Felszínközeli kőzettestekben uralkodó primer feszültségállapot meghatározása továbbfejlesztett Doorstopper cellás, magtúlfúrásos in situ feszültségmérésekkel

Kovács László Kútfej Bt., Pécs, kutfejbt@chello.hu

Bogár István Bomix Kft., Pécs, bomix@dravanet.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A cikk bevezető fejezete azt vizsgálja, hogy miért fontos kérdés, és egyúttal miért jelent nagy szakmai kihívást a kőzettestekben uralkodó jelenkori (recens) primer feszültségtér eloszlásának minél pontosabb meghatározása. Egy-egy vizsgált terület szerkezet-fejlődésének, tektonikai jellegének, geodinamikai stabilitásának illetve esetleges szeizmikus ve-szélyeztetettségének megítéléséhez ez az ismeret nélkülözhetetlen. A környezetvédelmi alkal-mazások számára alapvető a feszültségtér és a vízföldtani viszonyok között fennálló szoros összefüggések elemzése és számszerűsítése. Mivel a primer feszültségtér egyben a föld alatti üregképzés hatására végbemenő feszültségátrendeződés kiinduló állapotát is jelenti, kézenfekvő, hogy vizsgálata mind az alagútépítési és mélyépítési, mind pedig a bányászati gyakorlat számára is kiemelt feladat. A kérdéses területen uralkodó horizontális és vertikális főfeszültségek aránya a statikai méretezés egyik legfontosabb paraméterét jelenti a tervezők számára.

A feszültségtér in situ mérésekkel történő megbízható meghatározása rendkívül nehéz feladat, különösen az alagútépítés és mélyépítés célterületének számító kisebb (<100 m) felszín alatti mélységekben. Éppen ezért a gyakorlatban a legtöbbször elméleti megfontolások alapján felvett értékekkel dolgoznak, ami számos ellentmondáshoz és hibához vezethet.

A cikk következő része az in situ mérésekkel történő feszültségtér-meghatározás lehetőségeit vizsgálja; különös tekintettel a sekély mélységben is alkalmazható, aktív beavatkozással végzett módszerekre. Ezek közül a szakirodalomban régóta ismert Doorstopper cellás, mag-túlfúrásos közetfeszültség-mérési módszert a szerzők 2002. óta több lépcsőben jelentősen továbbfejlesztették; kiküszöbölve ezáltal a vonatkozó szakirodalomban dokumentált legfontosabb műszer- és méréstechnikai problémákat. A megújított technológiával a Mórágyi Gránit Formáció és a Bodai Aleurolit Formáció minősítési programja keretében már hét, sekély mélységű felszíni fúrásban és három felszín alatti fúrásban hajtottak végre sikeres méréssorozatokat. A cikk bemutatja a továbbfejlesztett módszert és annak kulcs-elemeit. Ezt követően röviden ismerteti a két nagyobb vizsgálati területen nyert eredményeket. Mindezek alapján megállapítható, hogy egy széles körben, kedvezőtlen és változatos körülmények között is nagy megbízhatósággal alkalmazható in situ feszültségmérési módszer került kidolgozásra.

Kulcsszavak: recens feszültségállapot, in situ feszültségmérés, mag-túlfúrás, Doorstopper cella, k tényező

1 A PRIMER KŐZETFESZÜLTSÉG FOGALMA ÉS MEGHATÁROZÁSÁNAK CÉLJA

A klasszikus kőzetmechanika analitikus leírása szerint a primer (tehát az emberi beavatkozás nélküli) kőzetfeszültség-teret a homogén, izotróp, rugalmas közegként kezelt kőzetek önsúlyterhelése hozza létre. Ennek megfelelően – legalábbis a rugalmas viselkedés mélységtartományában – a kőzetfeszültség-tenzor főkomponensei a következőképpen alakulnak: a maximális főfeszültség-komponens (σ_1) helyzete függőleges ($\sigma_1 = \sigma_V$), és a két további, vízszintes síkban elhelyezkedő összetevő (σ_2 és σ_3) ennél jóval kisebb, egymással viszont megegyezik $(\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_H)$. E teória szerint a horizontális és vertikális komponensek aránya (az ún. vízszintes feszültségi tényező, vagy k tényező) kizárólag a kőzetek Poisson számának függvénye, tehát anyagjellemzőként kezelhető mennyiség. A definíció szerint az így értelmezett k tényező fogalmilag megfelel a talajmechanikában alkalmazott K₀ nyugalmi földnyomás tényezőnek (amit a rugalmasságtani megközelítésen kívül a Jáky-képlettel is ki lehet számítani, vagy durva közelítésként egyszerűen 0,5 értékben szokás felvenni).

A napjainkra már igen nagy számú, világszerte elvégzett mérés eredménye azonban arra figyelmeztet, hogy a konszolidáció előrehaladottabb fokán álló, illetve a kőzetté váláson is átesett képződmények esetében ez a meglehetősen leegyszerűsített kép szinte soha nem érvényesül. (Meg kell jegyezni azt is, hogy a klasszikus talajmechanika tárgykörébe tartozó reális képződmények között is csak kevés olyan lehet, amelynek feszültségviszonyai tisztán az elméleti megközelítéssel megnyugtatóan leírhatók.) Az önsúlyterhelés alapján meghatározott feszültségre külső hatások eredményeként többlet-feszültségek szuperponálódnak. Ezáltal a főfeszültségeket az esetek többségében szabálytalan helyzetű térbeli feszültségellipszoid tengelyeiként kell értelmeznünk. Ilyen külső, a feszültségtér alakulását meghatározó hatások, jelenségek lehetnek például a következők (Brady & Brown, 1985):

- a nagyszerkezeti helyzetből fakadó recens lemeztektonikai/tektonikai folyamatok;
- a morfológiai viszonyokból illetve a litoszférában lévő sűrűségkülönbségekből adódó gravitációs eredetű többletfeszültségek;
- még le nem épült paleofeszültségek, korábbi rétegterhelések;
- különféle tektonikai jelenségek (azon belül is elsősorban a húzásos hasadékok jointok) gyakori jelenléte a kőzettestben;
- a mátrixtól erősen eltérő anyagi minőségű zárványok, telérkőzetek jelenléte;
- termikus eredetű többletfeszültségek (a felszínközeli, ún. termikusan aktív zónában).

A fellépő külső hatások eredőjeként egyetlen megfigyelési időpontban is rendkívül változatos térbeli feszültségeloszlás jöhet létre. Tekintetbe kell azonban azt is vennünk, hogy egy-egy adott térrész feszültségállapotára valamennyi korábbi, eltérő jellegű paleofeszültség-rezsim is rányomja a bélyegét. Mindezek miatt a primer feszültségállapot térbeli eloszlásának elméleti becslése bármely léptékben is irreális; azt csak in situ mérések illetve megfigyelések felhasználásával ismerhetjük meg.

Az elmondottakat először Brown & Hoek (1978) igazolták, akik az akkoriban világszerte hozzáférhető in situ feszültségmérések eredményei alapján vontak le fontos következtetéseket a vertikális és a horizontális feszültségek mélységbeli eloszlásának tendenciáiról. Kutatásaik szerint a mért függőleges feszültségek mélységbeli alakulása – bár jelentős szórással – megközelíti az elméletileg várható trendet. A horizontális feszültségek esetében azonban egészen más a helyzet. Amikor a két vízszintes főirányban mért (általában egymástól erősen eltérő) horizontális feszültség átlagának és a helyi vertikális feszültség értékének hányadosaként értelmezett k tényezőt a mélység függvényében ábrázolták, úgy az valamennyi mérés esetében a

$$k = 1500/z + 0.5 \tag{1}$$

és a

$$k = 100/z + 0.3 \tag{2}$$

egyenletű burkolók közötti területre esett (ahol z a felszíntől számított mélység m-ben). Az (1) és (2) egyenlet szerint a sekély (< 100 m) mélységtartományban kivétel nélkül minden esetben azt mutatták a mérések, hogy a horizontális feszültségek átlaga magasabb a vertikálisnál, de nem ritkán k = 3 körüli, vagy azt meghaladó értékek is előfordultak. Ugyancsak kiemelték, hogy egy-egy, komplexebb fejlődéstörténettel jellemezhető területen belül a mért adatok szórása – még jó minőségű mérések esetében is – igen magas lehet, tehát a feszültségek térbeli eloszlása inhomogén jellegű. A későbbiekben az egyre bővülő nemzetközi adatbázis (pl. az Interneten bárki számára elérhető World Stress Map Project világméretű adatbázisának) alkalmazásával számos más kutató is végzett hasonló vizsgálatokat, minden esetben hasonló következtetésekre jutva (pl. Zoback et al., 1989).

A kőzettestekben uralkodó jelenkori (recens) primer feszültségtér eloszlásának minél pontosabb meghatározása több tudományterület illetve gyakorlati alkalmazás szempontjából is igen fontos feladat. A teljesség igénye nélkül ezek közül néhányat az alábbiakban sorolunk fel:

- A szerkezeti földtan egyik alapvető tézise, hogy a vertikális feszültség (σ_V), valamint a maximális és a minimális horizontális feszültségek (σ_H és σ_h) egymáshoz viszonyított aránya határozza meg az adott területen megfigyelhető tektonikai stílust (Csontos (1998)). Amennyiben pl. $\sigma_1 = \sigma_V$, akkor tenziós vagy normálvetős feszültségtér alakul ki. $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ feszültségeloszlás esetén kompressziós vagy feltolódásos, míg $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ esetben eltolódásos tektonikai stílusról kell beszélni. Természetesen vannak átmeneti, kevert állapotok is: Amikor σ_2 értéke σ_1 -hez vagy σ_3 -hoz közelít, akkor transztenziós vagy transzpressziós tektonikai stílusok jöhetnek létre. A recens feszültségtér-adatokat a paleofeszültségekkel együttesen értelmezve egy-egy terület szerkezetfejlődésével kapcsolatban igen fontos következtetések vonhatók le. Bada & Horváth (1998) valamint Bada et al. (2007) vizsgálatai kimutatták, hogy a Pannon-medencében a késő-miocénpliocén óta egy, még mindig kezdeti stádiumban lévő inverzió zajlik, amelynek eredményeképpen a medence belsejében többféle, eltérő jellegű feszültségrezsim illetve tektonikai stílus figyelhető meg. Így a jelenkori feszültségtér inhomogenitása magyarországi léptékben is egyértelműen igazolt.
- A primer feszültségtér egyben valamennyi, talaj- illetve kőzetmegbontással járó emberi beavatkozás (pl. föld alatti üregképzés) hatására végbemenő feszültségátrendeződés kiinduló állapotát is jelenti. A szekunder terhelések illetve a terhelési és szilárdsági paraméterek viszonyának meghatározása elemi feladat minden mérnöki létesítmény tervezésekor. A kérdéses területen uralkodó horizontális és vertikális főfeszültségek aránya a statikai méretezés egyik legfontosabb paraméterét jelenti a tervezők számára. Így az esetleges anomális primer feszültségek kimutatása sem az alagút- és mélyépítési, sem pedig a bányászati gyakorlat számára nem lehet közömbös.
- Még ha "csak" néhány évtizedes élettartamra tervezünk is egy műszaki létesítményt, a mai kor követelményei szerint elképzelhetetlen, hogy ne foglalkozzunk az azt befogadó földtani közeg térségének geodinamikai stabilitásával illetve a szeizmikus veszélyeztetettség mértékének meghatározásával (ld. Eurocode 8: Tartószerkezetek földrengésállóságának tervezése). Ez az igény azonban hatványozottan lép fel akkor, ha a tervezett mérnöki létesítmény szükséges működési időtartama több ezer, vagy több tízezer év. Tipikus példaként említhetők erre a radioaktív vagy veszélyes hulladékokat véglegesen befogadó felszíni vagy felszín alatti tárolók.
 - Ugyancsak a hulladékelhelyezés kapcsán kell említenünk a feszültségtér és a vízföldtani viszonyok között fennálló szoros összefüggéseket is: A tektonikai események által létrehozott törések mentén általában megnő a permeabilitás, ezzel együtt a szennyeződés terjedésének lehetősége is. Az elméleti levezetések és a gyakorlati tapasztalatok egyaránt azt támasztják alá, hogy az uralkodó feszültségviszonyok döntően befolyásolják a már korábban kialakult, különböző jellegű tektonikus zónák áteresztőképességét. Kedvező esetben (ha a primer feszültségmező és a tektonikus öv mechanikai tulajdonságainak viszonya ehhez megfelelően alakul) akár az ún. természetes önzárás jelensége is kialakulhat, amelynek eredményeképp a kőzetben korábban keletkezett diszkontinuitások gyakorlatilag nem befolyásolják az izolációs tulajdonságokat (Kovács, 2001). Ennek azonban a fordítottja is előfordulhat: kedvezőtlen, extenziós jellegű feszültségtérben a szennyeződésterjedés sebessége megnőhet. A föld alatti tárolóüreg körül kialakuló fellazult zóna alakját és méretét is befolyásolja a primer feszültségtér jellege. Ez azért lényeges, mert a bioszféra biztonságát a megnövekedett szivárgási tényezővel jellemezhető fellazult zónában a primer hidraulikai viszonyokból nem levezethető (radiális és axiális) áramlási rendszerek esetleges kialakulása jelentősen ronthatja.

Amint az a fentiekből is látható, a horizontális síkban uralkodó illetve vertikális helyzetű normálfeszültségek – a feszültségellipszoid tengelyeinek általános térbeli helyzetétől függetlenül – a legtöbbször kiemelt szerepet játszanak a feszültségkép leírásában. Ennek egyik oka az, hogy a feszültségmeghatározási eljárások jelentős része a legtöbbször függőleges tengelyű felszíni fúrólyukakhoz kötődik. A másik fontos ok a fentiekben vázolt alkalmazási lehetőségek jellegében keresendő: Amennyiben az ismeretszerzés elsődleges célja ezt lehetővé teszi, elégséges lehet kizárólag a horizontális síkban uralkodó feszültségek pontos meghatározása illetve a vertikális feszültség becslése. Komplexebb megközelítést igénylő feladatok esetében azonban olyan feszültségmeghatározási módszereket kell választanunk, amelyek lehetővé teszik a teljes 3D-s feszültségtér-rekonstrukciót. Akármilyen célból végezzük is el azonban egy-egy terület feszültségviszonyainak elemzését, konkrét mérési adatokra épülő adatbázis nélkül ez általában illuzórikus vállalkozás.

2 A JELENKORI KŐZETFESZÜLTSÉG MEGHATÁROZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE

A recens primer kőzetfeszültség meghatározása optimális esetben a 3D-s feszültségtér teljes rekonstrukcióját jelenti, tehát azt, hogy méréseink alapján közvetlen vagy közvetett módon maradéktalanul, az inhomogén feszültségtér minden jellemző pontjában megkapjuk az \mathbf{F}_p feszültségtenzort. Részben a feszültségtér kis léptékben is megfigyelhető inhomogenitása miatt, részben pedig amiatt, mert az in situ mérések tervezése és kivitelezése komoly szakmai felkészültséget valamint műszer- és méréstechnikai hátteret kíván meg, ez az optimális állapot csak igen ritkán valósulhat meg. Egy-egy konkrét esetben a feszültségmérési módszer(ek) megválasztásakor és a mérési program tervezésekor tehát – a technikai és finanszírozási lehetőségeken túl – mindig szem előtt kell tartani az alkalmazási célját és azt is, hogy ez a kompromisszumkényszer hogyan hat majd az eredmények gyakorlati felhasználhatóságára.

2.1 A legfontosabb in situ feszültségmérési módszerek

Közismert tény, hogy maga a kőzetfeszültség, mint fizikai fogalom közvetlenül nem, csak az annak hatására bekövetkező jelenségek, folyamatok (pl. deformációk, kőzettörések, szeizmikus jelenségek) megfigyelése révén mérhető. A kifejlesztett meghatározási módszerek két nagyobb csoportba sorolhatók: Az elsőbe azok a módszerek tartoznak, amelyek végrehajtásakor a vizsgálandó kőzettestben *aktív* behatást végzünk, és az ennek hatására végbemenő változásokat detek-táljuk. Ilyenek például a következők:

- Mag-körülfúrásos vagy mag-túlfúrásos módszerek (overcoring);
- Hidrorepesztés (hydrofracturing);
- Tokrepesztés (sleeve fracturing);
 - Fúrólyuk-hornyolás (borehole-slotter).

A második csoportba tartoznak azok a módszerek, ahol aktív emberi beavatkozás nem történik, hanem pusztán a közvetett feszültségindikátorok passzív dokumentálása és az így nyert adatok feldolgozása révén érünk el eredményt:

- Földrengések fészekmechanizmusának elemzése;
- Lyukfal-deformáció illetve a lyukfalon szisztematikusan jelentkező kőzettörések analízise (borehole breakout);
- Kőzetmagon szisztematikusan jelentkező kőzettörések (korongosodási jelenségek disking) vizsgálata;
- A fiatal felszínfejlődés alakulásának vizsgálata DTM-analízissel és/vagy nagy felbontású űrgeodéziai mérésekkel.

(Meg kell jegyezni, hogy egyes szerzők szerint a recens feszültség meghatározására alkalmas eljárás lehet a kőzetminták laboratóriumi, a Kaiser-effektuson alapuló tesztelése is. Nem bizonyított azonban egyértelműen, hogy e módszer alkalmazása során a kőzetminták valóban a recens, és nem pedig az előterhelési, paleo-feszültségállapotok valamelyikére "emlékeznek"-e.)

Jelen cikknek terjedelmi korlátok miatt nem lehet feladata az egyes módszerek részletes ismertetése. Ezért az alábbiakban csak fentiekben említett két csoport legfontosabb jellemzőit hasonlítjuk össze.

A két csoportba tartozó mérési, meghatározási módszerek között a legnagyobb különbség abban rejlik, hogy az aktív beavatkozással végzett módszerek esetében (legalábbis azok többségében) a feszültségirányok és az abszolút értékek is kvantitatív módon meghatározhatók, míg a második csoport esetében a feldolgozások eredményeként csak az irányok adódnak egyértelműen. Az aktív módszerek közül is kizárólag az overcoring eljárások egyes módozatait tekinthetjük – legalábbis elvileg – alkalmasnak a 3D-s feszültségtér egyetlen mérésből történő meghatározására. Ugyancsak fontos különbség, hogy a közvetett feszültségindikátorok sekély (legfeljebb néhány 100 m) mélységben általában igen korlátozottan jelentkeznek, és ezért megfigyelésük, dokumentálásuk – a DTM-analízist illetve az űrgeodéziai méréseket leszámítva – ilyen esetekben nehéz feladat.

A fentiek miatt a közvetett feszültségindikátorok elemzésén alapuló eljárások elsősorban a hosszú távú szerkezetfejlődési és stabilitási elemzésekben valamint szénhidrogén-ipari alkalmazásokban kaphatnak nagyobb szerepet. A mérnöki alkalmazások "szokványos" mélységtartományában inkább az aktív, a feszültségirányokat és az abszolút értékeket is megadó módszerek hozhatnak sikert. Ezzel kapcsolatban azonban mindenképpen meg kell azt is említeni, hogy a felszínközeli kőzettestekben az aktív mérési módszerek kivitelezőinek is rendkívül sok problémával kell szembenézniük: A felszínközeli zónában például jóval gyakoribbak a kiemelkedésből (uplift) eredő húzásos diszkontinuitások, számottevőek lehetnek a termikus hatások, valamint az itt végbemenő mállási folyamatok általában jóval intenzívebben jelentkeznek, mint nagyobb mélységben. Emellett az aktív módszereknél szintén komoly problémát jelenthet, ha a viszonylag kis feszültségek mellett, nem megfelelő méréstechnológiai háttér esetén a mérendő jel/zaj hányados alacsony szintűre adódik. Mindezen hatások nemcsak technikailag nehezítik a mérések kivitelezését, de az eredmények értelmezhetőségét is sokszor hátrányosan befolyásolják. Nem véletlen, hogy Zoback et al (1989) a világméretű feszültség-adatrendszerek adatainak minősítéséhez kidolgozott egységes osztályozási rendszerében (amely megmutatja, hogy az egyes adatok milyen súllyal vehetők figyelembe egy adott terület feszültségviszonyainak elemzésekor) valamennyi aktív módszernél az egyik legfontosabb minősítési szempontként említi az adatok származási mélységét. A kidolgozott rendszer szerint "A", tehát a legjobb minőségi besorolást kizárólag olyan mérés kaphat, amely 300 m-nél mélyebbről származik. Ezzel együtt – a már említett mérnöki feladatok megoldása érdekében – sokszor van szükség ilyen sekély mélységű feszültségmérések végrehajtására. Egy-egy terület feszültségviszonyainak előzetes minősítését a legtöbb esetben olyan helyzetben kell megoldani, amikor a mérések kivitelezéséhez még nem áll rendelkezésre megfelelő mélységben megépült kutatóobjektum (vágat, akna, alagút), illetve a felszíni fúrólyukakban alkalmazandó aktív módszerek hatótávolsága sem éri el a 300 méteres határértéket. Függetlenül attól, hogy az ilyen tesztekből származó adatok eleve nem kaphatnak "A" minősítést, ezekben az esetekben fokozottan törekedni kell a megbízható, jó minőségű mérések kivitelezésére. Ehhez szükség esetén jelentős műszaki fejlesztést is végre kell hajtani.

