álló szelvény telepítésére került volna sor, amelyek közül az egyik szelvénynek a III., míg a másikkak a IV. kőzetosztály feszültségváltozási viszonyait kellett volna vizsgálni. Költséghatárak miatt azonban ez a későbbiek során módosult: összesen „1,5 szelvény” (egy 4-cellás és egy 2-cellás) megvalósítására nyílt lehetőség. Időütemezési

megfontolások miatt e szelvényeket is egyetlen ütemben, közös induló helyszínről kellett kialakítani; mégpedig úgy, hogy a különböző minőségű kőzetzónákat eltérő hosszúságú fúrólukakkal tárjuk fel. A telepítési helyszín megválasztásakor tehát abból kellett kiindulni, hogy innen az alábbiakban jelzett geometriájú fúrásokkal mindkét vizsgálandó kőzetkategoríának megfelelő (egymással szomszédos) vágatszakaszhöz elérhető legyen. Az említett feltételeknek az I-K2 kamrában kizárólag a 74-79 fm-es (az előzetes kamraprognózis szerint a IV. kőzetosztályba tartozó) illetve a 80-86 kamrafm-es (III. kőzetosztályú) intervallumok feleltek meg. Így a tervezett fúrásokkal ezeket kellett megcélozni. Hangsúlyozni kell, hogy addig, amíg a szelvények helyének kijelöléséhez használt prognózis a kamraszelvényen belül lemélyített előfúrások alapján készült, addig a CSIRO HI-cellás fúrások értelemszerűen a kamra tervszelvényen kívülre esnek. Így a geotechnikai viszonyok Mórágyi Gránit Formációban megismert nagyfokú változékonysága miatt már a tervezés fázisában is egyértelmű volt, hogy ez a kijelölés jelentős hibával terhelt lehet.

A lecsökkentett cellaszám mellett nem volt teljes mértékben megvalósítható, hogy a feszültségváltozások kőzetosztály-függése mellett annak mélységfüggését illetve a szelvény menti eloszlását is vizsgálni lehessen. Kompromisszumos megoldásként az a javaslat került elfogadásra, ami szerint a 2 célból álló fél szelvényben (IV. kőzetosztály) a főtében illetve a két kamra közti pillér közepvonalában fellépő feszültségváltozásokat kell vizsgálni, míg a teljes szelvényben (III. kőzetosztály) az É-i illetve a D-i oldalpontba, a főtébe valamint a pillér közepvonalába kell cellákat telepíteni (ld. a 2. és a 3. ábrán). Azokat a cellákat, amik nem a pillér közepvonalában kerültek telepítésre, egységesen a kőzet-horgonyzás által érintett kőzetövön belülről (a közvetlen vágatpalástba) irányítottuk. A limitált cellaszámból adódóan ezúttal tehát nem hasonlíthattuk össze a horgonyzott zóna belsejében illetve annak határán fellépő feszültségváltozásokat (ellentétben a HGM-kamra 2008-ban megvalósított, e szempontból is rendkívül informatív mérésorozatával).

A fenti célmeghatározásnak megfelelően az I-K2 kamra kalottjának 55,3 fm-es vājvégállása mellett, a vājvégtől mintegy 1,5-3,0 m-re hazafelé kezdtük meg a fúrási szelvény kialakítását. A vizsgálatok előkészítéséhez és lebonyolításához szükséges fúrás technikai közreműködést a Rotaqua Kft. biztosította. Az oldalfali fúrólukak mélyítéséhez DIAMEC 260 típusú, a főtelyukakhoz Diamec 250 típusú elektro-hidraulikus magfúró-berendezéseket használtak.

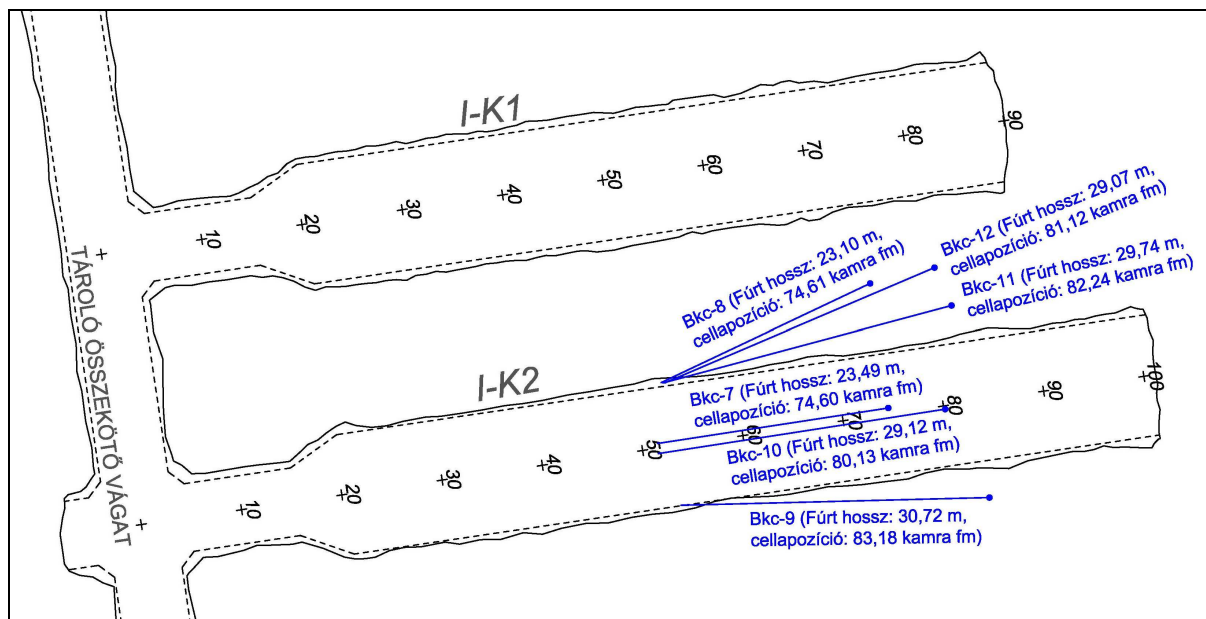
A kamrakialakítás minőségi követelményeinek megfelelően ezúttal nem alkalmazhattuk azt a jól bevált gyakorlatot, amely szerint a fúrásokat mintegy 0,5 – 0,7 m mélységű, előzetesen kialakított fülkéből lehet indítani. Ez a körülmény rendkívüli módon megnehezítette mind a fúrások kialakítását, mind pedig a cellák jelkábelleinek robbantások elleni védelmét.



2. ábra. A Bkc-7; ...; Bkc-12 jelű fúrások nyitópontjainak vázlatos elhelyezkedése az I-K2 kamra kalottszelvényében

A 2. ábrán látható nyitóponti elrendezés mellett összesen 6 db magfúrás mélyült BQ (59 mm) átmérőjű alapszakasszal, amelyből központosítva kerültek kialakításra a CSIRO HI-cellákat befogadó 0,5 m hosszú, EWG (37,7 mm) szerszámmal mélyített, ún. talpi zseblyukak. A zseblyukak névleges helyét előzetesen meghatároztuk ugyan, de ha az adott helyen a kőzet állapota nem volt megfelelő a cella telepítéséhez, úgy a zseblyuk felbővítésre került, majd a lyukat a megfelelő helyszín eléréséig tovább-

mélyítették. Így a gyakorlatban még az elvileg azonos mérési szelvényhez a cellák sem esnek egyetlen közös, a kamratengelyre merőleges síkba (ld. a 3. ábrán).



3. ábra. A Bkc-7; ...; Bkc-12 jelű fúrások vázlatja és a telepített cellák helyzete

Amennyiben a fentiek szerint a fúrást a maganyag alapján már megfelelőnek ítélték, úgy a Kőmérő Kft. munkatársai elvégezték a lyukkamerás ellenőrzéseket is. Erre azért volt szükség, mert a cellák installáló szerszámának a csövezetlen lyukban nem volt szabad az installálás során megakadni, vagy – egy esetleges kaverna jelenléte miatt – nem központos helyzetben elérni az EWG zseblyuk száját. Az ebből a szempontból veszélyes jelenségek észlelésén kívül akkor is el kellett rendelni az adott lyuk injektálását és újrafúrását (beleértve a zseblyukat is), ha a zseblyukból vízhozáfolyás volt tapasztalható. A fenti előkészítő műveletek eredményeként valamennyi fúróllyukat sikerült stabil, a cellatelepítéshez megfelelő módon kialakítani. Megtörtént a lemélyített fúróllyukak geodéziai bemérése és a maganyagok geotechnikai minősítése is. Ezek alapján az alábbi, 1. táblázatban a fúrások legfontosabb geometriai és geotechnikai adatait foglaljuk össze.

1. táblázat. A Bkc-7; ...; Bkc-12 jelű fúróllyukak geometriai és geotechnikai adatainak összefoglalása

Fúrás (cella) jele:	Bkc-7	Bkc-8	Bkc-9	Bkc-10	Bkc-11	Bkc-12
Fúrás nyitópontjának helye (kamra fm)	51,57	52,81	52,90	51,50	52,90	53,19
Fúrás hossza (m)	23,49	23,10	30,72	29,12	29,74	29,07
Nyitópont EOVS koordinátája	95 332,38	95 338,38	95 326,28	95 331,38	95 338,34	95 338,34
Nyitópont EOVS koordinátája	615 972,52	615 972,88	615 974,82	615 972,60	615 973,04	615 973,21
Nyitópont Z koordinátája (mBf)	10,97	6,43	6,90	11,04	6,19	5,90
Fúróllyuk irányszöge (°)	81,27	64,71	88,56	81,20	75,04	66,94
Fúróllyuk dőlése (°)	8,75	2,52	2,61	5,69	2,35	2,02
Átlagos repedettség – RQD (%)	36,7	45,1	47,2	40,3	38,5	45,4
EWG szakasz repedettsége–RQD (%)	20,8	76,0	40,1	40,2	31,7	38,2
Átlagos RMR érték (-)	42,19	48,39	49,23	44,02	48,91	50,08
EWG szakasz RMR értéke (-)	37	72	41	42	47	52
EWG szakasz geotechnikai minősítése	IV (gyenge)	II. (jó)	III. (megfel.)	III. (megfel.)	III. (megfel.)	III. (megfel.)

A fenti táblázat geotechnikai adatai alapján is nyilvánvaló vált, hogy az előzetes prognózis alapján csak részben sikerült az, hogy a cellák a tervezettnél megfelelő kőzetminőség mellett kerüljenek telepítésre. A IV. kőzetosztályba tervezett Bkc-7 cella ugyan még valóban a IV. kőzetosztály legfelső tartományába esik, de a fél szelvény másik, Bkc-8 jelű cellája (ez van legmesszebb a kamrától) esetében az említett földtani bizonytalanság már olyan mértékű volt, hogy a fúrás kérdéses utolsó szakasza a tervezett IV. helyett II. kőzetosztályt tárt fel.

