

# Nagy pontosságú nyomott rudas konvergenciamérési módszer alkalmazása a hazai radioaktív hulladék-elhelyezést előkészítő kutatásokban

Kovács László

Kőmérő Kft., Pécs, kovacslaszlo@komero.hu

Bogár István

Kőmérő Kft., Pécs, bogaristvan@komero.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A BAF kutatására kialakított föld alatti kutatólaboratórium (URL) vizsgálati programjához 1995-ben került kifejlesztésre egy olyan nyomott rudas konvergenciamérő műszer és eljárás, aminek pontossága egy nagyságrenddel meghaladja a világszerte általában alkalmazott, optikai illetve húzott szalagos mérőrendszereket. A rendszer 33 m<sup>2</sup>-es szelvényméret mellett is alkalmazhatónak bizonyult. Amíg korábban a konvergenciaméréseket (főleg hazánkban) inkább csak az üregstabilitás ellenőrzésére, a jelentősebb deformációk kimutatására alkalmazták, a megnövekedett pontosság miatt az eredmények felhasználási köre jelentősen kibővült. A BAF URL-ben végzett szisztematikus konvergenciamérési program eredményeit igen jól lehetett használni a disztinktelemes és végeselemes lépésekből felépített numerikus modellezés kiinduló illetve validáló adataiként is. Bátaapátiban, a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezését előkészítő program keretében, számos alkalommal sugaras illetve elhaladásos jellegű extenzométerekkel kombináltan telepített konvergenciamérő szelvények szintén igen informatívnak bizonyultak. Amellett, hogy egyes lokális földtani-tektonikai jelenségek mechanikai hatását sikerült pontosítani, a konvergenciamérések a vágat körül kialakuló EDZ jellemzéséhez is hozzájárultak. Felmerült a lehetősége annak is, hogy közvetlen kapcsolatot találjunk egy adott vágatszakasz empirikus geotechnikai módszerekkel meghatározott minősítési értéke és az ott várható konvergenciaértékek között. A cikk csak emlékeztet a BAF-URL-ben, a 90-es években végrehajtott mérési programra, részletesen a Bátaapátiban kapott adatokat elemzi.

*Kulcsszavak:* BAF, Bátaapáti, radiális deformáció, nyomott rudas konvergenciamérés, statikai tervezés alapadatai

## 1 BEVEZETÉS

### 1.1 A hazai radioaktív hulladékok végleges elhelyezését célzó programok

Már 1993-ban, nem sokkal a Paksi Atomerőmű radioaktív hulladékainak kezelésére létrehozott Nemzeti Célprojekt megalakulása után eldőlt, hogy két külön telephelyen, egymástól elkülönülten kell megkezdeni a hazai kis és közepes aktivitású hulladékok illetve a nagyaktivitású hulladékok (és a kiégett fűtőelemek) végleges elhelyezését előkészítő kutatási programokat. A nagyaktivitású hulladékok elhelyezésére potenciálisan a Bodai Aleurolit Formációt (BAF) tartják a legalkalmasabbnak. Itt ebből a célból 1994 és 1999 között, mintegy 1030 m átlagos felszín alatti mélységben kialakítottak és üzemeltettek egy föld alatti kutatólaboratóriumot (Underground Research Laboratory – URL). A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezését a 2003-ban földtanilag alkalmasnak nyilvánított Mórági Gránit Formációban (MGF) tervezik. Bátaapáti 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). 2008. ősztől – immár a beruházási program részeként – egy olyan, közel szintes hurokvágat-rendszer kialakítása zajlik, amelynek célja a majdani kamrarendszer térségének feltárása illetve a létesítmény felszín alatti infrastrukturális ellátó rendszereinek befogadása. A hurokrendszer kialakítása ezekben a napokban fejeződik be, és a tervek szerint még ebben az évben megkezdődnek a közel 100 m<sup>2</sup> szelvényterületű tárolókamrák kialakításának munkálatai. A potenciális befogadó képződmények minősítése és részletes jellemzése valamint a további fázisok tervezési adatainak biztosítása érdekében az építési folyamattal párhuzamosan mindkét említett felszín alatti üregrendszerben kiterjedt in situ geotechnikai-kőzetmechanikai mérési programot kellett megvalósítani. Az e program keretében elvégzett helyszíni deformációmérések egyik igen informatív módszerét jelentették a nagy pontosságú mechanikai konvergenciamérések.

## 1.2 A vágathajtás hatására fellépő közetdeformációk szerepe a tervezésben

A vágathajtás hatására a kőzetköpenyben végbemenő tranzienst jellegű deformációs folyamatok mértékének, időbeli lefolyásának és szelvénybeli eloszlásának ismerete alapvető fontossággal bír egy-egy föld alatti létesítmény előkészítésének geotechnikai, műszaki tervezési folyamatában. („Tranziens” alatt azt a folyamatot értjük, amelynek során a vágathomlok előrehaladásával párhuzamosan az alátámasztását veszített kőzetek fokozatosan deformálódva új egyensúlyi állapotba jutnak el.)

Egy szabályos körszelvényű vágatban a vájvég környezetében a deformációs folyamatok már jóval a vájvég mögött, tehát a jövesztéssel még nem érintett kőzetzónában megindulnak, majd fokozatosan kifejlődve, már az ürepszelvényben érik el maximális értéküket. A (Hoek, 2000) publikáció ennek kapcsán konkrét számadatokat is rögzít (pl. a deformációk a vájvég előtt körülbelül másfél vágatátmérőnyi távolságban kezdődnek, a radiális deformációs görbe inflexiós pontja a vájvég síkjában található, illetve a maximum a vájvég mögött egy, másfél vágatátmérőnyi távolságban alakul ki. Ezek az adatok azonban abszolút idealizált helyzetre (szabályos szelvényalakra, gömbszimmetrikus feszültségtérre ( $k = 1$ ) valamint ideálisan rugalmas kőzetekre vonatkoznak, tehát a gyakorlati tervezés számára nem feltétlenül irányadók. A reális kőzetviszonyok között végrehajtott in situ mérések azt mutatják, hogy egyes kőzettípusok esetében, megfelelő pontosságú mérőeszközök alkalmazásával akár már a vájvég mögött két, két és félszeres távolságban is kimutathatók deformációk, míg az elmozdulásfüggvény maximuma – éppen a kőzetek reológiai jellege miatt – inkább két és félszeres, néha akár háromszoros vágatátmérőnyi távolságban is kialakulhat. Miután ezek az értékek igen változékonyak lehetnek, ezért a tranzienst elmozdulásfüggvény minél pontosabb felvételével a vágathajtás által érintett kőzettestek mechanikai tulajdonságainak jó jellemzését adhatjuk meg. Ráadásul, mivel az e mérésekből visszaszámítható kőzetmechanikai paraméterek nagyságrendekkel nagyobb kőzettérforagra vonatkoztathatók, mint a laboratóriumi kőzetmechanikai vizsgálatokból származók, ezért ezek szórása lényegesen kisebb lesz.

A vágat környezetében kialakuló deformációk pontos méréseit – körszelvény, vagy azt jól közelítő szelvényalak valamint homogén és ideálisan rugalmas viselkedés esetében – a primer feszültségállapot közelítő leírására is felhasználhatjuk. A Kirsch-képletből levezetett, a főfeszültségekhez viszonyított véletlen Descartes-i tengelyekkel felírt egyenletrendszer statisztikus megoldásával a vágattengelyre merőleges síkban uralkodó két főfeszültségkomponens helyzete és abszolút értékeinek aránya is számítható (Martin et al. 1996).

Az elmozdulásfüggvény pontos felvételének azért is nagy jelentősége van, mert ez jelenti a beépítendő biztosítószerkezetek statikai méretezésének egyik legfontosabb adatrendszerét. A nemzetközi alagútépítési gyakorlat már a 70-es években is felismerte és alkalmazni kezdte ezt az elvet (pl. Carvalho & Kovári, 1977). Carranza-Torres & Fairhurst (2000) kidolgozta az ún. konvergencia-korlátozós biztosítástervezési módszert, amely a vágattengely-menti (longitudinális) deformációs profil, a kőzetreakció görbéje valamint a biztosítás jelleggörbe zárt matematikai formában való – a mérési eredményeket legjobban közelítő – felírásán alapul. Sajnálatos módon azonban ez a módszer is számos egyszerűsítő feltételt tartalmaz: A vizsgált kőzeteknek ki kell elégíteniük a Hoek-Brown tönkremeneteli kritériumot, a kialakítandó üregnek körszelvényűnek kell lennie, a primer feszültséget hidrosztatikus jellegűnek adja meg, valamint feltételezi, hogy az összes deformáció egy, a vágat tengelyére merőleges síkban jelentkezik. A gyakorlati igényeknek azonban – különösen a legkorszerűbb tudományos és technológiai módszerek alkalmazásának kötelezettségével járó radioaktív hulladék-elhelyezés esetében – az ilyen analitikus megoldások egyre kevésbé elfogadhatók. Az általában követett eljárás az, amikor a helyszíni mérések eredményeit bemeneti és/vagy validáló adatként használják fel fejlett numerikus modellezési eljárások során. Feng & Hudson (2010) az ilyen és ehhez hasonló problémák megoldásához egy olyan komplex, az egymásra épülő kutatási illetve beruházási fázisok fokozatosan bővülő mérési és megfigyelési adatrendszerén nyugvó tervezési folyamatábrát dolgozott ki, amelyben egyaránt helye van az egyszerű hagyományos tervezési megoldásoknak és a legbonyolultabb kapcsolt (pl. termo-hidro-mechanikai), kiterjesztett numerikus modellezéseknek is.

A biztosítástervezés kapcsán külön fel kell hívni a figyelmet egy fontos kérdésre: A kemény (szálabban álló) kőzetek mellett hazánkban általánosan alkalmazott fúrásos-robbantásos jövesztési technológia mellett – a geotechnikai viszonyok függvényében – az alkalmazott fogásmélység általában 1,0 és 3,0 m között mozog. Így az aktuális vájvégtől ekkora távolságra a biztosítószerkezeteket csak több órával a robbantást követően építik be. Ezen időszak alatt a biztosítatlan térségben a deformációk zöme (a reológiai utómozgásoktól eltekintve) már lejátszódik, így a később beépítendő biztosítószerkezeteknek a teljes elmozdulásnak csak egy részét kell felvenniük. A biztosítószerkezetek által felveendő elmozdulások (illetve terhelések) abszolút illetve százalékos mértékének ismerete a szükséges biztosítási reakció kiszámításának előfeltétele. Ebből, valamint az elmozdulásfüggvény szokásos alakjából egyébként az is következik, hogy – még azonos kőzetviszonyokat feltételezve is – 1,0 méteres fogáshossz mellett lényegesen magasabb lesz a biztosítószerkezetre ható terhelés, mint 3,0 m-es fogá-

soknál. (Ezt a különbséget természetesen tovább fokozza az a tény, hogy a kisebb fogáshosszú jövesztést szükségessé tevő, kedvezőtlenebb geotechnikai állapotú kőzetek esetében amúgy is magasabb a deformabilitás, tehát a fellépő teljes elmozdulások és terhelések is.) Mindezek miatt a biztosítószerkezetek beépítéséig kialakuló ún. relaxációs hányad értékét nem célszerű egységesen, a kőzetviszonyoktól és a fogáshosszaktól függetlenül kezelni.

A bányászati módszerekkel kialakított (nem felszíni típusú) radioaktív hulladékok végleges elhelyezésének előkészítése során a helyszíni deformáció- illetve elmozdulásméréseknek azonban nem csak a statikai tervezés illetve a kivitelezés kapcsán van jelentősége. Az így szerzett adatok a jövesztés által roncsolt illetve megzavart, a potenciális izotópmigrációs útvonalak kialakulásában különösen fontos kőzetzónák (az EDZ: Excavation Damaged Zone – a jövesztés által roncsolt kőzetzóna és az EdZ – Excavation disturbed Zone) mélységének és eloszlásának meghatározásához is nélkülözhetetlenek.

A kőzetköpenyben fellépő tranziens deformációs adatok felhasználásával tehát

- lehetővé válik az alkalmazott biztosítószerkezetekkel együttműködő kőzetek reális viselkedésének leírása és megértése (pl. kontinuum – diszkontinuum);
- a korai tervezési fázisokban (a kisebb szelvényekben) biztosíthatók a numerikus modellezés kiinduló illetve validáló adatai. Megfelelő numerikus visszaszámítási módszerekkel főleg a repedések szilárdsági paramétereiről, a nagy léptékű deformabilitásról vagy akár a primer feszültségállapotról szerezhetünk más módszerekkel nem, vagy csak nehezen megszerezhető információkat;
- lehetőség nyílik a feliskálázásra (upscaling);
- megismerhetővé és leírhatóvá válnak az EDZ és az EdZ mechanikai tulajdonságai;
- a kivitelezés fázisában lehetővé válik a modellek előrejelzéseinek ellenőrzése, és ezáltal a modellek finomítása;
- ellenőrizhetővé válik a kivitelezés megfelelése (tehát a kialakított üreg stabilitása).

A hazai radioaktív hulladék-tároló programok kapcsán gyorsan egyértelművé vált, hogy a befogadó képződmények mechanikai jellemzéséhez, az EdZ és EDZ viszonyok megértéséhez valamint az optimalizáló tervezéshez is felhasználható, részletes geotechnikai-kőzetmechanikai adatok csak nagy pontosságú helyszíni műszeres mérésekkel szerezhetők meg.

### 1.3 A radiális kőzetdeformációk helyszíni mérésének lehetőségei alacsony deformabilitású képződményekben

A deformációs mező talán legkönnyebben, leggyorsabban és legolcsóbban megmérhető eleme a kőzetköpeny meghatározott mélységében fellépő radiális komponens, ezért kézenfekvő, hogy a mérési eljárások zömét erre fejlesztették ki.