2.2 Hazai in situ feszültségmeghatározási előzmények

A primer feszültségmeghatározás hazai története még napjainkban sincs két évtizedes. Az első recens feszültség-adatokat Magyarországon 5 mélyfúrás faldeformációjának elemzése alapján csak 1988-ban publikálták (Dövényi et al (1988)). Az azóta keletkezett adatok túlnyomó többsége is a szénhidrogén-bányászat "melléktermékeként", hasonló módszerrel, tehát a mélyfúrások faldeformációs illetve breakout elemzéséből jött létre. A World Stress Map Project legutóbbi (2005. évi), a Pannon-medence térségéről publikált feszültségtérképe – néhány szórványos, a földrengések fészekmechanizmus-analíziséből származó adattól eltekintve – szinte kizárólag ilyen mérési eredményeket mutat be Magyarország területén (1. ábra). E módszer fejlesztése és alkalmazása folyamatosan és eredményesen zajlik (Windhoffer et al (2001)). A 2.1 pontban elmondottak szerint ezek az adatok nagymélységű fúrásokból származnak, és kizárólag a feszültségirányok alakulására engednek következtetni.

Magyar kutatók a Pannon-medence jelenkori háromdimenziós deformációs- és feszültségképével kapcsolatban rendelkezésre álló adatok részletes elemzésével, végeselemes numerikus modellezés útján vizsgálták a tágabb térség legfontosabb geodinamikai folyamatait (Bada & Horváth 1998). Az egyedi mérési adatok alapján a modell jól validálhatónak és regionális léptékben megalapozottnak bizonyult.

Tudomásunk szerint néhány szénhidrogén-ipari célból végzett rétegrepesztés analízise ugyancsak elkészült. Ezek azonban legtöbbször nem publikált információk maradtak.

Magyarországon igen kevés korábbi sikeres példa akad az aktív in situ feszültségmérési technikák alkalmazására. Egészen a legutóbbi évekig nem állt rendelkezésre az ilyen kísérletekhez szükséges eszközháttér és technológiai ismeret sem. A úttörő jellegű kísérletek közül meg kell említeni, hogy a 90-es évek elején az ország különböző területein – német közreműködéssel – öt külszíni, sekély mélységű (<5m), nyugalmi vízszint feletti overcoring tesztsorozat készült (Gerner et al 1994).



1. ábra: A World Stress Map Project 2005-ben publikált feszültségtérképe a Pannonmedencéről (forrás: http://www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de)

Az 1. fejezetben leírt célmeghatározásokkal összhangban elsősorban a radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló kutatási programok tették szükségessé az aktív feszültségmérési módszerek adaptálását illetve hazai fejlesztését. A Bodai Aleurolit Formációban (BAF, mint a hazai nagyaktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére potenciálisan alkalmas kőzet) 1994 és 1998 között létesített illetve üzemeltetett föld alatti kutatólaboratóriumban mélyített horizontális illetve pozitív dőlésű fúrásokban a kanadai AECL Doorstopper cellás overcoring teszteket, a budapesti székhelyű KBFI-ALFA Kft. pedig hidrorepesztéses és tokrepesztéses méréseket végzett. Sajnálatos módon e mérési sorozatok ellentmondásos, nehezen értelmezhető eredményeket hoztak.

2002. év folyamán – a Mórágyi Gránit Formáció, mint a hazai kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére kiszemelt képződmény minősítési programjához kapcsolódóan – sor került a tokrepesztéses technika továbbfejlesztésére. A továbbfejlesztett berendezés alkalmazásával a KBFI ALFA Kft-nek már 200 m-es hatótávolságban is sikerült repesztéses feszültségmeghatározásokat produkálnia (Üh-2 és Üh-23), valamint az Üh-33, Üh-34 és Üh-35 sekélyfúrásokban is végeztek ilyen méréseket. Ezek eredményeit eddig csak kutatási jelentések formájában foglalták össze, hivatalos formában még nem publikálták.

Az 2002. év elején – az AECL sikertelen méréssorozatának tapasztalatait felhasználva – szerzők megkezdték egy Doorstopper cellával működő, hatékony és megbízható mag-túlfúrásos mérőrendszer valamint előkészítési és mérési technológia kifejlesztését. Ennek eredményeként – ugyancsak a Mórágyi Gránit kutatásának keretében – 2002 nyarán és őszén a Bomix Kft. már sorozatban végzett sikeres, teljes körűen értékelhető méréseket 50 m talpmélységű, vízzel telt sekélyfúrásokban (ennek részleteit ld. a következő fejezetekben). Az összegyűlt mérési tapasztalatok alapján a technológiát ezt követően is számos vonatkozásban továbbfejlesztették annak érdekében, hogy az értékelés során a lehető legkevesebb zavaró tényezőt kelljen figyelembe venni. A továbbfejlesztett rendszerrel 2004 nyarán a BAF kutatási programjának keretében a Ny-Mecsekben újabb három felszíni sekélyfúrás eredményes tesztprogramja következett. 2007 októberében, a Bátaapátiban létesített feltáró lejtősakna egyik kamrájában, mintegy 250 m felszín alatti mélységben nyílott először mód arra, hogy három, egymásra merőleges helyzetű fúrásban végzett mérési program alapján rekonstruálni lehessen a recens 3D-s feszültségviszonyokat. Bár jelen cikk megírásának időpontjában már ez a méréssorozat is sikeresen lezajlott, a mérési eredmények értékelése még folyik. Ezért a következőkben – a továbbfejlesztett technológia kulcs-elemeinek ismertetése után – csak a 2002. és a 2004. évi méréssorozatot és annak eredményeit mutatjuk be.

3 AZ OVERCORING MÓDSZEREK

3.1 A mag-körülfúrásos illetve mag-túlfúrásos módszerek általános leírása

Az overcoring módszer az aktív beavatkozással végzett in situ feszültségmérési eljárások egyik legismertebb, de talán a legnagyobb technikai felkészültséget igénylő fajtája. Alapelve, hogy a megfelelően előkészített és alkalmas mérőeszközzel ellátott fúrólyuktalp környezetét fúrással kell feszültségmentesíteni. Az ennek hatására létrejövő kőzetdeformációk, valamint a kifúrt kőzetmag biaxiális (tehát a kifúrási geometriával megegyező módon végzett teszttel meghatározott) rugalmassági modulusának és Poisson számának mérésével a primer feszültségtér egyes komponenseinek nagysága és iránya számítható (Brady & Brown (1985); Brown (1985)). A mérések kivitelezésénél és értékelésénél természetesen figyelembe kell venni azt is, hogy a létrejövő deformációknak csak egy része játszódik le pillanatszerűen, az ideális rugalmasságtan szabályainak megfelelően. A deformációk másik része időben elnyújtva lép fel, a lyuktalpon végbemenő hőmérsékleti változások valamint a kőzet kúszási tényezőjének függvényében. Az értékeléshez ugyancsak igen fontos annak figyelembe vétele, hogy a lyuktalpi mérések nem valódi primer feszültségtérben zajlanak le, mivel azt már maga a fúrólyuk jelenléte módosította. Ez a hatás azonban megfelelő értékelő algoritmusokkal korrigálható (pl. Corthesy et al (1993)).

Amennyiben a mérésekre felszín alatti üregből mélyített fúrólyukakban kerül sor, természetesen ügyelni kell arra, hogy a vágatpalásttól sugárirányban legalább 3, tengelyirányban pedig legalább 2 vágatátmérőnyi távolságban alakítsuk ki az első tesztelendő fúrólyuktalpat. Ellenkező esetben a mérések nem a vágathajtás által módosított szekunder feszültségtérről adnak információt.

Az overcoring mérések gyakorlati kivitelezésnek számos válfaját írták már le, azonban ezek mindenképpen két fő csoportba sorolhatók:

- Az előkészítő ("pilóta-") lyuk nagyobb átmérőjű, mint a végén kialakított ún. "zseblyuk", amelyben a speciális mérőeszközt – általában ragasztással – rögzítik. Ezt követően a pilótalyuk átmérőjében történő továbbfúrással kifúrják a mérőeszközt is tartalmazó kőzethengert. A mérőműszer legtöbbször a háromdimenziós deformációs tér meghatározott irányú komponenseinek mérésére alkalmas, legalább 9 deformációs irány mérésére alkalmas cella, így felhasználásával a térbeli feszültségállapot rekonstruálható (a CSIRO Hollow Inclusion cellában általában 12 db, különféle helyzetű deformációmérő bélyeg és egy referencia-bélyeg található). A módszer alapváltozata N. Hast nevéhez fűződik.
- A másik módszer a kizárólag síkbeli feszültségkomponensek meghatározására alkalmas eljárás az ún. Doorstopper-módszer, amit először E. R. Leeman alkalmazott 1964-ben. Itt a fúrás során az átmérő végig állandó marad. A síkbeli maximális és minimális normálfeszültség meghatározásához legalább 3 irányú deformációmérés szükséges, de a gyakorlatban 4 mérőbélyeges rendszereket alkalmaznak. (A mérés menetét az alábbiakban részletesen ismertetjük.)

