

VÁGATHAJTÁS HATÁSÁRA BEKÖVETKEZŐ MECHANIKAI FESZÜLTSGVÁLTOZÁSOK MÉRÉSE A BODAI ALEUROLIT FORMÁCIÓ MINŐSÍTÉSÉRE KIALAKÍTOTT FÖLD ALATTI KUTATÓLABORATÓRIUMBAN

Kovács László

Kútfej Bt., Pécs, kutfejbt@chello.hu

Összefoglalás: A Bodai Aleurolit Formáció (a hazai nagy aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésének reménybeli közege) minősítésére kialakított föld alatti kutatólaboratóriumban 1994 és 1998 között kiterjedt kőzetmechanikai, geotechnikai vizsgálatosorozatot hajtottunk végre. Ennek keretében mód nyílt arra is, hogy fejlett műszer- és mérés technika alkalmazásával a gyakorlatban határozzuk meg a vágathajtás által az üregkörnyezet különböző pontjaiban, illetve az üregfelülettől való távolságban kiváltott mechanikai feszültségátrendeződés időbeli lefolyását. A kutatás érdekessége, hogy a feszültségváltozások vizsgálatával párhuzamosan sor került a hidraulikai és termikus változások, valamint a fellépő kőzetmozgások mérésére is. Ezáltal olyan adatokhoz jutottunk, melyek a későbbiekben esetleg az üregképzés hatásainak energodinamikai értelmezéséhez is felhasználhatók lehetnek. A cikk az in situ feszültségváltozás-mérés, valamint az adatfeldolgozás folyamatának ismertetése mellett kísérletet tesz néhány, az eredményekből levonható fontosabb következtetés rögzítésére is.

1. Bevezetés – Az üregképzés mechanikai hatásainak hagyományos és korszerű értelmezése

Bármilyen típusú (pl. vágat, akna, fejtés vagy fűrólyuk), orientációjú és tetszőleges technológiával végzett üregképzés következtében a primer feszültségtér átrendeződése mindenképpen végbemegy. A kialakított üreg környezetében létrejön a hely és az idő függvényeként leírható szekunder feszültségmező. A kontinuummechanika alapegyenleteire támaszkodó (tehát hagyományosnak mondható) kőzetmechanikai elméletek szerint mindez – kissé leegyszerűsítetten fogalmazva – azzal magyarázható, hogy az üregfelület radiális irányban elveszti addigi megtámasztását. A hiányzó támasztóerőket más kőzetrészekre ható többlet-terhelés kompenzálja (áthárított kőzetnyomás). Az ugrásszerűen megváltozó feszültségtér meghatározott irányokban és mértékben kőzetdeformációt vált ki.

A [2] jelű hivatkozásban található értelmezés szerint az F_p feszültségtenzorral jellemzett primer mezőben az üregnyitás hatására fellépő deformációk járnak együtt a feszültségmódosulással, amely így egy F^* kiegészítő (alakváltozási) feszültségtenzorként írható le. Az F^* tenzor tehát a primer és a szekunder állapotot jellemző feszültségtenzorok különbségeként fogható fel. Az így értelmezett alakváltozási feszültségtenzor függvénye a primer feszültségmezőnek, az üregalaknak, a kőzetkörnyezet anyagjellemzőinek, valamint az időnek.

A kontinuummechanikai megközelítés számos hiányossága és ellentmondása a gyakorlati tapasztalatok fényében viszonylag egyszerűen igazolható. (E problémákra többek között a [2], [3], [5] és [12] jelű hivatkozások szerzői is utalnak.) A szekunder mező elméleti meghatározása zárt matematikai formában csak igen speciális esetekben lehetséges. Amennyiben az üregképzés során bármilyen biztosítószerkezetet építünk be, úgy ilyen megoldás egyáltalán nem is létezik. A számítástechnika fejlődésével a végeselemes számításokra építő numerikus modellezés lehetővé tette ugyan megközelítő megoldások keresését, de a biztosítószerkezet jelenléte ilyen esetekben is csak implicit módon (pl. egy megnövelt szilárdságú közetöv generálásával) lehetséges [5]. Az alkalmazandó anyagmodell helyes megválasztása a módszer legkritikusabb eleme. Számos bizonytalanságot és elméleti kételyt vet fel, hogy a valós folyamatok közelítése reológiai (tehát az időtől függő anyagtulajdonságokat hordozó) anyagmodellel lehetséges.

További, igen kézenfekvő probléma a földtani okokra visszavezethető inhomogenitások kezelhetetlensége. A gyakorlatban jelenleg is széles körben alkalmazott diszkontinuum modellek e tekintetben lényeges előrelépést jelentenek, mivel segítségükkel az alkalmazandó paraméterek jól pontosíthatók. A szekunder mező meghatározása azonban ebben az esetben is a végeselemes modellekkel történik [8].

E módszerek korrekt és alapos alkalmazásával, a jó minőségű in situ feszültségmérések eredményeit felhasználó modell-validálás révén sok esetben megtalálhatók a gyakorlati élet igényeinek megfelelő megoldások. A végbemenő folyamatok valós fizikai jellege azonban – a kezelhetőséget biztosító leegyszerűsítések és elhanyagolások miatt – ezen az úton rejtve marad. Így a valóság és a modellszámítások általában szisztematikus eltéréseire általában nem adható megfelelő magyarázat.

Valószínűsíthető, hogy a XXI. században az emberiség a korábinál jóval nagyobb mértékben (és nem kizárólag az ásványi nyersanyagok kitermelése érdekében) fordul majd a szilárd földkéreg hasznosítása felé. Az újonnan felmerülő, sokszor speciális igények kielégítése a közetmechanika tudományától is új, megalapozottabb megközelítéseket és ebből fakadóan nagyobb megbízhatóságot követel meg.

Az egyik ilyen, komoly szakmai kihívásokat jelentő alkalmazást jelent a radioaktív hulladékok mély geológiai formációban történő végleges elhelyezése. A végleges elhelyezés lehetőségeit, illetve a reménybeli formáció alkalmasságát (izolációs tulajdonságainak megfelelőségét) vizsgáló kutatási programok kapcsán számos tekintetben alapvető igény a „hagyományos” bányászati, geotechnikai gyakorlatban elfogadott módszerek meghaladása. Erre az egyik legjobb példa az, hogy a közetmechanikának kiemelkedő szerepe kell legyen az üregképzés hatására az ún. EDZ-ben kialakuló szekunder izolációs tulajdonságok megítélésében.

A végleges elhelyezés lehetőségeinek kutatásával foglalkozó nemzetközi szakirodalom EDZ (**E**xcavation **D**isturbed **Z**one - a jövesztés által megzavart zóna) összefoglaló néven említi azt a térrészt, amelyen belül a primer állapotot jellemző paraméterek (feszültségállapot, hidraulikai, termikus, geokémiai és mikrobiológiai viszonyok) közül bármelyik megváltozását lehet kimutatni. Az e térrészben bekövetkező folyamatok megfelelő mélységű megértése alapvető fontosságú a radioaktív hulladékot befogadó

közvettest izolációs tulajdonságainak megítéléséhez. Ezért az e célra létrehozott föld alatti kutatólaboratóriumok felhasználásával az elmúlt egy-másfél évtizedben világszerte komoly erőfeszítések történtek a kérdéskör gyakorlati, in situ mérésekkel történő tanulmányozására. E mérések eredményeivel igazolható és számszerűsítő az a bányászati, geotechnikai gyakorlatban már régen felismert (de eddig problémamegoldásra viszonylag kevés helyen alkalmazott) tény, hogy az üregképzés által kiváltott mechanikai változásokkal egyidejűleg – azoktól egyáltalán nem függetlenül – számos egyéb fizikai és kémiai változás is lezajlik (ld. például a [4], [7] és [14] jelű hivatkozásokat). Az ilyen komplex folyamatok együttes kezelésére az elmúlt évtizedben kifejlesztették az ún. kapcsolt (termo-mechanikai, hidro-mechanikai) és kétszeresen kapcsolt (termo-hidro-mechanikai) numerikus modellezés elméletét és eszközeit is. Ám az ilyen modellezések változatlanul kontinuum- és diszkontinuum-mechanikai alapokon nyugvó rendszerekkel történnek [8]. Így a fentiekben ismertetett ellentmondásokat csak részben képesek kiküszöbölni.