Az olyan, viszonylag nagy szilárdságú és alacsony deformabilitású képződmények esetében, mint amilyen a BAF és az MGF is, felbontási és pontossági korlátaik miatt már a kutatások korai időszakában el kellett vetni számos olyan mérési módszer alkalmazását, amiket a felszínközeli végzett alagútépítési és mélyépítési feladatok esetében kiterjedten alkalmaznak. Ilyen volt pl. az inklinométeres technika, ami Bábaapátiban csak a felszínközeli talajrétegek (a portálok) környezetében adott megfelelő adatokat. Ezekben a képződményekben az optikai konvergenciamérési eljárás is csak korlátozottan, általában az esetleges nagy deformációval járó tönkremeneteli helyek monitorozására alkalmazható. A gyakorlati igényeknek leginkább kétféle, a vágat körül kialakuló radiális elmozdulásokat meghatározó, nagy pontosságú módszer, a fúróluk-extenzométerek és a mechanikai konvergenciamérő szelvények telepítése felelt meg.

A fúróluk-extenzométeres mérések általános elve a következő: A fúróluk előre kijelölt mélységű pontjain a fúróluk tengelyével párhuzamos irányú, kőzetdeformációt nem gátló kivitelű rögzítő elemeket (horgonyokat, ankereket) ültetnek és rögzítenek a kőzetfalhoz oly módon, hogy a kapcsolat csúszásmentes legyen. A horgonyokhoz mereven kapcsolt deformálórudazatok közvetítik a kőzet radiális irányú elmozdulásait az általában a fúróluk szájánál telepített ún. mérőfejben elhelyezett érzékelőhöz. Ily módon a mérőfej rögzítési pontja és a fúróluk különböző mélységében telepített rögzítők közötti relatív elmozdulás-különbségeket érzékelhetjük. Az ilyen extenzométereket kétféle alapvető elrendezésben telepíthetjük:

1. Ún. „sugaras” geometriában, ahol a már kialakított vājvéggtől hazafelé – lehetőleg a vājvéghez minél közelebb, hogy a fellépő deformációk minél nagyobb hányada mérhető legyen – mélyített, radiális helyzetű fúrólukakba építjük be az extenzométereket, amik a telepítési helyül szolgáló vágat majdani továbbhajtásának hatásait mérik. Amennyiben egy ilyen szelvényben egyenletes kiosztásban több (általában 4-6) extenzométer is működik, akkor a radiális elmozdulások nem

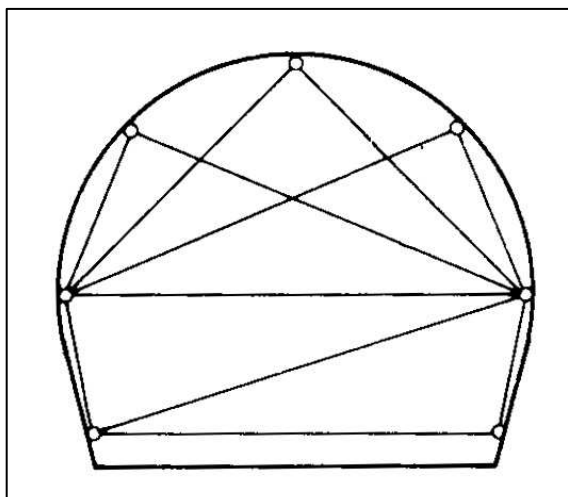
csak a vágattól való távolság függvényében határozhatók meg, hanem azok szelvény-menti eloszlása is megismerhető.

- Ún. „elhaladásos” elrendezésben, ahol a telepítési vágat nem azonos a mérendő vágattal. Egy megfelelő helyszínről telepített extenzométerekkel egy, még nem kihajtott vágatszakasz tervszelvényét közelítjük meg úgy, hogy az új vágat kihajtása során az extenzométer lehetőleg ne sérüljön meg. Mivel egy adott vágatszelvényben a deformációk egy része még az előtt lejátszódik, hogy a vágvég odaérne, ezért ennek a változatnak nagy előnye, hogy – a sugaras elrendezéssel ellentétben – így a teljes deformációs folyamat megmérhető (és így a már a vágvég előtt lejátszódó deformációk abszolút illetve százalékos értéke is pontosítható). Az elhaladásos mérési elrendezés geometriája illetve az abban alkalmazott extenzométerek száma igen változatos lehet; ezt elsősorban a két vágat egymáshoz viszonyított térbeli helyzete és a mérendő deformációs komponens határozza meg. Ezt az elrendezést legtöbbször szintén a radiális deformációk meghatározására alkalmazzák, de telepíthetők így extenzométerek axiális deformációk mérésére is.

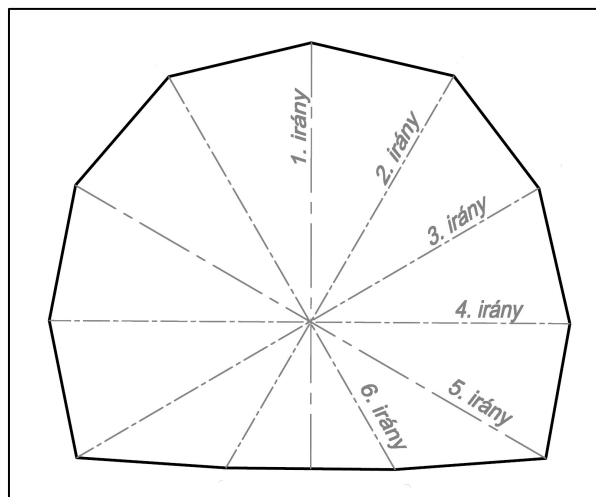
A gyakorlati problémák megoldása során, a leghatékonyabb információszerzés érdekében az extenzométereket kombináltan célszerű telepíteni a konvergenciamérő szelvényekkel. Mind a BAF URL-ben, mind pedig Bátaapátiban számos példa volt erre. Jelen kötet egy másik publikációja (Mészáros & Török, 2010) egy olyan esettanulmányt ismertet, ahol a fő hangsúly az extenzométeres eredményeken van. Ezért e cikk további részében döntően már csak a konvergenciamérésekkel foglalkozunk.

Mivel a hazai és a nemzetközi alagútépítési és bányászati gyakorlatban a 80-as évekig mást értettek a „konvergenciamérés” alatt, ezért a részletes tárgyalás előtt célszerű definiálni, hogyan is használjuk a továbbiakban ezt a fogalmat.

A konvergenciamérés során a kőzetfalba telepített mérőcsapok egymáshoz viszonyított távolságának változását (a konvergenciát) kell – az idő függvényében – meghatározni. Ezekhez a távolságmérésekhez mérésekhez hitelesített mechanikai vagy optikai mérőeszközöket használhatunk. Amennyiben a hagyományosnak tekinthető elrendezés szerint az egyes csapokat több másikkal is összemérjük (erre egy lehetséges példát az 1. ábra mutat be), úgy a redundáns mérésekből az egyes, eredetileg bemért helyzetű csapok térbeli koordinátáinak változásait is megkaphatjuk. Ilyen elrendezés mellett tehát nem közvetlenül a radiális irányokban kapjuk meg a konvergenciát, hanem azt a térbeli koordináták változásából tudjuk visszaszámítani.



**1. ábra.** Egy hagyományos konvergenciamérő szelvény elrendezése



**2. ábra.** Módosított, csak radiális irányokat tartalmazó konvergenciamérő szelvény elrendezése

A 80-as évekig az akkori mérés technikai lehetőségek miatt viszont a megfelelően pontos távolságváltozások (különösen a radiális irányúak) meghatározására csak abban az esetben volt lehetőség, ha a mérőeszközöket folyamatosan bent lehetett hagyni a vágatszélvényben. Ez a követelmény eleve kizárta azt, hogy a vágathajtási zónában is pontosan meg lehessen mérni a fellépő konvergenciát, ezért ezek a rendszerek csak egy-egy kritikus vágatszakasz hosszú távú monitorozására voltak alkalmasak. (A hazai bányászatban a 80-as évek végén is törekedtek az ilyen típusú mérések szabványosítására.) Amennyiben viszont a vágathajtási zónában is szükség van a konvergenciamérések kivitelezésére, úgy az alkalmazott mérőeszközök jelentős, sokszor akár mm-es nagyságrendű be- illetve visszaépítési hibái még abban az esetben is döntően meghatározták a mérések pontosságát, ha csak egyetlen összetartozó csap-pár közötti távolságokat kellett mérni. Amennyiben az 1. ábra szerint egy-egy csap több

irányhoz is tartozik, akkor a csapok gépészeti kialakításának problémái (a csatolások) tovább növelik a hiba mértékét.

A hagyományos konvergenciamérési elrendezésekben – technológiai okokból – a talpon általában nem telepítenek mérőcsapokat, így a talp elmozdulási viszonyairól nem is keletkezik információ. Bár ez a biztosítószerkezet méretezéséhez az esetek többségében nem is feltétlenül szükséges, a közetkörnyezet mechanikai viszonyainak jellemzése, és különösen az EDZ minősítés ilyen adatok nélkül nem megvalósítható.

A vázolt problémák megoldása érdekében egyre gyakrabban alkalmaznak új típusú, kizárólag radiális irányokat tartalmazó konvergenciamérési elrendezéseket; még azon az áron is, hogy ily módon az egyes csapok elmozdulásait önállóan nem ismerhetjük meg. (Ezt a célt kiegészítő extenzométeres mérésekkel amúgy is el lehet érni.) E szelvények esetében az induló vājvég közvetlen környezetében mélyített, radiális irányú fúrólukukba installált, legalább három, optimális esetben 6 mérési irányt kijelölő fix helyzetű mérőcsapok (mérési irányonként egy pár – ld. a 2. és a 6. ábrákon) felhasználásával határozzuk meg a vágat előrehaladásával párhuzamosan jelentkező jövesztések hatására megváltozott feszültségállapotú közetköpeny rugalmas elmozdulásainak idősorát, illetve ezek eloszlását a vágatszelvevény mentén.

Az említett mérési elrendezés bevezetését 1994-ben javasolta C.D. Martin, aki akkoriban a hazai BAF URL munkálataiban tanácsadóként közreműködő kanadai AECL cég vezető közetmechanikai szakértőjeként dolgozott, és több alkalommal is járt a helyszínen. A sikeres módszer- és műszerfejlesztést követően a továbbiakban is ezt az eljárást követtük. Ezért a cikk további részében a konvergenciamérés fogalma alatt a módosított, csak radiális irányokat tartalmazó elrendezést értjük.

## 2 A NYOMOTT RUDAS MECHANIKAI KONVERGENCIAMÉRŐ ELJÁRÁS

### 2.1 A mérési módszerrel szemben támasztott követelmények

Amint azt a bevezetőben már kifejtettük, a vágathajtás során a feszültségátrendeződés és az ebből fakadó közetdeformáció már a robbantások által közvetlenül még nem érintett közettömb belsejében megindul. Ezért a gyakorlatban, a már kialakított üregben telepített mérőberendezésekkel a teljes deformációknak csak egy – a közettulajdonságoktól, az üregalaktól és a primer feszültségállapottól függő – hányadát lehet megmérni. Éppen ezért igen fontos, hogy a mérési szelvevény valóban az aktuális vājvég közvetlen közelébe kerüljön. Az induló vājvégtávolság növekedésével az egyáltalán még megmérhető konvergenciaértékek ugyanis exponenciálisan csökkennek. C.D. Martin a BAF URL-ben kialakított 10 m<sup>2</sup>-es szelvevényterületű vágatok esetében 0,8-1,0 m-ben határozta meg az ún. induló vājvég és a mérési szelvevény maximális távolságát. A különböző szelvevények eredményeinek összevetetősége érdekében kiemelten fontos volt, hogy a telepített szelvevények geometriája és az alkalmazott mérési eljárás minden esetben közel azonos legyen.

Az AECL szakértői a kísérletek kezdeti szakaszában elfogadhatónak tartották volna, ha csak négy radiális irány kerül telepítésre, de optimálisnak a 6 irányt tartották. Az 1.3. fejezetben kifejtett okok miatt ugyancsak fontos követelmény volt, hogy a kialakítandó mérőszelvevények csapjai (különösen a talpi csapok) megfelelő mechanikai védelem mellett kerüljenek telepítésre.

Annak érdekében, hogy a konvergenciamérések eredményei alapján megvalósíthatóvá váljon a primer feszültségkomponensek közelítő visszszámítása, a méréseknek az ideálisan rugalmas állapotú közetzónát kellett érinteniük. Ezt megfelelően hosszú mérőcsapok telepítésével kellett elérni. A BAF mechanikai viszonyai és a várható konvergenciaértékek előzetes becslése alapján C.D. Martin fontosnak tartotta, hogy az alkalmazásra kerülő mérőeszköz összesített (visszaépítési és mérési) hibája ne haladja meg a 0,1 mm-es értéket.