Bár a magyar nyelvben ez még nem teljesen tisztázott, célszerű lenne a két alapváltozatot nevében is megkülönböztetni. A feszültségmentesítés geometriája miatt az első esetet "*mag-körülfúrásos*", míg a másodikat "*mag-túlfúrásos*" módszernek nevezhetjük.

A 2. ábrán egyaránt bemutatjuk a mag-körülfúrásos illetve mérésekhez alkalmazható Hollow Inclusion (HI) cellát (2a. ábra) és a síkbeli mag-túlfúrásos mérésekre kifejlesztett CSIR Doorstopper cellát (2b. ábra).



2. ábra: a HI cella (a) és a Doorstopper cella (b)

3.2 Az overcoring mérések előkészítésének és kivitelezésének menete

A mag-körülfúrásos és a mag-túlfúrásos mérések fúrástechnológiai előkészítése értelemszerűen különböző. Az első lépésben ugyan mindkét esetben simára kell csiszolni a kijelölt lyuktalpat, viszont – mivel a Doorstopper cella közvetlenül erre a felületre kerül majd, a létrehozott felület minőségének itt különösen jónak kell lennie. A mag-körülfúrásos méréshez a sima lyuktalpról kisebb átmérőben, koncentrikusan előre kell fúrni, és az így kialakított zseblyuk talpát is meg kell csiszolni.

Az előkészítő műveletek után az overcoring mérések kivitelezésének menete nagyjából azonos; függetlenül a beragasztott cellák típusától. A 3. ábrán a mag-túlfúrásos módszer alapváltozatának általános sémáját mutatjuk be: A megfelelően előkészített fúrólyuktalpra (1.) egy központosító eszköz segítségével egy, a síkbeli deformációk mérésére alkalmas, a Wheatstone-híd elvén működő eszközt ragasztanak (2.), melynek átmérője jóval kisebb, mint a továbbfúráskor alkalmazni kívánt szimpla falú magcső belső átmérője. A ragasztó megszilárdulása után a mérőfej egyes bélyegeinek alapértékeit regisztrálják (3.), majd az installáló szerszámot a lyukból eltávolítják (4.). Ezt követi a továbbfúrás (5), aminek során legalább fúrólyuk kétszeres átmérőjének megfelelő előrehaladást kell elérni annak érdekében, hogy a feszültségváltozások a mérés során teljes mértékben bekövetkezzenek. (A mag-körülfúrásos mérésnél értelemszerűen ennél is hosszabban, legalább a zseblyuk teljes mélységéig kell továbbfúrni). A továbbfúrás végén a teljes mag, illetve a rá ragasztott mérőeszköz kinyerésre kerül (6.), és egy megfelelő mérőműszerrel a változások kiolvashatók.

A 3. ábrán bemutatott alapváltozat igen nagy hátránya, hogy a deformációmérő bélyegeken észlelhető változásokat a ragasztást követő alapállapot és a kifúrást követő értékek különbözeteként állítja elő. Ily módon nincs lehetőség sem a kifúrás során fellépő, az értékelést erősen zavaró hőmérsékleti változások kontrollálására, sem pedig a teljes deformációs folyamat nyomon követésére. Ezért az ilyen mérések általában igen nehezen értelmezhetők. Ezt a hátrányt kezdetben olyan megoldásokkal próbálták kiküszöbölni, amik biztosítják, hogy a jelkábelek a kifúrás során a forgó fúrószerszám öblítőfején keresztül a felszínre juthassanak. Ez azonban technikailag igen körülményes és nem túl biztonságos módszernek bizonyult.

Egy fejlettebb megoldás szerint a mérőcellát elektronikus mérő- és adatgyűjtő egységgel egybeépítve kell a lyuktalpra ragasztani, és az adatok a mérési folyamat során folyamatosan, egységnyi időközönként a memóriába kerülnek. Ezzel a módszerrel a mérési folyamat is lényegesen leegyszerűsödik, másrészt pedig a fent említett hibák kiküszöbölhetők.



3. ábra: A Doorstopper cellás mérések alapváltozatának kivitelezése

A BAF kutatására kialakított föld alatti kutatólaboratóriumban, a vágathajtás hatására a vágatköpenyben kialakuló feszültségváltozás meghatározására sikeresen alkalmaztuk a térbeli feszültségmeghatározásra is alkalmas CSIRO HI cellákat (Kovács (2006)). Ezért kézenfekvőnek tűnhet az a kérdés, hogy miért nem az ilyen típusú cellára alapozva kezdtük meg az overcoring módszerek továbbfejlesztését. Ennek legfontosabb oka éppen az volt, hogy a 14 csatornás HIcellához – minden bizonnyal a méretkorlátok és a fokozott tápellátási igény miatt – mind a mai napig sehol a világon nem fejlesztettek ki megfelelő lyuktalpi mérő- és adatgyűjtő egységet; így az kizárólag a vele egybeépített kábelen keresztül mérhető (A Doorstopper cellához már a 90-es évek közepén is létezett kereskedelmi forgalomban kapható lyuktalpi adatgyűjtő). Amint azt a fentiekben bemutattuk, a kifúrás közben fellépő deformációs és hőmérsékleti folyamatok gyakori mintavételezéssel történő kontrollja a megbízható primer feszültségmérések záloga. Így a lyuktalpi adatgyűjtés lehetőségének hiánya – bár ez a feszültségváltozás-mérések során a kőzetfalban érintetlenül maradó cellák esetében nem jelent különösebb problémát – a primer feszültség meghatározásában igen nagy hátrányt jelent. A másik ok szintén a kábeles kivezetésben keresendő: A nagy érzékenységű elektromos ellenállás-mérésen alapuló mérőbélyeges módszerek esetében a kábelhossz értelemszerűen nem növelhető egy határon túl. (A gyártó cég legfeljebb 20 méteres kábellel szerelve szállítja a cellákat.) Hazai földtani viszonyaink között, felszínről mélyített fúrások esetén ez a hatótávolság általában elégtelen, mivel ebben a mélységben sokszor fiatal, konszolidálatlan üledékek, vagy még erősen mállott, bontott illetve erősen repedezett, diszkontinuitásokkal sűrűn átjárt kőzetváltozatok települnek. Az overcoring módszer nemzetközi irodalma szerint mind a mérések kivitelezhetőségét, mind pedig azok értékelhetőségét rontja, ha azokat ilyen kőzetviszonyok között kell végrehajtani. Így a hatótávolság növelése a sekélyfúrásokra épülő mérési program kapcsán elengedhetetlennek tűnt. Ezt pedig csak a Doorstopper cellás rendszerrel lehetett megoldani.

4 A TOVÁBBFEJLESZTETT DOORSTOPPER MÓDSZER ELEMEI

A Doorstopper módszer továbbfejlesztésének célja az volt, hogy nyugalmi vízszint alatt, legalább 60-70 m-es hatótávolsággal, a kivitelezést és az értékelést zavaró hatások lehető legteljesebb mértékű kiküszöbölésével lehetővé váljon az in situ feszültségmérések hatékony végrehajtása. Ennek érdekében a szerzők által több lépcsőben megvalósított célorientált program keretében kifejlesztésre került egy új mérő- és adatgyűjtő műszer, valamint megtörtént az előkészítési illetve mérési technológia egyes elemeinek teljes körű felülvizsgálata, szükség esetén módosítása is.

4.1 Az új lyuktalpi mérő- és adatgyűjtő műszer

Amint azt említettük, a kereskedelmi forgalomban már korábban is beszerezhető volt olyan automatikus mérő-adatgyűjtő eszköz (Intelligence Acquisition Module – IAM), ami a magtúlfúrásos mérések céljaira is felhasználható. Ezzel az eszközzel kapcsolatban a méréseket kivitelező szakemberek korábban, a kanadai AECL száraz fúrólyukakban elvégzett kísérletei kapcsán már tapasztalatot szereztek. Úgy ítélték azonban meg, hogy az IAM – számos, igen kedvező tulajdonsága ellenére – nyugalmi vízszint alatt tervezett mérésekhez nem lesz felhasználható. Ennek elsődleges oka, hogy az IAM túl sok energiát fogyaszt. Telepes, szuverén energiaellátása mintegy 2-3 óra altatási idő után a szokásos mérési sűrűség (5-7 sec/kiolvasás) mellett legfeljebb 1-1,5 órás mérési időszakot tett lehetővé. Ezzel szemben az elvégzett előzetes tesztek szerint a nyugalmi vízszint alatt egyáltalán alkalmazható ragasztóanyagok kötési ideje a lyuktalpon észlelhető 10-12°C hőmérséklet mellett minimálisan 6-8 óra. Az IAM másik kedvezőtlen tulajdonsága, hogy a telepek teljes kimerülése esetén a memória törlődik. Tehát alkalmazása esetén a fúrólyukban, a mérés vagy a szerszám kiépítése során bekövetkező esetleges bármilyen, nagyobb időigénnyel járó technikai probléma könnyen teljes adatvesztéshez vezethet.