### 2.3 A mérőrendszer előkészítése és telepítése

A tervezett telepítési geometria alapján a mérésekhez alkalmazott CSIRO-HI cellákat változó, 40 illetve 45 m hosszúságú jelkábelekkel rendeltük meg (ez nagyjából e mérési technika határértékét jelenti). A cellatelepítésre szolgáló, 23 és 31 m között változó hosszúságú fúrólukak felvették a korlátozott kábelhosszak nagyobb hányadát. Így ezúttal nem volt lehetőség arra, hogy a kalott kerülete mentén, különböző pozíciókban mélyített fúrólukból kivezetett jelkábelek adatainak folyamatos gyűjtését egyetlen automatikus mérő-adatgyűjtő egységgel oldjuk meg. Ezért a mérésekhez két darab, a Campbell Scientific által gyártott, multiplexelt bemenetű CR1000-es adatgyűjtő egységet telepítettünk; mégpedig oly módon, hogy az egyik négy cella (az É-i helyzetű három cella és az egyik főtécella), a másik pedig két cella (a D-i helyzetű és a másik főtécella) jelkábelének bekötésére legyen alkalmas. Az adatgyűjtőkhöz cellánként egy-egy megfelelő kompenzátor (jelillesztő egység) is tartozik. Ezek az egységek a cellákban található bélyegeket nagy pontosságú 120  $\Omega$ -os referencia-ellenállások révén egészíti ki a mérésre alkalmas módon. A mért jel ezen konverzió után jut a multiplexer egységekbe, majd egy-egy analóg-digitál átalakítón keresztül a CR1000-es adatgyűjtőkbe. A multiplexerek alkalmazása révén az egyes cellákból származó 12 db deformáció- illetve 1 db hőmérsékleti jel egyszerre, integráltan kezelhető. A multiplexerek időzítését is a CR1000-es egységek végzik.

Az ausztrál gyártó cég előzetesen elvégezte a cellák és az adatgyűjtő egységek összemérését, kalibrálását is. (Mivel a mérőbélyeges mérőrendszer igen érzékeny a kábelhosszra, ezért az értékeléseknél a gyártó cég által már összeszerelt állapotban meghatározott kalibrációs faktorokat vettük figyelembe.) A kalibrációs összefüggéseket beépítette a szintén általa biztosított értékelő szoftverbe is. Így a mérések megkezdése előtt további kalibrációs mérésekre már nem volt szükség.

A cella és a fúróluk előkészítése, valamint a cella megfelelő pozícióba történő, orientált beragasztása rendkívül nagy figyelmet igénylő, bonyolult munkafolyamat, ahol akár egyetlen rossz mozdulat is a költséges cella, vagy rosszabb esetben akár az előkészített fúróluk elvesztéséhez is vezethet. Ezért az előkészítés és a telepítés valamennyi munkafázisához részletes ellenőrzési listát állítottunk össze. A munka valamennyi mozzanatát az ellenőrzési listában foglaltak szerint, nagyon pontosan hajtottuk végre, és ezt írásban is dokumentáltuk. Ennek eredményeként a teljes telepítési program során nem fordult elő technológiai hiba; a cellák kivétel nélkül a tervezett pozíciójukba kerültek, és maradéktalanul működőképesnek bizonyultak.

A cellák telepítésének teljes befejezését követően, egy ütemben végeztük el az adatgyűjtő egységek felszerelését valamint a kábel- és műszervédelem kiépítését. Az adatgyűjtő egységek esetében a va-gyonvédelmet korrózióálló, profilkulccsal nyitható ajtós védődobozok biztosítják. Ezek önmagukban azonban nem lettek volna képesek biztosítani a robbantások mechanikai hatásaival szembeni védelmet. Ezért ezeket egy-egy nagy falvastagságú, robbantásálló kivitelű, löttbetonnal is biztosított acél védőszekrényben helyeztük el. A már említett fúrófülkék hiányában különleges problémát okozott az, hogy a cellák és azok jelkábeleik a kamra továbbhajtása során ne sérüljenek meg. (Az alacsony kitérésű szöggyel mélyített fúrások az induló vájvég síkjában mindössze 10 cm távolságban voltak a névleges kitérésű szelvénytől...) Kiegészítő műszaki védelem gyanánt a jelkábeleket előzetesen műanyag védőcsőbe húztuk be, majd azokat a fúrólukakba beépített, BQ fúrócsövekből álló 9,0 m-es technikai cső-rakaton is átfűztük. Mivel az ideiglenes szelvényelhagyást (unterprofil kialakítását) nem engedélyezték, ezért ez csak igen alacsony védelmi szintnek felelt meg, amit – a bányászati munkák felelőseinek közvetlen, helyszíni irányítása mellett – a robbantási kontúr megfelelő kialakításával (pl. lyukak sűrítésével, eltolásával), és a töltetek elrendezésével próbálták meg kiegészíteni. Ezen kívül a robbantási munkák megkezdése előtt, és azt követően minden robbantás előtt (fogásonként folyamatosan kiegészítve) felfestették az oldalfalakra és a főtéren a fúrások vágatfalakra eső vetületi nyomvonalát. A kö-zethorgonyzás így kijelölt tilalmi sávja biztosította azt, hogy a fúrólukak és a jelkábelek a horgony-lyukak fúrása során ne sérüljenek meg.

Az adatgyűjtő egységek telepítésének végeztével, már azok indítását követően történt meg a védődobozok löttbetonos eltakarása. Az első ilyen művelet következtében a D-i védődoboz belsejében fellépő magas hőmérséklet és páratartalom tönkretette a Bkc-9 cella kompenzátor egységét, amit a későbbiek során – több, sikertelen javítási kísérletet követően – ki is kellett cserélni. E tapasztalatok alapján a másik, a kamra É-i oldalán telepített védődoboz betonlövése előtt megtett különleges műszaki intézkedésekkel sikerült elkerülni a hibajelenség megismétlődését.

Az alábbi 2. táblázat a lemélyített fúrólukak illetve az azokba telepített cellák legfontosabb geometriai adatait illetve az értékelés során felhasználandó egyéb jellemzőit foglalja össze. Meg kell jegyezni, hogy a táblázatban a celláknak a szabad szelvénytől való távolsága csak névleges adat, hiszen a vágathajtás során a löttbeton falazat undulál. E bizonytalanság maximális mértéke a tapasztalatok szerint néhányszor 10 cm lehet.

**2. táblázat.** A Bkc-7; ...; Bkc-12 jelű fúrólukákba installált CSIRO HI-cellák geometriai és egyéb telepítési adatainak összefoglalása

Fúrás (cella) jele:	Bkc-7	Bkc-8	Bkc-9	Bkc-10	Bkc-11	Bkc-12
Cella lyukbeli telepítési mélysége (m)	23,30	22,81	30,54	28,77	29,56	28,89
Cella kamrabeli pozíciója (kamra fm)	74,60	74,61	83,18	80,13	82,24	81,12
Cella távolsága a szabad szelvénytől (m)	3,54	6,63	3,70	2,85	3,38	7,31
Telepített cella gyári száma	8861	8693	8868	8862	8692	8694
Cella kalibrációs értéke (-)	2,071	2,077	2,077	2,071	2,077	2,077

#### 2.4 A mérőrendszer üzemeltetése a kamrahajtás időszakában

A CSIRO HI-cellás mérőrendszer üzemeltetését a kamrahajtás időszakában a Kómérő Kft. munkatársai végezték el. A fentiek szerint kialakított mérőhelyek egyedi üzeműek, programozható adatgyűjtő egységüket számítógéppel, egyedi célszoftverrel kell a helyszínen kiolvasni. A rendszer mintavételi gyakorisága a teljes mérési időszakban 30 perc volt. Az adatgyűjtő egységeket az I-K1 kamra kalottjának 65 és 90 fm-es szakaszán végzett robbantásokat, illetve az I-K2 kamra valamennyi robbantását követően naponta ellenőriztük és olvastuk ki. Az ettől eltérő esetekben is legfeljebb ötnapos kiolvasási ciklust állítottunk be. Ez biztosította azt, hogy a rendszerben fellépő hibajelenségek észlelésére és lehetőség szerinti javítására késedelem nélkül sor kerülhetett, és így a rendszerben az adatvesztések száma a kérdéses időszakban minimális volt.

A CSIRO HI-cellás mérőrendszer általános sajátossága, hogy a mérések során egy, a kezdeti időszakban intenzív, aztán fokozatosan csillapodó drift-jelenséggel kell számolni. A pontos mérésekhez természetesen nem kell kivárni a cellák teljes stabilizálódását, hanem csatornánként csak egy-egy olyan, matematikailag egyértelműen leképezhető trendet kell felvenni, ami alapján a mérési eredmények időfüggő korrekciója elvégezhető. A Mórágvi Gránit termikusan kvázi-stabilnak tekinthető közetkörnyezete mellett – a HGM-kamrához hasonló módon – egy hetes stabilizációs időszakot irányoztunk elő. Sajnálatos módon – munkaszervezési okokból – ezt sem sikerült betartani, mivel a kamra kihajtását a telepítés befejezését követően szinte azonnal, május 18-án folytatták. Ez a körülmény csak a szerencsének köszönhetően nem okozott torzulást az eredményekben. A cellánként eltérő telepítési geometria miatt a robbantások érzékelhető hatásai (az ún. robbantási lépcsők) igen különböző időpontokban kezdtek jelentkezni az egyes regisztrátumokon: először értelemszerűen a legközelebbi, főponti helyzetű Bkc-7 jelű cellán (május 24-én), legkésőbb pedig a D-i, oldalponti helyzetű Bkc-9 jelű cellán (csak július 6-án). Így a Bkc-7 cella esetében még a késedelem nélküli továbbhajtás ellenére is több mint 5 napos, zavartalan stabilizációs időszak alakult ki. (Ebben az esetben a „zavartalan” kifejezés alatt tehát nem a robbantásmentes állapotot, hanem az első robbantási lépcső megjelenése előtti, külső beavatkozás nélkül felvett időszakot kell érteni!) A szerencsés geometria miatt a többi cella esetében – a Bkc-10 kivételével – a „zavartalan” stabilizációs időszak hossza mindig meghaladta az előirányzott 1 hetet.

A legrövidebb stabilizációs szakasz (mindössze 2 nap) a Bkc-10 cella esetében állt elő. Ennek oka a következő volt: A fúrófülkék hiányában védelmi megoldásként alkalmazni tervezett, helyszíni fúrás- és töltésirányításon alapuló robbantási eljárás az első, május 18-án végrehajtott robbantás során sikerrel járt ugyan, de a másnapi robbantás során a Bkc-10 fúrás védő acélcsöve szabadra került, és annak összeroncsolódása is láthatóvá vált. A kiolvasott adatsorok szerint egyértelmű volt, hogy a robbantás pillanatától a jelkábel megsérült; a cella egyetlen csatornája sem produkált értékelhető jelet. Tekintettel arra, hogy a helyreállítás esélyét igen alacsonynak ítélték, a másnapra kidolgozott részletes, frásos helyreállítási terv végrehajtására csak május 26-án kaptunk engedélyt. Az elvégzett helyreállítási műveletek – a szerencsés körülmények miatt – teljes sikerrel zárultak; azóta a cella újra teljes funkcionalitással működik. Mivel a kamrahajtás a kábelszakadás és a javítás engedélyezése között eltelt több nap alatt is folytatódott, így e cellánál a stabilizációs időszak rövidege okozhatott némi bizonytalanságot a mérési eredményben. Minthogy azonban a cellát rögzítő ragasztó termikus deformációi szerencsére erre az időszakra már minimalizálódtak, a javítást követően szinte azonnal minden csatornán jól közelíthető, szabályos jeleket sikerült felvenni. Így e bizonytalanság mértékét legfeljebb  $\pm 10\%$ -ra becsülhetjük.