Az Onsager-féle vezetési törvény (fenomenologikus reláció) Fényes Imre által kidolgozott általánosítására alapozva Asszonyi Csaba és Kapolyi László már a 70-es években felvetették, hogy a korábban elkülönülten vizsgált fizikai terekben végbemenő folyamatokat, kölcsönhatásokat helyesebb lenne egységes, energetikai szemléletmód alkalmazásával kezelni [1], [3]. E szemléletmód megfelelő jellemzésére az „energodinamika” elnevezést javasolták [3].

Energodinamikai megközelítéssel az üregképzés folyamatát a következőképpen értelmezhetjük: A kialakított üreg és kőzetkörnyezete (a határoló felület anyagi tulajdonságaitól függő) energetikai kölcsönhatásban van egymással. Amennyiben az adott kölcsönhatást jellemző intenzív (kiterjedéstől független) mennyiség az üregben, illetve az üregkörnyezetben különbözik egymástól, úgy olyan irányú konduktív, vagy konvektív áramlás jön létre, amely az inhomogenitást kiegyenlíteni igyekszik. Természetesen nem hagyható figyelmen kívül az sem, hogy a kőzettel a jövesztés révén energiát közlünk, valamint azt sem, hogy a folyamat konzervatív jellegű gravitációs erőterben megy végbe.

E megközelítéssel a mechanikai feszültség fogalma is elnyeri valódi fizikai jelentéstartalmát: „*A feszültségvektor az adott normálisú felület-elemen átfolyó konduktív impulzus-áram*” [3]. Így nincs akadálya annak sem, hogy a mechanikai feszültség változásait is egységes rendszerben értelmezzük a többi fellépő energetikai kölcsönhatással.

Ennek megfelelően azt kell szem előtt tartanunk, hogy a primer és a szekunder feszültségállapotot jellemző tenzorok különbségeként értelmezett \mathbf{F}^* kiegészítő feszültségtenzor függvénye

- a primer feszültségtér alakulásának,
- a jövesztési munkának (mechanikai impulzus és kinetikus energia közlése),
- a nyitandó üreg alakjának (a köznapi értelemben vett potenciális energia üregfelület mentén történő eloszlásának),
- az alkalmazott aktív biztosítószerkezetek által végzett munkának,
- a kőzetdeformáció során belső energiává disszipálódó kinetikus energiának,
- a hőmérsékletváltozást okozó termikus munkának,

- a pórusvíznyomás változásait okozó folyadékáramlási és térfogatváltozási munkának,
- minden egyéb, energiafelvétellel, vagy -leadással járó, az üregképzés hatására bekövetkező kémiai folyamatoknak.

A [3] szerint a fizikai kölcsönhatások és a következményükként fellépő folyamatok (illetve a statisztikus egyensúlyok) egyértelmű jellemzéséhez az energiátranzsportot leíró illetve energia-egyensúlyi egyenletek, valamint a folyamatra jellemző extenzív mennyiségek mérlegegyenleteinek felírása és megoldása szükséges. Ezek részletes tárgyalása a [3] jelű publikációban megtalálható. Ebből kitűnik, hogy egy-egy gyakorlati eset megfelelő, fizikailag korrekt leírásához ez az elmélet is rendkívül komplex elemzési és számítási eljárás lefolytatását kívánja meg. Ráadásul a hagyományos megközelítéshez képest sokszorozódik azon, a kőzetanyag tulajdonságaitól függő együtthatók száma, amelyek elméleti meghatározása nem lehetséges.

Mindezek miatt felmerülhet, hogy az elmélet ellenőrzése, továbbfejlesztése, illetve gyakorlati alkalmazási lehetőségeinek megteremtése csak megfelelő minőségű, energodinamikai szemléletmóddal tervezett, és kontrollált környezeti feltételek mellett végrehajtott in situ mérésorozatok végrehajtása útján lehetséges. Ilyen típusú mérésekre Magyarországon korábban nem nagyon volt mód.

2. A Komplex Műszerezettségű Szelvény mérései a Bodai Aleurolit Formáció (BAF) minősítési programja keretében

Hazánkban a Bodai Aleurolit Formáció (BAF) minősítési programja keretében, a föld alatti kutatólaboratóriumban kialakított ún. *Komplex Műszerezettségű Szelvény* (KMSZ) mérései jelentették az első olyan mérésorozatot, amelynek adatai esetleg alkalmazhatók lehetnek a fent vázolt továbblépéshez.

A KMSZ a BAF eddig lezajlott kutatásának egyik legfontosabb mérésorozataként értékelhető. E speciális mérési elrendezés alkalmazásával egyidejűleg váltak meghatározhatóvá a kőzetköpenyben lezajló deformációs, hidraulikai és termikus folyamatok, valamint a feszültségátrendeződés is. A KMSZ telepítését a kanadai AECL cég javasolta [11] és a szükséges, igen korszerű műszerezettség egy részét is ők biztosították. A történeti hűség kedvéért meg kell jegyezni, hogy a KMSZ méréseit is tartalmazó programfázis kutatási tervének összeállításakor még sem ők, sem pedig a terv készítői nem gondoltak az energodinamikai megközelítés lehetőségére. Ekkor még csak a külön-külön mérendő folyamatok számszerűsítését, illetve az ezekkel kapcsolatos esetleges BAF-specifikus viselkedés felismerését jelöltük meg célként.

A BAF minősítését célzó kutatólaboratórium 1000 métert is meghaladó felszín alatti mélységben került kialakításra, így egy ilyen mérésorozat kivitelezéséhez különlegesen kedvező körülményeket kínált. A kérdéses zónában a primer feszültségtér maximális komponense 30 MPa körül volt, a primer közethőmérséklet meghaladta az 50 °C-t, míg a pórusvíznyomás üregnyitás előtt 9,3 és 10 MPa közötti értékeken állandósult. A fellépő energetikai folyamatokat döntően meghatározó paraméterek ilyen magas értékei

mellett világszerte is csak kevés helyen végezhető in situ mérések. Pedig éppen az ily módon fellépő nagy változások tehetik könnyen tanulmányozhatóvá és megérthetővé a kölcsönhatások és folyamatok valódi fizikai természetét.