A fentiek miatt még 2002-ben, az Oszkomp Kft. közreműködésével sor került az említett problémákat kiküszöbölni képes, teljes funkcionalitású új mérő-adatgyűjtő egység kifejlesztésére és megépítésére. Az eszköz legfontosabb jellemzői a következők:

- A teljes elektronikus rendszert a folyamatos szuverén energiaellátásra szolgáló telepekkel együtt – a meglehetősen szűk geometriai lehetőségek figyelembe vételével kellett kialakítani. A víz alatti mérési programnak megfelelően az elektronikus egységeket 2,0 MPa víznyomást szivárgásmentesen elviselő tokozással láttuk el.
- Az elektronikus mérőegység a Doorstopper cellában található 4 db mérőbélyeg hibaáram-jelét a műszerbe épített beépített stabil kompenzátor-bélyegek segítségével változtatható (paraméterezhető) gyakorisággal képes meghatározni, feldolgozni és deformációjellé alakítva tárolni. Az ugyancsak a műszerben elhelyezett referencia-híd jelét is folyamatosan rögzíti. A mérőbélyegek jelének mérése 12 bites felbontással történik. A deformációmérés pontossága < 10⁻⁶ m/m, a linearitási hiba: 0,0015% FS. A mérőműszer megoldja a cellába épített termisztorok ciklikus kiolvasását is. A hőmérsékletmérés hibája < 0,1 °C.
- A mintavételezés lehetséges maximális gyakorisága 1 sec, míg minimális gyakorisága 999 sec (az összes mérendő csatornára vonatkoztatva). Az aktív mérési időszakot megelőző altatási periódus hosszát a paraméterezés során 0 perc és 24 óra között tudjuk változtatni.
- A rendszerinformációk és a mért értékek tárolása a tápellátás esetleges zavarai esetén sem törlődő módon került megoldásra. A memória mérete 5 sec adatgyűjtési sűrűség esetén 3 órányi mérési adatsor tárolására elegendő.
- Az energiaellátás és a mérő-adatgyűjtő egység áramfelvétele olyan, hogy az állandó 10-12 °C körüli környezeti hőmérséklet és 7-8 sec adatgyűjtési sűrűség mellett akár 10-14 órás altatási időszakot, majd azt követően 4-5 órás mérést biztonsággal lehetővé tesz.
- A rendszerinformációk (relatív indítási időpont, mintavételi gyakoriság, erősítési faktor) beállíthatósága és a gyűjtött adatok lekérdezhetősége érdekében kialakításra került az egység kapcsolata egy külső PC-vel. Így az összegyűjtött adatok a mérés befejezése és az adatgyűjtő fúrólyukból való visszanyerése után hordozható számítógépbe kerülhetnek, amellyel azonnal elvégezhető az eredmények előzetes megjelenítése is.

Az egyes méréssorozatok előtt értelemszerűen el kell végezni a mérőműszer kalibrációját mind a deformációs-, mind pedig a hőmérsékleti csatornák tekintetében.

A 2002-ben elvégzett méréssorozat tapasztalatai alapján – elsősorban a deformációjelek stabilizálása érdekében – 2004-ben sor került a prototípus jelentős átalakítására és továbbfejlesztésére is. A 2004-ben és a 2007-ben végrehajtott méréssorozatokhoz már az új szondákat használtuk.

4.2 Az előkészítési és mérési technológia további elemei

A mérési program megbízható és eredményes kivitelezése érdekében alapvető, hogy az in situ tesztek folyamatos hőmérsékleti kontroll mellett történjenek. Számos esetben ugyanis csak a

hőmérsékleti változások elemzése teszi lehetővé a lyuktalpon lezajló folyamatok teljes megértését, illetve ez teszi lehetővé a hőmérsékleti korrekciós számítások végrehajtását is. Sajnos a gyártó ennek ellenére kizárólag termisztor nélküli cellákat szállít. Kezdetben magába az adatgyűjtőbe próbáltunk termisztort építeni, ez azonban nem bizonyult megfelelő megoldásnak. Az előzetes tesztek ugyanis azt mutatták, hogy az erősen eltérő termikus viselkedésű anyagok (kőzet illetve fém) mellett az így beépített termisztor nem reprezentálja megfelelően a lyuktalpon, a kifúrás során lezajló hőmérsékleti változásokat. Ezért a termisztorokat nyomásálló módon, a Doorstopper cellák lyuktalpra ragasztandó felületébe építettünk be, és gondoskodtunk arról, hogy azok jelei is a mérő-adatgyűjtő egység megfelelő csatornájára kerüljenek.

A fúrástechnológiai előkészítés műveleteinek továbbfejlesztésében jelentős segítséget nyújtottak a fúrási munkákat kivitelező Rotaqua Kft. szakemberei. A megfelelő minőségű fúrólyuktalp kialakítása több fokozatban, speciális talpcsiszoló szerszámok alkalmazásával történik. Az utolsó fokozatban a szerszámra szerelt ún. iszapcsővel összegyűjthetővé és a lyukból kiemelhetővé válnak a talpon képződő durvább kőzetszemcsék, amik – különösen függőleges helyzetű fúrólyukban – igencsak megnehezíthetik a mérőegység talpra ragasztását. Annak érdekében, hogy a fúrólyuk felsőbb szakaszairól se történhessen utánhullás, és a talpra juttatott mérőegységnek a legmagasabb szintű mechanikai védelmet biztosítsuk, egy másik fontos újítást is bevezettünk: A nemzetközi gyakorlattal ellentétben az utolsó csiszolási fokozat után a végleges, a kifúráskor alkalmazandó fúrószerszám-összeállítással talpig be kell épülni. Egy tiszta vizes öblítési fázist követően így a lyuktalp minősítése és a mérőegység installálása is a fúrórudazat védelmében történhet. Mivel ez a megoldás még inkább leszűkíti a rendelkezésre álló helyet, valamennyi felhasznált eszköz (lyukkamera, szemcsegyűjtő fej, installáló szerszám) tervezésénél és legyártásánál különleges, egyedi megoldásokra volt szükség.

A talpkialakítás ellenőrzésére alkalmazott, jelenlegi kiépítésében 70 m hatótávolságú optikai lyukkamera szintén saját fejlesztés. Fontos sajátossága, hogy lehetővé teszi a talpsík több irányból történő, szabályozható fényerejű megvilágítását. Ez a megoldás jelentősen megkönnyíti a lyuktalp tektonikai vagy technológiai eredetű egyenetlenségeinek, hibáinak azonosítását. A lyuktalpak állapotának ellenőrzése és dokumentálása minden esetben digitális mozgóképes felvételekkel, hangrögzítéssel történik. Az egyes, előkészített lyuktalpakról illetve a fúrólyukak kritikus szakaszairól ezen kívül JPEG formátumban állóképes dokumentáció is készül. A 4a. ábra egy olyan lyuktalpat mutat be, amit egy jól látható, széles repedés miatt ragasztásra alkalmatlannak kellett minősíteni. A 4b. ábrán ezzel szemben egy jól kialakított, problémamentes talp látható.



4. ábra: Lyukkamerával mérésre alkalmatlannak (a.), illetve alkalmasnak (b.) minősített lyuktalp

A nyugalmi vízszint alatti mérésekhez alkalmas ragasztó kiválasztása igen nehéz feladatnak bizonyult. A kötés ütemét és megfelelőségét ugyanis erőteljesen befolyásolják a hidro- és kőzetgeokémiai viszonyok, valamint a fúróberendezéshez használt olajok és zsírok. Arra is te-kintettel kellett lenni, hogy a megkötött ragasztó Young-modulusa azonos nagyságrendbe essen a mérendő kőzetével, mert ellenkező esetben a ragasztó "elnyelhetné" a mérendő jelek nagy részét. Több, sikertelennek bizonyult próbálkozás után végül is egy speciális kétkomponensű,

Kovács-Bogár

műgyanta alapú ragasztóanyag mellett döntöttünk, amelynek kötésideje – a környezeti viszonyok függvényében általában 7 és 12 óra között változik.

Az installáláshoz használt rudazat helyzetének beállítása révén a mérőegység mindig orientált módon, azonos pozícióban kerül beragasztásra. A cella központosított helyzetéről az installálófej automatikusan gondoskodik. A fej szerkezeti felépítése olyan, hogy amennyiben a ragasztás mégsem lenne megfelelő, úgy a mérőegység benne marad és a felszínre kerül anélkül, hogy a forgó fúrószerszám tönkretehetné. Az 5. ábrán az installálófejbe helyezett, Doorstopper cellával egybeépített adatgyűjtő egység és a ragasztás folyamata látható.

A megfelelő minőségű fúrólyuktalp kialakítása és ellenőrzése, a mérőegység előkészítése és talpra juttatása, a szabályozott kifúrás és szonda-visszanyerés folyamata mind rend-



5. ábra: A ragasztóanyag felhordása az installálófejbe helyezett, adatgyűjtővel egybeépített cellára

kívüli figyelmet és precizitást igénylő művelet, amelynek során akár egyetlen kis hiba vagy eltérés is meghiúsíthatja az adott mérés sikerét. Éppen ezért a mérési program megindulása előtt írásos ellenőrzési listát állítottunk össze, amit a kivitelezés során szigorúan követni kell. Ugyanezen ellenőrzési listán kerülnek rögzítésre azok a környezeti- illetve időadatok is, amik nélkülözhetetlenek az értékelés folyamatához.

Az már az AECL által a BAF-ban kialakított föld alatti kutatólaboratóriumban elvégzett mérések tapasztalatai után is világos volt, hogy a lyuktalpi hőmérséklet kifúrás közben bekövetkező nagyobb változása jelentősen befolyásolja a kialakuló deformációs folyamatokat. A hőmérsékletváltozásokból, valamint a feszültségmentesítésből eredő deformációs hatások egymásra szuperponálódnak; nagyon megnehezítve az értékelést. A már említett komplex termikus folyamatok miatt a közvetlen lineáris hőmérsékleti korrekció biztosan nem vezethet eredményre. Ezért alapszabály, hogy törekedni kell a hőmérsékletváltozás csökkentésére. Ebből a szempontból a mérések víz alatti kivitelezése kifejezetten kedvező körülménynek számított, hiszen a felszíni, sekély mélységű fúrólyukakban lévő – alapállapotban 10-12 °C hőmérsékletű – víz csökkentette a fellépő hőmérsékletkülönbségeket. (Az AECL száraz lyukban végzett mérései során a kifúrás közben nem egyszer 18-20°C hőmérsékletkülönbség is előállt!) A felszíni mérések szélsőséges környezeti hőmérsékleti viszonyai mellett azonban a több m³ térfogatú öblítőtartály vízének stabil és hatékony temperálása nehéz feladatnak bizonyult. Első lépésben a legegyszerűbb módszerrel, a kifúrás megfelelő időzítésével próbálkoztunk: Már azzal is több fokos hőmérsékletcsökkenést lehetett elérni, ha a kifúrásra az éjszakai ragasztási szünet után, hajnalban, illetve kora reggel került sor. 2002-es méréssorozat első négy mérése azonban megmutatta, hogy ez nem elégséges.