Amint azt a célkitűzések kapcsán már említettük, a mérőrendszer úgy került telepítésre, hogy az lehetőleg mindkét kamra kihajtásának mechanikai hatásairól szolgáltatthasson információkat. Amint azt a következő fejezetekben részletesen is bemutatjuk, ez a célkitűzés teljesült, mivel több cellán nem csak az I-K2 kamra műveleteit, hanem az I-K1 kalottjának, sőt talpszeletének hatásait is egyértelműen azonosítani lehetett. Egy ilyen mérőrendszer esetében az amúgy is igen sok munkával járó, bonyolult kiértékelési folyamatot rendkívüli mértékben megnehezíti, ha a vágathajtást sok különböző, alternáló

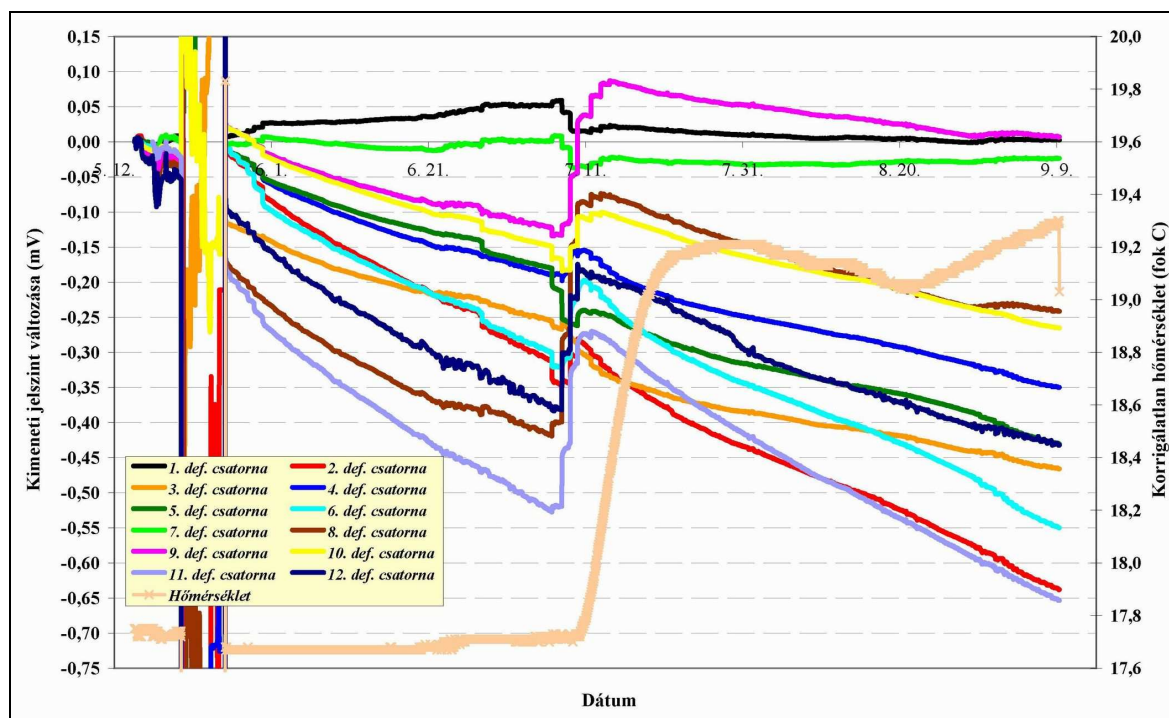
fázisra kell felosztani. Ezért ebből a szempontból szerencsésebb lett volna, ha legalább az azonos hatásfázisok (például az I-K2 kalottjának kihajtása) folyamatosan, megszakítás nélkül végig tudott volna haladni, és a következő, külön értékelendő művelet (például az I-K1 kalottjának kihajtása) csak ezután indult volna el. Sajnálatos módon azonban – munkaszervezési és időütemezési okokból – ez nem valósulhatott meg, mivel a CSIRO HI-cellás mérőrendszer megfigyelési időszakán belül számos alkalommal, szabálytalan időközönként változott a munkavégzés helyszíne. A legnagyobb problémát azonban az adott, folyamatos hatásfázist megszakítva a másik kamrában végrehajtott egyedi robbantások jelentették. Ezek a „kakukktójások” minden alkalommal megzavarták a folyamatos értékelés menetét, mivel az időben változó műszerdriftek csatornánkénti matematikai leképezését az egyes hatásfázisokra külön-külön kellett elvégezni.

A várakozásoknál lényegesen nehezebb technológiai és munkaszervezési körülmények ellenére, a gondos üzemeltetés eredményeképpen a regisztrátumok teljesnek mondhatók: a teljes mérési időszakban csak egészen minimális mértékű adatvesztés történt. A mostoha körülmények ellenére a 6 cellába integrált összesen 72 db mérőbéllyegből mindössze kettő hibásodott meg; valamennyi további bélyeg teljes funkcionalitással végezte el feladatát. Mivel a cellákban a bélyegelhelyezés redundáns módon történik, így ezek a hibák sem befolyásolták érdemben az értékelést. Általános, több cellát is érintő adathiány a 4 hónap alatt egyszer sem lépett fel. A cellák csatornáin regisztrált jelsorozat a teljes megfigyelési időszakban stabilnak, a robbantási hatások elkülönítésére alkalmasnak tekinthető.

### 3 A MÉRÉSEK ADATAINAK FELDOLGOZÁSA, ÉRTÉKELÉSE ÉS ÉRTELMEZÉSE

#### 3.1 Az adatok előfeldolgozása és a bélyegdrift-korrekció számítása

A CSIRO HI-cellás mérőrendszer két darab CR1000 típusú adatgyűjtőről ASCII-formátumban kiolvasott mérési adatsorok tartalmazzák a kiolvasások időpontjait. A kiolvasott nyers adatsorok automatikusan egy-egy előfeldolgozó, Microsoft Excel környezetben a Kőmérő Kft. által kialakított munkalaprendszerre kerülnek. Ezek segítségével lehet összefűzni a kiolvasott rész-adatsorokat, majd diagram formájában megjeleníteni a nyers (mV egységben kiolvasott) deformációs adatsorokat is. (A megfelelő gyári kalibrációs értékek figyelembe vételével elvileg itt is el lehetne végezni a valódi deformációs adatsorok kiszámítását és idősor jellegű diagram formájában történő megjelenítését, de ezt gyakorlati okokból a feldolgozás egy későbbi lépésében tesszük meg.) Ezek a nyers diagramok azok, amik alapján folyamatosan ellenőrizhető a rendszer egyes elemeinek működőképessége, az esetleges meghibásodások valamint – a robbantási időadatokkal együtt kezelve – ezek felhasználásával állapíthatók meg, hogy az adott cellákra mely robbantások voltak érzékelhető hatással (robbantási lépcsők). A 4. ábrán, példaként a Bkc-10 jelű cella teljes kamrahajtási időszakában felvett nyers regisztrátumát mutatjuk be. Az ábrán a robbantási lépcsők mellett jól megfigyelhető az előző fejezetben leírt kábelszakadásból eredő értékelhetetlen zavarjelek periódusa is (május 19 és május 26. között).



4. ábra. A Bkc-10 jelű cella nyers regisztrátuma a kamrahajtás teljes időszakában



Az adatfeldolgozás következő fázisában történik az ún. bélyegdrift-korrekciók kiszámítása. Erre azért van szükség, mert az említett fizikai okok miatt a cellák bélyegeinek jelszintje zavartalan, vágathajtás nélküli állapotban sem konstans. Ez a jelenség nem kiküszöbölhető, de megfelelően hosszú beállási idővel modellezhetővé és ezáltal korrigálhatóvá válik. Az üregképzés hatásaként a bélyegeken jelentkező deformációkat tehát a kiolvasott értékek és a bélyegdrift alapján számított elméleti adatsorok különbségeként lehet megkapni. Normál esetben, egyetlen folyamatos, állandó szelvényű és helyszínű vágathajtási ciklus mellett ezt a korrekciós lépést elegendő egyszer, a stabilizációs időszakban mért bélyegdrift adatok alapján elvégezni. Ahogy azonban az előző fejezetben ezt bemutattuk, egyrészt a különböző, alternáló hatásfázisok miatt, másrészt pedig a hosszan elnyúló kivitelezési és megfigyelési időszak miatt ezt a bélyegdrift-korrekciót nem lehetett csatornánként egy függvényként kezelni. Így az alábbiakban részletezett feldolgozási lépéseket cellánként 5-6 alkalommal kellett elvégezni.

A korrekciós számítások első lépéseként azonosítani illetve a hatásfázisok szerint csoportosítani kellett azokat az időszakokat, amikor a regisztrátumokon egyértelműen jelentkeztek a robbantások hatásai. Ezt követően a – sokszor zavarjelekkel terhelt – adatsorokból minden egyes hatásfázis esetében ki kellett választani egy relatíve hosszabb, nyugodt, matematikailag jól leképezhető időszakot, aminek időben minél közelebb kellett esnie az egyértelmű hatást kiváltó robbantásokhoz. A kiválasztott időszakban regisztrált értékeket a Microsoft Excel szoftver alkalmazásával csatornánként diagramokon ábráztuk. Még a HGM-kamra kapcsán elvégzett feldolgozások során különböző típusgörbéket (lineáris, hatvány,  $n$ -edfokú polinom, vagy exponenciális) illesztettünk ezekre az adatsorokra, majd a legkisebb négyzetek elve alapján vizsgáltuk az illeszkedés megfelelőségét. Az akkor elvégzett számítások alapján valamennyi cella minden csatornájára igaznak bizonyult, hogy a vizsgált időszakban a legjobb korrelációt egyenes illesztésével kapjuk. A jelen feldolgozási folyamatban ennek a tételnek az igazolását csak néhány csatorna esetében, szűrőpróba-szerűen vizsgáltuk meg, és ezekből is ugyanezt a következtetést lehetett levonni. Így a tömeges feldolgozást már úgy végeztük el, hogy az egyes csatornák értékeire kizárólag lineáris trendvonalat illesztettünk. Amennyiben valamelyik csatorna esetében az  $R^2$  értéke nem érte el limitként előzetesen megadott 0,9-et, úgy a korábban felvett adatok levágásával addig rövidítettük az elemzési időszakot, amíg az  $R^2$  értéke a megadott határ fölé nem került. Az elemzési időszak minimális hosszára vonatkozólag a követelmény 3 nap volt, de az ismertetett módszer alkalmazásával ennél általában lényegesen hosszabb alap-időszakokat sikerült azonosítani.

Az egyenesek illesztését mind a hat cella esetében (cellánként 12-12 db mérőbélyegre) minden egyes, előzetesen azonosított hatásfázisra vonatkozólag külön-külön el kellett végezni. (Mindez hozzávetőleg 390 db ilyen feldolgozást jelentett.) Fontos kiemelni, hogy mivel az egyes cellák más és más időpontokban elvégzett robbantásokra reagáltak, ezért még a referencia-időszakokat sem lehetett egy-egy hatásfázison belül azonosra választani.

