

## Budapest 4. metróvonal I. szakasz, Kelenföld pu. állomás bányászati módszerrel épített vonali kihúzó alagúti műtárgy Az építés geotechnikai viszonyai

Sándor Csaba

*Geovil Kft., geovil@geovil.hu*

Horváth Tibor

*Geovil Kft., geovil@geovil.hu*

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A cikk szerzői készítették a kelenföldi vonali kihúzó alagúti műtárgy előkészítő geotechnikai kutatását és mint geotechnikai szak-építésvezetők működtek közre az alagút kivitelezése során. Ismertetjük az alagútépítés geotechnikai viszonyait, összefoglaljuk a fejtés és az alagút primer biztosító szerkezetének biztonságos beépítése érdekében létrehozott környezeti, geotechnikai monitoring rendszerrel végzett mérések eredményeit, az azokból levonható következtetéseket. A környezeti monitoring rendszer egyrészt sikeresen betöltötte a kitűzött célt, támogatta a biztonságos alagútépítést (a humán erőforrás, épített – építendő és a természetes környezet védelmét). Másrészt a mért és rendszerezett adatok alkalmasak a tervezési „back analysis” készítése, melyre a jövő gazdaságos tervezési munkáival a tervező- kivitelező - beruházó növelheti projektjei gazdaságosságát. A tervezési modellszámítások kalibrációjával kiválaszthatók az előkészítő geotechnikai kutatások közül azon konvencionális (fúrásos és laboratóriumi vizsgálatok), vagy in situ vizsgálatok, melyek eredményei igazolódtak a kivitelezés során. A monitoring rendszer keretein belül, a mérési eredményeken keresztül végül vizsgáltuk a geotechnikai paraméterek és a talaj/közet – épített környezet kölcsönhatásának időbeli változásait.

*Kulcsszavak:* alagútépítés, geotechnikai monitoring, deformáció, közetnyomás, inklinométer, extenzométer

### 1. BEVEZETÉS, A MŰTÁRGY LEÍRÁSA, HELYSZÍNI ÉS ÉPÍTÉSI VISZONYOK, GEOLÓGIAI ADOTTSÁGOK

A kelenföldi kihúzó alagút az I. építési szakasz nyugati végén helyezkedik el, közvetlenül, nyugatról csatlakozik a résfalás építési technológiával épített Kelenföld pu. metróállomáshoz, mely nagyobb részt a vasúti vágányok alatt helyezkedik el. Az építési terület beépítetlen, közel sík, korábban sportpálya állt e területen, illetve iparterület. Az építési területen található a Határ árok rendezett, burkolt medre, távhő vezeték, illetve gyalogjárda.

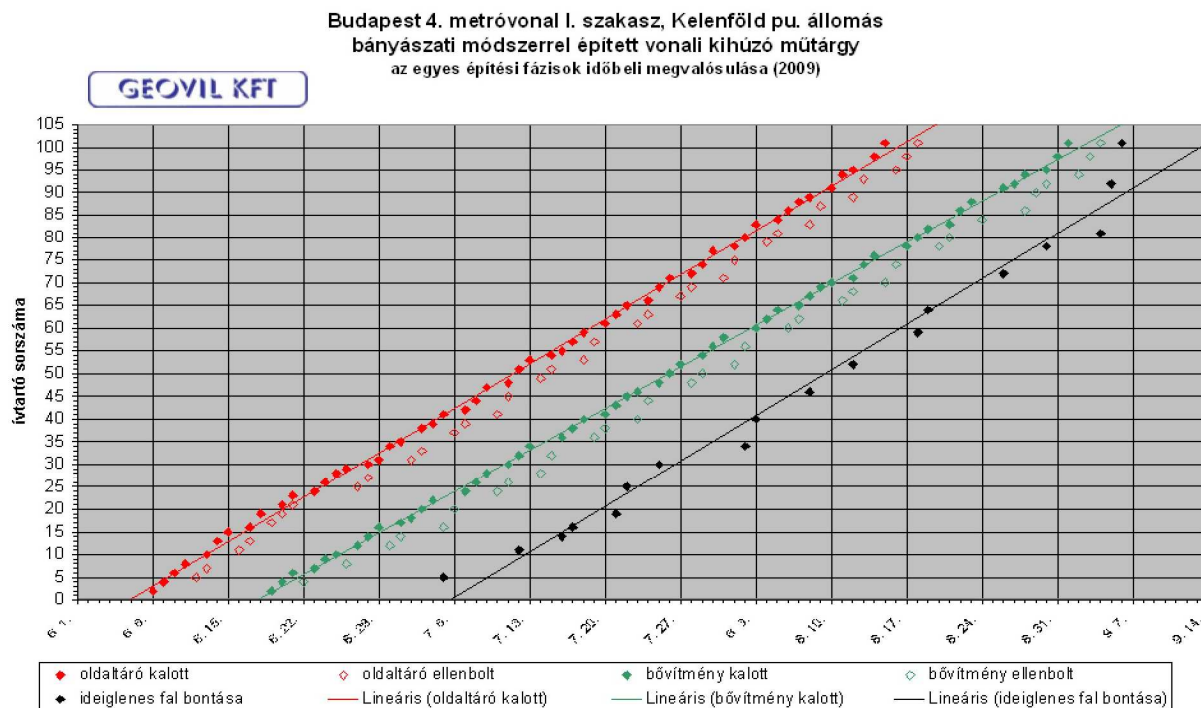
Az alagútépítés kivitelezői munkáit a HÍDÉPÍTŐ Zrt. végezte, a bányászati munkákkal összefüggésben szakvállalkozó cég, a LYUKÓSZÉN Kft. bevonásával. A kihúzó alagút 10,6 m magasságú, közel 11,0 m szélességű, a főtekítörés 104,0 mBf-i szinten van, mely több mint 15 m-es takarást jelentett. A földfejtés és ezzel együtt az egyes építési ütemek két fő részből tevődtek össze, a kb. 5 m széles oldaltárhoz és bővítmény részekből. Mindkét fejtés további két részfejtéssel valósult meg kalott és mag+ellenboltozott részekből. Az oldaltárhoz és ellenboltozott fejtési homlokai 20 m távolságban követték egymást. A fogásmélység ezzel együtt az ívtartók kiosztása 1m-es volt. Az alagút átmérője ~102 m-es hossza mentén változatlan, az alagút szintes. Az alagútépítés kanalas alagútfejtő géppel és frézeres bontófejjel szerelt alagúti baggerrel, 10h és 2h közötti szakaszon 6 m hosszban előtűzéssel, löttbetonos alagútépítési módszerrel (30 cm vastagságú, kettős háló és ívtartó héjszerkezettel) készült 2009. június 5. és szeptember 8. közötti időszakban.

Az alagútépítés időszakában geotechnikai szak-építés-vezetői feladatokat láttunk el. Tevékenységi körünkbe tartozott a kivitelezéssel összefüggő geotechnikai kérdések véleményezése, a kivitelezés geotechnikai szempontú ellenőrzése és az okozott környezeti hatások vizsgálata. Az épített környezet, a műtárgy és a kivitelezők védelmét ellátó geotechnikai monitoring rendszer a következő elemekből épült fel:

- Fejtési homlokszelvényezés, előfúrásos kutatás;
- Alagút deformáció mérések;
- Közetnyomás és az alagút falazatában ébredő feszültségek mérése;
- Az alagút közetkörnyezetében végzett mozgásmegfigyelések;

- Felszínsüllyedés és távhő vezeték süllyedés mérései;
- Az alagút környezetében talaj- és rétegvízszint mérések.