Az IAM adatgyűjtővel végzett overcoring mérések nemzetközileg elfogadott gyakorlata szerint – az adatvesztés elkerülése érdekében – a kifúrás végeztével azonnal magszakítás és kiépítés következik. A fentiekben részletezett okok szükségessé, a saját fejlesztésű adatgyűjtő kedvező tulajdonságai pedig lehetővé tették, hogy továbbfejlesztett módszerünk ne ezt a rossz gyakorlatot kövesse. Az új adatgyűjtővel ugyanis – az öblítővíz kiindulási hőmérsékletének és a beállított adatgyűjtési sűrűségnek megfelelően – a magszakításra és a kiépítésre akár több óra múlva is adatvesztés veszélye nélkül kerülhetett sor. Így az első, kedvezőtlen tapasztalatok alapján úgy döntöttünk, hogy a magszakítás és a kiépítés előtt minden esetben 1-2 órás hőmérsékleti stabilizációs időszakot iktatunk be. A kiterjesztett mérési időszakban rögzített deformációs és hőmérsékleti adatok jelentősen fokozták a mérések megbízhatóságát. A 2002. évi tesztsorozat első négy mérését leszámítva mindegyik fúrás teljes mérési programjában alkalmaztuk az utólagos hőmérsékleti stabilizáció módszerét.

A 6. ábra egy ilyen, közel 1,5 órás "pihentetéssel" elvégzett mérés regisztrátumát mutatja be. Az ábrán jól látható, hogy az adott mérésnél, az öblítővíz előtemperálása nélkül még egy ilyen hosszú stabilizációs időszak sem volt elegendő ahhoz, hogy a kiinduló hőmérsékletre hűljön vissza a lyuktalp. A gyakorlati tapasztalatok szerint a hőmérsékleti stabilizáció akkor tekinthető teljes értékűnek, ha a kiinduló és a végső lyuktalpi hőmérséklet különbsége nem haladja meg a 0,5-1°C-t, mert ebben az esetben a hőmérsékleti hatásból eredő deformáció már a mérési hibahatár alá kerül. A 2002. évi méréssorozatok során bebizonyosodott, hogy ez a követelmény a nyári időszakban még az utólagos pihentetéssel sem teljesíthető. Ezért 2004-ben kifejlesztettünk és üzembe állítottunk egy olyan hűtőberendezést, amellyel az öblítővíz hőmérsékletét 0,5 °C pontossággal be lehet állítani és a mérés közben állandó értéken lehet tartani. Az e berendezés alkalmazásával végzett mérések immár valóban zavarmentesnek és teljes értékűnek tekinthetők.



6. ábra: Egy 1,5 órás hőmérsékleti stabilizációs időszakkal kiegészített mérés regisztrátuma

Meg kell említeni, hogy a hőmérsékleti probléma kezelésére az említetteken túl más irányú kísérlet is történt. 2003 év folyamán a cseh Dolexpert-Geotechnika végeselemes (FEM) módszerrel egy 2D-s kapcsolt termikus-mechanikai-hidraulikai (T-M-H) modellezési programot hajtott végre (Doležalová et al (2003)). E munka célja egy olyan numerikus modell illetve tesztelési program kidolgozása volt, amely közelít az in situ mérési eredményekhez, és lehetővé teszi a feszültségfelszabadulásból származó, tehát mechanikai-hidraulikai (M-H) hatásra illetve a hőmérsékletváltozás hatására (T) létrejött deformációk szétválasztását és ezzel a hőmérsékleti korrekció meghatározását. Mind a Mórágyi Gránitban 2002. évben, mind pedig a BAF föld alatti kutatólaboratóriumában végzett, jelentős hőmérsékleti hatásokat magán viselő mérések közül 2-2 teszt feldolgozására került ily módon sor.

A modellezők tulajdonképpen "numerikus Doorstopper teszteket" építettek fel. A numerikus modellnek az in situ Doorstopper teszthez való illesztése olyan változatok segítségével történt, amelyek vizsgálták a feladattípusnak, az anyagmodellnek, a mechanikai és hőtani paramétereknek valamint más tényezőknek (pl. a K_0 nyugalmi oldalnyomás-tényezőnek) a számítási eredményekre gyakorolt hatását. Az in situ Doorstopper teszthez illeszkedő numerikus Doorstopper teszt és az ahhoz tartozó M–H illetve T–M–H megoldások eredményeinek összevetésével meghatározhatóvá vált a mérések kiértékeléséhez szükséges hőmérsékleti korrekció nagysága.

A Mórágyi Gránit tesztjei kapcsán végzett modellezés el is érte célját: Megfelelő paraméterezéssel (pl. magas oldalnyomási tényezők feltételezésével) a mérési eredményekhez jól illeszkedő deformációlefutást kaptak. Kimutatták, hogy a csaknem 7°C hőmérsékletváltozás okozta többlet deformáció mindkét elemzett tesztnél magasabbra adódik, mint maga a feszültségmentesítés kapcsán mérhető érték. A modellezés eredményeképp elvileg a jelentős hőmérsékletváltozással, hőmérsékleti stabilizáció nélkül elvégzett mérések is értékelhetővé váltak.

Sajnos az AECL által a BAF-ban végzett mérések esetében a kitűzött célt nem sikerült ilyen egyértelműen elérni. A modellezés kimutatta, hogy a mérési eredmények közelítése csak több, meglehetősen leegyszerűsítő feltevéssel lehetséges. A regisztrált deformációgörbék sajátságos alakulását nem lehetett kizárólag a hőmérsékletváltozással magyarázni. A megnyugtató eredmény eléréséhez 3D-s modell felépítésére lenne szükség.

A kifúrás során felvett kőzetdeformációs adatsorok az értékelhetőség szempontjából csak az adott magdarabra (sőt anizotróp kőzetek esetén az adott irányokra) érvényes feszültségdeformáció összefüggés meghatározása után válnak teljessé. Ezért – amennyiben a mag állapota ezt lehetővé tette – úgy a mérőegységgel együtt kifúrásra kerülő magon haladéktalanul el kellett végezni az ún. Hooke-cellás (biaxiális) teszteket is. A biaxiális tesztek tapasztalatai alapján a Corthesy et al (1993) által kidolgozott értékelő algoritmust úgy módosítottuk, hogy az alkalmassá váljon az irányonként eltérő deformációs modulusok kezelésére.

Világszerte valamennyi overcoring teszt kapcsán az említett biaxiális teszteket alkalmazzák a feszültség-deformáció összefüggés meghatározására, ezért az eddigi mérési programok kapcsán mi is ezt az eljárást használtuk. Ennek kapcsán azonban komoly problémaként kell felvetni azt, hogy a laboratóriumi mérések tapasztalatai alapján a fel- illetve leterhelési irányokban az alakváltozási pályák általában különbözőek. Így a biaxiális tesztekkel nem minden esetben lehet megnyugtatóan közelíteni a kifúrás körülményeit. Véleményünk szerint a módszer tökéletesítésének folyamatában ezt a fontos elvi kérdést minél gyorsabban tisztázni kell.

5 A FELSZÍNI SEKÉLYFÚRÁSOKBAN VÉGZETT MÉRÉSI PROGRAMOK EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

5.1 A Mórágyi Gránit Formációban 2002-ben végzett mérések

A továbbfejlesztett rendszerrel végrehajtott első mérési programra a Mórágyi Gránit Formáció minősítési programja keretében, 2002. júliusa és októbere között került sor. A mérések helyszíne a Bátaapáti, illetve Mórágy községek térségében mélyített négy, egyaránt völgytalpi helyzetű, legfeljebb 50 m talpmélységű sekélyfúrás (Üh-32/C, Üh-33, Üh-34 és Üh-35) volt. A tervek szerint a méréseket a fúrások 20 és 50 m közötti, ép gránitot harántoló szakaszain kellett megvalósítani. Az Üh-32/C jelű fúrásban 9, az Üh-34-ben 8, az Üh-33-ban 4, míg az Üh-35-ben 3 teszt került kivitelezésre.

A fúrási és mérési geometriából következően a mérések célja a horizontális síkban uralkodó feszültségek meghatározása volt. Az értékeléshez szükséges vertikális feszültség értékét az önsúlyterhelésből számítottuk.

A overcoring-célú fúrások egységesen völgytalpi helyzetűek voltak. Így nem volt vizsgálható, hogy a térség topográfiai viszonyai milyen hatással voltak a sekély mélységben meghatározott eredményekre.

A fúrásoknak a mérésekre nem megfelelő kőzetanyagú, gránitmurvás illetve töredezett, mállott, omlásra hajlamos felső szakaszai (a 0-20...25 m közötti intervallum) palástcementezett csövezéssel kizárásra kerültek. Az Üh-32/C-t leszámítva sajnos a fúrások nyitott szakaszai is kedvezőtlen mechanikai állapotú, repedezett, sokszor erősen mállott gránitot harántoltak. Ez a körülmény mindenképpen hátrányosan befolyásolta a mérések kivitelezhetőségét és értékelhetőségét is. A 24 db elvégzett tesztből 7 db korai magtörés miatt nem teljes értékűnek bizonyult, noha a kialakított lyuktalpak kamerás ellenőrzése ezekben az esetekben is ragasztásra megfelelő helyzetet mutatott. Amint azt korábban említettük, további 4 mérés a hőmérsékleti stabilizáció hiánya miatt csak numerikus modellezés útján vált értékelhetővé. A legsúlyosabb problémák az Üh-35 jelű fúrásban jelentkeztek. Itt ugyanis a fúrólyuk előkészítése kapcsán elkövetett fúrástechnológiai hibák miatt mindössze egy, nem teljes értékű tesztet sikerült végrehajtani (a másik két esetben a fúrószerszám már a kifúrás első fázisában letörte a talpról a mérőegységet).

Az egy-egy fúrásban többszörös ismétléssel elvégzett tesztprogram végrehajtása a vázolt problémák ellenére is lehetővé tette a horizontális síkbeli feszültségállapot meghatározását az

egyes fúrások térségében. A 7. ábrán a fúrások helyszínét és a mérések végeredményét összefoglaló módon ábrázoló térképet láthatjuk. Az ábrán feltüntetett eredmények a zavartalan, hőstabilizált, egyértelműen értékelhető mérésekből származnak. A könnyebb érthetőség kedvéért feltüntettük az ábrázolt feszültségek léptékét is (3 MPa).