Hasonló előzmények híján 1994-ben Magyarországon nem állt rendelkezésre olyan mérőeszköz és mérési technika, amivel a fenti követelmények teljesíthetők lettek volna. Különösen a megkívánt minimális mérési pontosság okozott sok gondot. Ennek elérése a szokásos deformációmérési technikák alkalmazásával általában nem probléma, itt azonban a mérőeszközt a jövesztő robbantások előtt értelemszerűen ki, majd a méréshez irányonként vissza kell építeni. Így a visszaállítás elérhető pontossága döntően befolyásolja a mérési eljárás hibáját. A külföldi gyártók e célból fejlesztett húzott invarszalagos konvergenciamérő rendszerei (tape extensometer) közül a legjobbak ugyan – legalábbis névlegesen – éppen képesek voltak e követelmény teljesítésére, viszont a katalógusok kiemelték, hogy ezt a limitet csak nagy gyakorlattal rendelkező mérési személyzet esetén lehet garantálni. Az invarszalagos rendszerek esetében ugyanis a visszaállítás során a lehetséges csatolási pontatlanságok mellett a szalagon alkalmazott, elvileg állandó szinten tartandó húzóerő mérésének illetve beállításá-

nak nehézségei is fellépnek. Az ilyen műszerrel elérhető pontossági szint tökéletesen megfelelő az olyan esetekben, amikor a mérhető maximális konvergenciaérték több 10 mm. Még a francia ANDRA Bure-i URL-ében végzett, általában 50-100 mm-es maximális értéket adó mérések (Wilewau et al. 2006) adatsoraiban is felfedezhetők azok az egyenetlenségek, amik – a földtani környezet ismeretében – egyértelműen jelentősebb visszaállási hibákra utalnak. Ennél nagyságrendileg alacsonyabb elmozdulások esetében viszont húzott szalagos mérőrendszerrel nagyon nehezen rajzolódna ki a szabályos lefutású konvergenciagörbék.

## 2.2 A nyomott rudas konvergenciamérő műszer és a mérési módszer elemei

Az első lépésben tehát ki kellett fejleszteni egy olyan speciális mérőberendezést, illetve egy olyan komplex beépítési és mérési technológiát, amellyel megvalósíthatóvá váltak a tervezett konvergenciamérések. A konstrukciós terveket, a komplex beépítési és mérési technológiát 1994-ben jelen cikk szerzői dolgozták ki. Az előzetes tervek alapján a berendezés, a mérőcsapok és egyéb kellek gépészeti tervezési és gyártási munkálatait a BOMIX Kft. végezte el.

Annak érdekében, hogy a húzóerőmérés ismertett problémáit ki lehessen küszöbölni, a kifejlesztett konvergenciamérő szerkezet nyomott rudas elven működik. Laboratóriumi ellenőrző mérésekkel sikerült igazolni, hogy a rugós rendszerrel előfeszített rúdszerkezet maximális deformációja a teljes rugóerő-tartományon belül jóval a 0,001 mm/m érték alatt marad, így ez gyakorlatilag nem befolyásolja a mérés pontosságát. A rendszer önbeálló csatolási pontokkal működik, ami azt jelenti, hogy a gömbfelületű csapok és a negatív kúpos kiképzésű csapvégek automatikusan kerülnek vissza mindig azonos pozícióba. A megfelelő visszaépítési pontosságot emellett a műszer harmadik felfüggesztési pontjához csatolt 0,01 mm pontosságú analóg, ún. kihajlasmérő óra alkalmazásával sikerült elérni.

Az elkészült berendezéssel laboratóriumi hitelesítő méréssorozat készült, ahol függőlegesen, illetve vízszintesen szerelt csapokon, fix helyzetben, valamint speciális, pontosan mérhető "konvergenciát" létrehozó adapter közbeiktatásával teszteltük a műszert. Az a 2,8 m-es feszítávokon igen jól vizsgázott: A berendezéssel minden esetben 0,01-0,02 mm visszaállási és mérési pontosságot lehetett elérni, ami jóval a limitként megadott 0,1 mm pontossági érték alatt maradt (Kovács, 1999).

A mérhető konvergenciaértékek hőmérsékletfüggése jelentős, így minden esetben szükséges a nyers mérések hőmérsékleti korrekciója (a tapasztalatok szerint 7,0 méteres feszítávolság esetén a műszer 1,0°C hőmérsékletnövekedése már megközelítően 0,1 mm-es „hőmérsékleti konvergenciatöbbletet” eredményez). Mivel a műszer vegyes anyagokból készült, egyes alkatrészei pedig olyan ötvözetekből, amelyek lineáris hőtágulási együtthatója műszaki táblázatokban nem található meg, ezért valamennyi terepi mérési program megkezdése előtt, ugyancsak laboratóriumban, kontrollált és szabályozható hőmérsékleti térben hőmérsékleti kalibrációs méréssorozatokat is végeztünk.

A hitelesítő mérések tapasztalatainak felhasználásával elkészítettünk egy ellenőrzési listát, ami alapján a későbbiekben a telepítési és a mérési munkálatok valamennyi fázisát végeztük.

A BAF URL-ben telepített konvergenciamérő szelvények minden esetben 6-6 mérési irányt tartalmaztak. A mérési szelvények telepítése így 12 db, 30°-onként egyenletesen kiosztott, radiális irányban mélyített fúróluk kialakításával kezdődött. Erre a célra egy merev állványra szerelt forgózsámolyos, lafettával kombinált, a diszkrét fúrési irányok beállítására szolgáló célberendezés szolgált. Ennek segítségével egyrészt lehetővé vált a pontos beépítési geometria kialakítása és a vājvéghez közelebb történő telepítés, másrészt pedig ezzel jelentősen csökkent a telepítés időszükséglete is. A rugalmas deformációk tartományában való maradás követelménye miatt – a nemzetközi gyakorlattól némiképp eltérő módon – a mérőcsapokat a vágat kerületi pontjain 1,2 m, míg a talppontokon 1,8 m mélységű fúrólukakba ültettük. A csapok konstrukciós megoldása kizárólag a radiális értelmű elmozdulásokat engedi meg. A rögzítés pontragasztásos kivitelben (a csapok utolsó 30 cm-ében), kétkomponensű ragasztóanyaggal történt. Mivel a BAF URL-ben a jövesztett készlet rakodására és szállítására vasúti síneken közlekedő berendezések szolgáltak, ezért a sínkoronaszint alá süllyesztett talpi csapok védelme csak egy-egy acélcső beépítését igényelte; robusztusabb védőgát (pl. betonozás) kialakítására itt nem volt szükség. A kerületi csapok a kőzetfalba süllyesztett kivitelben készültek, kiegészítő mechanikai védelmükről műanyag védőkupakkokkal gondoskodtunk.

Az egyes mérési irányok installálása a véglegesített, egyazon irányhoz tartozó mérőcsapok azonosításával és távolságuk meghatározásával kezdődött. Ezután előzetes jelleggel összeszereltük és az adott irány azonosító jelével láttuk el az egyes irányok toldórudazatait. Ezek véglegesítéséhez már az összeszerelt mérőműszert is alkalmazni kellett. A toldórudazatokat oly módon állítottuk be és véglegesítettük, hogy azokkal a méréssorozat végéig biztosan belül maradjunk a műszer méréshatárán. A véglegesített toldórudazatok ezt követően egészen a méréssorozat teljes befejezéséig az adott szelvény adott irányához tartoznak; azokat módosítani vagy szétszerelni nem volt szabad. Az installálást követően, de még mindig az ún. induló vājvégnél (tehát az első robbantást megelőzően) a véglegesített

toldórudakkal elvégeztük az irányonkénti alpméréseket (ld. a 3. ábrán). Az alpmérések során kellett meghatározni az adott irány azon kiinduló paramétereit, amelyekhez a későbbiek során a változásokat (elmozdulás és hőmérsékletváltozás) viszonyítani kellett, valamint ekkor kerültek rögzítésre az egyes irányok teljes mérési sorozatban állandóan alkalmazandó kihajlási értékei is.



**3. ábra.** Konvergenciamérés kivitelezése a BAF URL 10 m<sup>2</sup>-es vágatszelvényében (fent)



**4. ábra.** Konvergenciamérés kivitelezése Bátaapátiban, 33 m<sup>2</sup>-es vágatszelvényben (jobbra)

Kontinuummechanikai megközelítés szerint ahhoz, hogy a jövesztések hatására megváltozott feszültségállapotú kőzetköpeny deformációinak alakulását meg lehessen határozni, az induló vājvéghez képest legalább két vágatátmérőnyi előrehaladás során, valamennyi jövesztési fázist követően kell ismétlőmérésekkel észlelni a fellépő konvergenciát. Ez mind a BAF URL, mind pedig Bátaapáti viszonyai között azt jelentette, hogy az installálás után a következő 5-6 fogásban végeztünk ismétlőméréseket, a mindenkor vājvégtávolság rögzítésével. Mivel a BAF URL harmadik szelvényében, az ismétlőmérések befejezése után mintegy másfél hónappal elvégzett ellenőrző mérés jelentős mértékű utólagos konvergenciára utalt, ezért szükségessé vált a mérési folyamat időbeli kiterjesztése is. A valamennyi irányra kiterjedő utólagos (reológiai) mérések gyakoriságát – az elsősorban a kőzetköpeny intenzív kihülési folyamatai által indukált – kőzetmozgási folyamatok időbeli alakulása alapján határoztuk meg. Így a későbbiekben átlagosan egy-másfél havonta került sor a telepített szelvények ellenőrző méréseire; egészen a teljes stabilizáció eléréséig. Az alpméréseket, az ismétlő- illetve reológiai méréseket értelemszerűen ugyanazzal a mérési módszertannal kell végrehajtani.



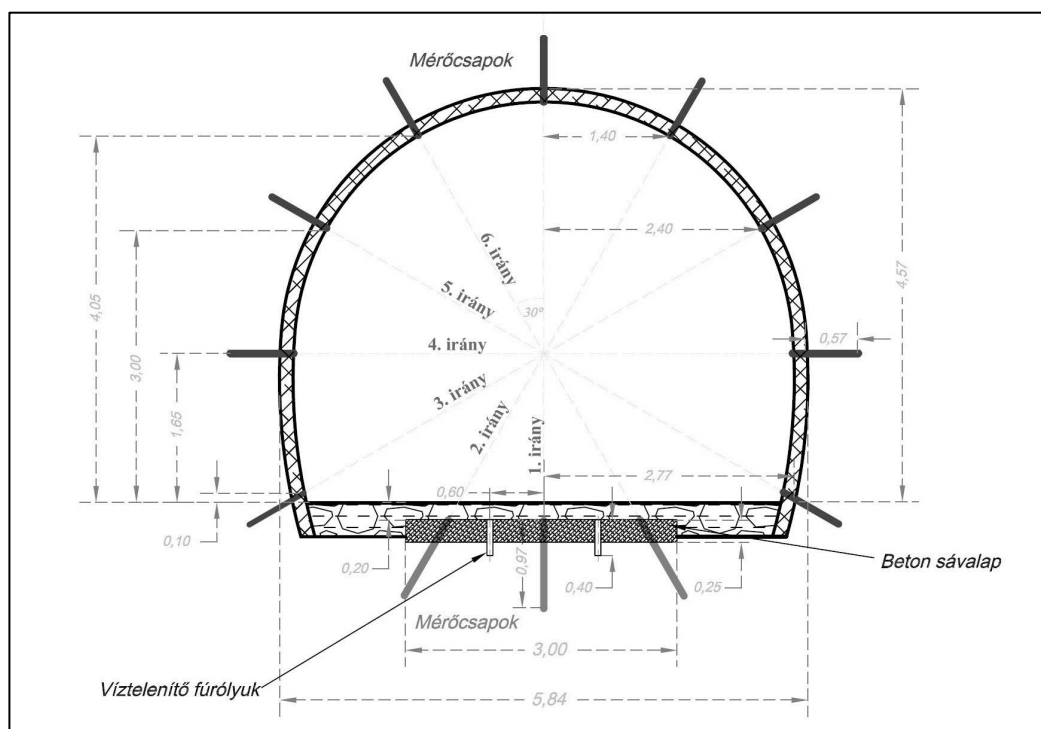
**5. ábra.** A továbbfejlesztett műszer szétszerelt állapotban

A Bátaapáti térségrendszer jelentősen nagyobb (21 és 33 m<sup>2</sup> közötti – ld. a 4. ábrán) szelvényméretei és az eltérő kivitelezési körülmények (pl. a lejtőszakna-geometria, az önjáró szállítási és rakodási technika valamint az általánosan alkalmazott löttbeton biztosítás) szükségessé tették mind a műszerkonstrukció, mind pedig a szelvénytelepítési technológia kisebb módosítását.

A műszeren elvégzett módosítások elsősorban a műszer mérésének fokozását célozták, de ezzel egyidejűleg más, a mérések megbízhatóságának további javítását szolgáló fejlesztésekre is sor került. Míg az eredeti konstrukcióban a konvergenciaértékek leolvasására egy analóg elmozdulásmérő óra szolgált, addig a továbbfejlesztett műszeren ezt kiegészítettük egy szintén 0,01 mm felbontású digitális mérőlécclal is; mégpedig úgy, hogy a digitális és az analóg órán egyidejűleg egymástól független leolvasások történhetnek. Ily módon az esetleges durva leolvasási hibák azonnal felszínre kerülnek. A továbbfejlesztett konstrukcióban a mérőműszerek robusztus kivitelű, ütészálló védőkeretet is kaptak (5. ábra). Tekintettel a nyomott rudas kivitelre és a nagy mérendő feszítávolságokra, a műszer alapegysége összeszerelt állapotban már nem volt szállítható. Ezért gondoskodtunk arról is, hogy az egyes műszeregységek ismételt szét- illetve összeszerelése ne eredményezze a visszaépítési hiba megnövekedését. Az al-

kalmazott megoldás azt eredményezte, hogy ezen okból a teljes méréssorozatban 0,01 mm-t nem meghaladó mértékű hiba jelentkezik. A szétszerelt műszer egységeinek szállításához egy új, e célra tervezett, ütészálló kivitelű, zárható hordládát gyártattunk, amely még a bányabeli körülmények között is megfelelő védelmet biztosít a műszer számára mind a mechanikai igénybevételek, mind pedig a por és a víz ellen (ld. az 5. ábrán).