3. A KMSZ geometriája és mérőrendszerei

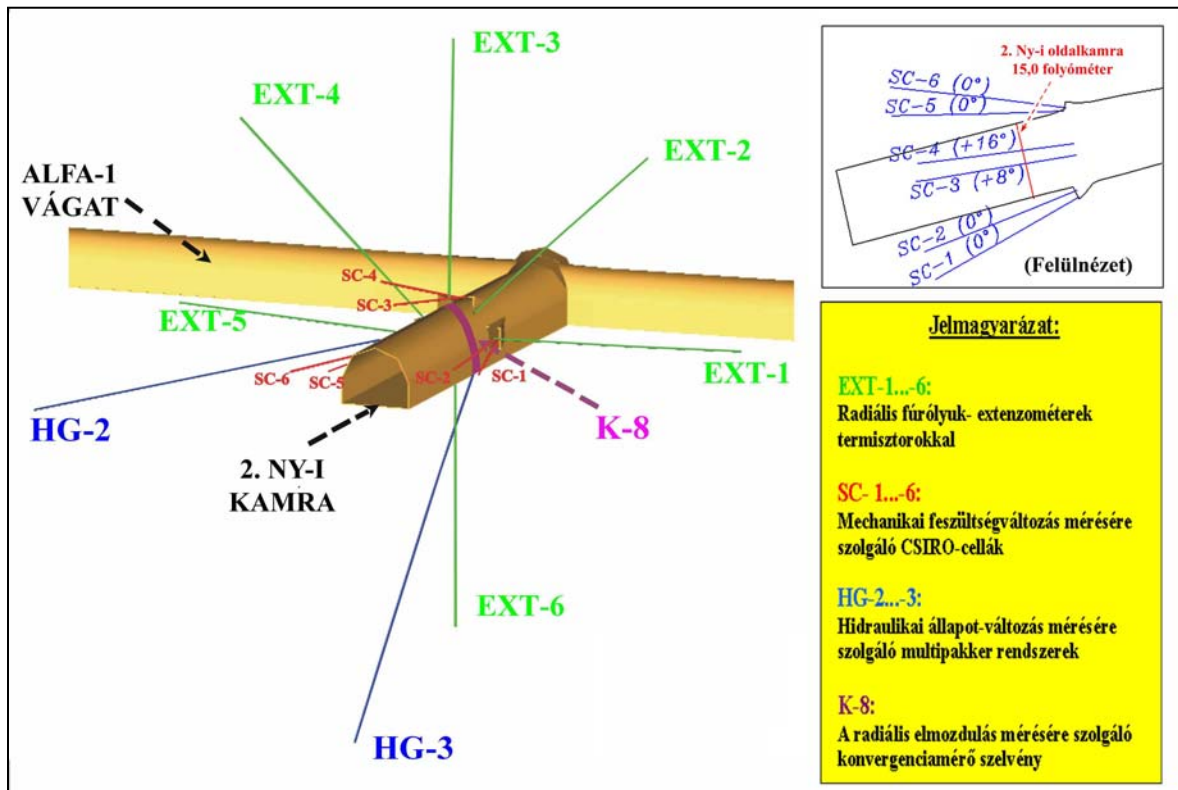
A Bodai Formációt a felszíntől számított mintegy 1050 m mélységben feltáró Alfa-1 vágat 424. fm-ében, a vágat tengelyére közel merőlegesen, Z3 szelvényrel hajtották ki a 2. Ny-i oldalkamrát. A speciális mérési szelvény az oldalkamra 15,0 fm-es vágvégállása mellett került kialakításra. A kísérleti elrendezés telepítési helyét előzetes ellenőrző mérések alapján jelöltük ki.

A KMSZ keretében telepített mérőrendszerek az alábbiak voltak:

- Az üregképzés hatására a vágat körül végbemenő feszültségváltozás meghatározására szolgáló triaxiális deformációmérő (CSIRO-) cellák (SC-1...-6),
- A vágat körül kialakuló hidraulikai potenciáltér vizsgálatára a HG-2 és a HG-3 fúrásba telepített multipakker-rendszerek,
- A radiális elmozdulások mérésére alkalmas speciális, egyenként 15 m hosszú fúróluk-extenzométerek (EXT-1... EXT-6),
- A 8. számú konvergenciamérő szelvény a radiális elmozdulások egyszerű mérésére,
- A H-14 és H-15 deformációellenőrző háromszöges mérőhely az üregfelület érintősíkjában kialakuló deformáció ellenőrzésére,
- A fúróluk-extenzométerek egyes rögzítési pontjaival egybeépített, de önálló "hőlánc"-jellegű mérőrendszernek is felfogható termisztorok,
- három érzékelőből álló akusztikus megfigyelőrendszer az esetleges dinamikus közettönkremenetel, vagy a műszerek rendellenességeinek kimutatására.
- A szeizmológiai állomáshoz csatlakozó érzékelők a robbantási időpontok meghatározására.
- Bár e mérőrendszereket nem a KMSZ program keretében telepítettük, itt kell megemlíteni azt is, hogy a vágatrendszer szellőztető hűtött légáram, illetve a vágatból visszaáramló levegő klimatikus paramétereinek (hőmérséklet, sebesség, páratartalom) időbeli alakulását folyamatosan üzemelő, automatikus adatgyűjtő rendszerrel szintén mértük.

A KMSZ telepítéséhez mélyített fúrólukak axonometrikus vázlata, valamint az SC-1... SC-6 jelű fúrások felülnézeti rajza az alábbi, 1. ábrán látható.

A fentiekén kívül szorosan a KMSZ-mérésekhez tartozó, azokkal együtt értékelhető információnak tekinthetjük a műszertelepítési célból készült magfúrások, illetve a 2. Ny-i oldalkamra földtani és hidrogeológiai dokumentációját, a fúrások ferdeség és iránymérését, lyukkamerás felvételeit, továbbá a területről származó magmintákon végzett ásvány-kőzettani és kőzetmechanikai laboratóriumi mérések eredményeit. Ugyancsak jól dokumentált az alkalmazott robbantóanyagok típusa és mennyisége is.



1. ábra: A KMSZ mérőrendszereinek telepítésére szolgáló fúrólukak geometriája

A KMSZ mérései 10 db, egyenként 1 méteres fogásmélységű, kőzetkímélő robbantást követően, a telepített mérőrendszerek meghatározott gyakoriságú kiolvasásával történtek. Biztonsági okokból valamennyi fogás kirobbantása és a jövesztett kőzet kiszállítás után azonnal elvégeztettük a végleges biztosítás szisztematikus beépítését. Ehhez 1,8 m hosszúságú hasított csőhorgonyokat (Split-Set) alkalmaztunk, 1 db/m² sűrűségben.

Terjedelmi korlátok miatt e cikkben nincs lehetőség valamennyi, a különböző mérőrendszerekhez tartozó információ összefoglalására. (Ezeket a [10] jelű jelentés tartalmazza.) Ezért, valamint a kiindulási tematika követését szem előtt tartva a következőkben csak a fentiek szerint definiált F* kiegészítő feszültségtenzor komponenseinek in situ méréssel történő meghatározását ismertetjük. A telepítés, a mérés, az értékelés és értelmezés teljes folyamatának bemutatásával célunk az is, hogy elősegítsük egy rendkívül informatív, a nemzetközi gyakorlatban széles körben alkalmazott ([5], [6]), a hazai gyakorlatban azonban sajnos még újdonságnak számító feszültségmérési módszer elterjedését.

4. Az alkalmazott mérőcellák

A KMSZ-mérések során a 2. ábrán látható, ausztrál CSIRO cég által kifejlesztett (azon belül is az ún. Worotnicky-típusú), háromtengelyű deformáció mérésére szolgáló epoxy-szondákat alkalmaztunk. (E típus angol megnevezése: Hollow Inclusion Cell.) A henger alakú cellákban 12 db, meghatározott helyzetű (axiális, körívminti, valamint a



2. ábra: Az alkalmazott cella a telepítés előkészítése közben

cella tengelyével 45° illetve 135° szöget bezáró) deformációmérő bélyeg, egy mozgásmentes ponton elhelyezett referenciabélyeg 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 többletadatok birtokában kiegyenlítő számításokra is mód van. (A CSIRO-cellák felépítését és működési elvét részletesen a [15] jelű

publikáció ismerteti.)