A ciklusos alagútépítési módszer egyes építési ütemeinek megvalósulását az 1. ábra mutatja. A megvalósulási ábrán az egyes részfejtésekre illesztett egyenesek párhuzamosak, ami fegyelmezett kivitelezést jelent. Ezzel együtt az egyes részfejtések esetében vett abszcissza és ordináta értékek szintén egyenletesek, melyek fizikai tartalma egy fejtési szelvényben a gyűrűzárásig eltelt idő és távolság.



**1. ábra.** A bányászati módszerrel épített vonali kihúzó részfejtéseinek időbeli megvalósulása

Az oldaltárhoz esetében többségében 3 nap volt a szelvényekben a gyűrűzárásig eltelt idő és csak egy esetben érte el a 7 napot. A bővítmény esetében ez szintén 3-4 nap az esetek többségében, de 6 nap időtartamot nem lépte túl. Távolságok tekintetében – melyre az építési tervekben határértékek vannak – 3-8 m közötti értékeket tartottak. Az egyenletes kivitelezés előnye, hogy az üregnyitási környezetre gyakorolt hatásai egyenletesen vehetők figyelembe, az egyes monitoring elemek mérési eredményei nem pusztán idősorokkal elemezhetők, hanem a térben változó homlokhatások függvényében össze is hasonlíthatók. Előbb nézzük röviden az építési környezet geológiai felépítését:

A Határ árok térségében az építés geológiai alapkőzet a középső - oligocén korú kiscelli agyag, agyagmárga, mely terepszint közeli településű. A geotechnikai alapkőzetre pleisztocén és holocén korú, üledékek települnek - általában kavicsos, murvás, rosszul osztályozott agyagos lejtőtörmelékek. A területen a történelem folyamán intenzív tereprendezés, elsősorban feltöltés történt, a feltöltés átlagos vastagsága 0,8 - 1,2 m. A MÁV vágányok alatt húzódó, kiemelt helyzetű harmadidőszaki hátság, az összefüggő talajvíz megszűnését eredményezi, ettől Ny-ra a Határ árok felé eső részen nem alakul ki összefüggő talajvízszint. A kiscelli agyag felső 30 m-es részének hármas mérnökgeológiai tagozódása a kutatások alapján ismeretes (mállott zóna - repedezett expandált zóna - expandációs hatáson túli zóna). **Mállott zóna:** A pleisztocén-holocén rétegek fekéjében, átmenetesen megjelenő kiscelli agyag, melynek felső 0,5 - 2,5 m-es vastagságú része plasztikus agyag. E zóna jellegzetessége a világosbarna szín és a plasztikus, vagy ahhoz közeli állapot. **Repedezett expandált zóna:** A mállott zóna alatt található a tört, töredezett, expandált zóna, amelyre jellemző a szilárd (Ic~1) kőzetdarabokra történő szétesés. A kőzetek sárgásbarna színe fokozatosan szürkeárnyalatúvá válik, majd dominálni kezd a növekvő mélység felé haladva a szürke szín. A szürke kőzetmátrix mellett a repedések, törések barna, limonitos bekérgezése 6 - 9 m terepalatti mélységközben még megfigyelhető, majd 9 m terepalatti szinttől (110 mBf) egyveretű szürke szín jellemzi a kőzeteket. Az erős töredezettség a mélységgel csökken és repedezettséggé válik, a szilárdsági paraméterek növekedésével. **A mállott és repedezett kőzetzónák együttesen jelentik az alagút fedőjében megjelenő kőzeteket.** **Expandációs hatáson túli zóna, kőzettömeg:** A töredezett, majd repedezett kőzetzónák alatt, 110 mBf-i szint alatt jelenik meg, laboratóriumi vizsgálatok és in situ mérések szerint megemelkednek a kőzet nyírószilárdsági paraméterei e zónában.

A kihúzó műtárgy területén jelentkező típusos kiscelli agyagot a nyugodt település, általában üde állapotban a szürke-kékesszürke szín jellemzi, kötőanyaga  $\text{CaCO}_3$ . Rendszerint finomhomokos, meszes, helyenként homokköves kifejlődésű epigén pirit tartalmú agyag, agyag márga és márga, rétegzetlen, ritkán pados kifejlődésű. A kiscelli agyag összlet dőlése egyenletes  $3 - 5^\circ$ , a dőlésirány DK-i irányú. Az előzetes kutatásoknak megfelelően az alagútépítés során az alagút tengelyével közel párhuzamos,  $\sim$ K-i csapásirányú vetőzónát találtunk. A vetőzóna csapásiránya kicsiben tért el az alagút tengelyétől, így hosszan végigkísérte az építési munkákat. Fokozottan tört zónát az alagút kezdő szelvényeiben (0 - 5 m alagútszelvény) majd a 15 - 40 m alagútszelvények közötti szakaszon írtunk le. A növekvő szelvényszámok irányában (az 57 m alagútszelvénytől) a töredezett zóna a kalott felső része felé és jobboldalra húzódva „elhagyta” az űrszelvényt. A vetők többsége D-i irányba dől, de É-i irányú vetőket is leírtunk. Két vetőrendszer – egyik  $10-30^\circ/3-5^\circ$ , a másik  $45-70^\circ/75-85^\circ$  – síkjai sűrűn, 0,1-1,5 m-ként metszik a vizsgált függőleket. (Az első értékek a vető dőlését, a perértékek a vízszintestől való eltérést jelentik.) A meredekebb rendszer a fiatalabb, a kisebb dőlésű vetőket elmetsző. A vetők a vártnak megfelelően kompresszív jellegűek voltak.

Fejtési munkát csak a homlokról végzett kutatófúrás adatainak ismeretében lehetett végezni. A kutatófúrások 134 mm átmérővel, folyamatos spirálfúrással készültek, 9 - 12 m egyszeri hosszban és 2-3 m átfedéssel, jelenlétünkben készültek. Az előfúrások adatait a heti kockázatelemző megbeszéléseken értékeltük. Geotechnikai szelvényezést az alagút építési ütemének megfelelő gyakorisággal, a földfejtések során végeztünk. Az alagút építését megelőzően, a réselt állomástér földkiemelése során végzett szelvényezési munka pontosította a kőzetkifejlődésre, főleg a tektonikai viszonyokra vonatkozó ismeretet.