A nyers idősorokon is jól megfigyelhető, hogy az egyes csatornákon egy-egy robbantás után kialakuló jelszint nem állandó, de ez a jelenség nagyobb nagyításban még egyértelműbb. Közvetlenül a robbantás időpontja után általában egy tranziens csúcs figyelhető meg a robbantási lépcső elején, ami néhány órán belül cseng le a robbantás hatását valóban jellemző stacioner szintre. Éppen ezért az adatfeldolgozás során nem a két robbantás között felvett valamennyi adatértékből számítottuk az átlagos jelszintet, hanem ebből kihagytuk a robbantás utáni első 8 óra értékeit. Az ezt követő, a feldolgozásba bevont időszak hosszát viszont a lehető legnagyobbra választottuk annak érdekében, hogy az esetleges zavarjelek torzító hatását minimalizáljuk.

Az üregképzés hatásait a bélyegeken ténylegesen mért deformáció-értékekből a fenti átlagolási eljárással kapott eredmény és a bélyegdrift alapján számított elméleti adatsorok különbségeként számszerűsíthetjük. Az ismertetett módszerrel meghatározott, az adott hatásfázisban az adott csatornára jellemző bélyegdriftet legjobban közelítő egyenes egyenletéből egyszerű extrapolációval adódtak azok az elméleti kimeneti jelszintek, amik az egyes csatornákon vágathajtás nélkül egy-egy adott időpontban valószínűsíthetően jelentkeztek volna. Azt az időmetszéket pedig, amire a bélyegdrift-korrekciós függvényt extrapoláltuk, az elemzésbe bevont, két robbantás közti időszak középértékeként kaptuk meg.

Az így kapott csatornánkénti deformációértékek egy-egy robbantás hatásait számszerűsítették. Ahhoz, hogy a hatás felépülését egységes idősorként lehessen kezelni, ezeket az értékeket kumulálni kellett. Ezt követően, a feldolgozás utolsó lépéseként, a kapott nyers, mV-ban kifejezett eredményeket a cellák kalibrációs adatainak felhasználásával valós deformáció-értékeké konvertáltuk. Az így kapott végeredmények – a robbantások időpontja szerint idősorba rendezve – már alkalmasak voltak a célszoftverben történő feldolgozásra.

### 3.2 Az egyes robbantások által kiváltott feszültségváltozások számítása és ábrázolása

A fentiek szerint előkészített adatok értékeléséhez az ausztrál ES&S cég által kifejlesztett, a CSIRO HI-cellák monitoring-jellegű üzemeltetési adatait befogadni és feldolgozni képes, Microsoft Excel makró-alapú célszoftvert (Stress2011\_monitoring version) alkalmaztuk. A szoftver értékelő algoritmus a Fama & Pender 1980 jelű publikációban közölt levezetések szerint készült. A teljes feszültségváltozás komponenseinek számításához elvileg elegendő lett volna az is, ha a számításokat csak az utolsó kamraroobbantás után regisztrált értékekből végezzük el. A fentiek szerint előkészített adatbázis azonban lehetőséget adott a feszültségváltozások teljes időbeli lefolyásának nyomon követésére is. Ez az eljárás igazán érdekes többletinformációkat eredményezett ahhoz képest, mintha csak a kezdeti és a végállapotot hasonlítottuk volna össze. A teljes időbeli lefolyás számításához mind a hat cella esetében a fentiek szerint korrigált idősorok valamennyi, az értékelésbe bevont időmetszékéből el kellett végezni a részletes számításokat. Ez azt jelenti, hogy minden olyan robbantásra vonatkozólag, amikor az adott cellán észlelhető hatásokat regisztráltunk, számszerűsíthetővé vált, hogy az adott robbantás után a cellákat befogadó közetzónákban milyen térbeli feszültségváltozás ment végbe.

A feszültségváltozás és az annak hatására a mérőcellában fellépő deformáció közötti kapcsolatot az értékelő algoritmus a klasszikus mechanikából jól ismert lineárisan rugalmas viselkedés feltételezésével teremti meg. Így a számításokhoz az epoxy ragasztóra illetve a közetkörnyezetre jellemző Young modulus –  $E$  – és Poisson hányados –  $\nu$  – (vagy Poisson szám –  $m$ ) értékekre is szükség van. A ragasztóra vonatkozólag a forgalmazó megadta a jellemző értékeket ( $E_{\text{epoxy}} = 2,60 \text{ GPa}$ ;  $\nu_{\text{epoxy}} = 0,4$ ). Sajnos a Bkc-fúrásokból maganyagából kialakított szabványos laboratóriumi mintatestek laboratóriumi mérési adatai a jelentés elkészítésének időpontjában még nem álltak rendelkezésre. A vizsgált térszében korábban mélyített előfúrások (BK2-1; BK2-3) maganyagából készült hasonló vizsgálatok adatai alapján azonban – viszonylag alacsony szintű bizonytalanság mellett – a közet Young-modulus értékét megalapozottan lehetett  $70 \text{ GPa}$ -nak, míg a Poisson-hányados értékét  $0,25$ -nek választani. Így a további számítások során egységesen, valamennyi cellára vonatkozólag ezeket az adatokat alkalmaztuk. (Mivel a cellák telepítésére a korábban leírtak szerint csak ép közetben kerülhetett sor, ezért az ép laboratóriumi mintákon meghatározott paraméterek a számításokhoz korrekció nélkül voltak alkalmazhatók.)

A fúrások illetve a cellák orientációjára és geometriájára vonatkozó paramétereket az 1. és 2. táblázatban bemutatott adatokkal egyezően, míg a cellákra jellemző további, a számításokhoz szükséges alapadatokat (pl. a fizikai méretek és a bélyegek orientációja) a cellákhoz mellékelte gyártói adatlapok alapján vittük be a szoftverbe.

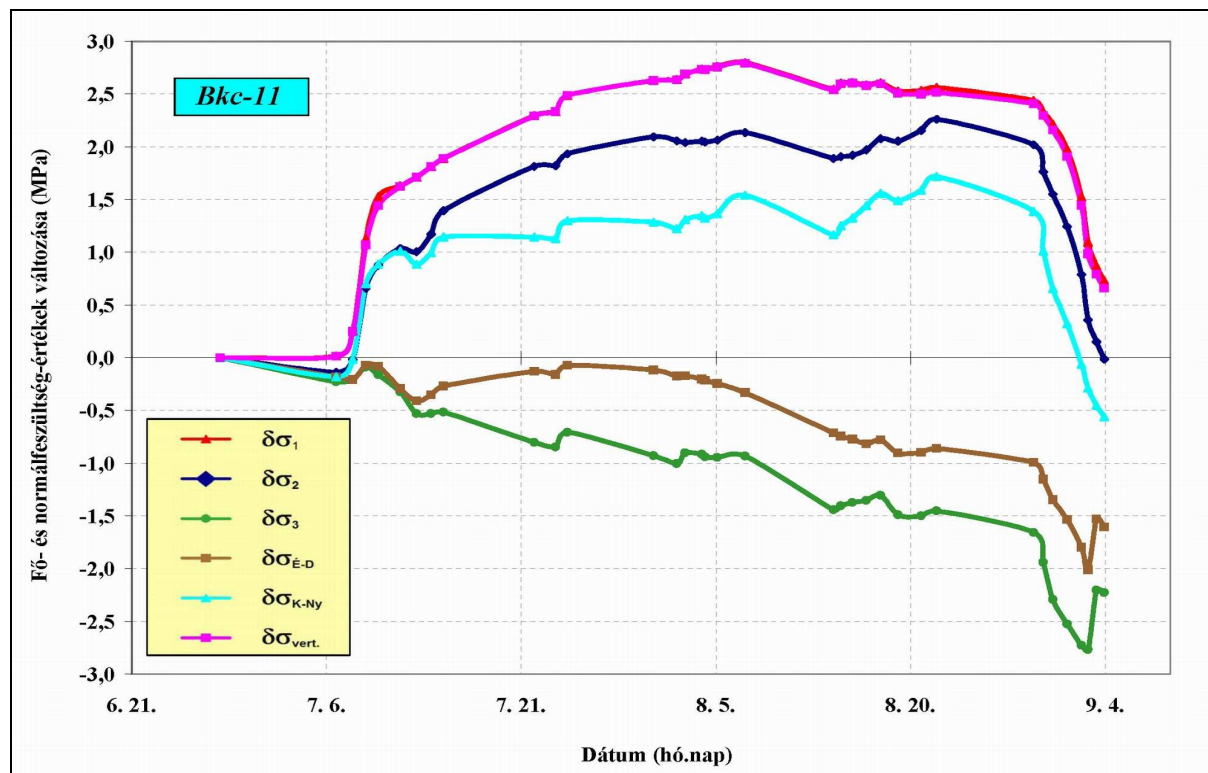
Az értékelő szoftver futtatása során a közetfeszültségek számítása többszörös (iteratív) lineáris regressziós eljárásorozattal történik. Ennek során a program először a viszonyítási rendszer normál és csúsztatófeszültségeinek értékeit számítja ki, illetve meghatározza ezek és a bemenő adatok viszonyára jellemző statisztikai adatokat. A mért értékekhez legjobban illeszkedő feszültség-adatsort fokozatos közelítéssel kapjuk meg. A számított komponensek értékeiből és standard hibáiból aztán a főfeszültségek magnitúdója és helyzete is meghatározható. Ismételt hangsúlyozni kell, hogy a jelen esetben a mérési elrendezés jellege olyan, hogy nem magukat az egyes feszültségkomponenseket, hanem pusztán azok változásait kapjuk meg. Így a  $\delta\sigma_1$  nem a legnagyobb főfeszültség-komponens megváltozását, hanem a legnagyobb mértékű főfeszültség-változást jelenti.

Az egyes futtatások eredményeit tartalmazó kimeneti file-ok adatait a szoftver táblázatos formájában foglalja össze. Ezek a táblázatok az egyes robbantási időpontokhoz rendelve megadják a  $\delta\sigma_1$ ,  $\delta\sigma_2$  és  $\delta\sigma_3$  magnitúdóit, irány- és dőlés-adatait, valamint a térbeli főirányokra jellemző normál- és csúsztatófeszültség-változások értékeit. Ezen kívül a szoftver megadja még azt is, hogy a statisztikailag elfogadható megoldáshoz szükség volt-e valamely csatorna adatainak kizárására.

Mivel a cellákat befogadó közetzóna feszültségviszonyait több jövesztési hatásfázis is – sokszor egymással ellentétes irányban – befolyásolta, ezúttal volt értelme annak is, hogy a kapott feszültségváltozási végeredményeket egységes idősor formájában is bemutassuk. (Az 5. ábrán példaként a Bk-11 jelű cella feszültségváltozási időszora látható.) Ezek a diagramok jelentős segítséget nyújtottak annak meghatározásában, hogy a cellákra mely jövesztési fázisok hatottak érdemben, és így a további értékelések során hány hatásfázist kell az alábbiak szerint külön-külön megvizsgálni.

Az értékelés utolsó lépésében a kapott eredményeket ugyanis már nem idősorként kezeltük, hanem azt vizsgáltuk meg, hogy a vājvégek (külön-külön a kalott- illetve talpszelet-vājvégek) mindenkor helyzete hogyan befolyásolja a cellákon mérhető feszültségváltozásokat. Célszerűségi okok miatt a vājvég és a cellák relatív helyzete alatt a vājgattengelyre merőlegesen vetített cellaközéppont és az aktuális vājvég között a tengelyen mért távolságot értjük. (A negatív előjel értelemszerűen azt jelenti, hogy a vājvég az adott robbantás után még nem érte el a CSIRO HI-cellák telepítési síkját.) Mivel az ismertett jövesztési rendszerben a „vājvég” mind az I-K1, mind pedig az I-K2 kamrában 2-2 alkalommal ér-

hette el például a cella kamratengelyre merőleges, függőleges síkját, ezért egy adott cella esetében elvi maximumként négy ilyen elemzésre volt lehetőség.