A mérési pontból származó jelek egy 16 eres (kettő a közös szál) árnyékolt kábelen kerülnek kivezetésre a fúrólukból, ahol kiolvasásuk a Measurements Group által gyártott, P-3500 típusú digitális deformációmérő műszerrel, illetve a termisztorok esetében digitális multiméterrel történik.

5. A CSIRO-cellák telepítéséhez szükséges fúrólukak

Az SC-1....SC-6 jelű műszerek telepítéshez szükséges speciális helyzetű, 9,5 m névleges hosszal tervezett fúrólukakat vízöblítéses technológiával és folyamatos magvétellel a Rotaqua Kft mélyítette. A fúrások nyitópontja az induló vājvég mögött 2,5 m-re kialakított kis oldalfülkébe került. A fúrólukakat 3 csoportba sorolhatjuk (ld. az 1. ábrán):

- Az SC-1 és SC-2 jelű lyukak a D-i oldalfalról indulva, a vāgattengellyel horizontális értelemben rendre 8° , illetve 16° -os szöget zárnak be.
- Ugyanez a helyzet az É-i oldalfal zsebéből kiinduló, SC-5 és -6 jelű fúrásokkal.
- A főtében kialakított fúrólukból indított SC-3 és SC-4 horizontális értelemben párhuzamos a vāgattengellyel, viszont azzal vertikálisan 8° , illetve 16° -os szöget zár be.

A talppontok a 8° -os fúrások esetében 1,4 m, míg a 16° -osak esetében 2,8 m minimális távolságban helyezkednek el a továbbhajtott oldalkamra kerületi pontjaitól. (A „minimális” szó használata azért indokolt, mert a KMSZ-műszerek telepítéséhez a kamra szelvényét Z3-nál minden irányban 20 cm-rel nagyobbra kellett bővíteni. A továbbhajtás során viszont visszatértünk az eredeti szelvénymérethez.) A ferdeség- és irányméréssel ellenőrzött geometriából az következik, hogy a fúróluktalpra beépített cellák a 21,5-22,5 fm-es vāgatszélvénnyel vonalában, tehát a KMSZ 15,0 m-ben található induló vājvégehez képest 6,5-7,5 m-rel távolabb kerültek telepítésre.

Az SC-1....SC-6 fúrások első 9,0 méterét BQ átmérővel, a további 0,5 m-t EWG (37,7 mm) szerszámmal mélyítették. Ezután gondoskodni kellett mind az átmeneti perem, mind pedig a lyuktalp simára csiszolásáról is. A telepítés előtt elvégezték a fúrólukak

kamerával történő ellenőrzését. Az SC-5, SC-6 esetében az EWG átmérőjű szakasz állapota a telepítéshez nem bizonyult megfelelőnek, ezért elrendeltük mindkét fúrás BQ-ra történő bővítését és új cellalyuk kialakítását az eredetitől 0,5 m távolságban.

6. A mérőcellák telepítése és mérése

A telepítés rendkívüli koncentrációt és technológiai fegyelmet követelő művelet, amit írásos ellenőrzési lista szerint kell végezni. A cellák megfelelő orientálására a telepítés során higanykapcsolóval kombinált installáló szerszám alkalmazásával került sor. A cellatestbe töltött speciális ragasztóanyagot a cella lyuktalpra helyezésével párhuzamosan egy távtartó dugattyú juttatta a gyűrűs térbe. A cellák beragasztásának megfelelőségét egyenként 24 órás kötési idő betartásával biztosítottuk. Csak ennek elteltével kerülhetett sor az installáló rudazat, illetve szerszám oldására, kiépítésére és az alapállapot mérésére (3. ábra).



3. ábra: A kiindulási állapot mérése a telepítés során

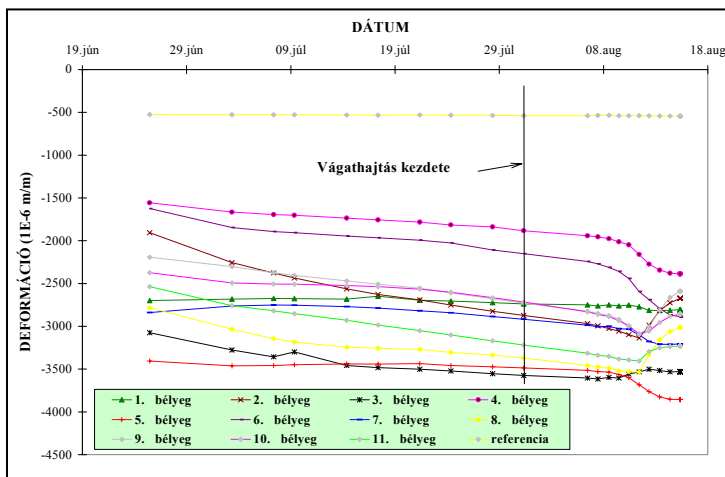
A telepített cellák adatkábeleit masszív, acéllemezből és gumiszalagból készült borítással kellett védeni a közvetlen közelben elvégzett robbantások hatásaitól.

A telepített eszközök stabilizációs folyamatát még a vágat továbbhajtása előtt, mintegy másfél hónapos, rendszeres méréssorozattal kellett ellenőrizni. A CSIRO-cellákban található bélyegek időSORA a KMSZ-mérések megkezdéséig annak ellenére sem stabilizálódott, hogy a 2. Ny-i oldalkamra vágóvége ebben az időszakban helyben maradt (példaként lásd a 4. ábrán a vágathajtás kezdetét megelőző intervallumot). Az első egy hét zavartabb, valószínűleg a hőmérsékleti stabilizációból adódó eredményeit követően valamennyi csatornán megfigyelhető volt egy időben lassan csökkenő, de szigorúan monoton tendenciájú drift. Az egyes bélyegeken mérhető, esetenként akár több száz $\mu\text{m}/\text{m}$ nagyságrendű változások egyértelműen a ragasztóanyag kúszására vezethetők vissza.

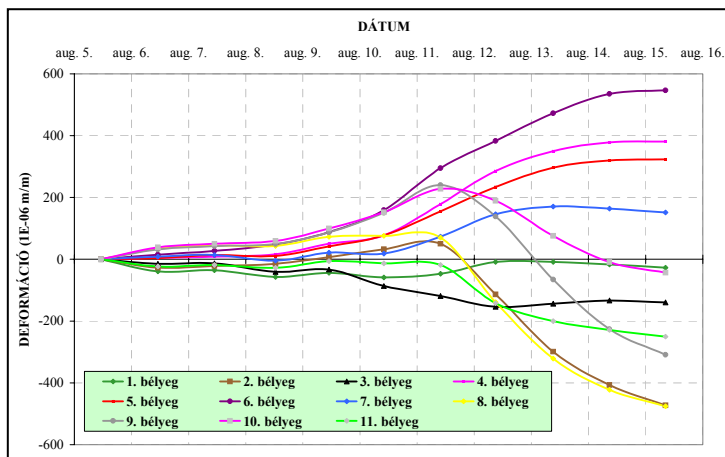
A KMSZ tíz robbantását követően (illetve a későbbi monitoring-időszakban) felvett adatokat írásos jegyzőkönyvekben és elektronikus formátumban egyaránt rögzítettük. A 4. ábra jobb oldalán a KMSZ-robbantások hatására a cella 1.-11. jelű bélyegein, valamint referenciabélyegén mért változások láthatók.