Mivel az önjáró rakodó és szállítóberendezések rakodási szintjét ezúttal nem limitálta a vasúti sín, ezért a telepítési technológia kapcsán a legnagyobb változást a talpi csapok védelme tette szükségessé. A 6. ábrán bemutatott telepítési terv szerint ezért a talpi csapokat egy, a végleges járószint alatt kialakított beton sávalapba kellett beépíteni. Annak érdekében, hogy a beton sávalap lehetőleg ne korlátozza a fellépő elmozdulásokat, ezért ezt vasalás nélkül és három, egymástól elválasztott szegmensben kellett kialakítani. Kiegészítő biztosításként a betonfelületre terített, de ahhoz nem rögzített kazánlemez alkalmaztunk. A csapok fellelhetőségét – különösen a 6° dőléssel kialakított lejtősaknaszakaszokon – víztelenítő fúrások mélyítésével biztosítottuk.



**6. ábra.** A konvergenciamérő szelvények Bátaapátiban, 21 m<sup>2</sup> szelvényterületű vágatszakszok esetén alkalmazott telepítési terve

Amint az a 6. ábrán is látható, a kisebb felszín alatti mélységgel és az itt megvalósítandó mérések elsődleges céljával, az EDZ minősítésével összhangban Bátaapátiban már nem törekedtünk a nagyobb mélységű mérésekre. Itt a terület mentén 0,5 m-es, míg a robbantásokkal erősen fellazított talpban 0,9 m-es csaphosszat alkalmaztunk. (A rögzítési hossz ebben az esetben is 30 dm volt.)

A mérőcsapok telepítéséhez szükséges fúrólyukak mélyítése Bátaapátiban a lejtősaknák kihajtása során rendszeresített fúrókocsikkal történt. A mérőszelvény pontos geometriáját helyszíni geodéziai irányítással kellett biztosítani. A nagyobb szelvény miatt a mérések kizárólag emelőkosaras berendezések alkalmazásával folyhattak (4. ábra).

Csakúgy, mint a BAF URL esetében, alapértelmezésben Bátaapátiban is minden jövesztő robbantás után egy irányban háromszor építettük be, illetve ki a mérőműszert, és végeztük el a leolvasásokat. Előzetesen azt a szabályt rögzítettük, hogy amennyiben az első három beépítés és mérés során leolvasott értékek eltérése nagyobbak bizonyulna 0,04 mm-nél, vagy ha a mérést végzők bármilyen rendellenességet észlelnének, úgy további mérésekre is sor kerül. (A jegyzőkönyv összesen 5. ilyen mérésorozat rögzítésére adott lehetőséget, de természetesen szükség esetén ez a folyamat tovább is folytatható lett volna. A gyakorlatban ilyenre azonban nem került sor.) Mivel minden beépítés során a digitális mérőléc és az analóg kontrollóra leolvasása két független mérésként adódott, mindez azt jelenti, hogy egy-egy jövesztő robbantás után irányonként legalább hat, legfeljebb tíz független mérésből határoztuk meg a fellépő konvergenciát. A teljes adatrendszer ismeretében egyértelműen kijelenthető, hogy a méréssorozatban a visszaépítési és mérési hiba valamennyi mért szelvényben 0,02 és 0,03 mm között alakult. Az elvégzett konstrukciós módosítások tehát azt eredményezték, hogy a mérési



szelvény telepíthetőnek és megvédhetőnek, míg a mérőrendszer akár 8 méteres feszítávolság mellett is stabilnak bizonyult.

A Bátaapátiban mérési program 5-6 hónapos időtávon szintén tartalmazott reológiai mérések is. Mivel ebben az esetben a kőzetköpeny hőmérsékletváltozása lényegesen alacsonyabb szintű volt, mint a BAF-ban, ezért itt a reológiai mérések elsődleges célja annak vizsgálata volt, hogy a szelvény környezetében a kőzetköpeny és a biztosítószerkezet stabilizálódása megfelelő mértékű-e, vagy pedig esetleg szükség van-e kiegészítő biztosítószerkezetek alkalmazására.

### 2.3 Az eredmények feldolgozása és megjelenítése

A mérési eredmények feldolgozására saját fejlesztésű, automatizált működésű táblázat- és diagramrendszer szolgál. A feldolgozás során – a jegyzőkönyvekben hibásnak minősített adatok kiszűrése után – az irányonként mért kumulált értékek számítására kerül sor. A konvergencia aktuális értékeként a két műszeren irányonként mért 6-10 db leolvasások középértékeit fogadjuk el, és a kumulált értékek számításához ezeket az alapmérés során kapott értékekhez viszonyítjuk. Ezt követően minden irányra vonatkozólag elvégezzük a mért adatok hőmérsékleti korrekcióját.

Minden szelvény esetében elkészítjük az ismétlőmérések alapján felvett konvergenciaértékek alakulását bemutató grafikonokat a telepített szelvény és az aktuális vājvég távolságának függvényében (ld. pl. a 7., 11. és 12. ábrákon). Az ismétlőmérések időszakában nem lenne informatív a számított konvergenciaértékek idősor jellegű ábrázolása, de a teljes, 5-8 hónapos megfigyelési időszakra vonatkoztatva ez az értelmezéshez már jelentős segítség (8. illetve 13. és 14. ábrák).

Ezen kívül szelvényenként megszerkesztjük a konvergenciamérő szelvények síkbeli deformációs állapotát megjelenítő ún. pókháló-diagramokat is (15. ábra). Ezeket azzal a közelítő feltételezéssel élünk, hogy az egy irányhoz tartozó konvergencia-értéket az átellenben elhelyezett két mérőcsap azonos mértékű radiális elmozdulása hozza létre. Amint azt konvergenciamérésekkel párhuzamosan végzett extenzométeres mérések igazolták, ez nem feltétlenül igaz, azonban ez az ábrázolásmód mégis alkalmas részben az összehasonlító elemzésre, részben pedig az anomális értékeket eredményező irányok kiszűrésére.

## 3 A MEGVALÓSÍTOTT MÉRÉSI PROGRAMOK ÉS AZOK LEGFONTOSABB EREDMÉNYEI

Helyhiány miatt a mérési eredmények részletes ismertetésétől eltekintünk; az alábbiakban csak a legfontosabb összefoglaló megállapításokat közöljük.

### 3.1 A BAF URL-ben végzett mérési program eredményei

A 2.2. pontban ismertetett módszerrel a BAF URL-ben 1994 és 1999 között összesen 12 db (K1-K12 jelű), különböző geotechnikai állapotú térrészekbe telepített szelvényben sikerült megvalósítani a konvergenciaméréseket. A közel azonos vágatszélvény (jelentősebb szelvénytorzulások csak a tektonikus zónában telepített K10 és K11 mérőhelyeken láthatók), illetve az azonos telepítési geometria lehetőségét adott az egyes mérési elrendezésekben mért radiális elmozdulásmező alakulásának közvetlen összehasonlítására.

Az öt robbantás után végzett alap-méréssorozatok befejezését követően a mért maximális konvergencia értéke általában a 2,5-4,0 mm-es tartományba esett. Ez alól csak a tektonikus zónában telepített szelvények képeztek kivételt, ahol a szokásos értékek többszörösét lehetett mérni. Mindössze néhány-szor volt tapasztalható, hogy egyes irányok anomálishan magas, vagy alacsony értéket adtak (anomálishan azt tekintjük, amely nem illeszkedik a többi konvergencia-érték által kijelölt szabályos síkidom – ellipszis, vagy lemniszkáta – kerületi pontjaira. Az ilyen jelenségek minden esetben lokális üledékföldtani, vagy mikrotektonikai jelenségekkel (pl. vetőbreccsa, karbonátos kitöltésű litoklázisrendszerek, stb.) függték össze. Ez a leginkább egyértelműen a K11 szelvény esetében volt megfigyelhető, ahol a tektonikusan szabdaltnál térrészben kijelölhető legfontosabb elmozdulási síkok és a szelvény kiugró értékeket adó irányai estek egybe. A két anomális irány elhagyásával a többiből még ez utóbbi esetben is szinte tökéletes állóellipszis volt szerkeszthető, ami a rendkívül zavart földtani szituáció mellett igen meglepő volt.

A szelvény menti eloszlás tekintetében két fő csoportot lehet megkülönböztetni:

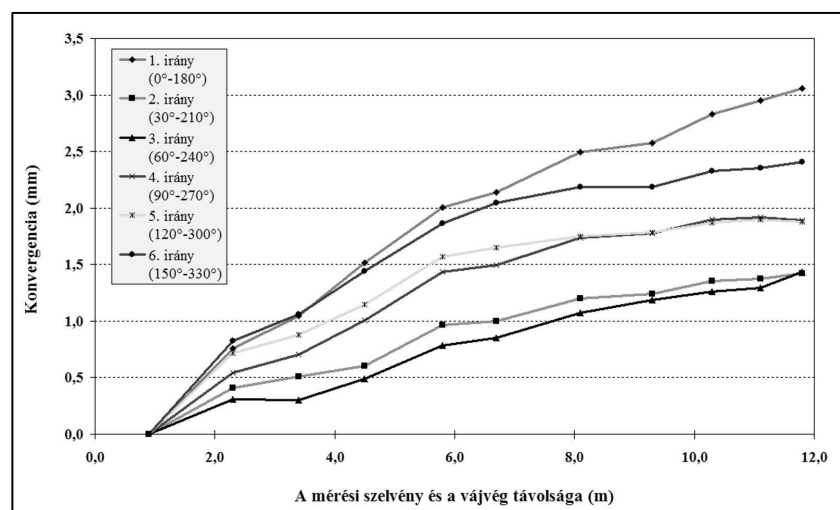
- Az első csoporthoz tartozó szelvények esetében a maximális elmozdulások a függőleges síkhoz közel esnek. (Ehhez a gyakoribb, más mérési eredmények alapján is tipikusnak tekinthető képhez a következő szelvények tartoznak: K1, K2, K4, K5, K7, K8, K11 és K12.)

- A másik csoport esetében a legnagyobb konvergencia érték a vízszintes síkkal kis szöget zár be. Valamennyi, az előbb nem említett szelvény besorolható ebbe a csoportba.

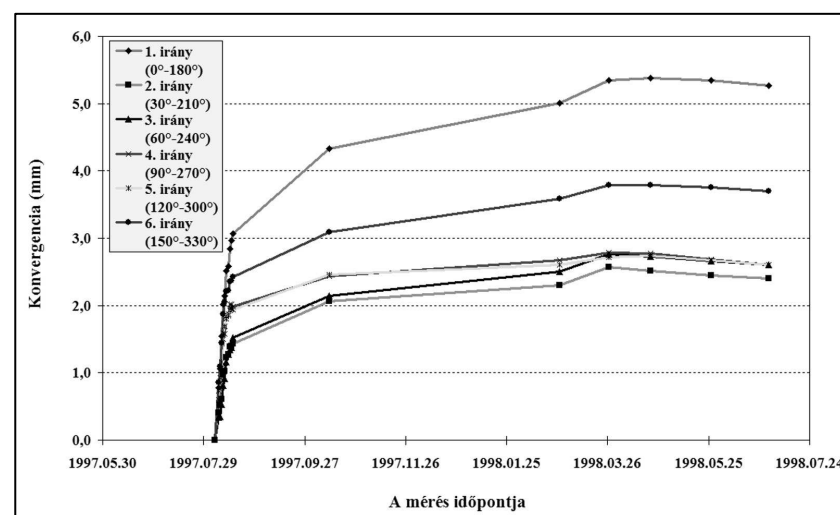
A később ismertetésre kerülő numerikus elemzések is azt bizonyították, hogy a jelenség okát nem a feszültségtér nagy mértékű változékonyságában, hanem szintén a kőzettömb szerkezeti inhomogenitásaiban kell keresni.

A mérések szerint szoros összefüggés van a mérhető maximális konvergenciaértékek és a telepített szelvény helyén uralkodó geotechnikai viszonyok között. Minthogy azonban a BAF URL-ben szisztematikai geotechnikai vágatdokumentálás nem folyt, e kapcsolatot számszerűen nem sikerült meghatározni.

A mérési szelvények túlnyomó többsége közel azonos orientációjú, a rétegdőlés irányában kihajtott vágatszakszakokon került telepítésre. E szelvények esetében az első öt robbantást követően felvett ismétlőmérések adatai a konvergencia-értékek aszimptotikusan beálló, stabilizálódó jellegére utalnak. (Ez még annak ellenére is megállapítható, hogy – amint azt már jeleztük – az intenzív kőzetköpeny-kihülésből fakadó termikus deformációk szuperponálódnak a mechanikai hatásokra.) Ezzel szemben a csapásirányú vágatszakszakokon telepített K2 és K8 szelvény alpmérései esetében – a nagyobb vájvtávolság és a hosszabb mérési időintervallum ellenére is – az egyes irányokhoz tartozó kon-



7. ábra. A konvergenciaértékek alakulása a BAF URL K8 jelű konvergenciamérő szelvényében az első tíz robbantás után



8. ábra. A konvergenciaértékek alakulása a K8 jelű szelvényben a teljes megfigyelési időszakban (a teljes stabilizálódásig)

kus mérőrendszerek adataival, így valószínűsíthetővé vált, hogy a jelentős mértékű utókonvergencia elsősorban termikus hatások eredményeképpen lépett fel.