5. ábra. A Bkc-11 jelű cella adataiból számított feszültségváltozások alakulása a teljes megfigyelési időszakban

Ahogy azt már említettük, a számításokat kizárólag az időben egymást követő robbantások szekvenciális jellegű feldolgozásával lehet megfelelően elvégezni, mivel csakis ebben az esetben kapjuk vissza a valós, időben egymásra épülő feszültségváltozásokat. Amennyiben egy-egy jövesztési hatásfázis folyamatosan, a másik kamrában illetve a másik szeletben végzett közbenső robbantás(ok) nélkül zajlott volna le, akkor ezek a számítások közvetlenül megadták volna az adott hatásfázisnak (pl. az I-K2 kalott kihajtásának) a feszültségre gyakorolt következményeit. A következő lépésben, az azonos kamrához illetve szelethez tartozó robbantási események célszerű csoportosításával el kellett készíteni azokat a táblázatokat illetve diagramokat is, amelyek alkalmasak a vájvég és a cella közti távolság függvényében változó fő- és normál feszültség-komponensek áttekinthető bemutatására. Ez a munka a már ismertetett több, „zavaró” robbantás miatt nem volt automatizálható; csakis az egyes konkrét időponthoz tartozó feszültségmódosító hatások célszerű leszűrésével illetve a csoportosítás utáni kumulálásával lehetett csak megkapni a kívánt eredményeket.

A megfelelő előkészítés után a Bkc-7...Bkc-12 jelű CSIRO HI-cellák előfeldolgozott adatsoraiból kiszámítottuk a fő- és normál feszültség-változások alakulását, majd ezeket jövesztési fázisonként csoportosítva, a cella és az aktuális vájvég távolságának függvényében ábrázoltuk is. Az adott jövesztési fázishoz tartozó ilyen diagramot csakis abban az esetben készítettük el, ha az adott robbantási sorozat feszültségmódosító hatása jelentősnek volt mondható. Jelentős hatásnak azt tekintettük, ha az adott fázisban a főfeszültség-változások abszolút értékei legalább a 10%-át érték a teljes megfigyelési időszakban számított  $\delta\sigma_1$ ,  $\delta\sigma_2$  és  $\delta\sigma_3$  adatok abszolút érték-maximumának. E kritérium figyelembe vételével az elvileg lehetséges négyből a Bkc-7;...; Bkc-10 jelű cellák esetében csak 2-2 diagramot, míg a Bkc-11 cella esetében 3 diagramot volt érdemes elkészíteni. Egyedül a Bkc-12 jelű cella bizonyult olyannak, ahol mind a négy jövesztési fázis eredményeképpen jelentősnek nevezhető hatás bontakozott ki.

Hangsúlyozni kell, hogy a jövesztési fázisokra bontott diagramokat úgy készítettük el, hogy az előző fázis végén kapott feszültségváltozási értékeket zérusnak tekintettük (az adatokat erre a pontra normáltuk), és így csak az ettől kezdve kibontakozó változásokat ábrázoltuk. Így viszont az I-K2 kamra kalottjának kihajtását követő fázisokat bemutató diagramokon első látásra akár rossznak is tekinthető adatokat láthatunk: pl. a  $\delta\sigma_1$  kisebb értékeket vehet fel, mint a  $\delta\sigma_3$ . Fel kell hívni tehát a figyelmet arra, hogy a leírt eljárás következtében ezek a másodlagos hatásdiagramok már nem pl. a jövesztési folyamat tényleges maximális feszültségváltozásáról adnak számot (ehhez az adott fázist teljesen kü-

lön kellene értékelni, ami szintén irreális eredményeket adna), hanem arról, hogy az adott fázisban a maximális feszültségváltozás ( $\delta\sigma_1$ ) hogyan módosult.

Ahogy azt már említettük, a számított főfeszültség-változásokat azok magnitúdójával, dőlésével és azimutjával lehet definiálni. Ezek alakulása táblázatos formában ugyan jól nyomon követhető, de a térbeli helyzet többszöri változása miatt ezek vizuális szemléltetése nem könnyű feladat. Ezúttal azonban segítségünkre volt az a körülmény, hogy az I-K2 kamra tengelye illetve a fúrásokba installált cellák többségének pozíciója is közel esett az egyik térbeli főirányhoz (KNy-i). Minthogy a három térbeli főirányban értelmezett normálfeszültségek helyzete magától értetődik, amennyiben ezeket is ábrázoljuk a cella és a vájvégek távolságának függvényében megszerkesztett diagramokon, úgy e feszültségkomponensek valamint a  $\delta\sigma_1$ ,  $\delta\sigma_2$  és  $\delta\sigma_3$  adatok egymáshoz viszonyított alakulása irányadó lehet a folyamatok térbeliségének megítéléséhez is.

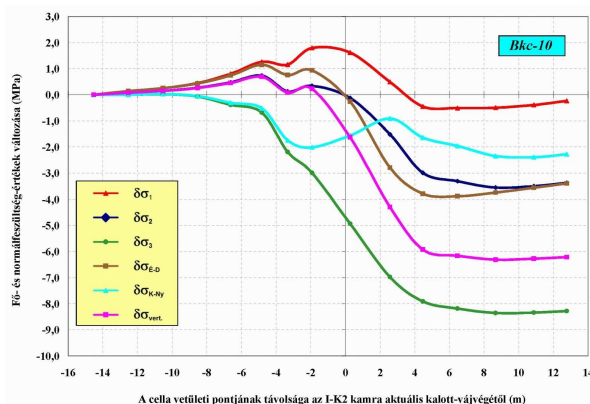
### 3.3 A kapott eredmények értelmezése

A mérésorozat legfontosabb eredményének azt tekinthetjük, hogy sikerült elkülönített módon meghatározni a telepítési kamra és a szomszédos tárolókamra kalottjának illetve talpszeletének kihajtása során fellépő feszültségváltozásokat. A mérési program abban a vonatkozásban is kifejezetten sikeresnek és eredményesnek tekinthető, hogy szinte minden hatásfázis esetében meg lehetett adni a stabilizációs szinteket. Ez azt jelenti, hogy a vágathajtás és az annak hatásait kimutatni hivatott mérések addig folytak, amíg a feszültségváltozások már valóban teljesen lecsengtek.

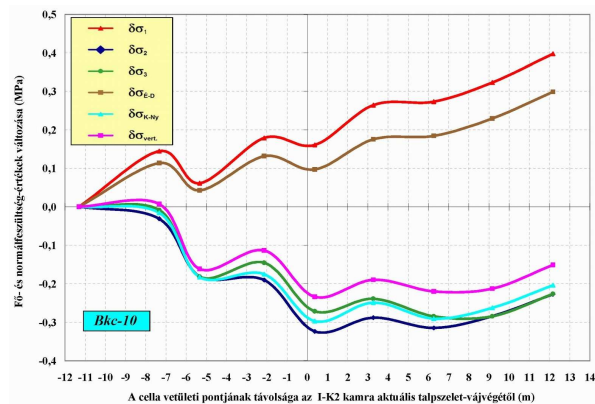
Jelen cikk terjedelme nem teszi lehetővé azt, hogy valamennyi hatásfázisra vonatkozólag külön-külön is bemutassuk az összes cella regisztrátumai alapján számított feszültségváltozási diagramokat. Az alábbiakban csak a gyakorlati szempontból legfontosabb eredmények közlésére szorítkozunk. Az egyes cellák értékelése során kapott eredményeket célszerű csoportosításban vesszük sorra. A csoportosítás alapját nem az képezi, hogy milyen geotechnikai állapotú közetzónában, hanem az, hogy milyen pozícióban telepítettük az egyes cellákat. Így külön-külön foglalkozunk a főteponi és az oldalponi helyzetű cellákkal illetve azokkal is, amelyek a I-K1 és az I-K2 kamra közti pillér középvonalában kerültek telepítésre.

#### 3.3.1 Főteponi helyzetű cellák (Bkc-7 és Bkc-10)

Az előzetes várakozásoknak megfelelően a főteponi cellákkal kimért fő hatást egyértelműen az I-K2 kamra kalottjának elhaladása váltotta ki. A két cellán ez a kamrahajtási fázis meglehetősen hasonló lefutású feszültségváltozásokat indukált, amelyek – némileg ellentétben a HGM-kamrában mért hasonló eredményekkel – többnyire megfelelnek a kontinuummechanika törvényszerűségeinek is. Amíg a HGM-kamrás mérőrendszer cellái esetében – egy jól azonosítható tektonikai jelenség miatt – mind a főfeszültség-változások magnitúdói, mind pedig azok irányai szinte robbantásról-robbantásra jelentősen módosultak, addig a mostani mérésorozat főteponi celláinál viszonylag egyértelmű, konzekvens feszültségváltozási folyamatok bontakoztak ki. Noha a 6. ábra diagramja szerint a Bkc-10 cella esetében néhány robbantási ponton kisebb amplitúdójú hullámzás megfigyelhető ugyan, egyértelműen kijelenthető, hogy ilyen jelenséggel az I-K2 kamra főteponi cellái kapcsán nem találkoztunk.



**6. ábra.** A Bkc-10 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K2 kalott aktuális távolságának függvényében



**7. ábra.** A Bkc-10 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K2 talpszelet aktuális távolságának függvényében

Abban az időszakban, amikor a kalott vájvége megközelítette a cellákat, a legnagyobb főfeszültség-változás ( $\delta\sigma_1$ ), a Bkc-7 cellánál közel 3,0 MPa, míg a Bkc-10 cellánál 2,0 MPa értéket vett fel (vájvég-

előterhelési hatás), majd a cella síkján való áthaladás után a  $\delta\sigma_1$  mindkét cellánál zérushoz közeli szinten stabilizálódott (a Bkc-7 a pozitív, a Bkc-10 pedig a negatív tartományban). A középső főfeszültség-változás ( $\delta\sigma_2$ ) az elhaladás előtt ugyancsak pozitív értéket vesz fel, ami éppen az elhaladás pillanatában megy át a negatív tartományba. Stabilizációs szintje a Bkc-7 esetében közel -5,0 MPa, a Bkc-10 esetében pedig -3,5 MPa. Ugyancsak hasonló, egyaránt szigorúan monoton csökkenő tendenciát fut be a két cellánál a  $\delta\sigma_3$ , ami a Bkc-7 esetében az igen alacsonynak tekinthető -14,0 MPa szintre zuhan, míg a Bkc-10 esetében a  $\delta\sigma_3$  stabilizációs szintje -8,5 MPa lesz.