7. A kiértékelés menete

Az értékelés előkészítő fázisa több lépésből állt. Először a stabilizációs időszakban mért bélyegdrift adatok alapján korrigálni kellett a KMSZ mérések adatsorait. Ehhez ki kellett számítani az egyes KMSZ-mérések időpontjában a vágathajtás nélkül várható



4. ábra: Az SC-3 jelű mérőcella bélyegeinek stabilizációs időszakban, valamint a KMSZ-mérések során felvett nyers idősorai



5. ábra: A vágathajtás által ténylegesen kiváltott deformációk korrigált idősorai

geken jelentkező deformációk a mért értékek és a bélyegdrift alapján számított elméleti adatsorok különbségeként kaphatók meg. Az 5. ábra az így kapott korrigált adatsorokra mutat egy példát.

Az így előkészített adatok további feldolgozása a U.S. Bureau of Mines által 1990-ben kifejlesztett, az AECL által rendelkezésünkre bocsátott Stresout 1.0 nevű értékelő szoftverrel történt. A szoftver értékelő algoritmus a [9] jelű publikációban közölt levezetések szerint készült. Elvileg lehetőség lett volna a cellák típusától, geometriájától és anyagtulajdonságaitól függő K1....K4 korrekciós faktorok input adatként történő bevitelére is, de előzetes tapasztalatok híján inkább ezeket is kiszámítottuk.

Az F^* kiegészítő feszültségtenzor komponenseinek számításához elvileg elegendő lett volna az is, ha a számításokat csak az utolsó KMSZ-robbantás után regisztrált értékekből végezzük el. Azonban a fentiek szerint előkészített adatbázis lehetőséget ad a feszültségváltozások teljes időbeli lefolyásának nyomon követésére. (Amint azt a

elméleti adatsor értékeit. Az előzetes mérések időszakában csatornánként összegyűjtött adatokra típusgörbékkel illesztünk (lineáris, hatvány, n-edfokú polinom, vagy exponenciális). A legkisebb négyzetek elve alapján vizsgáltuk ezek megfelelőségét. Az elvégzett számítások alapján azt tapasztaltuk, hogy ugyan a teljes stabilizációs adatsorok is viszonylag jól közelíthetők, de az első „helyezkedési időszak” adatpontjainak kihagyásával az illeszkedés javítható. Valamennyi cella mind a 11 csatornájára igaznak bizonyult, hogy az utolsó 5 stabilizációs mérés adatára igen nagy megbízhatósággal ($R^2 > 0,98$) egyenes illeszthető. (A referenciabélyeget nem kell korrigálni, ugyanis annak viselkedése a ragasztóanyagtól független). A KMSZ mérések időszakában vágathajtás nélkül valószínűsíthető értékek így egyszerű extrapolációval adódtak. Az üregképzés hatásaként a bélye-

későbbiekben majd látni fogjuk, az igazán érdekes információkhoz ezzel a módszerrel juthatunk.) Ehhez azonban a korrigált idősorok valamennyi időmetszékéből, és mind a hat cella esetében el kellett végezni a részletes számításokat. Ez 60 db, az értékelő szoftver speciális bemeneti formátumának megfelelő rész-adatállomány előkészítését és az értékelő szoftver 60 futtatását jelentette.

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 a térségre jellemző E és ν (vagy m) értékekre is szükség van. A KMSZ-fúrások maganyagán végzett laboratóriumi kísérletek alapján a Young-modulus értékét egységesen 35 GPa-nak választottuk, míg a Poisson-hányados értékére az átlagos 0,25 értéket fogadtuk el. Sem az elvégzett nagyszámú célvizsgálat eredménylistája, sem pedig a térség földtani képe nem indokolta, hogy az egyes fúrásokat eltérő rugalmassági paraméterekkel vegyük figyelembe. (Meg kell jegyezni, hogy a választott Young-modulus érték igen jó egyezést mutat azzal a közettömbre értelmezett deformációs modulussal, amit az [5] jelű publikációban található tapasztalati összefüggések segítségével, a 2. Ny-i oldalkamra térségét jellemző RMR közettömb-minősítési adatokból számítottunk.)

Az értékelő szoftver futtatása során a kőzetfeszültségek 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. Ismételten 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 főfeszültségkomponens megváltozását, hanem a legnagyobb mértékű főfeszültség-változást jelenti! (Sajnos a primer feszültségtér meghatározására elvégzett mag-túlfúrások illetve repesztéses mérések technikai okokból nem bizonyultak maradéktalanul sikeresnek. Ezért a KMSZ környezetében uralkodó primer feszültségviszonyokat nem ismerjük pontosan.)

8. A kapott eredmények és értelmezésük

Az egyes futtatások eredményeit tartalmazó kimeneti file-ok adatait táblázatos formában foglalhatjuk össze. Az alábbi, 1. táblázat az SC-3 fúrásba telepített cella számított főfeszültségváltozásainak, míg a 2. táblázat a normál-, illetve csúsztatófeszültségek változásainak időbeli alakulását mutatja be. A főfeszültség-változásokat azok abszolút értékével, azimutjával és dőlésével definiáltuk. Viszonyítási lehetőségként közöljük, hogy az SC-3 fúrás azimutja 260° , dőlése pedig -8° (felfelé!), az oldalkamra tengelyének hasonló adatai pedig 255° illetve 0° . (Hangsúlyozni kell, hogy a szoftver a lefelé dőlő fúrások dőlését veszi pozitívnak és a feszültségváltozások irányait is ennek megfelelően adja meg.)

Az értékelés során külön kell definiálni a 2. Ny-i oldalkamra falában ébredő, polárkoordinátarendszerben értelmezett axiális, tangenciális és radiális feszültségkomponenseket, valamint az értékelő szoftver által a K-Ny-i, ÉD-i, illetve a vertikális irányok által kijelölt derékszögű koordinátarendszerben megadott értékek változásait. Az oldalkamra közel K-Ny-i orientációja ebből a szempontból szerencsésnek tekinthető, mert ez az értelmezést egyszerűsíti.

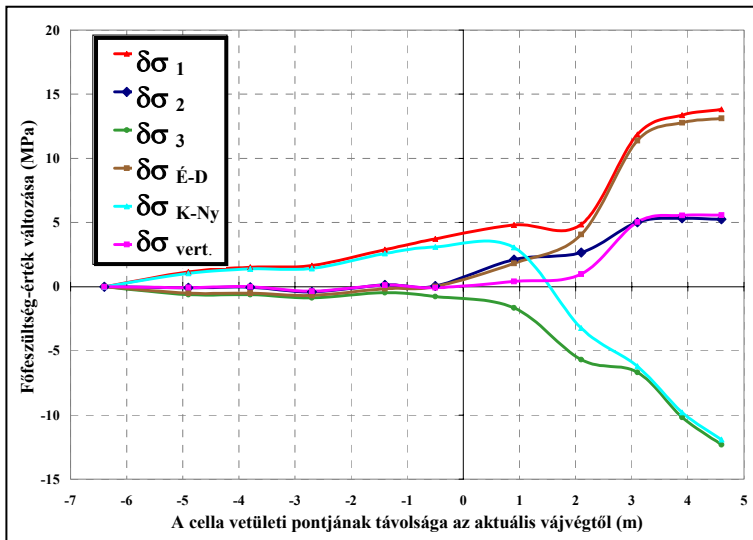
Az értelmezés e fázisában a kapott eredményeket már nem csak időszorként foghatjuk fel. Azt is vizsgálhatjuk, hogy a vájvég mindenkor helyzete hogyan befolyásolja a cellákon mérhető változásokat. Célszerűségi okok miatt a vájvég és a cellák relatív helyzete alatt a vágattengelyre merőlegesen vetített cellaközéppont és az aktuális vájvég között a tengelyen mért távolságot értjük. (Ez tehát akkor zérus, ha a vájvég a cella síkjába ér.) Az alábbi táblázatok első oszlopaiban már ezek az adatok szerepelnek.