Az első két szelvény eredményeit vizsgáló Martin 1994 dokumentum illetve a későbbi tapasztalatok szerint az eredmények zárt matematikai formulával történő értékelése számos bizonytalansággal terhelt: A szelvényalak nem ideális; az alkalmazott biztosítási rendszer – a kőzethorgonyzás – jelentősen

konvergencia-értékek további növekedésre utaló jellege figyelhető meg (7. ábra). Feltételezhető, hogy ezt a vágattengely és a rétegek csapásának szinte azonos orientációja okozta. Ugyanilyen orientációban közvetlen tapasztalati adatot szereztünk arról, hogy a K7 szelvénytől 8 méter távolságban, csapásirányban álló vájvtávolságban még akkor is 25-35 % konvergencia-növekményt okozott, amikor az utókonvergencia már teljesen lecsengett.

A reológiai mérések minden szelvény esetében azt igazolták, hogy a kőzetköpenyben jelentős utókonvergencia játszódik le, amelynek mértéke az alpméréssorozatban kapott konvergencia-értékek nagyságrendjébe esik. A tapasztalatok szerint mintegy 6-8 hónapig folytatott ismételt méréssel az utólagos konvergencia alakulása jól leképezhető; ezután mindenhol (még a tektonikus zónában is!) bekövetkezik a teljes stabilizáció (ld. a 8. ábrán). Az említett időrend kiváló egyezést mutatott a vágatköpeny kihülésének folyamatának meghatározására telepített termi-

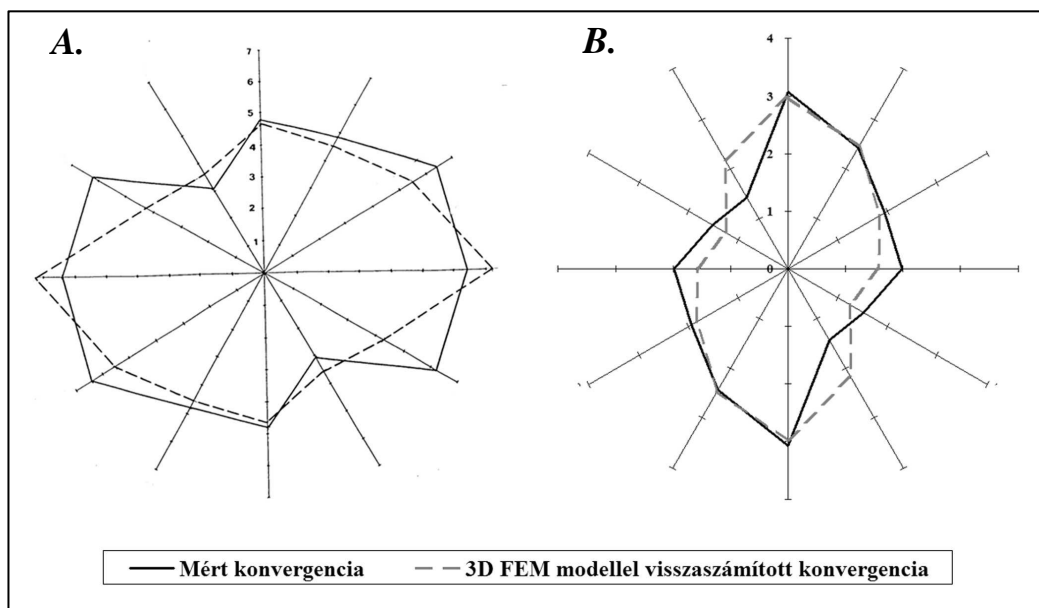
gátolja a bekövetkező radiális elmozdulásokat; az irányonként mért értéket meghatározó két szemközti csap elmozdulása jelentősen eltérhet, stb. Éppen ezért a mérési eredmények értelmezéséhez elengedhetetlenné vált a fejlett numerikus módszerek alkalmazása. Ezeket a vizsgálatokat a prágai székhelyű Dolexpert végezte el (Doležalová et al. 1998). Ennek első lépéseként a K3 szelvény modellezése történt meg, majd pedig az ún. Komplex Műszerezettségű Szelvény (KMSZ) részeként, más kőzetmechanikai mérőrendszerekkel kombináltan telepített K8 szelvény adatai is bevonásra kerültek. Az értékelés során figyelembe vették az URL egészére, valamint a kiválasztott szelvény környezetére vonatkozó földtani adatokat, továbbá a teljes geometriai, hőmérsékleti, mozgási adatsorokat illetve az egyéb kapcsolódó információkat is (pl. robbantási adatok).

A K3 esetében a 3D-s mechanikai feladat megoldása az alábbi lépésekben történt:

- 2D-s UDEC (Universal Distinct Element Code) paramétertanulmány a repedezettség hatásának ellenőrzésére. Ennek eredményeként visszaszámították az ép kőzetek valamint a mértékadó repedésrendszerek mértékadó mechanikai paramétereit.
- 2D-s FEM (Finite Element Method) analízis a kőzetmasszívum átlagos anyagi jellemzőinek meghatározására. Az öt független alakváltozási paraméterrel jellemzett transzverzálisan izotróp rugalmas-képlékeny anyagmodell alkalmazásával felépített modell a 3D-s FEM modell előkészítésére szolgált.
- Az in situ konvergenciamérés 3D-s FEM modellezése fokozatos közelítéssel, a vājvégállások és a mérések időrendjének figyelembevételével.

A modellezésből kapott fontosabb megállapítások az alábbiak:

- Az UDEC diszkontinuum modell a 3. irány kivételével igen jó egyezést mutat a K3 konvergenciamérés eredményeivel. A modellben alkalmazott két fő diszkontinuitásrendszerrel a domináló vízszintes konvergencia pontosan előállítható volt. Az eredmények alapján megadták az elmozdulásmezőt, a keletkezett új repedések geometriáját, valamint a főfeszültségek eloszlását.
- A FEM kontinuum modell által számított és a mért konvergencia illeszkedése szintén megfelelőnek tekinthető, a fent említett 3. irány kivételével (9/A. ábra). A 3. irányhoz tartozó értéket ebben az esetben a transzverzális izotrópia sík forgatásával finomítani lehetett.



**9. ábra.** A mért és a 3D FEM modellel visszaszámított konvergencia-eloszlások összehasonlítása (A.: K3 szelvény; B.: K8 szelvény)

- A mért minimális konvergencia a diszkontinuum modellel jobban modellezhetőnek bizonyult.
- A numerikus vizsgálatok azt mutatták, hogy a vágat körüli kőzetköpeny csak 0,5-0,8 m-es mélységig jut határállapotba, tehát az alkalmazott közethorgonyok (1,5 m) és a mérőcsapok hossza (1,2 és 1,8 m) megfelelő volt.
- Az irányonként külön-külön elvégzett számítások egyöntetűen azt igazolták, hogy a nem mérhető előkonvergencia mértéke 40%, míg a fennmaradó 60 %-on kb. egyenlő arányban osztozik a vājvég előrehaladása által okozott (a robbantások kapcsán mért) konvergencia és a mintegy fél éves időszak alatt, reológiai okokból kialakuló utókonvergencia.

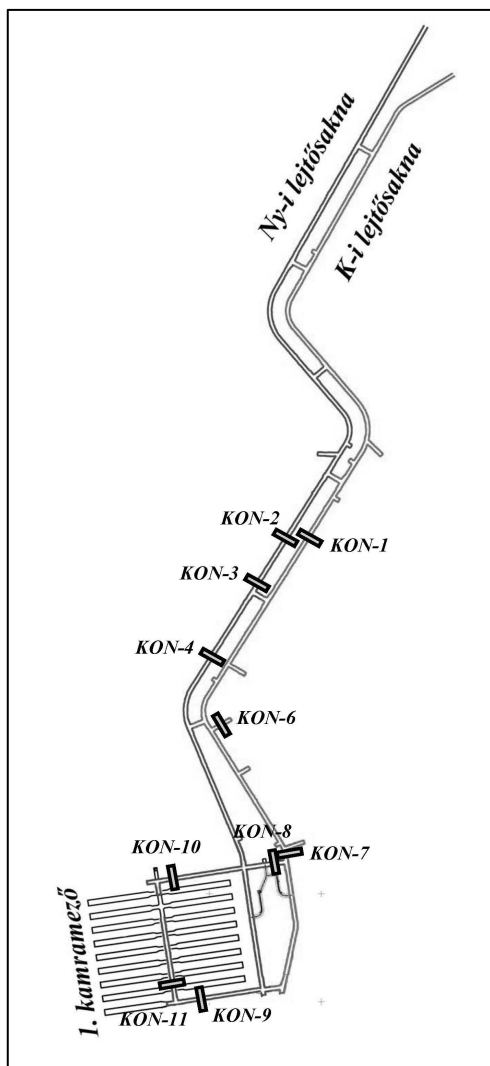
- A Mohr-Coulomb törésméletre alapozott modellszámítások segítségével megállapítható volt, hogy a nyírószilárdság kihasználtsági foka az egész vágat körül viszonylag magas ( $s_1 = 0,7-0,9$ ). A termikus hatások mellett ez lehet a másik oka a mért, intenzívnek tekinthető utókonvergenciának. A modellezés szerint a vágatszakasznak talpának széles zónájában és elsősorban a K-i oldal kisebb felületén (hozzávetőleg 0,2-0,4 m mélységig) a rugalmas tartományt meghaladó mértékű alakváltozás lehetséges. (Ez szintén megegyezik a helyszíni tapasztalatokkal.)

A K8 konvergenciamérő szelvény elemzése még komplexebb módon történt. Ez a munka a KMSZ részét képező egyéb mérőrendszerek (EXT-1...-6 extenzométerek, SC-1...-6 CSIRO HI-cellák valamint a HG-2 és HG-3 fúrásba installált multipakker-rendszerek) modellezését is magában foglalta. Mivel a feladat célja a mérési eredményekhez illeszkedő háromdimenziós szekunder feszültségterek, hidraulikus potenciálterek meghatározásán túl a BAF-anyagmodell és az ahhoz tartozó mechanikai és hidraulikai paraméterek pontosítása volt, ezért a modellezés fokozatos közelítéssel, a vājvégelőrehaladás figyelembe vételével, kapcsolt 3D-s FEM mechanikai-hidraulikai feladattal történt. Így ezúttal egy Biot-féle konszolidációs feladatot kellett megoldani, azaz a deformáció és a pórusvíznyomás alakulását kellett kiszámítani rugalmas-képlékeny, telített közegben. A munka első lépésében paramétertanulmányokkal tisztázták, hogy egyes kritikus paraméterek milyen értéke, vagy értéktartománya mellett kerülnek egymáshoz közel a mérési eredmények. A paramétertanulmányok alapján kiválasztott értékekkel részletes modellezéseket végeztek, ahol hét terhelési lépcsőben, három különféle változatban végezték el. Az eredmények az alábbiakban összegezhetők:

- A K8 szelvény modellezésére vonatkozó eredmények megerősítették a korábban kialakított módszertan és a kapott eredmények helyességét.
- A vājvégelőrehaladás függvényében számított konvergencia-értékek alapján az mondható el, hogy a modellezett konszolidációs folyamat eleinte gyorsabb, aztán fokozatosan összhangba kerül a mérésekkel. Ebből és a paramétertanulmányokból azt a következtetést vonták le, hogy a réteglapmenti és arra merőleges szivárgási tényező aránya nagy hatással van a konvergencia-értékek nagyságára és a maximális konvergencia irányára is. A méréshez akkor közelítünk jobban, ha a réteglapra merőleges szivárgási tényezőt fél nagyságrenddel magasabbra választjuk, mint a réteglap mentit. Ez az eredmény alapvetően eltért a korábbi feltételezésektől.
- A megfelelően megválasztott paraméterek mellett számított és a mért értékek – a 2. irány kivételével – igen jó egyezést mutatnak a K8 szelvényben (9/B. ábra). Az viszont, hogy a második szelvény esetében is „kilóg” egy irány, nagy valószínűséggel azt jelenti, hogy az alkalmazott anyagmodell további finomítására kell törekedni. Olyan anyagmodellt kell találni, amely pontosabban figyelembe veszi a repedésrendszerek számát és irányát.
- Az in situ potenciáltér változása csak mérsékelt hatással volt a számított konvergenciára (80% víznyomáscsökkenés mindössze 10 % konvergencia növekedést okozott).
- A vizsgálat szerint rétegirányban a BAF deformációs modulusa 31 GPa-ra tehető, arra merőlegesen pedig 12,5 GPa. A nyírószilárdság a rétegződés mentén  $42^\circ$ -os súrlódási szöggel és 8 MPa kohézióval, arra merőlegesen hasonló súrlódási szöggel és 17,5 MPa kohézióval jellemezhető. Az ehhez tartozó szivárgási tényező a vágat által zavart zónában 10-8 m/sec és a vágathajtás okozta szivárgás vízhozama 0,021-0,095 l/sec.
- A feladat nem teljesen egyértelmű, mert a mechanikai és a hidraulikai paraméterek többféle kombinációjával is jó illeszkedést lehetett elérni. Ezt a bizonytalanságot a továbbiakban több és célirányosabban tervezett mérés eredményeivel kell megszüntetni.
- Az előzetes számítások eredményeképpen számítható volt a vágathajtás okozta szekunder feszültség- és potenciáltér, valamint az elmozdulásmező is.