7. ábra: A Bátaapáti és Mórágy térségében végzett mérési program eredményeinek összefoglaló ábrázolása

- A 7. ábrán szereplő adatok alapján összefoglalóan a következőket lehet megállapítani:
- Az ÜH-34, ÜH-33 és ÜH-35 jelű fúrások méréseiből számított, e szempontból nagyjából ellentmondásmentes eredmények alapján kijelenthető, hogy a vizsgált területen és mély-ségtartományban általában kompressziós jellegű feszültségtér van jelen.
- A vizsgált térségben a meghatározott horizontális normálfeszültségek nagysága többszörösen meghaladja a vertikális feszültség önsúlyterhelésből számítható 1 MPa alatti elméleti értékét. (Amint azt Brown & Hoek (1978) munkái megmutatták, ez nem egyedi mérési eredmény.) Így a fenti kijelentés alapjaiban véve várhatóan akkor sem fog megváltozni, ha a tényleges vertikális feszültség az elméletinél jóval nagyobbra adódna.
- A horizontális síkban uralkodó normálfeszültségek abszolút értékéről és helyzetéről vázlatosan a következők mondhatók el: Zavartalan állapotban jellemző az É-D-i irány körül hajladozó, 5-6 MPa körüli maximális illetve 2 és 4 MPa közötti minimális horizontális normálfeszültség. A nem teljes hőmérsékleti stabilizáció miatt ezek az értékek ugyan ki-

sebb mértékben csökkenhetnek, de a figyelembe vett, teljes értékű méréseknél ez a hatás nem túlságosan jelentős.

- Az ÜH-34 illetve az ÜH-33 fúrás zavartalan méréseiből számított, a síkbeli feszültségkomponensek helyzetére vonatkozó adatok egymástól látszólag karakteresen eltérnek (a σ_{max} ÉÉK-DDNy-i, illetve ÉÉNy-DDK-i iránya). A síkbeli normálfeszültségkomponensek helyzetének meghatározásában rejlő viszonylag magas bizonytalanság mellett nem állapítható meg, hogy mindez valamilyen földtani-tektonikai okra, iránymeghatározási hibára vezethető-e vissza, vagy esetleg a völgytalpak orientációja befolyásolta-e ilyen mértékben az eredményeket.
- Az egy-egy fúrásban végzett több méréssel a függőleges szelvény mentén mindig kimutatható volt a lokális jellegű törések, földtani zavarok hatása. Ezek közelében a kompressziós jelleg általában megmarad. A törés közelében lecsökkenő, azt követően pedig megnövekvő normálfeszültségek a jellemzők. Ez az eredmény alátámasztja azt a bányászati gyakorlatban közismert elvet, miszerint a mechanikai egyensúly fenntartása érdekében az ép területek felveszik a zúzott zónák által "áthárított" kőzetnyomást.

A fentiekben felsorolt, általános megállapítások az ÜH-32/C fúrással feltárt térrészre egyáltalán nem vonatkoznak. Ki kell emelni, hogy az ÜH-32/C volt az egyetlen olyan fúrás, amely megfelelő, sőt kifejezetten kedvező mechanikai állapotú gránitot harántolt. A fúrás mindössze 2,5 m-es szakaszán elvégzett 9 db teszt adatai rendkívül meglepőek voltak. Az itt végzett mérések túlnyomó többségénél negatív (húzásos) normálfeszültsége(ke)t határoztunk meg. Ezek helyzete a rövid mérési intervallumon belül folyamatosan és jelentős mértékben változott. A mérési közeg jó mechanikai állapota és az azonos módszerrel, nagy ismétlésszámmal elvégzett zavarmentes mérések miatt kizárható, hogy ezek az eredmények esetleges mérési hiba miatt adódtak volna.

Meg kell jegyezni, hogy a mérések között akadt "normális", tehát típusos lefutású deformációs görbéket eredményező is. A 7. ábra térképén az ebből számított feszültség-értékeket a húzásos adatokkal együtt feltüntettük.

A 8. ábrán egy, az Üh-32/C fúrásban felvett anomális viselkedést mutató regisztrátum látható. Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a kifúrás hatására valamennyi mért irányban negatív irányú deformáció lépett fel, mintha a kőzetre a kifúrás előtt minden síkbeli irányban húzófeszültségek hatottak volna.



8. ábra: Az Üh-32/C fúrásban elvégzett egyik, anomális regisztrátumokat produkáló mérés

A mérések szerint mintegy 30 m-es felszín alatti mélységben uralkodó negatív normálfeszültségek jelenlétét, illetve a nagyfokú változékonyságot kőzetmechanikai szempontból legjobban talán a jól ismert Brasil-típusú laboratóriumi húzószilárdság-vizsgálati módszer analógiájával lehet magyarázni: A Brasil teszt során az ép hengeres magmintát két, egymással szemközti palástalkotója mentén (általában vízszintes) nyomólapokkal terhelik. Így a palástalkotók által kijelölt (általában függőleges) irányban kizárólag nyomófeszültségek lépnek fel. Erre merőlegesen viszont az elmozdulás nem korlátozott, ezért ebben az irányban húzófeszültségek alakulnak ki, melyek végül aztán a mintatest függőleges sík mentén történő eltöréséhez vezetnek. Egy adott terhelési állapotban a vízszintes húzófeszültségek nagysága a hely függvénye. Maximumát a hengeres minta tengelyvonalában éri el, míg a hengerpalást bármelyik alkotója felé haladva folyamatosan (általában zérusig) csökken, illetve a nyomólapok közelében a nyomási tartományba is átlép. Hasonló kép akkor is kialakulhat, ha a fő terhelési síkra merőlegesen az elmozdulást korlátozzuk: Amíg az alkalmazott korlátozó nyomóerő egy meghatározott szintet nem halad meg, a mintatest belsejében bizonyos irányokban húzófeszültségek léphetnek fel.

Amennyiben az említett terhelési mező mellett a kérdéses mintatesten belül gondolatkísérletként, kis léptékben "overcoring feszültségméréseket" hajtanánk végre, ezek nagy valószínűséggel hasonló módon változékony eredményeket hozhatnának, mint amilyeneket az ÜH-32/C fúrás kapcsán a fentiekben leírtunk. Ennek az lenne az egyetlen feltétele, hogy a mintatest "átfúrását" ne pontosan a terhelési főirányban, vagy arra merőlegesen végezzük el. Ez az egyszerű modell tehát jól illeszthető az ÜH-32/C fúrás vizsgált szakaszára.

Célszerű azt is megvizsgálni, hogy milyen földtani-tektonikai jelenség alakíthat ki egy ilyen terhelési szituációt. Erre egyetlen kézenfekvő magyarázat lehet: A kérdéses fúrás környezetében egy olyan nagyobb léptékű, jelenleg is aktív, oldaleltolódásos jellegű tektonikai elem található. A vonatkozó szakirodalom szerint ilyen esetekben a torlódásos (feszültségmaximummal jellemezhető) illetve feszültségszegény zónák sűrűn váltogathatják egymást. Így egyes kőzetblokkokon belül – bizonyos irányokban – könnyen előfordulhat, hogy az elmozdulás korlátozása elégtelen, vagy teljesen hiányzik, tehát húzófeszültségek alakulhatnak ki.

A mérési program eredményei közül ki kell még emelni a késleltetett deformációra (kúszásra) vonatkozó megfigyeléseket is. A 4.2. pontban említett utólagos hőmérsékleti stabilizáció időszaka alatt természetesen a kúszási jelenségek is regisztrált módon folynak a vizsgált kőzetben. Ez éppen ellentétes irányú folyamat azzal, mint amit a kifúrás után visszacsökkenő hőmérséklet indukál. Ahogy azt a 6. ábra jól szemlélteti, a termikus változás okozta deformáció mértéke a mérés során lényegesen nagyobb, mint a kúszásból származó. A jól temperált öblítővízzel, viszonylag állandó hőmérsékleten elvégzett mérések arra utalnak, hogy a vizsgált képződményekben 1-2 óra alatt minimális mértékű (mérési hibahatáron belüli) késleltetett deformáció lép fel.

5.2 A Nyugat-Mecsek területén 2004-ben végzett mérések

A BAF minősítési programja keretében 2004. év nyarán sor került a második méréssorozat kivitelezésére is. Ennek során - a korábbi méréssorozattal megegyező módon és geometriával három, egyenként szintén 50 m-esre tervezett sekélyfúrásban (Bak-5, Eg-2 és Het-6) kellett a méréseket végrehajtani. A fúrások a potenciális befogadó kőzettest (BAF) mellett az annak tágabb földtani környezetét jelentő üledékes képződmények felszínközeli zónáját tárták fel. A Bak-5 fúrásban végrehajtott 9 db és az Eg-2 fúrásban végzett 10 db teszt mindegyike a BAFban került kivitelezésre (a cellával együtt kifúrt magokat ld. a 9. ábrán), míg a Het-6 fúrásban elvégzett 7 db tesztre vékonyréteges, gumós, márga betelepülésekkel tarkított mészkő képződményekben került sor. Ez utóbbi földtani



9. ábra: Az Eg-2 fúrásban végzett tesztek során kifúrt magok

közeg egyáltalán nem kedvezett a méréseknek, mivel a szinte mindig jelentkező magtörések miatt itt mindössze egyetlen kísérlet bizonyult zavarmentesnek és teljes értékűnek.

A Mórágyi Gránit Formációban elvégzett mérési programmal összevetve megállapítható, hogy 2004-re – még a Het-6 fúrás említett problémáival együtt is – jelentősen csökkent a nem értékelhető mérések száma. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a BAF-ban végrehajtott mérések sikerességi rátája minden korábbinál magasabbra adódott (a minden szempontból teljes értékű, zavartalan mérések aránya csaknem 60% volt). A korábbi méréssorozathoz képest jelentősen lecsökkent az egyes fúrásokban végzett tesztek alapján számított eredmények szórása is. Külön kiemelésre érdemes, hogy az igen bonyolult technológia ellenére durva fúrás- vagy méréstechnikai hiba a teljes méréssorozatban nem fordult elő. A 2002. és 2004. között elvégzett fúrástechnológiai, valamint mérés- és műszertechnikai fejlesztések tehát tovább javították a kivitelezés minőségét és a mérési eredmények megbízhatóságát.

A 10. ábrán a zavarmentes mérések alapján meghatározott feszültségek alakulását a Ny-Mecsek földtani térképkivágatára helyezve mutatjuk be.