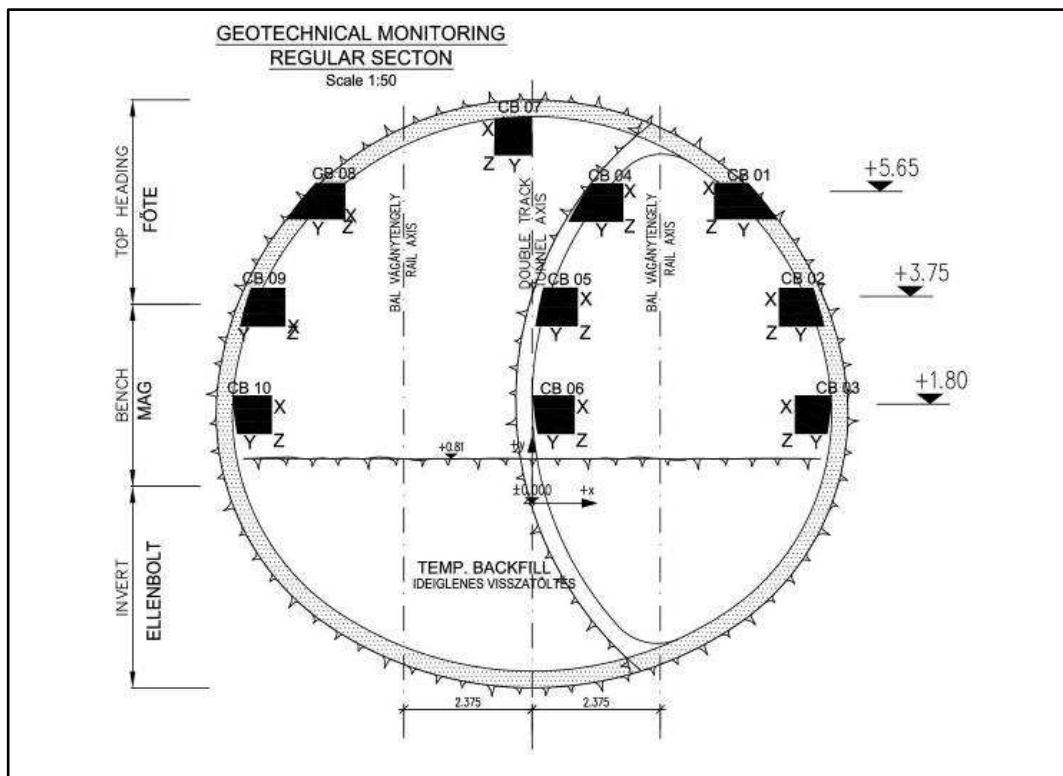
A homlokhorgonyok használata mellett a fejtési homlok fellazulása korlátozott volt. Az összetöredezett részekben a jövesztő kanállal könnyen kialakítható volt a szükséges profil. A résfal mögötti 5-8 m alagútszelvényig fokozottan töredezett állapotú volt a márga, majd tovább a 40 m alagútszelvényig. A homlokról indított kutatófúrás 19 m alagútszelvénytől vizesebb zónát jeleztek. A fúrás elkészítését követően órákkal később koncentrált víz jelentkezett a furatból, a szivárgás intenzitása fokozatosan csökkent. Elérve a fejtéssel a vizesebb kőzet zónát a kőzet repedések felületén tapasztaltunk vízfilmet, mely néhány órási építési idő alatt lassan bevonta a kőzetfalat. Az alagútba beszivárgó vízmennyiség nem volt jelentős, a fejtett földanyag felszívta azt, melyet a kiföldeléssel együtt kezeltek. Következő vizesebb zóna a 34. szelvénytől következett, a homlokhorgonyok mentén szivárgó víz jelezte, majd a kutatófúrás is. A 43. szelvénytől előrehaladva egyre csökkent a kőzettöredezettség, mely felfelé és jobb oldalra elhagyta a fejtési szelvényt. Az 57. alagút métertől a szelvény nagyobb részében jelennek meg az ép kőzetviszonyok, a törési felületek is többnyire szárazak. A homloki dóm kialakításánál mélyített száraz, légöblítéses spirálfúrással kőzetanyag tekintetében nem jeleztek változást a végfal mögötti térrészben. Adott építési körülmények és az alkalmazott biztosítások mellett a tervezett építési ütemben és túlfejtés nélkül elkészült az alagút. A következőkben értékeljük az alagút biztosító szerkezetének deformáció méréseit.

## 2. ALAGÚT DEFORMÁCIÓ MÉRÉSEK

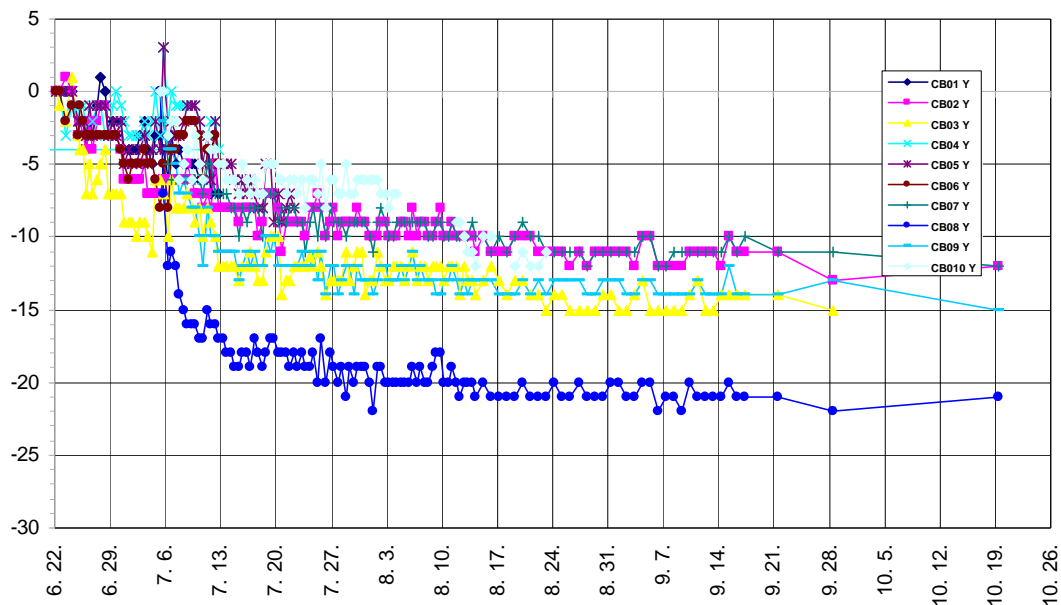
Az alagút monitoring tervének megfelelően a beépített biztosító szerkezet deformációit a 102 m hosszú alagútban 13 db mérési szelvényben mérte a bányászati kivitelező. A mérési szelvények (RMS-1 – RMS-13 jelűek) 6-9 m között változó távolságban követték egymást. Egy-egy mérési szelvényben - a részfejtéseknek megfelelően - az oldaltáróban 6 db, a bővítményben további 4 db mérőpont (célprizma) létesült, a 2. ábra szerinti elvi elrendezésben. A ciklikus alagútépítés munkafázisainak megfelelően egy-egy mérési szelvényben a kalott ívállítást követően 4-6 órán belül elkészültek a prizmák alpmérései, majd általában további 12 órán belül az első visszamérések. Egy-egy mérési szelvényben a gyűrűzárás általában 3 – 6 nap elteltével történt meg. A mérési körülmények alapján érzékelhető, hogy a deformáció mérések nem adnak abszolút nagyságú elmozdulás értékeket, hiszen a kőzet fejtésekor megkezdődő alakváltozások 50-70% mértékben lezajlanak, mire az első visszamérés eredménye előáll [a szerzők Rákóczi téri mérései alapján]. A 3. ábrán egy kitüntetett mérési szelvényben (23 m alagútszelvény) mért függőleges elmozdulás értékeket mutatjuk be.

Az elmozdulásokat függőleges és az alagútszelvényben vízszintes értelemben vizsgáltuk, adott mérőhelynek megfelelő irányú elmozdulás határértéknek való megfeleltetéssel. Az elmozdulások vizsgálata során néztük azok sebességét is, melyek csillapodása a bekövetkező konvergenciát jelzi. Építés közben azonnali döntéshozatalra a 4. ábrához hasonló egyesített grafikus feldolgozások tettek lehetővé. Könnyen kiemelhetők és egyedileg vizsgálhatók a görbeseregből „kilógó” eredmények. Az alagút deformáció mérés „egyoldalú” monitoring elem, a fejtést követően kezdődnek a mérések és a

távolodó homlok függvényében értelmezhetők az eredmények. Tervezői határértékeket is a távolodó fejtési homlok, ezzel együtt növekvő szilárdságú betonszerkezet figyelembevételével adtak meg.