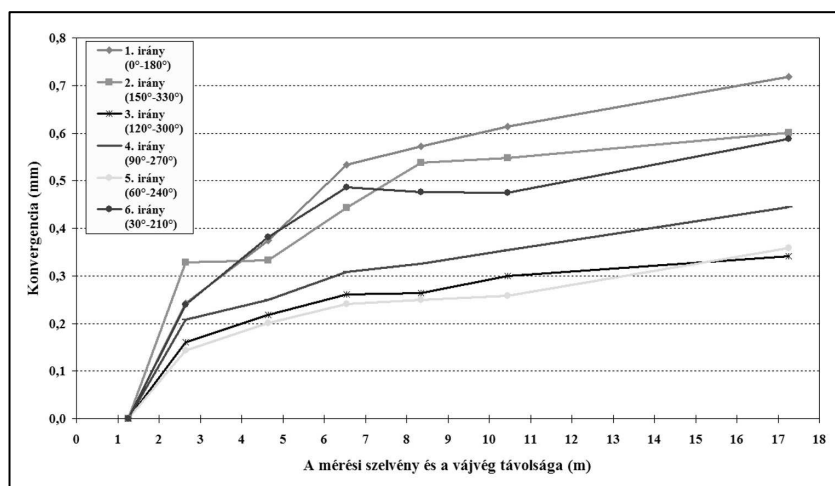
Mindezek alapján megállapítható, hogy a konvergenciamérések és a numerikus modellek együttes alkalmazása közetminősítésre maradéktalanul használható, hatékony módszernek bizonyult. Az elvégzett numerikus modellezési és értékelési folyamat az eredeti elvárásokhoz viszonyítva egy nagyságrenddel növelte a mérésekből levonható következtetések számát és megbízhatóságát is. Ennek ellenére az is egyértelmű, hogy az eredményekből – például a további, az elemzésekbe még nem bevont szelvények modellezésével – számos fontos további információ lenne még kinyerhető.

## 3.2 A Bátaapátiban végzett mérési program eredményei



10. ábra. A Bátaapátiban eddig telepített konvergenciamérő szelvények

tése történt meg (ebből a KON-5 jelű a szelvény bányászati előkészítésének hiányosságai miatt megsérült és értékelhetetlenné vált). A beruházási program I. és II. ütemének keretében további 6 konvergenciamérő szelvény telepítésére és mérésére került sor (ebből az utolsó, a KON-12 jelű szelvény mérése nem fejeződött be). Az eddig megvalósult 10 db értékelhető szelvény telepítési helyszíneit a 10. ábra mutatja be.

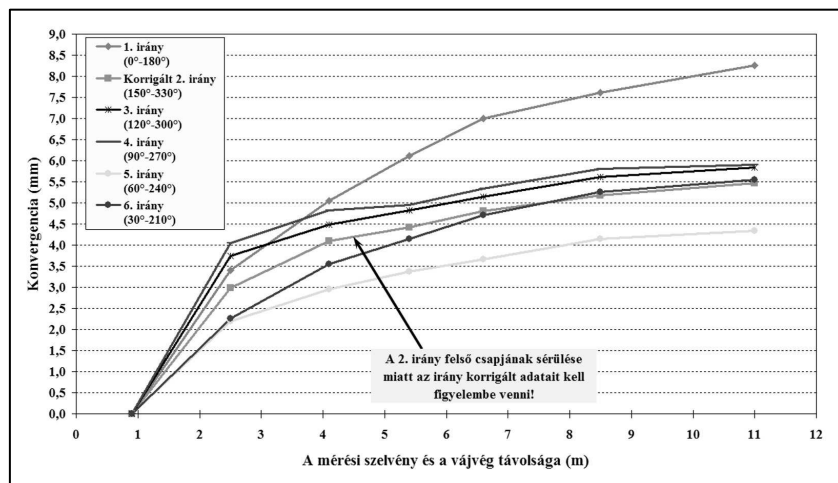


11. ábra: A KON-6 jelű szelvény ismétlőmérési során felvett konvergenciaértékek alakulása a vávjégtávolság függvényében

A Bátaapáti lejtősakna vágatrendszer kialakításának időszakában érvényes kutatási terv (Szűcs et al. 2004) a mechanikai konvergenciamérések kivitelezését egy szisztematikus telepítési program szerint irányozta elő: Mindkét lejtősaknában 250 m-enként tervezték telepíteni a konvergenciamérő szelvényeket. Ezt a mérési hálózatot az összekötő vágatok felezőpontjában kialakított, az anizotrópia értékelésére is alkalmas szelvényekkel kellett volna kiegészíteni. Ezek mellett az ún. KMSZ-kamrákban illetve a lejtősaknák olyan pontjain is tervezték konvergenciaméréseket, ahol az előfúrások adatai szerint a kőzetviszonyok jelentős romlására lehetett számítani. Ily módon az egyszerűen kivitelezhető, alacsony időigényű és költségű konvergenciamérésekből a felszín alatti kutatási fázisban minimálisan 25 db-ot kellett volna végrehajtani. A konvergenciamérések fentiekben ismertetett hátrányának ismeretében a kutatási terv 6 db konvergenciamérő szelvénytel egyidejűleg, azoktól legfeljebb 1,0 m távolságra sugaras extenzométeres szelvények telepítését is előírta. E logika szerint a lényegesen nagyobb időigénnyel és magasabb költséggel telepíthető extenzométeres szelvények – egyéb feladataik mellett – a nagyobb gyakorisággal végrehajtható konvergenciamérések kalibrálására is szolgálnak.

A tervezett program végrehajtása esetén egy olyan jelentős, statisztikusan is értékelhető adatmennyiség képződhetett volna, amellyel a Mórágyi Gránit feltárt képződményeinek in situ mechanikai (deformabilitási) viszonyait a számos ható tényező (pl. a felszíntől számított mélység, a különböző kőzettípusok, a tektonizáltság, a geotechnikai állapot, az orientáció, a szelvényméret és esetleg a szelvényalak) függvényében is megalapozottan lehetett volna értékelni. Sajnálatos módon a tervezettnél lényegesen alacsonyabb szelvényszám valósulhatott meg: A lejtősaknák kihajtásának időszakában mindössze 6 db konvergenciamérő szelvény (KON-1, ..., KON-6) telepí-

A ismétlőmérési időszakában felvett, a mindenkori vávjégtávolság függvényében ábrázolt konvergenciaértékek alakulására a 11. és 12. ábrákon bemutatott két példa a mérési program eddigi legkisebb illetve legnagyobb konvergenciaértékeit hivatott megjeleníteni. A további mérési szelvényekben e két szélsőérték közötti eredmények adódtak, általában szoros korrelációt mutatva a mérési szelvény környezetében tapasztalható geotechnikai viszonyokkal (részletesen ld. később). Ez



**12. ábra:** A KON-7 jelű szelvény ismétlőmérései során felvett konvergenciaértékek alakulása a vájvégtávolság függvényében

agyagos, vető-breccsás tektonikai öv és a szelvény kölcsönös helyzete a felelős. Mivel a rövid konvergenciamérő csapok teljes, 30 cm-es rögzítési hosszukban a törészóna NyDNy-i oldalán maradtak, így a KÉK-i oldalon végzett vágathajtás mechanikai hatását az alacsony deformabilitási modulusú törészóna – legalábbis részben – leárnyékolta. A többi konvergenciamérő szelvény esetében hasonló speciális tektonikai szituáció nem befolyásolta a mérési eredmények kialakulását.

A 11. és 12. ábrákon az is látható, hogy a konvergencia-értékek lefutása az irányok többségében teljesen szabályos, egyenletes. Ez a többi szelvény esetében is általában igaz volt. Ez azt jelzi, hogy a fellépő elmozdulásokhoz viszonyítva a méréssorozat felbontása igen jó, megbízhatósága magas szintű. Ez – az adatok egyértelmű értékelhetősége mellett – azért is hasznos, mert az ilyen, jó minőségű adatsorok még a méréssorozat közben esetleg megsérült (de még javítható) csapot tartalmazó irányok megfelelő megbízhatóságú korrekcióját is lehetővé teszik (ld pl. a 12. ábrán). A sérült irányok további, zavartalan méréseinek eredményei alapján ugyanis a sérülés időpontjában az adott irányban kialakuló konvergencialépcső nagy biztonsággal leképezhető. Az elvégzett elemzések alapján ugyanis az egyes irányokban mérhető konvergenciaértékek alakulása esetek többségében igen jól közelíthető a

$$K_i = K_{\max} \times \left( 1 - e^{-a \times (T_i - T_0)} \right) \quad (1)$$

alakú egyenlettel, ahol

- $K_i$  — Az  $i$ -edik robbantás után számítható kumulált konvergenciaérték (mm)
- $K_{\max}$  — Az utolsó ismétlőmérés időpontjában az adott irányban mért kumulált konvergencia (mm)
- $a$  — A közettípustól függő változó (meghatározását ld. az alábbiakban)
- $T_i$  — Az aktuális vájvég és a mérési szelvény távolsága az  $i$ -edik robbantás után (m)
- $T_0$  — Az aktuális vájvég és a mérési szelvény távolsága a szelvény telepítésekor (m)

A gyakorlati tapasztalatok szerint a fenti egyenlet szerinti közelítés különösen akkor megfelelő, ha az utolsó ismétlőmérésnél mérhető konvergencia már magas szinten stabilizálódott. Ebből a szempontból a különböző szelvények igen eltérően viselkednek: A fentiekben bemutatott KON-6 és KON-7 szelvények esetében a 11 illetve a 17 m-t is meghaladó vájvégtávolság elérése sem eredményezett magas szintű stabilizálódást. Más szelvények (mint pl. a KON-1 és KON-4) esetében azonban ehhez már akár 9-10 m-es vájvégtávolság is elegendőnek bizonyult. Ezt a különbséget nyilvánvalóan a közetkörnyezet reológiai tulajdonságában rejlő eltérések okozzák.

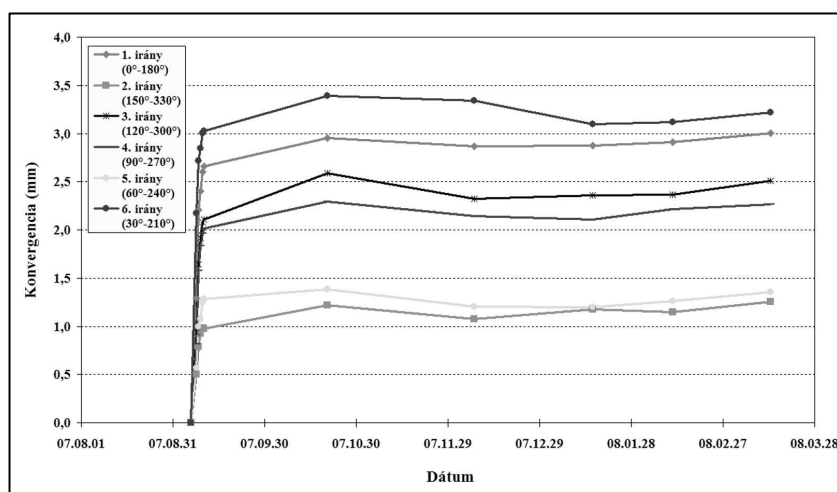
Az „ $a$ ” paraméter optimális értékét az egyes szelvények esetében úgy határoztuk meg, hogy megkerestük az egyes fogásokban mért illetve számított konvergenciaérték közötti távolságok négyzetösszegének minimumát, az irányonkénti maximális konvergenciaértékekre normalva. Az „ $a$ ” paraméter optimális értékeit és az ehhez tartozó eltérések normált négyzetösszeg-értékeit ( $\Sigma \Delta^2$ ) – az egyes szelvények egyéb jellemzőivel együtt – az 1. táblázat mutatja be. Az említett paraméterek meghatározásának elsődleges célja az volt, hogy kapcsolatot találjunk a konvergenciagörbék lefutása és az olyan jellemzők között, mint pl. a szelvény környezetének geotechnikai állapota, vagy az induló vájvégtávolság. Az 1. táblázat szerint azonban – bár bizonyos tendenciák kirajzolódni látszanak – ezzel a módszerrel szoros és egyértelmű összefüggést egyelőre nem sikerült kimutatni.

1. táblázat. A Bátaapátiban eddig telepített konvergenciamérő szelvények legfontosabb adatai

Szelvény	$T_0$ (m)	$T_{max}$ (m)	RMR- átlag (-)	Q-átlag (-)	$K'_{max}$ (mm)	$K'_{min}$ (mm)	$K'_{\text{átl}}$ (mm)	"a" (-)	$\Sigma\Delta^2$ (mm <sup>2</sup> )
KON-1	1,47	11,2	65,0	2,324	1,57	0,31	0,76	-0,690	0,6112
KON-2	1,25	13,9	66,0	2,869	1,45	0,14	0,62	-0,375	0,6197
KON-3	0,61	11,0	52,0	0,481	5,17	2,31	4,45	-0,455	0,4421
KON-4	1,00	9,3	57,0	0,648	3,03	0,97	2,01	-0,495	0,1181
KON-6	1,25	17,3	60,0	0,850	0,72	0,34	0,51	-0,410	0,1673
KON-7	0,90	11,0	45,9	0,223	8,26	4,34	5,89	-0,385	0,1558
KON-8	1,10	9,5	55,0	0,703	3,74	2,26	2,55	-0,460	0,2377
KON-9	1,40	12,0	61,5	0,596	5,77	2,20	3,59	-0,405	0,0871
KON-10	0,90	8,9	58,0	0,759	4,81	1,24	2,31	-0,380	0,1618
KON-11	1,60	13,2	53,5	0,268	3,59	1,44	2,36	-0,340	0,0594

Az 1. táblázat fejlécében feltüntetett, korábban nem magyarázott jelölések a következők:

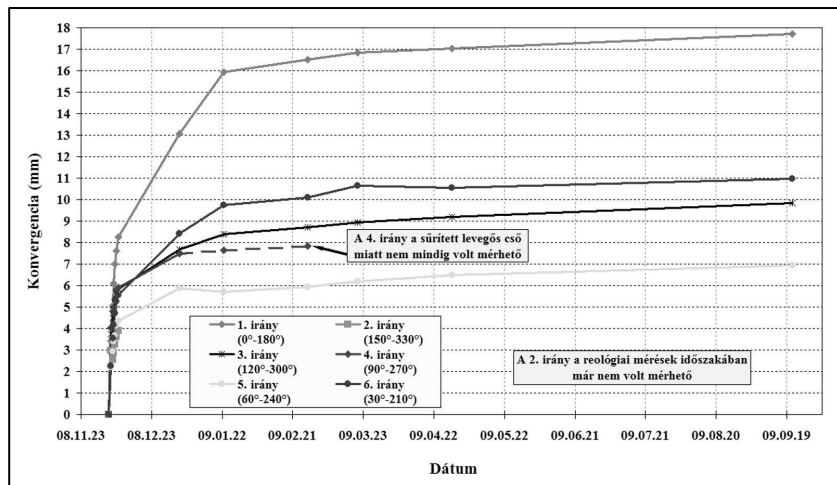
- $T_{max}$  — A vájvég és szelvény távolsága az utolsó ismétlmérés időpontjában (m)  
RMR-átlag — A mérési szelvény előtt és azt követően kialakított vájvégeken Bieniawski 1989 szerint meghatározott RMR értékek átlaga  
Q-átlag — A mérési szelvény előtt és azt követően kialakított vájvégeken Barton et al 1974 szerint meghatározott Q értékek átlaga  
 $K'_{max}$  — Az adott szelvényben a legnagyobb elmozdulást produkáló irány kumulált konvergenciaértéke az ismétlmérések után (mm)  
 $K'_{min}$  — Az adott szelvényben a legkisebb elmozdulást produkáló irány kumulált konvergenciaértéke az ismétlmérések után (mm)  
 $K'_{\text{átl}}$  — Az adott szelvény irányainak átlagos kumulált konvergenciaértéke az ismétlmérések után (mm)



13. ábra. A KON-4 szelvény hosszú távú megfigyelési időszakában felvett konvergencia-idősorok

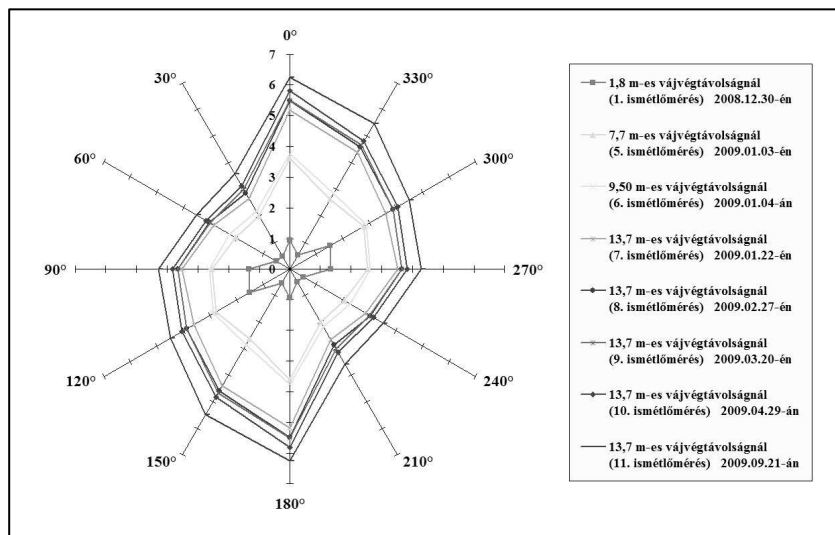
(amibe még belemérhetjük az ismétlmérések során nem teljesen stabilizált konvergencia-hányadot is) a hosszú távú megfigyelések időszaka alatt általában legfeljebb a szezonális jellegű, vagy a szellőztetési környezet megváltozására visszavezethető hőmérsékletváltozásból eredő fluktuáció mutatható ki a konvergenciagörbéken.

Azt is figyelembe kell azonban venni, hogy a kivételként említett KON-7 szelvény hosszú távú megfigyeléseinek időszakában a mechanikai folyamatokat befolyásoló körülményekben jelentős változások álltak be. A 7. Összekötő vágat két irányú jövesztéssel kialakított K-i elágazása menet közben jelentősen megváltoztatta a KON-7 szelvény környezetének szekunder feszültségterét. Bizonyára ennek is betudható, hogy az e szelvényben az ismétlmérések során meghatározott, amúgy is kiemelkedően magas konvergenciaértékek a reológiai mérések során szokatlan mértékben növekedtek tovább: Az 1. irányban a reológiai mérések végére a kiinduló érték közel 2,1-szeresét, a 6. irányban 1,9-szeresét lehetett meghatározni. (A többi irányban 1,5 – 1,6-szoros volt a változás jellemző mértéke.) A függőleges irányban fellépő kumulált konvergenciaérték így a szelvényben 2009. szeptemberére már



14. ábra. A KON-7 szelvény hosszú távú megfigyelési időszakában felvett konvergencia-idősorok

növekményt mutatott. Ezt követően a konvergenciagörbék ugyan szabályosan, az eredeti trend szerint folytatódtek tovább, de az említett két irány – a többitől eltérő módon – a hosszú távú megfigyelési időszakban sem stabilizálódott megfelelően. A szelvény környezetében kialakított vājvégek földtani-tektonikai és geotechnikai dokumentációja alapján valószínűsíthető, hogy az említett jelenséget a főte illetve a vállpont között kialakuló, ék-jellegű kőzetblokk átmeneti kimozdulása majd újristabilizálódása okozhatta.



15. ábra. A KON-8 szelvény ún. pókháló-diagramja

közvetlenül a mért konvergenciaértékek olvashatók le. A 15. ábra szerint – leszámítva a legelső ismételmérés talán kicsit torzult képét – a szelvény menti konvergenciaeloszlás jellege a teljes megfigyelési időszakon belül alapvetően nem, vagy csak minimális mértékben változik.

A különböző konvergenciamérő szelvényekben meghatározott adatsorok szelvény menti eloszlásában viszont — még ha vannak is ismétlődések — nem lehet teljesen általános érvényű szabályszerűséget felfedezni. A legtöbb esetben a maximális értéket a függőleges (1.) vagy az ahhoz közel eső valamelyik (2. illetve 6.) irány adta ugyan, de a szóban forgó irányok némelyike egy másik szelvényben akár minimumhelyként is szerepelhetett. A tapasztalatok szerint minden olyan esetben, amikor a maximumhelyek nem az 1., 2. vagy 6. irányban alakulnak ki, úgy a kőzetkörnyezetben felfedezhető egy olyan, mechanikai szempontból domináns tektonikus elem, ami a konvergenciaeloszlást módosítja. A függőleges vagy a másik két, talpi csapot is magában foglaló irány dominanciáját – a nem henger-szimmetrikus vágatalak mellett – azért is természetes jelenségnek kell tekinteni, mert a talpi csapok a közethorgonyzással és löttbetonnal nem biztosított kőzetzónában kerülnek telepítésre. Ugyan a talpi csapok a mechanikai védelmük érdekében egy beton sávalapban helyezkednek el, de ezeket oly módon alakítjuk ki, hogy azok ne korlátozzák a talp radiális elmozdulásait. Ily módon valószínűsíthető, hogy a maximális konvergenciaértékek kialakulásáért döntő mértékben a talpi csapok a felelősek. (Mindez tehát nem jelenti automatikusan a vertikális primer feszültségkomponens dominanciáját.)

megközelítette a 18 mm-t, ami egy elágazás környezetében a hosszú távú üzemeltetés során mindenképpen fokozott óvatosságra int, és a kérdéses vágatszaksz állandó ellenőrzését követeli meg.

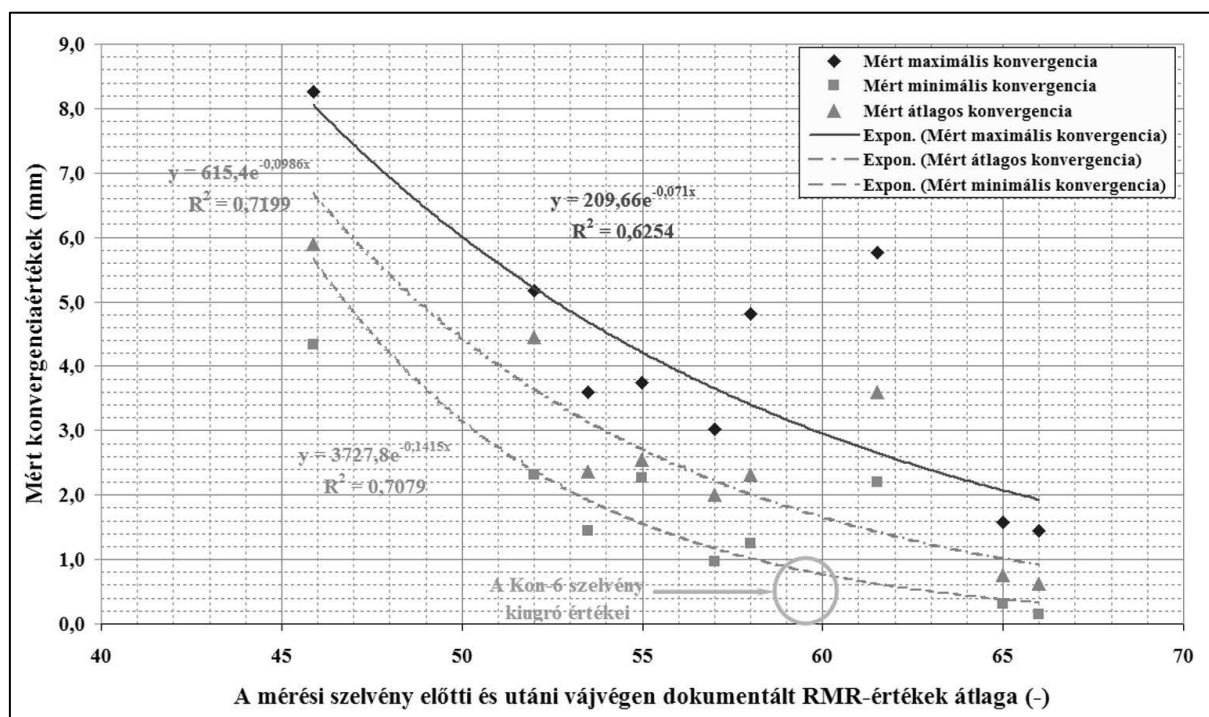
A hosszú távú stabilitás szempontjából ki kell még emelni a KON-10 szelvény esetét is. A Tárolói Szállítóvágatban telepített szelvény függőleges síkban lévő 1. iránya, valamint az ahhoz közeli 6. irány két, egymást követő ismételmérés során egyaránt kiugró, a normálistól erősen eltérő mértékű konvergencia-

A 15. ábrán a KON-8 jelű szelvény példáján mutatjuk be a 2.3. fejezetben már említett ún. pókháló-diagramot, és ezzel a konvergencia szelvény menti eloszlásának alakulását az idő függvényében. Hangsúlyozni kell, hogy a pókháló-diagramokon nem a módosult szelvényalak, hanem az irányonként mért konvergenciaértékek láthatók. Az értékek — a könnyebb leolvashatóság kedvéért — a diagram középpontjára tükrözött formában kétszeresre szerepelnek. Ez azt jelenti, hogy az egyes irányok által kijelölt tengelymetszéken