A számos hasonlóság mellett a legjelentősebb különbség a főfeszültség-változások irányában bontakozik ki. A Bkc-7 cellánál a három főfeszültség-változás igen jó közelítéssel a térbeli főirányokba rendeződik: A legnagyobb mértékű, 14,0 MPa-t is megközelítő csökkenés egyértelműen a vertikális irányhoz, míg a kisebb csökkenés a KNy-i irányhoz köthető. A Bkc-10 esetében a kép már nem ilyen tiszta: A legnagyobb csökkenés itt is a vertikális irányhoz áll ugyan közel, de a  $\delta\sigma_2$  itt inkább az ÉD-i irányban bontakozik ki. A felvázolt különbségeknek háromféle magyarázata is lehet:

- Egyrészt a Bkc-7 jelű cella távolsága a szabad szelvénytől 0,7 m-rel nagyobb, mint a Bkc-10 jelűé (3,54 illetve 2,85 m). Ez a különbség önmagában nem lenne jelentős, de a 4,0 méteres horgonyhosszak mellett ez azt jelenti, hogy amíg a Bkc-10 még a horgonyzás által intenzíven befolyásolt kőzetövön belül, addig a Bkc-7 már annak határán helyezkedik el.
- Bár a két fúrás EWG szakaszának geotechnikai minősítő adatai között nincs jelentős különbség (37 illetve 42 RMR), elképzelhető, hogy az intenzív horgonyzási zónán már kívül eső, részben fellazult főtében a számítások során alkalmazott 70 GPa-nál valamivel alacsonyabb a kőzettest rugalmassági modulusa. Ha ezt feltételezzük, akkor a Bkc-7 cellánál számítható feszültségváltozások abszolút értékei csökkenni fognak. Ez az eshetőség azonban csak az abszolút értékek kapcsán leírt különbségeket magyarázza, az irányok tekintetében azonban a mért adatokkal ellentmondásban van.
- A Bkc-10 cella feszültségváltozási adataiban látható, kisebb méretű hullámmás miatt azt sem lehet kizárni, hogy a kisebb tektonikai jelenségek okozta feszültségmódosító hatások is közrejátszanak az említett jelenségek kialakulásában.

Véglegesen állást foglalni egyelőre nem lehet a tekintetben, hogy a háromféle magyarázat közül melyik a leginkább reális.

Mivel a kőzetek lényegesen alacsonyabb mértékű húzófeszültséget képesek elviselni, mint nyomófeszültséget, mindenképpen foglalkozni kell a főtében kimutatott jelentős mértékű feszültségcsökkenések jelenségével is. A kontinuummechanikai levezetések szerint  $\nu=0,25$  Poisson-szám alatt a főtépontban, tangenciális irányban akár tényleges húzófeszültségek is kialakulhatnak. Éppen ezek elkerülése érdekében van szükség a Bataapátiban is alkalmazott biztosítószerkezetekre, elsősorban a szisztematikus közethorgonyzásra. Biztosított kőzetzónában – különösen a főtéponttól közel 2,8 m távolságban – tehát húzófeszültség elvileg már nem alakulhatna ki. A Kovács 2011 jelű dokumentum szerint a lokális tektonikai módosító hatásoktól mentes esetben a maximális, a horizontális síkban uralkodó főfeszültség értéke 9,4 MPa, míg a vertikális főfeszültségé 7,0 MPa. Az egyes konkrét primer feszültségmérések tapasztalatai szerint egyes lokális törések környezetében – az ún. feszültségáthárítódás jelensége miatt – az említettek messze meghaladó értékeket is lehetett mérni. Mindezek miatt tehát a Bkc-10 cella esetében teljesen reálisnak látszik, hogy még a 8,5 MPa nagytudójú feszültségcsökkenés miatt sem alakul ki a horgonyzott zónán belül húzófeszültség. Más a helyzet a horgonyzott zóna határán lévő Bkc-7 cellával. Ebben a zónában számos korábbi mérés (pl. a BAF föld alatti kutatólaboratóriumában korábban telepített hasonló CSIRO HI-cellás szelvény illetve a Miskolci Egyetem által kivitelezett kombinált geotechnikai-geofizikai vizsgálat (Kovács 1999, 2006) is a kőzetek fellazulását, valós húzófeszültségek kialakulását igazolta. Ezek alapján is az volt várható, hogy a közethorgonyzás hatásövezetének határára telepített Bkc-7 jelű cella valamennyi főfeszültségváltozása negatív, de legalábbis zérushoz közeli lesz. (Egyes statikai elméletek szerint éppen a horgonyzott zóna feletti, korlátozott vastagságú fellazuló kőzetöv önsúlyterhelése jelenti a biztosítási reakcióval legyőzendő terhelést.) A mérési eredmények ebből a szempontból tehát egyáltalán nem tekinthetők szélsőségesnek vagy megalapozatlannak.

A szabad szelvénytől való eltérő távolság mellett a két cella pozíciója között egy másik, kis mértékű eltérés is van: a Bkc-7 cella mintegy 1,0-1,5 méterrel van közelebb az I-K1 kamrához, mint a Bkc-10. Valószínűsíthető, hogy ez a két minimális különbség okozza azt, hogy amíg az I-K2 kalottjának kihajtása mellett – a megfogalmazott kritérium szerint – a Bkc-7 cella esetében az I-K1 kamra kalottjának kihajtása, addig a Bkc-10 cella esetében az I-K2 talpszeletének kihajtása okozott jelentősnek tekinthető mértékű feszültségváltozást. Meg kell jegyezni, hogy mindkét cella esetében mérhető volt a másik robbantási sorozat hatása is, de a limitnél valamivel kisebb mértékben (0,1 – 0,2 MPa maximális értékekkel).

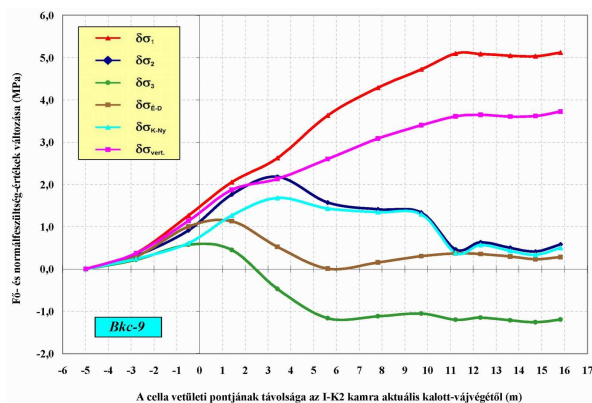
A különböző ható tényezőkkel összhangban, a két főtéponti cella esetében a diagramokon is bemutatott másodlagos hatásnak nem elsősorban a mértéke, hanem a jellege különbözik. Amíg a Bkc-7 cellánál az I-K1 kalottjának kihajtása minden komponens esetében további, egyenes feszültségcsökke-

nést indukált (tovább növelve a húzófeszültségek kialakulásának valószínűségét, addig a Bkc-10 esetében az I-K2 talpszeletének kihajtása közel ÉD-i irányban mintegy 0,4 MPa feszültségnövekményt eredményezett, ami a vizsgált kőzetzónát a kedvezőbb geotechnikai állapot felé tolta el (ld. a 7. ábrán).

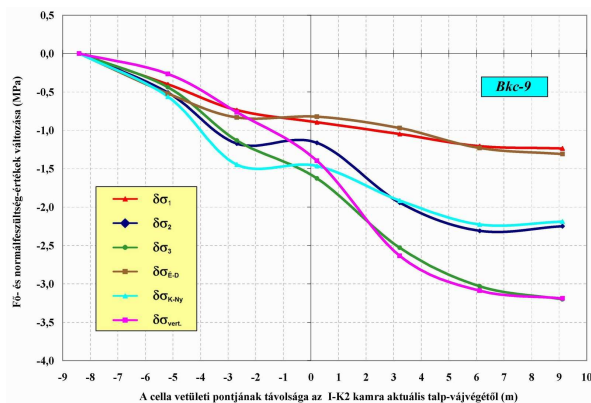
### 3.3.2 Oldalponyi helyzetű, a horgonyzott zóna határára telepített cellák (Bkc-9 és Bkc-11)

A Bkc-9 illetve Bkc-11 jelű cellák egymáshoz képest hozzátétőlegesen tükrözött helyzetben kerültek telepítésre, a kamra jobb és bal oldalán azonos magasságban, egyaránt a közethorgonyzott zóna határára. Kontinuummechanikai megfontolások alapján tehát e cellák esetében is azt várhattuk, hogy – legalábbis az I-K2 kamra robbantásaira – közel azonosan reagálnak majd.

Az I-K2 kalott kihajtása valóban hasonló feszültségváltozási folyamatokat indukált a két cella esetében, mind a jelleg, mind pedig az irányok tekintetében. A várakozásoknak megfelelően az oldalpontban a vertikálishoz közel eső (a Bkc-11 esetében egész pontosan függőleges) irányban jelentősnek mondható feszültségnövekmény volt kimutatható. A két cella viselkedése közötti legnagyobb különbség e növekmény magnitúdójában van: A Bkc-9 esetében a  $\delta\sigma_1$  stabilizációs szintje 5,0 MPa körül van (ami több mint 70%-a az elméleti vertikális primer főfeszültségnek), míg a Bkc-11 cellánál ez az érték a 2,5 MPa-t sem éri el. Ez olyan jelentős különbség, ami a két cellát befogadó kőzetzóna esetlegesen eltérő mechanikai paramétereivel önmagában nem magyarázható. A különbség valódi oka minden bizonnyal a  $\delta\sigma_2$  eltérő lefutásában keresendő. A cella síkjának eléréséig (sőt még azon túl is, mintegy 2-3 méterrel) a  $\delta\sigma_1$  és a  $\delta\sigma_2$  jellege és orientációja mindkét cellánál szinte azonos. Itt azonban a Bkc-9 esetében a középső főfeszültség-változás trendet vált és jelentős csökkenésen megy keresztül (ld. a 8. ábrán). A  $\delta\sigma_1$  kiugrása ennek mintegy kompenzálásaként megy végbe. A Bkc-11 esetében ilyen hatás nem jelentkezik. A Bkc-9 cellánál tehát a kalott 86 m-es vjvégállása környezetében egyértelműen valamilyen tektonikai zavaró hatás érvényesül, ami kontinuummechanikai megközelítéssel nem leírható választ indukált a kőzetkörnyezetben.



**8. ábra.** A Bkc-9 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K2 kalott aktuális távolságának függvényében



**9. ábra.** A Bkc-9 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K2 talpszelet aktuális távolságának függvényében

Kiemelésre érdemes továbbá, hogy a Bkc-9 esetében a cella síkjának harántolása után mintegy 9 és 11 m-rel, valamint a Bkc-11 cella síkjának elhagyása után 10 és 12 méterrel újabb zavarjelek figyelhetők meg mind a két feszültségváltozási diagramon. Mivel a Bkc-11 cella közel 1 méterrel közelebb helyezkedik el a kamra nyitópontjához, mint a Bkc-9, ez azt jelenti, hogy a 92 és 94 kamrafm közötti szakaszon olyan, a vágattengelyre éppen merőleges helyzetű tektonikai elemeket harántolt a vágat, amik a feszültségváltozási folyamatok lefutását befolyásolni képesek. Ennek lehetséges okait a későbbi integrált földtani-geotechnikai értelmezések során azonosítani kell majd.

A  $\delta\sigma_3$  lefutása és stabilizációs szintje a két cella esetében nagyjából hasonlóan alakul: egy általános, de leginkább az ÉD-i irányhoz közelítő irányban közel 1,0 MPa feszültségcsökkenés alakul ki.

A kamra D-i oldalán elhelyezett Bkc-9 cellára az I-K1 kamra kihajtását célzó robbantások értelemszerűen nem voltak érzékelhető hatással. Ez azonban nem mondható el a Bkc-11 celláról, amelynek maximális feszültségnövekményét az I-K1 kalott kihajtása további mintegy 0,4 MPa-lal emelte meg.