2. ábra. Alagút deformáció mérési pontok elvi elrendezése egy-egy mérési szelvényben



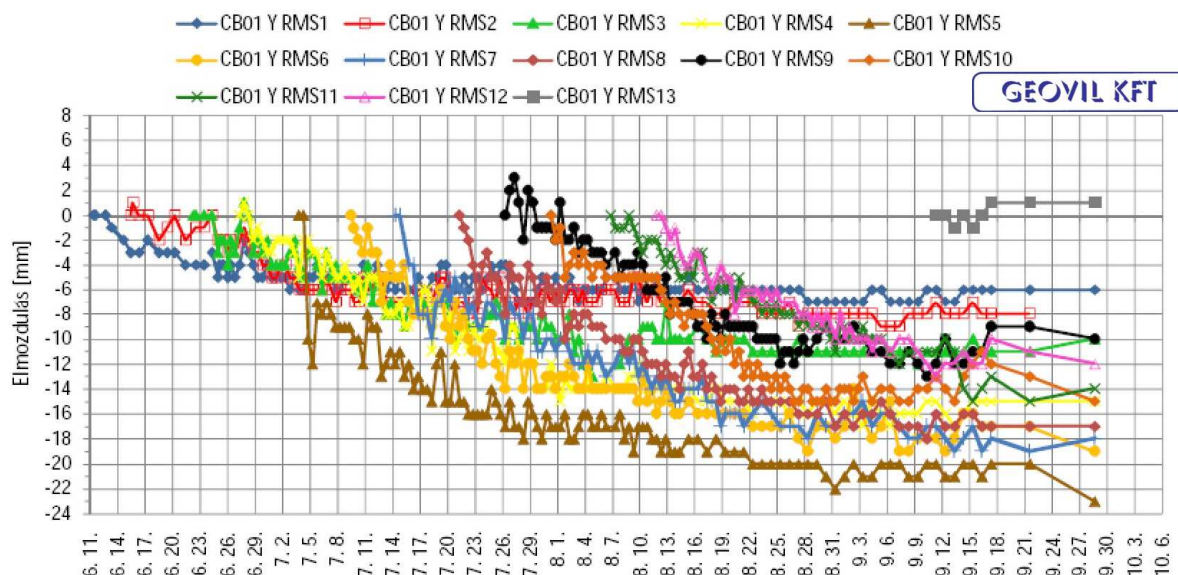
3. ábra. Alagút deformáció mérések – 23 m alagútszelvény – függőleges elmozdulások [mm]

Az elvégzett alagút deformáció mérések alapján megállapítjuk, hogy:

- a mért elmozdulások szinte valamennyi mérési pont esetében elmaradnak a tervező által adott, összegzett határértékektől; Az építés során a kivitelezővel közösen végzett deformáció analízis szerint az első építési fázisban (10m) a pontok többsége kisebb-nagyobb mértékben meghaladta a fázisra vonatkozó határértékeket, vízszintes és függőleges elmozdulások tekintetében egyaránt. A következő két építési fázis alatt (15m, 20m) az egyre megengedőbb határértékeken belül kerültek az egyébként csillapodó elmozdulások és csak alárendelten fordul elő, hogy az utolsó építési fázisban váljanak csak megfelelővé az értékek.

- A mérési szelvényben mért elmozdulások 5-8 nap múlva stabilizálódnak (általában a második-harmadik építési zónában), amikor a fejtési homlok 1,5D távolságba került a mérési szelvénytől. Nincsenek további elmozdulások.

A napi két alkalommal végzett mérések eredményeit értékeltük az eredményeket pedig a kivitelezésre létrehozott dinamikus adatportálon ([www.geovil.hu](http://www.geovil.hu)) tettük elérhetővé korlátozott felhasználói kör részére. Az alagút deformáció mérések alapján az alkalmazott építéstechnológia, a tervezett elsődleges biztosító szerkezet (lőttbetonos héj) megfelel az igénybevételeknek. A következőkben vizsgáljuk meg a biztosító szerkezetben ébredő feszültségeket és a primer szerkezet-közet falán kialakult közetnyomás értékeit.



4. ábra. Alagút deformáció mérések – oldaltárhoz jobbra felső prizma függőleges elmozdulások [mm] – egyesített grafikus megjelenítés



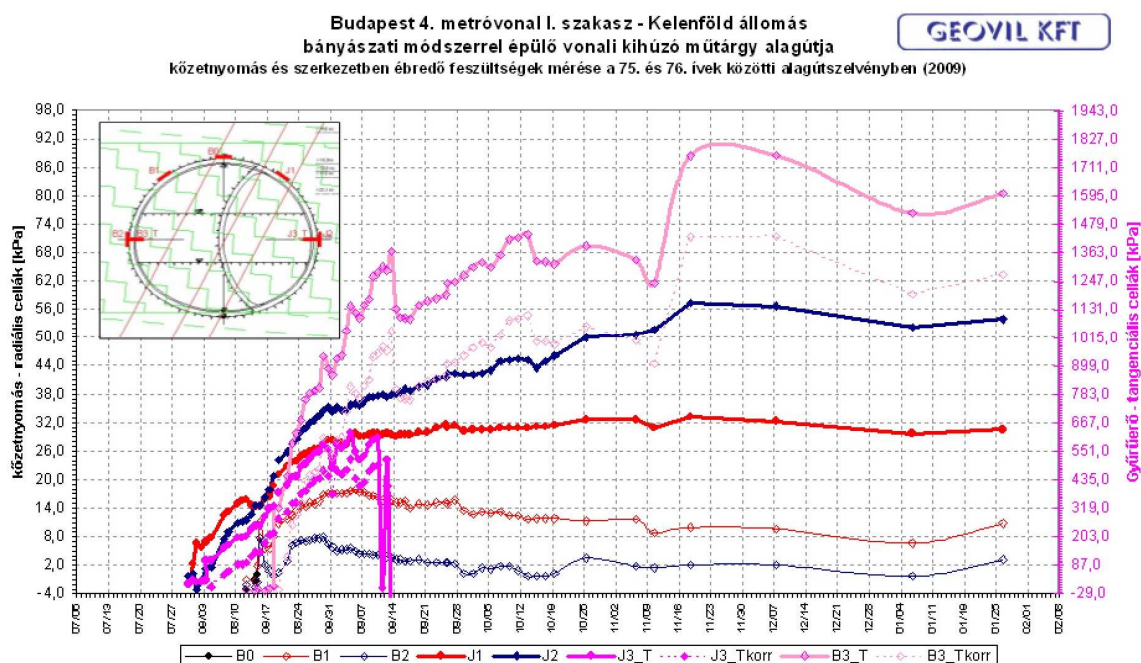
5. ábra. Közetnyomás mérések – 75,5 m alagútszelvénybe telepített műszerek és 2010. januárban mért közetnyomás eloszlás [kPa]

### 3. KÖZETNYOMÁS MÉRÉSEK ÉS AZ ALAGÚT FALAZATÁBAN ÉBREDŐ FESZÜLTSÉGEK

A monitoring terveknek megfelelően az alagút 76 m-es szelvényébe nyomásmérő cellákat építettünk be, az alagútfalazatban kialakuló mindenkor feszültségek, illetve külső felületén ébredő közetnyomás értékek mérésére. Az 5. ábra szerinti elrendezésben részfejtésenként 2-2 db radiális közetnyomás mérő

cellát építettünk be (B1, B2, J1 és J2), továbbá 1-1 db tangenciális mérőcellát (B3\_T és J3\_T) a szerkezet erőjátékának figyelésére. Korábbi elnevezéssel e monitoring elem is „egyoldalú”, a mérési szelvénytől távolodó homlokkal összefüggésben vizsgáljuk a kapott eredményeket (ld. 6. ábra).