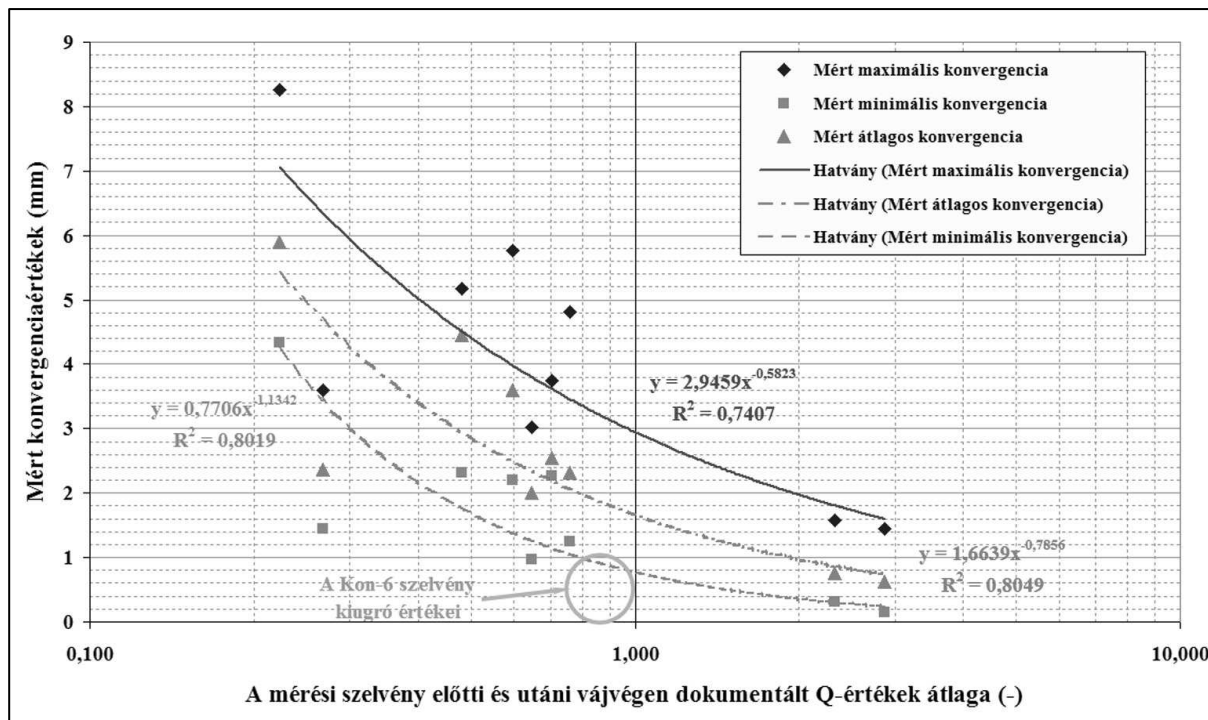


Már az első néhány szelvény méréssorozatának lezárása után is kézenfekvőnek látszott az a feltételezés, hogy a mérhető konvergenciaértékek alakulása elsősorban a szelvény környezetében települő kőzettestek geotechnikai viszonyainak függvénye. A KON-1, ..., KON-4 szelvények lemerését követően kísérlet történt arra, hogy kapcsolatot találjunk a mérési eredmények alakulása és a mérési szelvény telepítési helyén uralkodó geotechnikai viszonyok között. Az adatokban fellelhető tendenciák előzetes áttekintése alapján azt a kiinduló munkahipotézist állítottuk fel, hogy a szelvény telepítési helyének mechanikai állapotát jelző mérőszámok (az RMR illetve Q értékek) és az adott szelvényben mért maximális, minimális illetve átlagos konvergencia értékek között kell függvénykapcsolatot keresni. Mivel pontosan a szelvény telepítési helyszínén általában nem történt geotechnikai felvételezés, de a szelvények minden esetben szinte pontosan két, dokumentált vágvég (a kiinduló és az azt megelőzően kialakított vágvég) közé esnek, okkal feltételezhettük, hogy az e két vágvégen meghatározott RMR és Q értékek átlagaival a szelvény viselkedése megfelelően leírható. Már az első ilyen, a KON-1, ..., KON-4 szelvények adatain alapuló elemzés során is meglepően magas korrelációs együtthatóval lehetett függvénykapcsolatot találni a mért konvergenciaértékek és a geotechnikai minősítő rendszerek mérőszámai között. (Az RMR és a konvergenciaértékek között exponenciális, míg a Q és konvergenciaértékek között hatványfüggvények illesztésével volt elérhető a legjobb korreláció.) A a KON-6 szelvény – a már ismertett speciális tektonikai helyzete miatt – kiugró értéket jelentett ebből a trendből. A kiinduló munkahipotézis helyességét a későbbiekben kialakított KON-7, ..., KON-11 szelvények mérési eredményei is megerősítették, bár egy-egy újabb adat beillesztésével a függvénykapcsolat szorossága csökkent. A KON-10 szelvény két irányának már ismertett anomális viselkedése például értelemszerűen kiugró adatként jelentkezik mind a maximális, mind pedig az átlagos konvergenciaértékek közelítésében. Egyelőre nem találtunk viszont végleges magyarázatot arra, hogy a teljesen szabályos konvergencialefutást produkáló KON-9 szelvény esetében a mérhető értékek miért lettek közel kétszeresei az elméletileg előrejelzetteknek. Minthogy ez a szelvény a térség egyik legmarkánsabb agyagos breccsazonájának, az ún. Patrik-törésnek közelében került telepítésre, nem zárható ki, hogy ez a tektonikai helyzet jelentősen befolyásolja a lokális primer feszültségtér alakulását, és ezzel hatással van a konvergenciaképre is.

A 9 szelvény adataira épített összefüggéseket a 16. (RMR) és 17. (Q) ábrákon mutatjuk be. Mindkét ábra szemlélteti a KON-6 szelvény kiugró adatainak zónáját is, de ezeket a korrelációs összefüggés számításánál figyelmen kívül hagytuk.

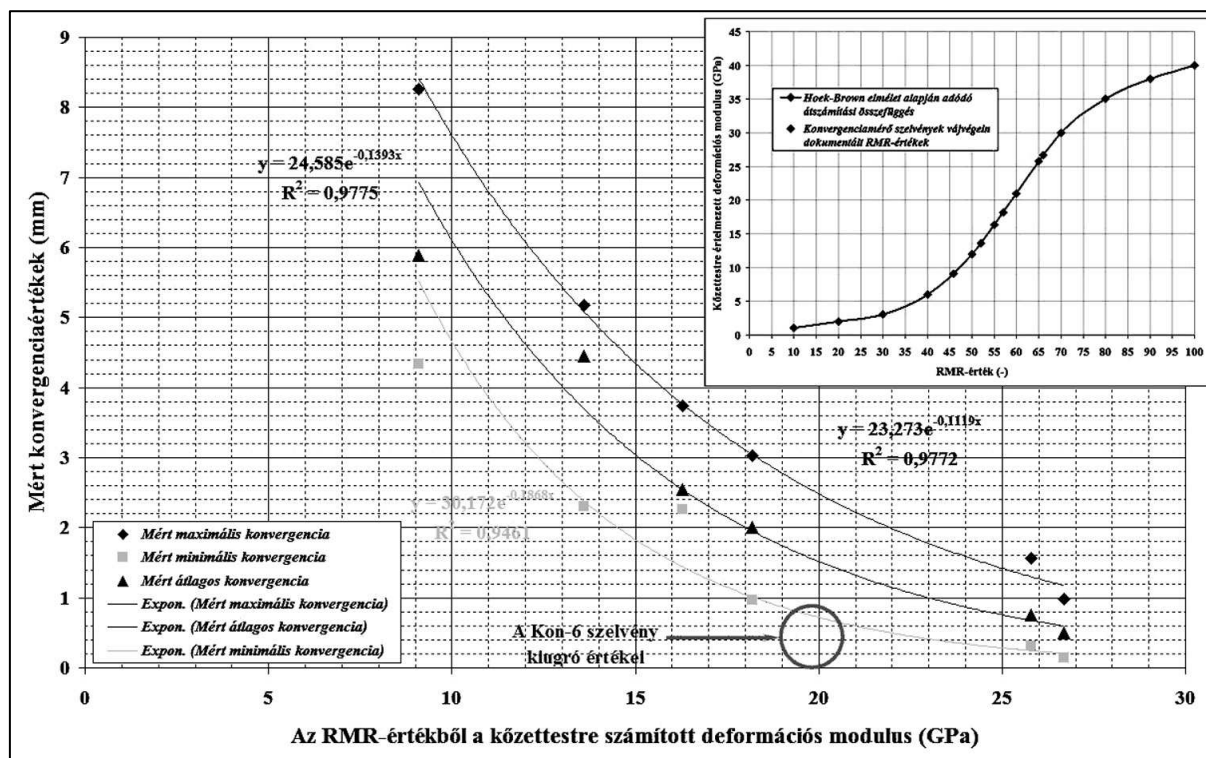


16. ábra. Az RMR értékkel jellemzett geotechnikai állapot és a mért konvergenciaértékek közti kapcsolat alakulása kilenc konvergenciamérő szelvény bevonásával



17. ábra. A Q értékkel jellemzett geotechnikai állapot és a mért konvergenciaértékek közti kapcsolat alakulása kilenc konvergenciamérő szelvény bevonásával

Ezt követően a Hoek-Brown törési elmélet alapján, a RocLab szabad felhasználású szoftverrel (<http://www.roscience.com/>) az egyes konvergenciamérő szelvények 1. táblázatban feltüntetett átlagos RMR adataira is kiszámítottuk a közzetestre értelmezett deformációs modulusokat. Ezzel megszerkeszthetővé vált a 16. ábra egy olyan változata is, amely a konvergenciamérő csapok telepítési mélységében (0,2 – 0,5 méter) lévő közzetartományra értelmezett deformációs (látszólagos rugalmassági) modulus ( $E_d$ ) függvényében ábrázolja a mérhető konvergenciákat. (ld. a 18. ábrán). Az ábra jobb felső részében látható diagram az RMR –  $E_d$  átszámítási összefüggést mutatja be grafikus formában.



18. ábra. Az RMR-értékekből a Hoek-Brown törési elmélet alapján a közzetömbre számított látszólagos rugalmassági modulus és a mért konvergenciaértékek közti kapcsolat alakulása kilenc konvergenciamérő szelvény bevonásával

Figyelembe véve a vágat körül kialakuló feszültségváltozások mértékéről és eloszlásáról a HGM-kamrában (a KMSZ részeként) kapott mérési adatokat is, a 18. ábrán feltüntetett adatokat teljesen reálisnak tekinthetjük. Így végső soron a konvergenciamérések abban is segítséget nyújtottak, hogy a kőzetköpeny 0,5 m-es zónájára jellemző deformációs modulusok számítása megalapozott legyen.

Tisztában kell lenni azzal, hogy a fentiekben bemutatott diagramokon a mért adatokkal lefedett kőzetkategoróriák köre egyáltalán nem elégséges: A kedvezőtlenebb állapotú kőzetzónákra vonatkozólag gyakorlatilag nem állt rendelkezésre adat. Azt is tudomásul kell venni, hogy a diagramokon jelenleg még mindig csak igen kevés mérési pont szerepel, és a fentiek szerint még ezek némelyikét is bizonytalanság terheli. A bemutatott eredmények azonban mindennek ellenére tovább erősítik azt a reményt, hogy a későbbiekben akár pusztán az egyes vájvégek — amúgy is mindig elvégzett — geotechnikai minősítése alapján igen magas szinten lehet majd meghatározni a Mórági Gránit Formációban történő vágathajtás során valamely szelvényben fellépő konvergenciákat. Mindez azonban csak megfelelő mérési program végrehajtása esetén lehet elérhető.

### 3.3 Összefoglaló megállapítások

A szelvények fentiekben bemutatott telepítési technológiája és a speciálisan kialakított nyomott rudas konvergenciamérő műszer akár 8 m-es feszítávolság mellett is biztosítja a mérések stabil, gyors és minden más ismert konvergenciamérési módszernél pontosabb (mindössze 0,02-0,03 mm maximális visszaállási és mérési hibával terhelt) kivitelezhetőségét. Megfelelő szelvénytelepítés és gondos csapvédelem mellett az alkalmazott mérési módszer nagy megbízhatósággal képezi le a kőzetköpenyben fellépő radiális deformációs folyamatokat. A konvergenciamérési eredmények rendkívül széles körben használhatók fel a kőzettestek minősítésére, az EDZ mértékének és eloszlásának meghatározására, valamint alkalmasak arra is, hogy azokat akár a hagyományos, akár pedig a fejlett, numerikus módszereket alkalmazó biztosítástervezési eljárások bemenő illetve validáló adataiként használjuk fel.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton mondanak köszönetet a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft.-nek (RHK Kft.), amely szervezet a Központi Nukleáris Pénzügyi Alap finanszírozásával lehetővé tette az ismertetett mérések kivitelezését. Ugyancsak köszönet illeti a MECSEKÉRC Környezetvédelmi Zrt-t, a BAF és a Bábaapáti kutatási programok fővállalkozóját.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Barton N; Lien R.; Lunde J. 1974: Engineering classification of rock masses for the design of the tunnel support. *Rock Mech. Rock Engng.*, **7**(4): 183–236.
- Bieniawski Z.T. 1989: *Engineering rock mass classification*. Wiley 251 p.
- Carranza-Torres C., Fairhurst C. 2000: Application of the convergence–confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **15**(2), 187-213.
- Carvalho O.S., Kovári K. 1977: *Displacement Measurements as a Mean for Safe and Economical Tunnel Design*. Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Rock Mechanics. Zurich, April 4-6. 1977. 709-721.
- Doležalová M., Zemanová V., Kovács L. 1998: *Rock Mass Characterization Via Field Measurements and Numerical Methods*. 4th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 14 - 16 October 1998, Udine, Italy.
- Feng X-T., Hudson J.A. 2010: Specifying the information required for rock mechanics modelling and rock engineering design. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.* **47**: 179–194.
- Hoek E., 2000: *Rock Engineering*, Course Notes, Chapter 12.1-12.3.
- Kovács L.: *A Bodai Aleurolit Formáció minősítésének Rövidtávú Programja. Kutatási Zárójelentés, 6. kötet: Kőzetmechanikai, geotechnikai vizsgálati program*. Kézirat, MECSEKÉRC Rt., Pécs, 1999. március., RHK Kft. Irattára.
- Martin C.D. 1994: *Boda Claystone Access Tunnel: Review of convergence data. AECL Preliminary Report*. Kézirat, Mecsekérc Rt Adattár.
- Martin C.D., Chandler N.A., Read R.S. 1996: The role of convergence measurements in characterizing a rock mass. *Canadian Geotechnical Journal*, **33**: 363-370.

- Mészáros E., Török Á. 2010: *A Bábaapátiban tervezett radioaktív hulladéklerakó vágatrendszere deformációjának mérnökgeológiai vizsgálata és modellezése*. Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kis-könyvtár (Szerk: Török Á. & Vásárhelyi B.). Műegyetemi Kiadó, Budapest, 207-218.
- Szűcs I., Berta J., Csicsák J., Hámos G., Balla Z., Gyalog L., Horváth I., Maros Gy., Rotárné Szalkai Á., Tóth Gy., Turczy G., Molnár P., Szegő I., Bérci K., Takács T., Vértesy L., Törös E., Szongoth G., Kovács L., Gondár K. 2004: *A felszín alatti földtani kutatás terve, Bábaapáti (Üveghuta), 2004–2007*. Kézirat, Bátatom Kft., Budapest, 2004. május 28., RHK Kft. Irattára, Paks, BA–03–196A.
- Wileveau Y., Renaud. V, Kazmierczak J-B., Armand G. 2006: *Rheological Characterization of a Clay Formation from Drifts Excavation: Elastic and Elastoplastic Approach*. Proc. of Sea to Sky Geotechnique. (Annual Conference of Canadian Geotechnical Society). Vancouver, Oct. 1-4. 2006. 481-487.