A mérésorozat egyik legfontosabb szakmai eredményét jelentik azok a számítások, amelyek az I-K2 kamra talprobbantásainak az oldalponyi cellákon észlelt hatásait mutatják be. A 9. ábrán bemutatottak szerint a talprobbantások eredményeként a Bkc-9 jelű oldalponyi cella zónájában (a Bkc-11 cellához

hasonlóan) jelentős mértékű, valamennyi irányban érzékelhető leterhelődés zajlik le. A Bkc-9 cella esetében vertikális irányban mintegy 3,2 MPa, KNy-i irányban 2,2 MPa, míg ÉD-i irányban 1,3 MPa feszültségcsökkenést mértünk. A Bkc-11 cellánál nem ugyanilyen irányokban rendeződnek sorba a leterhelődések: Itt a maximális mértékű feszültségcsökkenés a KNy-i irányhoz tartozik (-2,3 MPa), míg vertikálisan 1,8 MPa, ÉD-i irányban pedig 1,3 MPa feszültségcsökkenés zajlik le. A jelenség magyarázata az, hogy a szekunder feszültségtérben többlet-terheléseket felvevő oldalponti zóna a talpszelet kihajtása után vertikális értelemben kiterjedtebb lesz, és így a fellépő többletterhelések nagyobb térrészen oszlanak el. Mindez alátámasztja azt a bányászati és alagútépítési gyakorlatban már régóta jól ismert elvet, miszerint amennyiben egy üreg kalottja már biztosított és stabil, akkor annak lefelé történő továbbmélyítése geotechnikai értelemben – legalábbis egy bizonyos, a primer feszültségtér jellegétől függő határig – nem okoz kedvezőtlenebb állapotot.

### 3.3.3 Oldalponti helyzetű, a két kamra közti pillér középvezetékébe telepített cellák (Bkc-8 és Bkc-12)

A mérésorozat egyetlen olyan elemét, amely kissé bizonytalanul értékelhető, a Bkc-8 jelű, a pillér középvezetékébe telepített cella jelenti. Már az adatok előfeldolgozása során is kisebb bizonytalanságot okozott, hogy ennél a cellánál – valószínűleg a telepítési környezet lényegesen kedvezőbb geotechnikai adottságai miatt – a robbantási lépcsők csak nagyobb nagyításban voltak azonosíthatók. Ennek ellenére az előző fejezetben ismertetett bélyegdrift-korrekciós és egyéb előkészítő lépések valamint az egyes robbantásokra adott feszültségváltozási számítások itt is problémamentesen elvégezhetők voltak. Ennél a cellánál fordult azonban egyedül elő az, hogy az iterációs számítások során a statisztikai értelemben megfelelő megoldás számos robbantás kapcsán is csak több (akár négy) bélyeg kihagyásával volt elérhető.

Az I-K2 kalott kihajtásának első időszakában a cella még teljesen szabályos, az elméleti elvárásokhoz közel eső válaszokat produkált. A cella síkjának harántolását követően 8 méteres vájvégtávolságnál a  $\delta\sigma_1$  2,1 MPa, a  $\delta\sigma_3$  pedig közel -1,9 MPa értéket vett fel. Még azt sem lehet meglepőnek tekinteni, hogy a  $\delta\sigma_1$ ,  $\delta\sigma_2$  illetve  $\delta\sigma_3$  nem rendeződött a térbeli főirányokhoz; tekintettel arra, hogy éppen e cella iránya tér el legnagyobb mértékben egyrészt a kamra tengelyétől, másrészt pedig a KNy-i főiránytól. Ezt követően azonban a cellán nehezen megmagyarázható folyamatok indultak el. A hirtelen fellépő, minden irányban igen jelentősnek mondható feszültségzuhanásra valószínűleg csak egyetlen lehetséges válasz adható: A cellát befogadó kőzetblokk a robbantások dinamikus és feszültségátrendező hatása miatt feltehetőleg elvált környezetétől, és – legalábbis átmenetileg – a tér több irányában is elégtelen megtámasztásúvá vált. Erre utal az is, hogy néhány méter további kalotthajtás hatására (hozzávetőleg 90 kamrafm-től) minden irányban újra intenzív feszültségnövekedés tapasztalható, ami a korábban elvált kőzetblokk ismételt felterhelődését jelzi. Ezt a magyarázatot az I-K1 kalottjának kihajtása kapcsán kapott, az elméleti várakozásoknak teljesen ellentmondó feszültségváltozási diagram sem zárja ki. Mindezek miatt a továbbiakban a Bkc-8 eredményeit, mint a befogadó kőzetre általában nem reprezentatívakat, nem vesszük figyelembe a számszerű értékelések során. Ennek ellenére a mérésorozat, mint a blokk-elválás létezésének méréses bizonyítéka, mindenképpen kiemelt fontosságú, és a továbbiakban még tanulmányozandó.

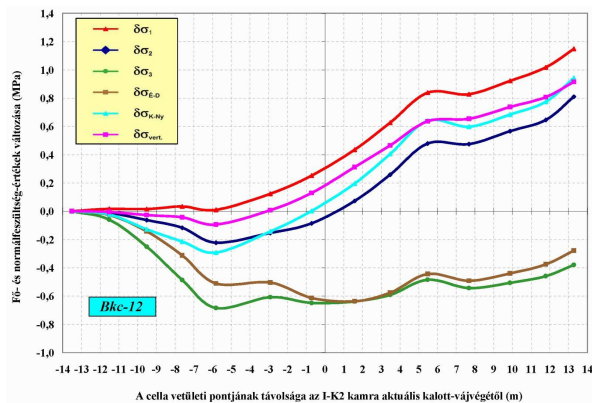
A Bkc-12 jelű, a pillér középvezetékébe telepített másik cella szerencsére teljesen egyértelmű és jól értelmezhető eredményeket adott, amelyek alkalmasak a pillér középvezetékében lejátszódó feszültségváltozási folyamatok számszerűsítésére. Az alábbi, 10-13. ábrákon a Bkc-12 cella kapcsán mind a négy jövesztési határfázis elkülönített feszültségváltozási diagramjait bemutatjuk, mert itt mind az I-K2, mind pedig az I-K1 kamra kalottjainak és talpszeleteinek kihajtása is egyaránt jelentősnek tekinthető feszültségváltozásokat indukált. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a szimmetrikus telepítési helyzet ellenére elméletileg sem várható el az, hogy a cellán az I-K2 illetve az I-K1 azonos jellegű jövesztési fázisai hatására ugyanolyan feszültségváltozást lehessen mérni. Ennek oka az, hogy amíg például az I-K2 kalott kihajtásának alapállapota a primer feszültségállapot volt, addig az I-K1 kihajtása során már számolnunk kell azzal is, hogy a cella az I-K2 kalottja által előterhelt térben helyezkedik el.

A Bkc-12 cella az I-K2 kalott kihajtása kapcsán hasonlóan reagált, mint a kitörési szelvényhez közelebb, a horgonyzott zóna határára telepített Bkc-11. Ugyanúgy az ÉD-i irányhoz rendeződő, negatív értelmű  $\delta\sigma_3$  valamint pozitív előjelű  $\delta\sigma_1$  és  $\delta\sigma_2$  jellemzi, csak itt az abszolút értékek – a nagyobb távolsággal összhangban – lényegesen alacsonyabbak (a  $\delta\sigma_2$  a folyamat végére még az 1,2 MPa értéket sem éri el (ld. a 10. ábrán). A I-K1 kalott kihajtása kapcsán szinte azonos módon és azonos mértékben folytatódott a  $\delta\sigma_1$  és  $\delta\sigma_2$  felépülése. A  $\delta\sigma_3$  fejlődési tendenciája mutatott ugyan némi eltérést az I-K2 kapcsán megfigyelthez képest, de a folyamat végére ez is elérte szinte ugyanazt a -0,6 MPa szintet, mint amit az első robbantási szériában megfigyelhettünk (ld. a 11. ábrán).

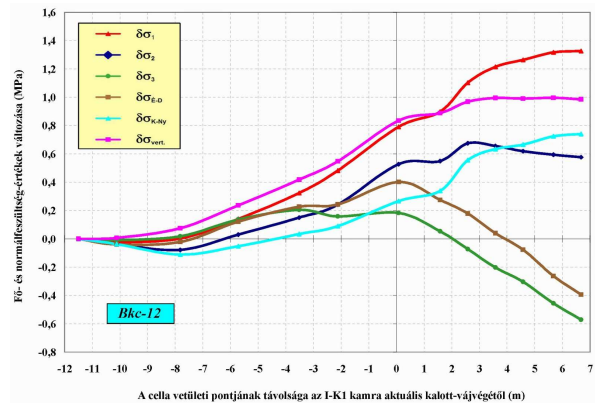
A 10. és 11. ábrán bemutatott eredmények alapján fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a két kalott kihajtása mintegy 2,5 MPa maximális terhelésnövekményt eredményezett egy ilyen megfelelő

geotechnikai minősítésű térrészben. Ez kissé magasabb a várakozásoknál (mintegy 36%-a az elméleti  $\sigma_{vert}$ -nek és 27%-a az elméleti  $\sigma_1$ -nek). Így elmondható, hogy a jelenlegi 15 m-es pillér esetleges további csökkentése alapos geotechnikai megfontolást igényel majd.

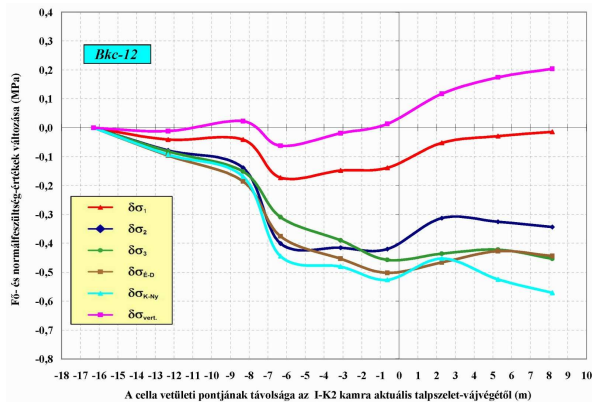
A talpszeletek kihajtása – csakúgy, mint ahogy a közelebbi helyzetű Bkc-9 és Bkc-11 kapcsán már bemutattuk, általában valamennyi irányban terheléscsökkenést eredményezett (ezeket az I-K2 kamra esetében a 12., míg az I-K1 kamra esetében a 13. ábra mutatja be). Azt azonban ki kell emelni, hogy a  $\delta\sigma_1$  és  $\delta\sigma_2$  ezekben a hatásfázisokban -0,1 és -0,4 MPa közötti értékeket mutat, ami azt jelenti, hogy a kalottok kapcsán az előbb említett felterhelődési hatásokat a talpszeletek csak mérsékelten tudják elensúlyozni. Ettől függetlenül ezt a feszültségcsökkentő hatást szükség esetén, célszerűen megválasztott műveleti sorrenddel ki is lehet használni. Abban az esetben például, ha a pillérméret esetleges csökkentésével a kalothajtás a pillér biztosítatlan zónájára még nagyobb feszültségnövelő hatással lesz, úgy mindenképpen célszerű lenne az adott kamra talpszeletét is kihajtva ezt redukálni még azelőtt, mielőtt a szomszédos kamra kalottja is kihajtásra kerülne.