1. táblázat: Főfeszültségváltozások időbeli alakulása

Cella és vájvég távolsága (m)	$\delta\sigma_1$ (MPa)	azimut (°)	dőlés (°)	$\delta\sigma_2$ (MPa)	azimut (°)	dőlés (°)	$\delta\sigma_3$ (MPa)	azimut (°)	dőlés (°)
-6,40	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00	-	-
-4,90	1,16	256,3	7,9	-0,09	213,9	-79,3	-0,62	345,3	-7,1
-3,80	1,52	257,0	8,4	-0,04	241,6	-81,3	-0,62	346,7	-2,3
-2,70	1,66	255,6	11,0	-0,40	201,9	-71,8	-0,86	342,7	-14,3
-1,40	2,89	255,2	9,7	0,14	187,7	-65,9	-0,46	341,2	-21,8
-0,50	3,72	76,6	-17,6	0,06	359,6	35,3	-0,76	325,0	-49,3
0,90	4,82	72,6	-26,7	2,11	357,1	26,5	-1,65	304,6	-50,7
2,10	4,86	182,7	-22,1	2,67	61,5	-52,0	-5,69	285,8	-29,2
3,10	11,87	172,5	8,1	5,02	317,4	80,1	-6,67	81,7	5,6
3,90	13,37	172,9	9,6	5,33	346,2	80,3	-10,18	82,7	1,1
4,60	13,82	173,0	11,4	5,25	352,1	78,6	-12,31	82,9	0,2

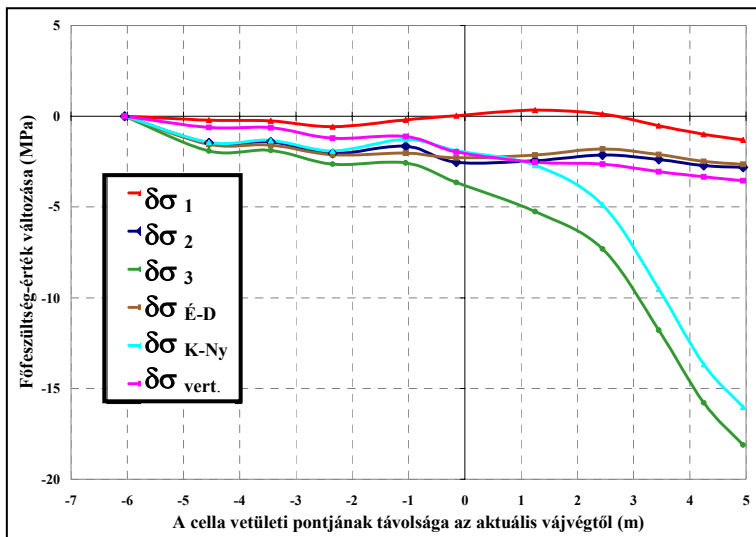
2. táblázat

Cella és vájvég távolsága (m)	$\delta\sigma_{\text{ÉD}}$ (MPa)	$\delta\sigma_{\text{KNy}}$ (MPa)	$\delta\sigma_{\text{vert}}$ (MPa)	$\delta\tau_{\text{ÉD/KN}}$ (MPa)	$\delta\tau_{\text{KNy/V}}$ (MPa)	$\delta\tau_{\text{V/ÉD}}$ (MPa)
-6,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-4,90	-0,51	1,03	-0,07	0,41	-0,18	0,02
-3,80	-0,51	1,38	0,00	0,46	-0,23	-0,03
-2,70	-0,67	1,43	-0,35	0,60	-0,41	0,01
-1,40	-0,15	2,58	0,13	0,82	-0,51	0,08
-0,50	0,01	3,09	-0,08	0,91	-1,26	0,09
0,90	1,82	3,05	0,41	1,32	-2,55	0,72
2,10	4,07	-3,23	0,99	1,76	-3,39	1,73
3,10	11,38	-6,20	5,05	-2,52	-1,01	-1,12
3,90	12,78	-9,81	5,55	-2,91	-0,13	-1,35
4,60	13,12	-11,92	5,59	-3,14	0,16	-1,65



6. ábra: A főtébe telepített SC-3 jelű cellán mérhető feszültségváltozások alakulása

(azimut: 260°, dőlés: -8°, a cella és a vágatfal távolsága: 1,4 m)



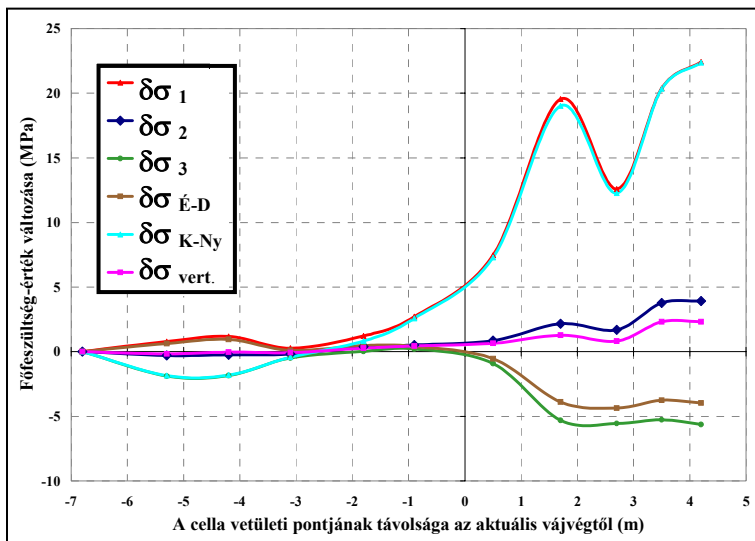
7. ábra: A főtébe telepített SC-4 jelű cellán mérhető feszültségváltozások alakulása

(azimut: 260°, dőlés: -16°, a cella és a vágatfal távolsága: 2,8 m)

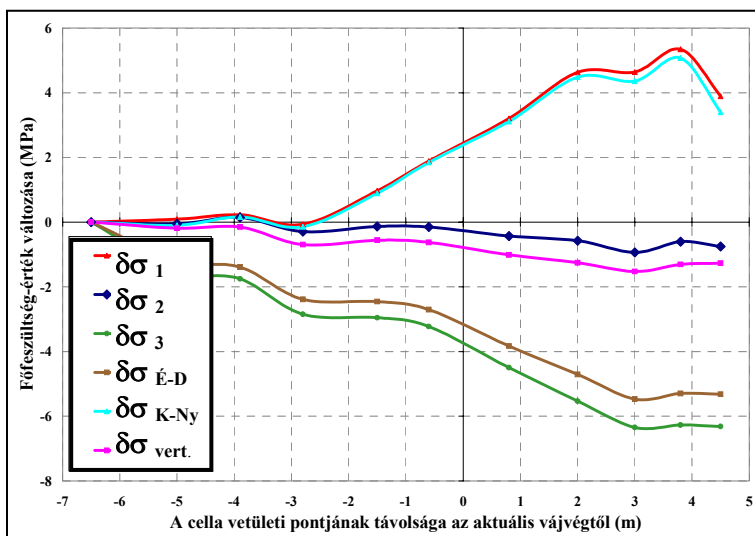
eredményezett, mint a távolabbiakon (SC-1, SC-4 és SC-6). Ez alól egyetlen kivételként az SC-4 cella minimális főfeszültség változása említhető, mivel ez a komponens nagyobb mértékben csökkent, mint az SC-3 hasonló adata. Az SC-4 adatsora azonban általában is nehezen értelmezhető, mivel itt mindhárom főfeszültség-komponens értéke jelentős mértékben lecsökkent. Nem állapítható meg egyértelműen, hogy ez mérési hibára, vagy a természetes módon kialakuló, illetve a horgonyok által létrehozott mesterséges boltozat közti fellazulás speciális mechanizmusára utal. Mindenesetre a [13] jelű publikációban közölt, szeizmikus terjedési sebesség-mérések adatai ez utóbbi feltételezést látszanak alátámasztani. A vertikálisan felfelé mélyített fúrásoknál a horgonyzott szakasz felett a sebességértékek folyamatos csökkenése volt tapasztalható,