A tangenciális cellákat a betonlövés után, annak néhány napos korában olajnyomással a betonfelületekhez feszítettük, ezáltal biztosítva a nyomásátadó kapcsolatot. Az így kialakult gyűrűfeszültséget a bevitt többletnyomással korrigáltuk. A kőzetnyomás cellák esetében erre nincsen szükség. Az oldaltáróban eleinte hasonló sebességgel és értékre épülnek fel a kőzetnyomás értékek 13:30h és 15h pozíciókban. A bővítőmenny fejtésének hatására a kőzetkörnyezet fellazult, ez jól látható a 13:30h pozíciójú cella mérési eredményeiben, kb. 1 hét időtartamon keresztül. Itt a kőzetnyomás 3-4 kPa-lal csökkent, majd a bővítőmenny héjazatának elkészülte és a fejtési homlok eltávolodása után a bővítőmenny zavarása előtti meredekséggel (sebességgel) folytatódott a felépülése. A 15h pozícióban lévő cella a bővítőmenny fejtési homlokától távol épült be, így a fellazulás itt nem figyelhető meg. A nagyobb szelvény nyitásának hatására mindkét cella többletterhelést kapott (15h cella jelentős mértékben), itt az ezután mért kőzetnyomás értékek rendre meghaladják a 13:30h cella értékeit. A 4. ábrán feltüntettük 2010. januárjában mért kőzetnyomás értékeket szelvény menti eloszlással.



**6. ábra.** Kőzetnyomás és szerkezetben ébredő feszültségek mérése [kPa] – 75,5 m alagútszelvény

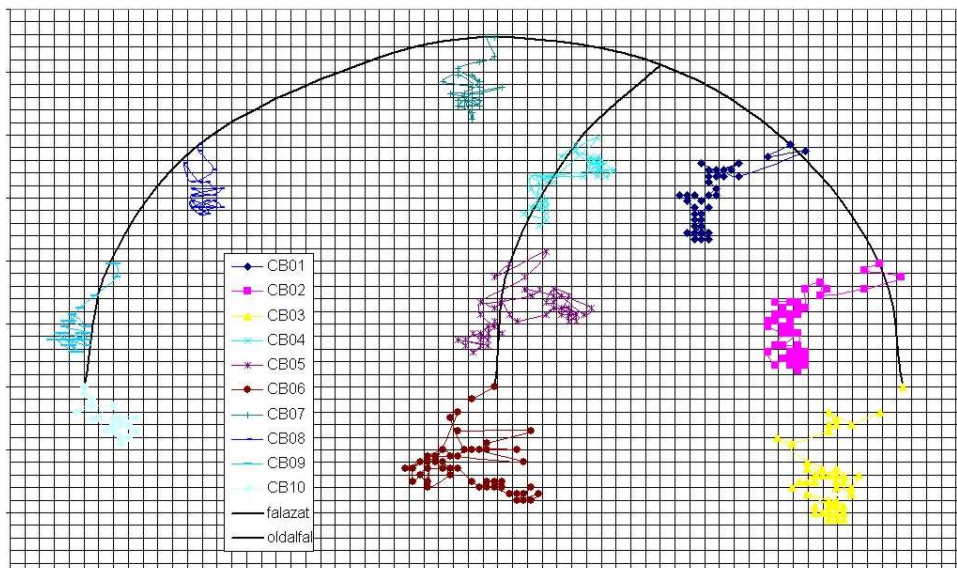
Az oldaltáróban lévő tangenciális cella mért értékein megfigyelhető, a falazatra jutó nagyobb terhelésnek és statikai váz megváltozásának hatására a gyűrűben ébredő nagyobb normálerő. Az ideiglenes falazat bontása is megfigyelhető a mérési eredményeken (2009. 08. 30.). A radiális cellák kőzetnyomás felépülési sebessége lecsökkent, míg a tangenciális celláknál a normálerő 80-100 kPa-os csökkenése is megfigyelhető. A normálerő 2-3 nap elteltével ismét növekedni kezdett. Az alagút végfal betonozása után a tangenciális cellákban normálerő csökkenés figyelhető meg. A végfaltól 28 m-re kialakított mérési szelvényben 300 kPa normálerő csökkenés alakult ki, melynek oka lehet a statikai váz megváltozása, valamint a végfal nagyobb merevsége. Az oldaltáróban lévő (J3\_T jelű) tangenciális cellában ez a nagymértékű nyomáscsökkenés a cella meghibásodását okozta.

2009. 09. 25-29. között a szigetelés felhordása előtt szivattyúzást végeztek az alagút talprészében, mely a radiális cellákon mérhető, kismértékű kőzetnyomás csökkenésben jelentkezett. Ezt követően a kőzetnyomások állandósultak. A létrejött nyugalmi állapotban az alagút jobb oldalán lényegesen nagyobb kőzetnyomások alakultak ki, melynek oka lehet a részfejtéses alagútépítés, valamint a vízszintes kőzetnyomás orientáltsága. A jelenlegi műszerezettség szintje mellett a vízszintes földnyomás irányítottasága valószínűsíthető, de iránya nem adható meg pontosabban, minthogy ÉNy – ÉK iránytartományból támad.

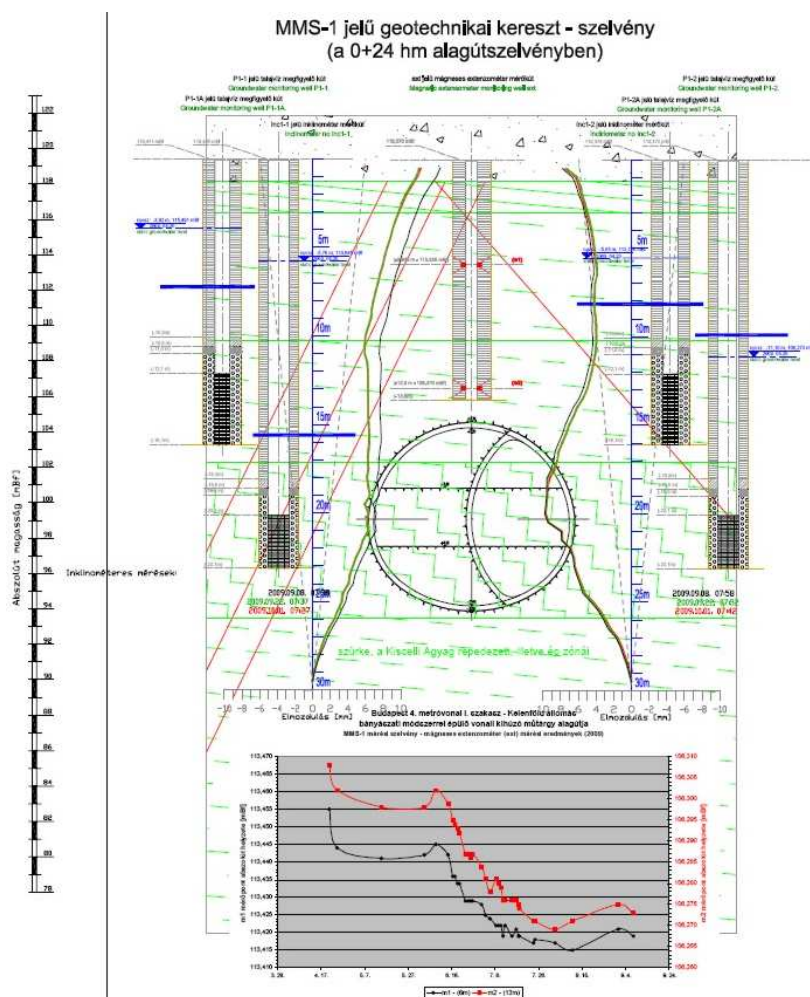
A 7. ábrán egy sajátos alagút deformáció feldolgozást mutatunk be, a kőzetnyomás mérés alagútszelvényében, ahol a kivitelező torzítva tüntette fel a biztosító szerkezet mért elmozdulásait. Az oldaltáróban kezdetben és összességében is nagyobb elmozdulásokat mértünk, mint a bővítőmenny részben, a kőzetnyomás értékek eloszlásának megfelelően. A következőkben vizsgáljuk meg az alagút környezetében bekövetkezett kőzetmozgásokat.