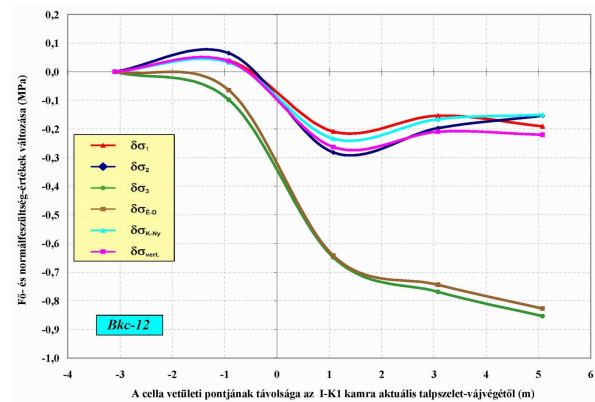
**10. ábra.** A Bkc-12 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K2 kalott aktuális távolságának függvényében



**11. ábra.** A Bkc-12 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K1 kalott aktuális távolságának függvényében



**12. ábra.** A Bkc-11 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K2 talpszelet aktuális távolságának függvényében



**13. ábra.** A Bkc-12 jelű HI cellával érzékelt feszültségváltozások alakulása a cella és az I-K1 talpszelet aktuális távolságának függvényében

#### 4 ÖSSZEFOGLALÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK

A fentiekben részletezett információk alapján a mérőrendszer eredményeit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

A tervezettnél alacsonyabb számú mérőelem (6 db) nem volt elégséges ahhoz, hogy valamennyi célkitűzésnek maradéktalanul eleget lehessen tenni. Leginkább az a célkitűzés valósult meg, hogy a két kamra kihajtásának különböző fázisaiban is meg lehetett határozni a fellépő feszültségváltozásokat. Ugyancsak megvalósult az a cél, hogy a kitorési szelvény mentén, a kritikus pontokban (főte és oldalpont) illetve a pillér középvonalaiban is számszerűsíthessük a feszültségváltozásokat. Nem valósulhatott azonban meg maradéktalanul a kitorési szelvénytől való távolság függvényében való feszültségváltozás-mérés, a biztosított zónán belüli és a biztosított zóna határán illetve azon kívül fellépő



feszültségváltozások összehasonlítása, tehát a biztosítás hatásainak számszerű minősítése sem. A fél és a teljes szelvény telepítési környezetének hasonlósága miatt ugyancsak nem lehetett egyértelműen vizsgálni a kapott eredmények geotechnikai állapottól való függését sem.

A főteponi cellák esetében az adott kamra kalottjának kihajtása a mérések szerint intenzív feszültségcsökkenési folyamatokat indukált (ahol a legnagyobb feszültségcsökkenés a vertikális irányhoz köthető). Ennek hatására a mértékadó feszültségek a biztosított zónában zérus körüliek lesznek, viszont a horgonyzott zóna határán már biztosan húzófeszültségek lépnek fel. A másik kamra kalottjának és talpszelvénytének illetve az I-K2 kamra talpszelvénytének kihajtása a főteponi cellákon csak alárendelt jelentőségű hatásokat váltott ki.

Az oldalponti helyzetű, a biztosított zóna határára eső cellák esetében kisebb-nagyobb mértékű (2,5 – 5,0 MPa), általában vertikális értelmű feszültségnövekmény volt megfigyelhető az I-K2 kalott kihajtásakor. Amennyiben az adott cella a két kamra közötti pillérben helyezkedett el, úgy ezt a hatást az I-K1 kamra kihajtása kis mértékben tovább fokozta. Igen fontos megfigyelés viszont az, hogy e celláknál a talpszelvet kihajtása intenzív feszültségleépülést eredményezett. Ez a jelenség a primer feszültségtérhez illeszkedő módon, célszerűen megválasztott alaktényező és biztosítási technológia mellett jól kihasználható lehet a tárolókamrák optimalizálása során.

A pillér középvonalába eső cellák esetében hasonló volt a helyzet, mint az oldalponti helyzetű, a biztosított zóna határára eső celláknál, csak itt értelemszerűen sem a kalottok kihajtása nem okoz olyan mértékű feszültségnövekményt, sem pedig a talpszelvetelek kihajtása nem jár jelentős feszültségleépüléssel. A mért feszültségnövekmény számszerű, a várakozásoknál kissé magasabb mértéke figyelmeztető lehet az esetleges pillérméret-csökkentés szempontjából.

Az I-K2 kamrába telepített mérőrendszer esetében az eredmények általában lényegesen szabályosabbak, a kontinuummechanika törvényszerűségeivel jobban leírhatók, mint a HGM-kamrában, 2008-ban elvégzett mérőrendszerek adatai. Ettől függetlenül itt is több esetben talákoztunk olyan, minden bizonnyal lokális tektonikai hatások által kiváltott jelenségekkel, amik ennek az elvnek nem felelnek meg. Ezek közül is ki kell emelni a Bkc-8 cella kapcsán ismertetett kőzetblokk-elválás és feszültségleépülés jelenségét.

A Bkc-7; ...; Bkc-12 cellák kapcsán bemutatott feszültségváltozási folyamatok a kamra főtéjében és oldalpontjában a horgonyzási zóna határára illetve a pillér középvonalára vonatkoznak. A megfigyelt zónákban olyan mértékű feszültségváltozásokat, amik akár rövid, akár pedig hosszú távon bármilyen statikai problémára utalhatnak, a mérések nem mutattak ki. Ez alapján tehát azt állíthatjuk, hogy a kamrák alakja, mérete, biztosítási és kihajtási technológiája valamint a pillérméret megfelel az eredeti műszaki célkitűzéseknek. Ugyanakkor a mérőszorozattal megszerzett gyakorlati adatok közvetlen módon és rendkívül jól hasznosíthatók lehetnek a későbbi kamraoptimalizálási illetve az ahhoz csatlakozó statikai tervezési munkák során is. Szakmai meggyőződésünk, hogy a CSIRO HI-cellás feszültségváltozás-mérési módszer a leginformatívabb és legeredményesebb geotechnikai-kőzetmechanikai mérési módszer, amit az újabb statikai tervek ellenőrzésére is feltétlenül alkalmazni érdemes.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton mondanak köszönetet a RHK Kft.-nek, amely szervezet a Központi Nukleáris Pénzügyi Alap finanszírozásával lehetővé tette az ismertetett mérések kivitelezését. Ugyancsak köszönet illeti a MECSEKÉRC Környezetvédelmi Zrt-t, a Bátaapáti kutatási és beruházási programfázisok fővállalkozóját, valamint azokat a termelésirányító és bányász kollégákat is, akik biztosították a kamrahajtással párhuzamos műszertelepítési és mérési munkák zökkenőmentességét.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Asszonyi Cs., Gálos M., Kertész P., Richter R. 1980: *A bányászat mechanikai rendszere, 1. kötet. A kőzetmechanikai anyagszerkezeti és reológiai alapjai*. MTA Veszprémi Akadémiai Bizottság kiadványa. Veszprém.
- Asszonyi Cs., Kapolyi L. 1981: *A bányászat mechanikai rendszere, 2. kötet. Kőzetkontinuumok mechanikája*. MTA Veszprémi Akadémiai Bizottság kiadványa. Veszprém.
- Benkovics I., Takáts F., B. Rebró K., Berta J., Csicsák J., Hogyor Z., Dr. Kereki F., Ropoli L., Szabéni G., Tamás P., Tóth P., Varga M., V. Miskolci R., Vrászlai F., Kulcsár L., Thomas A., Hersvik D., Megyeri T., Németh Gy., Lowson A. 2010: *A Bátaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-Tároló feltáró vágatai térképezése*. Kiviteli Terv, II. Ütem 3. szakasz. Kézirat – MECSEKÉRC Zrt. Mott McDonald Kft., 2010. szeptember 24. RHK Kft. Adattára. RHK-K-123C/09.

- Brady B.H.G., Brown E.T. 1985: *Rock mechanics for underground mining*. George Allen & Unwin, London, first edition.
- Bonne A., Andre-Jehan R., Oth. 1990: Testing and modelling of the mechanical hydrogeological and thermal phenomena related to the geological disposal in clay. Conference on Radwaste management and disposal, Luxembourg. *Proc.* pp: 505-517. Elsevier, Amsterdam.
- Brown E. T. (editor) 1985: *ISRM Suggested methods for in situ rock stress measurements*. Pergamon Press, Oxford.
- Deák F., Kovács L., Mészáros E. 2011: Töredezett kőzetek mérnökgeológiai modellezésének lehetőségei – Bábaapáti esettanulmányok. Extended abstract. XIII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia Kiadványa, Gyergyószentmiklós. 2011. március 31.-április 3. pp. 166-169
- Del Olmo C., Fiorvante V. et Al. 1996: Thermo-mechanical properties of deep argillaceous formations. *Engineering Geology* **41**: 87-102.
- Fama M. E. D.; Pender M. J. 1980: Analysis of the Hollow Inclusion Technique for Measuring In Situ Rock Stress. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sciences*, **17**: 137-146.
- Hudson J.A., Feng X.T. 2007: Updated Flowcharts for Rock Mechanics Modelling and Rock Engineering Design. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sciences* **44**: 174–195.
- Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. 2007: *Fundamentals of Rock Mechanics*. Fourth Edition. Blackwell Publishing Ltd., 2007. ISBN-13: 978-0-632-05759-7.
- Kovács L. 1999: A Bodai Aleurolit Formáció minősítésének Rövidtávú Programja. Kutatási Zárójelentés, 6. kötet: Kőzetmechanikai, geotechnikai vizsgálati program. — Kézirat, MECSEKÉRC Rt., Pécs, 1999. március., RHK Kft. Irattára.
- Kovács L. 2006: Vágathajtás hatására bekövetkező mechanikai feszültségváltozások mérése a Bodai Aleurolit Formáció minősítésére kialakított föld alatti kutatólaboratóriumban. In: Török Á. és Vásárhelyi B (szerk.) *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006*, Műegyetemi Kiadó, Budapest. 123-138.
- Kovács L., Vásárhelyi B. 2009: Geotechnical and Rock Mechanical Investigations for preparing the Hungarian L/ILW Repository. Extended abstract O-02-11. *Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2009; "Safe Tunnelling for the City and Environment"*, Budapest, 23-28. May., pp. 61-63.
- Kovács L. 2011: Jelentés a Bkf-1, Bkf-2 és Bkf-3 fúrásokban elvégzett CSIRO HI-cellás 3D-s és Doorstopper-cellás 2D-s primer kőzetfeszültség-meghatározásokról. Kézirat, Pécs, 2011. szeptember. RHK Kft. Irattára, Paks; RHK-K-051/11.
- Mészáros E., Török Á. 2010: A Bábaapátiban tervezett radioaktív hulladéklerakó vágatrendszere deformációjának mérnökgeológiai vizsgálata és modellezése. In: Török Á. és Vásárhelyi B (szerk.) *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2010*, Műegyetemi Kiadó, Budapest. 205-216
- Somosvári Zs. 1987: *Geomechanika I-II.*, Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
- Worotnický G., Walton R. J. 1976: Triaxial „Hollow Inclusion” Gauges for Determination of Rock Stresses In Situ. *Proc. ISRM symp. on investigation of stress in rock, Supplement*, 1-8. Sydney. Instn. Engrs. Aust., 1976.