A fentihez hasonló táblázatok alapján elkészíthetők az egyes fúrásokban meghatározott feszültségváltozások grafikonjai is. A következő oldalakon található 6.-7. illetve a 8.-9. ábrákon páronként mutatjuk be a szomszédos helyzetű (egymástól 8°-kal eltérő) fúrásokban meghatározott feszültségváltozások grafikonjait. Ennek az a célja, hogy közvetlenül megítélhető legyen, vajon a vágatfaltól mért r távolság növelése a feszültségváltozások értékének alakulásában milyen eltéréseket okoz. A 6.-7. ábrák a főtében, míg a 8.-9. ábrák a kamra É-i oldalában telepített cellák eredményeit mutatja be.

A szomszédos helyzetű fúrások adatait összehasonlítva az az egyébként is kézenfekvő felismerés adódik, hogy a vágattól kisebb távolságban elhelyezett cellákon (SC-2, SC-3 és SC-5) a vágathajtás hatása lényegesen nagyobb változásokat



8. ábra: Az É-i oldalba telepített SC-5 jelű cellán mérhető feszültségváltozások alakulása (azimut: 268°, dőlés: -2°, a cella és a vágatfal távolsága: 2,0 m)



9. ábra: Az É-i oldalba telepített SC-6 jelű cellán mérhető feszültségváltozások alakulása (azimut: 276°, dőlés: -2°, a cella és a vágatfal távolsága: 3,4 m)

okozhatták.

Az egyformán „közeli” helyzetű mérőeszközök adatainak összevetésével a főte és az oldalfal viselkedésének eltérő jellegét figyelhetjük meg. Ennek megfelelően az oldalpont feszültségváltozásait reprezentáló SC-2 és SC-5 cellák esetében az axiális, közel KNy-i irányú komponensek növekedése a legjelentősebb (18-22 MPa). Kisebb mértékű növekedés, illetve stagnálás figyelhető meg a tangenciális, tehát vertikális komponensek esetében. A radiális, tehát az ÉD-i iránytól nem sokkal eltérő komponensek mintegy 6 MPa csökkenéssel reagálnak az üregképzésre. (A $\delta\sigma_1$, $\delta\sigma_2$, és $\delta\sigma_3$ értékek értelemszerűen annál közelebb esnek a derékszögű koordináta-rendszerben értelmezett normál-feszültségekhez, minél jobban megközelíti a fúróluk és a cella

egészen a magasabb zónákban kialakuló természetes boltozat eléréséig. A közhorgonyzás által létrehozott mesterséges boltozat ezt a hatást jelentősen csökkentette, így a két zóna között nagyobb mértékű fellazulás alakult ki, mint közvetlenül az üreg felett. Miután a 2. Ny-i oldalkamrában 1,8 m hosszú horgonyokat alkalmaztak, az SC-3 jelű cella a horgonyzás tartományába esett.

Ugyancsak a kőzetek nem ideális viselkedésére vezethető vissza az SC-5 cella 8. mérésénél tapasztalható jelentős anomália is, amit – ha kisebb mértékben is – az SC-6 cella is jelez. A további cellák által detektált feszültségváltozások nagyságrendileg megegyeznek az elméletileg előre jelezhető folyamatokkal, de azért azoktól néhány ponton eltérnek. Alapvető feladat lesz a későbbiekben annak vizsgálata, hogy a jelzett eltéréseket milyen fizikai, vagy földtani hatások

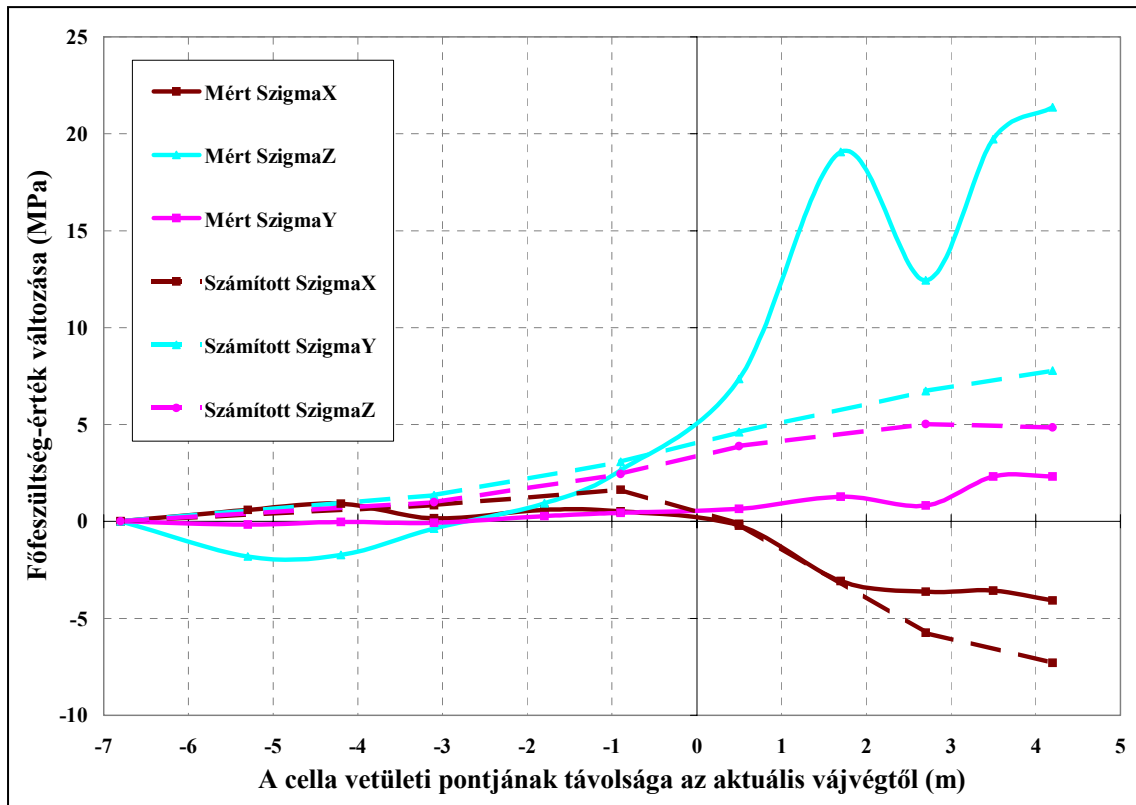
tengelye a KNy-i irányt. Ezért az elmondottak a 268° azimutú SC-5 esetében figyelhetők meg a legjobban.)

A fentiek megállapítások a teljes vágathajtási folyamat végén bekövetkező feszültség-változásokra vonatkoztak. Érdeemes azonban észrevenni azt is, hogy a vágathajtás első, csak kis hatásokkal járó szakaszában – elsősorban a közeli celláknál – még fordított a helyzet. A $\delta\sigma_3$ (legkisebb főfeszültség-változás) értékek ekkor még a KNy-i, vagy ahhoz közel eső irányhoz kötődnek. Ez arra utalhat, hogy a fűrőlyuk léte maga is - kisebb mértékben - befolyásolja a feszültségek alakulását.