10. ábra: A Nyugat-Mecsekben végzett mérési program eredményeinek összefoglaló ábrázolása

A 10. ábra kapcsán leszűrhető legfontosabb megállapítás az, hogy a BAF-ban lefolytatott mérési program során a legnagyobb horizontális síkbeli főfeszültség (σ_{max}) hozzávetőleg 1,2 és 1,8 MPa között változik. Mivel ebben a mélységszintben a harmadik – feltételezhetően közel vertikális – főfeszültség (σ_{vert}) önsúlyterhelésből számítható elméleti értéke 0,85 MPa körül van, ennek megfelelően a síkbeli σ_{max} értéke ezen a területen is az adott pontbeli σ_1 -gyel azonosítható. A horizontális síkbeli σ_{min} jellemző értéke 0,7 és 1,0 MPa körülire adódott, tehát éppen a σ_{vert} tartományába esik. Ezért ebben a zónában a kevert jellegű, transzpressziós tektonikai stílus dominanciája valószínűsíthető. Az mindenesetre egyértelmű, hogy ebben a térségben anomálisan magas feszültségértékek nem fordulnak elő.

Igencsak meglepő volt, hogy a síkbeli főirányok tekintetében mind a Bak-5 mind pedig az Eg-2 jelű fúrásban kapott mérési eredmények két jellemző csoportba voltak besorolhatók. Mindkét fúrásban meghatározható volt egy bizonyos mélységszint, ami alatt – bár a normálfeszültségek abszolút értéke mértékadó módon nem változott – azok jelentős mértékű, közel 80°-os elfordulása volt észlelhető. A Bak-5 fúrásban a 37 és 47 fm között harántolt tektonikus zóna felett elvégzett mérésekre az volt jellemző, hogy a legnagyobb horizontális síkbeli főfeszültség hozzávetőleg ÉÉK-DDNy irányú, míg ez alatt NyÉNy-KDK-i jellegűvé vált.

Szinte ugyanezt a jelenséget figyelhettük meg az Eg-2 fúrásban is. A 24 és 33 m közti mélységszint között végzett zavartalan mérések irányukat tekintve szinte megegyeznek a Bak-5 fúrás "felső szinti" csoportjával. Bár az Eg-2 fúrásban nem tapasztaltunk olyan markáns tektonikus zónát, mint a Bak-5-ben, 38,89 m-ben itt is volt egy olyan mérés, ami egyértelműen egy, a feszültségteret jelentősen módosító tektonikus zóna közelségére utal. Itt is megfigyelhető volt az a jelenség, amikor a törés közelében (illetve azon belül) erősen lecsökkenő, majd azt követően újra megnövekvő főfeszültségeket lehet mérni. Az említett mélységszint éles választóvonalnak bizonyult az ez alatt, illetve az e felett elvégzett mérések eredményei között. A 39 m alatt elvégzett három mérés azonos jellegű, de a korábbiaktól jelentősen különböző feszültségirányokat adott. Itt is előállt tehát az az eset, hogy a tektonikus zóna alatt a főfeszültségek iránya jelentősen elfordult. A leginkább figyelemre méltó körülmény azonban az, hogy a Bak-5 és az Eg-2 fúrás mélyebb szintjein elvégzett mérésekből számított főirányok is közel megegyeznek. Ez azért érdemes különösen kiemelésre, mert bár mindkét fúrás a BAF külszíni kibúvásának határán mélyült, azok nem azonos földtani blokkban kerültek telepítésre (a Bak-5 a Büdöskúti szerkezeti öv déli, míg az Eg-2 annak É-i oldalán mélyült). Így a mérési eredményekből az az igencsak előzetes jellegű következtetés vonható le, hogy – legalábbis a vizsgált mélységtartományban – a Büdöskúti szerkezeti öv nem befolyásolja érdemben a nagyobb léptékű feszültségtér alakulását. A σ_{pmax} és σ_{pmin} helyzetének 35-40 m alatti jellegzetes megváltozása valószínűleg a felszínközeli zóna fokozott igénybevételére (extenziós eredetű jointok jelenlétére) vezethető vissza.

A Hetvehely-Magyarszék zóna közelében mélyített Het-6 jelű fúrásban végzett mérésekből levonható fontosabb következtetések az alábbiak voltak:

- A fúrásban végzett valamennyi mérés értékelése negatív értéket adott a horizontális síkbeli σ_{min} főfeszültségre vonatkozóan. A σ_{min} abszolút értékei (nyilvánvalóan a mérések közben bekövetkezett korai magtörések torzító hatása miatt) a legtöbb esetben extrém magasnak adódtak, de ez figyelembe véve a zavartalan 7. mérés adatait is valószínűleg nem módosítja azt a megállapítást, miszerint a fúrás minden bizonnyal egy nagyobb léptékű tektonikus öv feszültségtér-módosító hatása alatt mélyült.
- Kiemelésre érdemes, hogy a horizontális síkbeli σ_{max} értékek meglepően kis szórással a Bak-5 és az Eg-2 kapcsán már említett tartományba esnek. Az irány meghatározására megbízhatóan csak az 55 m mélységben elvégzett 7. mérés eredménye alkalmazható. Eszerint a σ_{max} iránya közel esik a másik két fúrás mélyebben elvégzett tesztjeiből meghatározottakhoz.
- Az 50 m körüli mélységben elvégzett méréseknél a σ_{vert} elméleti értéke 1,25 MPa körül alakul. Így ismét csak elsősorban a 7. mérés eredményei alapján annak van a legnagyobb valószínűsége, hogy a területet oldaleltolódásos jellegű feszültségtér uralja, de nem zárható ki a tenziós állapotok bekövetkezésének valószínűsége sem.

A két méréssorozat eredményeinek összehasonlítása arra utal, hogy a Bátaapáti-Mórágy illetve a Ny-Mecsek térsége teljesen eltérő feszültségrezsimhez tartozik. Az azonos geometriával, teljesen azonos módszerekkel végrehajtott és kiértékelt in situ mérések eredményei közötti jelentős és szisztematikusan jelentkező különbségek miatt igen nagy valószínűséggel kijelenthetjük, hogy a Mórágyi Gránit vizsgált felszínközeli zónájában anomális jellegű feszültségtér uralkodik, amit a végleges elhelyező létesítmény tervezésekor és kivitelezésekor fokozottan figyelembe kell venni. A méréssorozatok alapján az is megalapozottan jelenthető ki, hogy a részben adaptált, részben továbbfejlesztett metodikával, korszerű eszközökkel elvégzett mag-túlfúrásos méréstechnika alkalmazásával a primer feszültségtér meghatározása megfelelő megbízhatósággal végezhető el. A méréstípus alkalmas a síkbeli feszültségállapotot jellemző valamennyi paraméter számszerűsítésére, még a felszínközeli kőzetzónákban is. Megfelelő kőzetállapot és fúrási technika mellett a származtatott végeredmények bizonytalanságáért felelős faktorok jól követhetők és kézben tarthatók.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szerzők ezúton mondanak köszönetet a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Társaságnak (RHK Kht.), amely a Központi Nukleáris Pénzügyi Alap finanszírozásával lehetővé tette az ismertetett mérések kivitelezését. Ugyancsak köszönet illeti a MECSEKÉRC Környezetvédelmi Zrt-t azért, mert felismerte a recens feszültségvizsgálati programok fontosságát, és beépítette azokat az általa összeállított kutatási tervekbe.

IRODALOMJEGYZÉK

- Bada G.; Horváth F. 1998: A Pannon-medence jelenkori tektonikája. Természet Világa 1998/II. különszám (Geológia), 18-23.
- Bada G., Dövényi P., Horváth F., Szafián P., Windhoffer G. 2007: Jelenkori feszültségtér a Pannon-medencében és alpi-dinári-kárpáti környezetében. Földtani Közlöny 137(3): 327-357.
- Brady, B.H.G.; Brown, E. T. 1985: *Rock mechanics for underground mining*. George Allen & Unwin, London, first edition. 135-183.
- Brown, E.T.; Hoek E. 1978: Trends in relationships between measured rock in-situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.* **15**. 211-215.
- Brown, E. T. (editor) 1985: *ISRM Suggested methods for in situ rock stress measurements*. Pergamon Press, Oxford.
- Corthesy, R.D.; Gill E.; Ouellet J. 1993.: Methodes de mesure des contraintes dans les massifs de roches dures, *Centre de recherches minerales*, **61**, 69-70
- Csontos L. 1998: Szerkezeti földtan. Egyetemi jegyzet. ELTE Eötvös Kiadó. Budapest.
- Doležalová M., Hladik I., Zemanová V. 2003: Jelentés a mag-túlfúrásos módszerrel végzett in situ feszültségmérések 2D-s termikus mechanikai- hidraulikai modellezéséről. Kutatási jelentés. Dolexpert-Geotechnika. Prága, 2003. december.
- Dövényi P., Horváth F., Fodor L. 1988: Kőzetfeszültségi viszonyok meghatározási lehetőségeinek vizsgálata mélyfúrásokban lyukbőség adatok alapján. Kutatási jelentés. ELTE Geofizikai Tanszék, Budapest, 1-29.
- Gerner P.; Porjesz R.; Szafián P. 1994: Ráfúrásos technikával végzett kőzetfeszültség-mérések Magyarországon. *Magyar Geofizika*, **34**(3): 134-142.
- Kovács L. 2001: Partial Self-Healing Effects of a Highly Indurated Claystone Formation (BCF) Discovered by In Situ Measurements. OECD NEA/RWM/Clay Club Self-Healing Topical Session Proceedings. Nancy, France 16. May 2001. 47-57.
- Kovács L. 2006: Vágathajtás hatására bekövetkező mechanikai feszültségváltozások mérése a Bodai Aleurolit Formáció minősítésére kialakított föld alatti kutatólaboratóriumban. In: Török Á. & Vásárhelyi B. (szerk.): Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006. Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár 2., 123-138.
- Research Group of the Heidelberg Academy of Sciences and Humanities: The World Stress Map Project. Internet: http://www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de
- Windhoffer G., Bada G., Dövényi P., Horváth F. 2001: Új kőzetfeszültség-meghatározások Magyarországon lyukfaldeformációs mérések alapján. Földtani Közlöny 131(3-4), 541-560.
- Zoback M.L. és 28 társszerző 1989: Global patterns of tectonic stress. Nature, 341: 291-298.