A *főtepont* viselkedését reprezentáló SC-3 jelű cella adatsora igen érdekesen alakul: Itt egészen addig, amikor a vágófej már túlhalad a cellán, az axiális – közel KNy-i komponensen mérhető a legnagyobb növekmény (ez már nem tekinthető fűrőlyuk-hatásnak). Az alátámasztását részben elvesztő főtében azonban ezen a ponton hirtelen megváltozik a feszültségkép és az ÉD-i irányú normálfeszültség, tehát a tangenciális komponens növekedése lesz a legnagyobb (boltív-hatás). Ezzel együtt a radiális komponens is megnő, amelynek hatására konvergencia alakul ki. Az 1,4 m mélyen mért axiális komponens hirtelen 12 MPa-nyi csökkenése alapján az üregfelületen akár kisebb húzófeszültség kialakulása is elképzelhető lenne. A tapasztalatok szerint ezt azonban a közethorgonyzás hatékonyan képes megakadályozni.

A CSIRO-cellás mérések a *KMSZ további méréseinek értelmezéséhez* is jelentős segítséget adtak. Ezek közül is kiemelkedik a *HG-3 fűrész* multipakker rendszerének mérései során tapasztalt jelenségek magyarázata, az üregnyitás által kiváltott ún. mesterséges öngyógyító mechanizmus felismerésében való közreműködés. Ez azonban már nem képezheti e cikk tárgyát.

A KMSZ-program részeként elvégzett konvergencia- és extenzométeres mérések numerikus modellezésére kapcsolt kontinuum- és diszkontinuum-mechanikai módszereket egyaránt alkalmazó 3D-s hidromechanikai feladatként, tehát az üregképzés miatt változó hidraulikai nyomásviszonyok figyelembevételével került sor [8]. Ennek eredményeként többek között számíthatók voltak a vágathajtás okozta feszültségváltozások is. Sajnálatos módon a modellezési programnak nem volt része a CSIRO-cellák adatsorának kvantitatív kiértékelése. Ez a körülmény viszont lehetővé tette, hogy elvégezzük a mért és az elmozdulásmérések adatainak felhasználásával visszakalkulált feszültségváltozások időbeli alakulásának összevetését. Ehhez először a 3D-s kapcsolt hidro-mechanikai modelltől meg kellett határozni modell megfelelő csomópontjaiban (a CSIRO-cellák helyén) számított normálfeszültség-változásokat. Ezt követően a mért adatokat transzformálni kellett az oldalkamra tengelye által kijelölt derékszögű koordinátarendszerbe, miután a modellezés ilyen rendszerben történt. Az alábbi, 10. ábrán az SC-5 cella példáján mutatjuk be az elvégzett összehasonlítás eredményeit:



10. ábra: A 3D-s hidromechanikai modellből az SC-5 cella helyén számított normálfeszültség-változások összevetése a mérésből kapott értékekkel

A két adatsor együttes grafikus megjelenítése jól érzékelteti, hogy a modellezett folyamatok általában jó egyezést adnak a CSIRO-cellák által mért feszültségváltozások időbeli eloszlásával és nagyságrendjével is. Ezzel együtt azonban az is megállapítható, hogy a gyakorlati mérés eredményei számos ponton eltérnek az elméleti levezetések, illetve az elvégzett modellszámítások alapján előrejelzett tendenciáktól. (A további cellák esetében végrehajtott ellenőrzések tapasztalata is ugyanez.) Alapvető feladat lenne tehát a későbbiekben annak vizsgálata, hogy ezt az eltérést milyen fizikai, vagy földtani hatások okozhatták.

Ki kell emelni, hogy – bár a BAF minősítési programja keretében, más feladatok megoldására eredményes termo-mechanikai modellezés is folyt – a KMSZ kapcsán említett modellezési folyamat nem vette figyelembe a termikus változások lehetséges hatásait. Könnyen elképzelhető, hogy az említett eltérések jelentős részben ez az elhanyagolás okozza. Ez is arra hívja fel a figyelmet, hogy a cikk bevezetőjében energodinamikai megközelítésmód továbbfejlesztése és következetes alkalmazása egyedülálló lehetőségeket kínálhat a fölmerülő kérdések megoldására.

Hivatkozások

- [1] Asszonyi Cs.; Kapolyi L.: *Kőzetek mechanikai jellemzőinek meghatározása*. MTA Veszprémi Akadémiai Bizottság Monográfiái. II. évf. 4. szám. 1976.
- [2] Asszonyi Cs.; Gálos M.; Kertész P.; Richter R.: *A bányászat mechanikai rendszere*, 1. kötet. *A kőzetmechanikai anyagszerkezeti és reológiai alapjai*. MTA Veszprémi Akadémiai Bizottság kiadványa. Veszprém, 1980.
- [3] Asszonyi Cs.; Kapolyi L.: *A bányászat mechanikai rendszere*, 2. kötet. *Kőzetkontinuumok mechanikája*. MTA Veszprémi Akadémiai Bizottság kiadványa. Veszprém, 1981.
- [4] Bonne, A.; Andre-Jehan, R.; Oth, A.: *Testing and modelling of the mechanical hydrogeological and thermal phenomena related to the geological disposal in clay*. Conference on Radwaste management and disposal, Luxembourg. 1990 Proc. pp: 505-517. Elsevier, Amsterdam.
- [5] Brady, B.H.G.; Brown, E. T.: *Rock mechanics for underground mining*. George Allen & Unwin, London, 1985.
- [6] Brown, E.T. (editor): *ISRM Suggested methods for in situ rock stress measurements*. Pergamon Press, Oxford. 1985
- [7] Del Olmo, C.; Fiorvante, V. et Al.: *Thermo-mechanical properties of deep argillaceous formations*. *Engineering Geology* 41. pp. 87-102., 1996.
- [8] Dolezalová M., Zemanová V.: *Szakértői jelentés (I.-II. rész) a Bodai Aleurolit Formáció minősítését célzó in situ kőzetmechanikai, hidrogeológiai és termikus mérések kontinuum és diszkontinuum modellezésének és kiértékelésének második szakaszáról, kapcsolt feladatokkal*. Prága-Budapest. 1998. február.
- [9] Fama, M.E.D.; Pender, M.J.: *Analisis of the Hollow Inclusion Technique for Measuring In Situ Rock Stress*. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17:137-146., 1980.
- [10] Kovács L.: *A Bodai Aleurolit Formáció minősítésének rövidtávú Programja*. Kutatási Zárójelentés, 6. kötet: Kőzetmechanikai, geotechnikai vizsgálati program. Pécs, 1999. március.
- [11] Martin, C.D.; Simmons G.R.: *The Underground Research Laboratory – an opportunity for basic rock mechanics*. *ISRM News Journal*. 1(1). 5-12. 1992.
- [12] Somosvári Zs.: *Geomechanika I-II.*, Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
- [13] Somosvári Zs.: *Szeizmikus mérések és értékelés az Alfa-1 vágatban új robbantási technológiával kihajtott szakaszon*. Kutatási jel.. Miskolc. 1998. okt.
- [14] Volckaert, G.; Bernier, F; and Oth.: *Thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier in radioactive waste repositories*. SCK/CEN EUR 16744 EN Report. Mol, Belgium, 1995.
- [15] Worotnický G.; Walton R.J.: *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.