## 4. AZ ALAGÚT KÖZETKÖRNYEZETÉBEN MÉRT ELMOZDULÁSOK

Az alagút közegkörnyezetében bekövetkezett térbeli elmozdulásokat a 24m alagútszelvényben, függőleges értelemben mágneses extenzométerekkel, vízszintes értelemben pedig inklinométer mérőkutakkal vizsgáltuk. A monitoring elemeket a 8. ábra szerinti elrendezésbe telepítettük. A függőleges inklinométer mérőkutakat az alagút tengelyétől jobbra és balra egyaránt 9 m-re építettük be. A mérőkutak 30 m mélységűek, az alagút alá érnek. A mágneses extenzométereket az alagút főtéjébe két mélységszintbe (~6m és ~13m) építettük be.



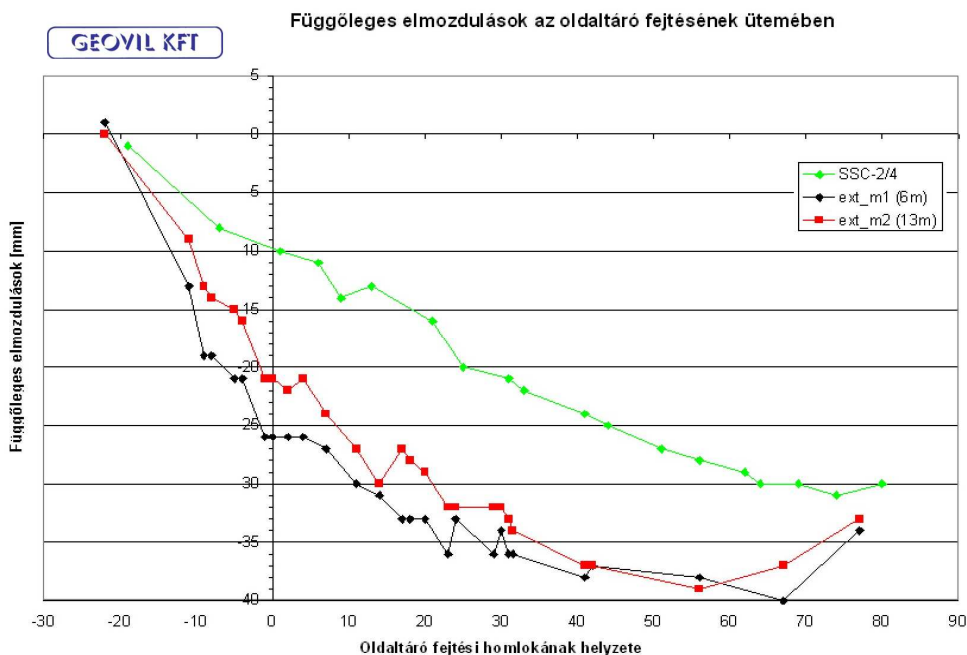
7. ábra. Alagút deformáció mérések – 76 m alagútszelvény – szelvénybeli elmozdulások



8. ábra. Alagút geotechnikai monitoring – kereszt-szelvény a 24m alagútszelvényben

A kőzetmozgás monitoring eszközök „kétoldalú”-ak, azaz nyugalmi állapotban indított méréseket követően mérhetők a helyet megközelítő, majd elhaladó és eltávolodó fejtési homlokok hatása. A főtében mért függőleges elmozdulásokat az oldaltároló homlok előrehaladásának függvényében a 9. ábrán mutatjuk be, idősorát a 8. ábra mutatja. Az extenzométeres mérések során az eltérő mélységekbe helyezett pókmágnesek között nem tapasztaltunk lényeges függőleges elmozdulás különbséget. Az alagút főtéjében 5-10 mm nagyságú elmozdulást mértünk a résfal bontás okozataként. Az oldaltároló építése során további 15-17 mm-es függőleges elmozdulás zajlott le, majd a bővítmény építése során további 20-22 mm, kisebb intenzitású, lassabban jelentkező mozgásokat mértünk. Az oldaltároló ideiglenes fal bontás hatása az alagút főtéje felett 9 napig, míg attól távolabb 17 napig volt kimutatható. A 9. ábra szerint a főtében akkor jelentkeztek függőleges kőzetmozgások, amikor az oldaltároló fejtési homloka 22 m-re (2D távolság) megközelítette a mérési szelvényt. A mozgások megélnkülése 11 m-es homloktávolság (1D) elérésekor kezdődik és hasonló intenzitással folytatódik egészen a homlok 22 m-es (2D távolság) elhaladásáig, ami a bővítmény homlok hatásának szuperpozíciója. A lecsillapodó mozgások a bővítmény homlok 1,5-2D távolságig tartó elhaladásáig észlelhetők. A 9. ábrán feltüntettük a szelvényben mért felszínsüllyedés értékeket is (SSC-2/4 pont), ahol az összehasonlíthatóság érdekében az eddig bekövetkezett süllyedéseket nulláztuk. Az átboltozódás miatt kisebb mértékű felszínsüllyedéseket mértünk, melyek hosszabb idő alatt alakultak ki, mint az alagút főtéjében, különböző mélységekben. A bővítmény építése ugyanakkor kisebb hatással volt a főtémozgásokra, ebben az építési fázisban kisebb intenzitású és abszolút értékű elmozdulásokat kaptunk, mint korábban az oldaltároló építése során.

A kőzetkörnyezet vízszintes értelmű elmozdulásait a célra kialakított inklinométer mérőkutak időszakonkénti (szondahosszal megegyező, 0,5 m-enkénti) letapogató mérésével végeztük. Minden mérés eredményét a nagy gondossággal végzett un. alpmérés eredményeihez viszonyítva megkapjuk az eltelt idő alatt bekövetkezett vízszintes elmozdulásokat. A méréseket a kivitelező végezte, digitális adatrögzítésű, kézi mérésű műszerrel. Az adatok feldolgozása két irányban folytatódott, egyrészt torzítással szerepeltettük az alagutak keresztaszelvényében (ld. 8. ábra), így az aktuális mérési eredményeket rövid időn belül értékelni tudtuk azonnali döntéshozatalhoz.



**9. ábra.** Alagút főté függőleges elmozdulások (és felszínsüllyedés) az oldaltároló fejtési homlok függvényében (24m alagútszelvény)

Másrészt a mért elmozdulások időbeliségét vizsgáltuk és vetettük össze az építési ütemekkel, a fejtési homlokok mindenkorai helyével. A mért elmozdulások értékeléséhez szükséges azok irányának helyes értelmezése, mely az alapprotokoll értelmében „+” irányú, ha az elmozdulás az alagút felé mutat (A+ irány). Ha A+ irányt 12 órának tekintjük a vízszintes síkban, akkor 3 óránál van a B+ irány. Az alagút környezetében végzett vízszintes kőzetmozgásokkal kapcsolatban a következőket állapítottuk meg:

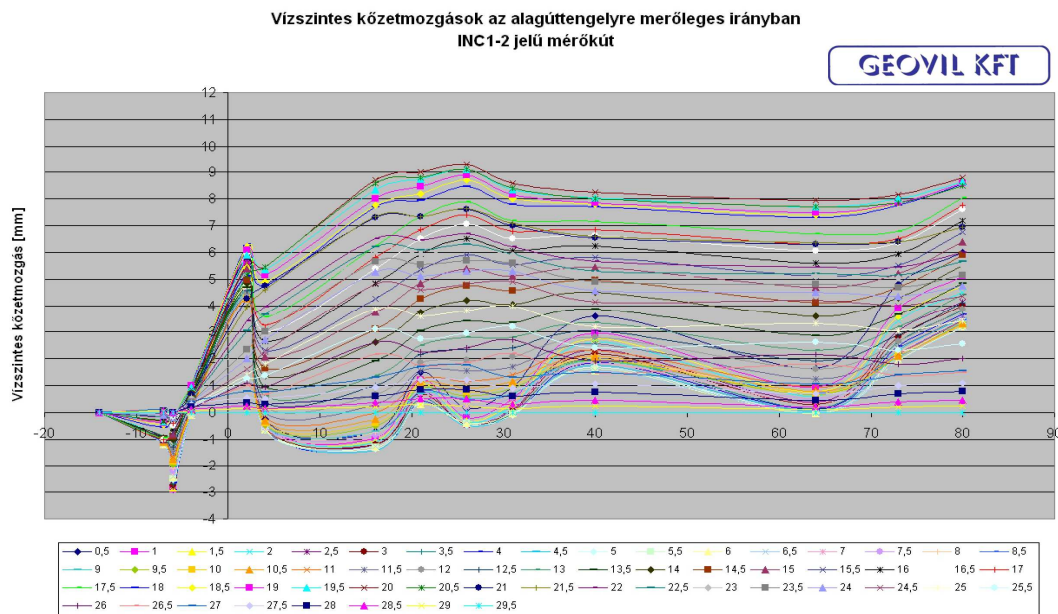
- az alagút É-i és D-i oldalán egyaránt az alagút felé történő elmozdulásokat mértünk. Az É-i oldalon nagyobb (maximálisan 10 mm-es) elmozdulásokat mértünk, míg a D-i



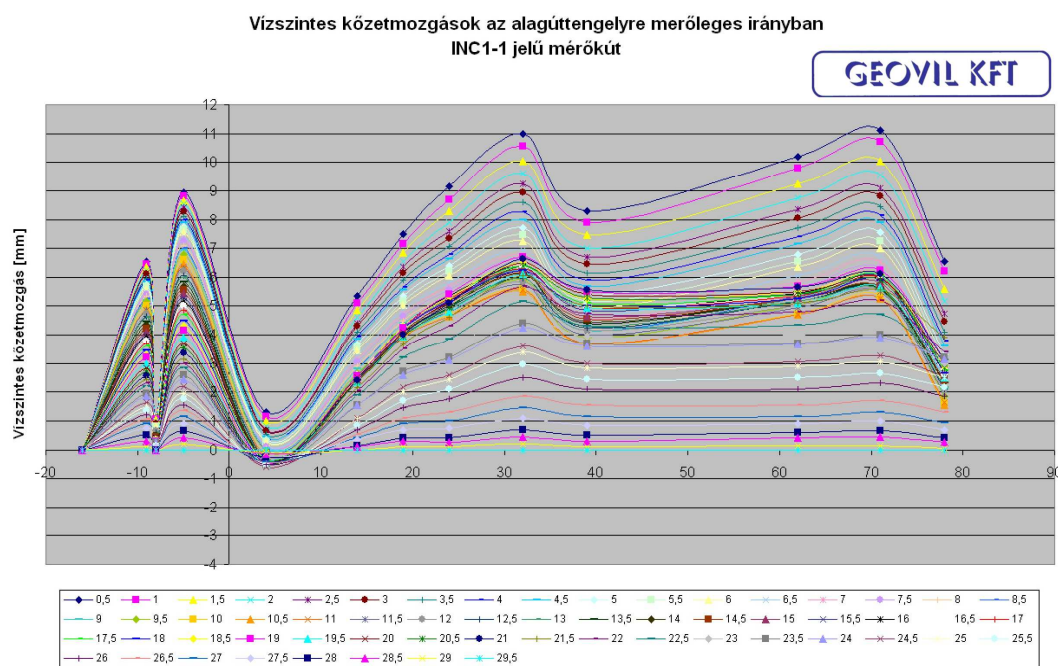
oldalon maximálisan 7 mm-es alagút irányába történő elmozdulásokat mértünk (összhangban a kőzetnyomás és a deformáció mérések oldalfüggő eredményeivel).

- az alagút felé mutató irányokban mért görbéket vizsgálva azok maximális értéke a kalottláb szintjében jelölhető ki. A görbék inflexiós pontja kijelöli az alagút jellegzetes pontjait: főtepont, talpszint és kalottláb.
- az alagúttal párhuzamos irányok tekintetében az oldaltárhoz felé eső É-i oldalon egyértelműen a közeledő fejtési homlok felé irányuló az elmozdulások (K-i irány), maximálisan 4-5 mm-es értékkel. A bővítő oldalán (D-i oldal) ebben az irányban hibahatárt meghaladó elmozdulásokat nem mértünk.

A vízszintes irányú kőzetmozgás adatait – a korábbi tárgyalásmódnak megfelelően - az alagútépítés fejtési homlokainak (oldaltárhoz és bővítő) a mindenkori helyzete függvényében dolgoztuk fel és adjuk meg a 10. és 11. ábrákon.



**10. ábra.** Vízszintes kőzetmozgások az alagút jobb oldalán (É-i oldal) az oldaltárhoz fejtési homlok függvényében (24m alagútszelvény)



**11. ábra.** Vízszintes kőzetmozgások az alagút bal oldalán (D-i oldal) az oldaltárhoz fejtési homlok függvényében (24m alagútszelvény)

A 10-11. ábrák alapján az alagút É-i és D-i oldalán bekövetkezett vízszintes kőzetmozgásokra vonatkozóan a következő megállapításokat tesszük:

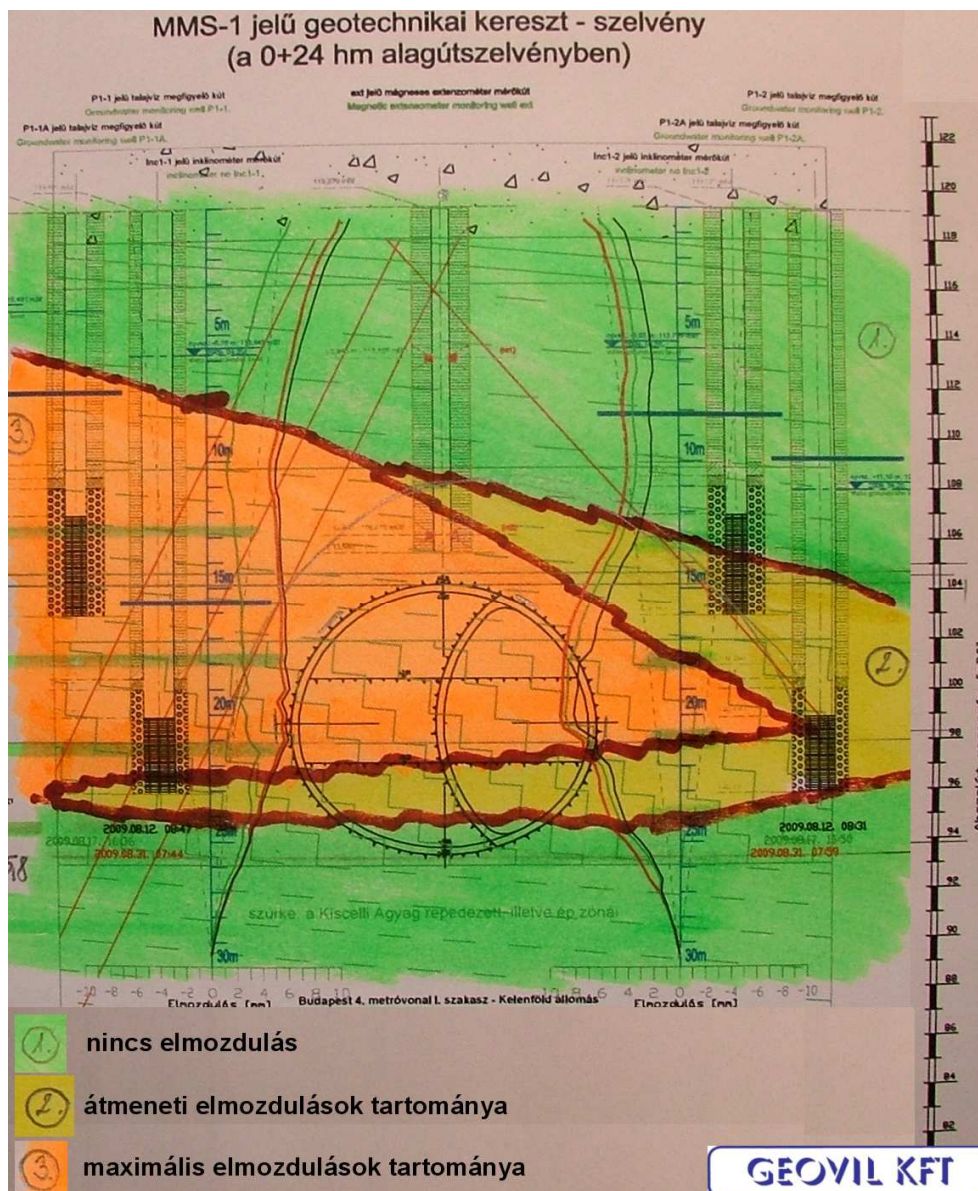
- az É-i oldalon kapott görbesereget 5, míg a D-i oldalon mért görbéket 4 tartományra osztottuk mélység szerint a következő tartalommal: **nincs elmozdulás** (É: 0-13m; 24,5-29,5m és D: 0-7,5m; 24-29,5m); **átmeneti elmozdulások tartománya** (É: 13-18m; 21,5-24,5m és D: 22,5-24m) és **maximális elmozdulások tartománya** (É: 18-21,5m és D: 7,5-22,5m;). Az egyes tartományokat a 12. ábrán jelöltük.
- **elmozdulás nélküli tartományok:** alagút felett; az É-i oldalon e zónában jellemzően korrelálhatók az okozott elmozdulások az építési ütemekkel, viszont maradandó vízszintes elmozdulásokat nem mértünk. Az oldaltárhoz fejtési homlok hatása 5 m-es közelségben éreztette hatását, előbb 3 mm-es távolodó elmozdulásban, majd 4,5-5,5 mm közötti alagút felé történő elmozdulásban. A szelvényt 3 m-re elhagyó homlok helyzetben az addig tapasztalt elmozdulások „rugalmasan” visszarendeződtek. A bővítmény homlok szelvénybeli elhaladása ideiglenes 1-2 mm-körüli elmozdulást okozott, mely korábbihoz hasonlóan nem állandósult. E tartományban az oldaltárhoz ideiglenes falának bontása 5-6 mm-es elmozdulásokat okozott (a mérési adatsor nem teszi lehetővé annak megállapítását, hogy ez az elmozdulás állandósult-e). A D-i oldalon e tartományban szintén korrelálhatók az okozott elmozdulások az építési ütemekkel, az alagút felé történő elmozdulás 7-11 mm közötti volt, mely állandósult. Megjegyezzük, hogy ebben a mélységzónában a legmagasabb a mérésekre adódó hiba. Az alagút alatti térrészben az É-i oldalon e tartományban fokozatosan lecsengenek a vízszintes elmozdulások. Az oldaltárhoz által okozott 1 mm-es alagút felé történő elmozdulásra folyamatosan épül fel a bővítmény okozta 3-4 mm-es elmozdulás. A D-i oldalon 1-2 mm-es elmozdulásokat mértünk, melyeken nem mutatható ki az oldaltárhoz ideiglenes falzatának elbontásakor feltételezett hatás.
- **átmeneti elmozdulások tartománya:** az É-i oldalon 13-18m közötti zónában mért vízszintes elmozdulások az oldaltárhoz 0,5D távolságában 1 mm-es távolodó elmozdulással, majd 5-6 mm közötti alagút felé történő elmozdulással kezdődtek, majd a szelvényt 3 m-re elhagyó homlok helyzetben az addig tapasztalt elmozdulások 1,5-3 mm-es nagyságban állandósulnak. Erre épül fel a bővítmény homlok okozta hatás, mely 4-7 mm-es értéken állandósult. A 21,5-24,5m közötti zónában kisebb a különbség az oldaltárhoz okozta 2-3,5 mm közötti alagút felé történő elmozdulás és a bővítmény okozta 4,8-6,5 mm elmozdulások között. Az elmozdulások kismértékű visszarendeződése tapasztalható a bővítmény elhaladását követően, 4,1-5,8 mm értékre. Nem jelentős az oldaltárhoz ideiglenes falának bontása a mért értékeken. A D-i oldalon csak egy átmeneti tartományt jelöltünk az alagút ellenoldali részében, a zóna alsó határa itt is egybeesik az alagút talpszintjével. E tartományban mért elmozdulások fokozatosan csökkennek a mélység felé.
- **maximális elmozdulások tartománya:** ebben a tartományban mértünk a legnagyobb vízszintes elmozdulásokat. Az É-i oldalon az oldaltárhoz fejtési homlok hatása a szelvényt 0,5D távolságban (mely a mérőhelytől 1D távolságot jelent) megközelítve vált mérhetővé jelentéktelen távolodó elmozdulásban, majd 5,7-6,2 mm közötti alagút felé történő elmozdulásban. A szelvényt 3 m-re elhagyó homlok helyzetben az addig tapasztalt elmozdulások kismértékben visszarendeződve, 4,8-5,5 mm-es nagyságban állandósultak, illetve erre épül fel a bővítmény homlok szelvénybeli elhaladása. A bővítmény hatása - kis szórással - 8-9,3 mm-es értéken állandósult. Az oldaltárhoz ideiglenes falának bontása mérhető, ám jelentéktelen hatású. A D-i oldalon e tartományba sorolt mélységszinteken kis szórással, azonos értékeket mértünk. A bővítmény fejtési homlok hatása 10-12 m-es távolságban (1D) már éreztette hatását, az alagút felé történő elmozdulások legnagyobb értéke pedig a mérési szelvényt 10-12 m-re (1D) elhagyó homlok esetében érte el. Ebben a mélységtartományban 5,6-6,8 mm közötti alagút felé történő elmozdulást mértünk, mely értékek állandósultak.

A D-i oldali mérőhely függvényében az oldaltárhoz szelvényben történő elhaladása csak átmeneti elmozdulásokat okozott, maradandó értékeket nem mértünk. A mérőkút helyét merőlegesen vetítettük be az alagúttengelybe, mely mellett a fejtés hatása az előzőekben megállapított 5 m helyett, már 8 m távolságból kimutatható volt. A mérőkútban mért vízszintes elmozdulások a hozzá közelebb eső bővítmény hatásának tulajdonítható. A 12. ábrán jelölt vízszintes közetelmozdulás eloszlás összhangban van az egyes részfejtési ütemekkel, összevethető az alagút deformáció és közetnyomás aszimmetrikus eloszlásával is.

## 5. FELSZÍNSÜLLYEDÉS MÉRÉSEK - TÁVHŐ VEZETÉK MOZGÁSMEGFIGYELÉSEI

A mozgásmérések következő célterülete a felszínsüllyedés mérések és ezzel összefüggésben az építési területet átszelő távhő vezeték süllyedésmérései. A felszínsüllyedés méréseket a kivitelező készítette a geotechnikai monitoring terv alapján az általa létrehozott mérési hálózatra történő rendszeres

geodéziai mérésekkel. A mérési pontok: az alagút hossz tengelyében 10 db (egymástól ~10 m-es távolságokra, szélső esetekben 6 m és 14 m), illetve 9 m és 22 m alagútszelvényekbe az alagút hossz tengelyére merőleges kereszt-szelvények mentén további kettő és hat db mérési pont létesült. A mérési rendszer alapmérését 2009. 06. 05-én készítették el, a kivitelezés időszakában összesen 22 db mérés készült, ami heti kettő db mérésnek felel meg.



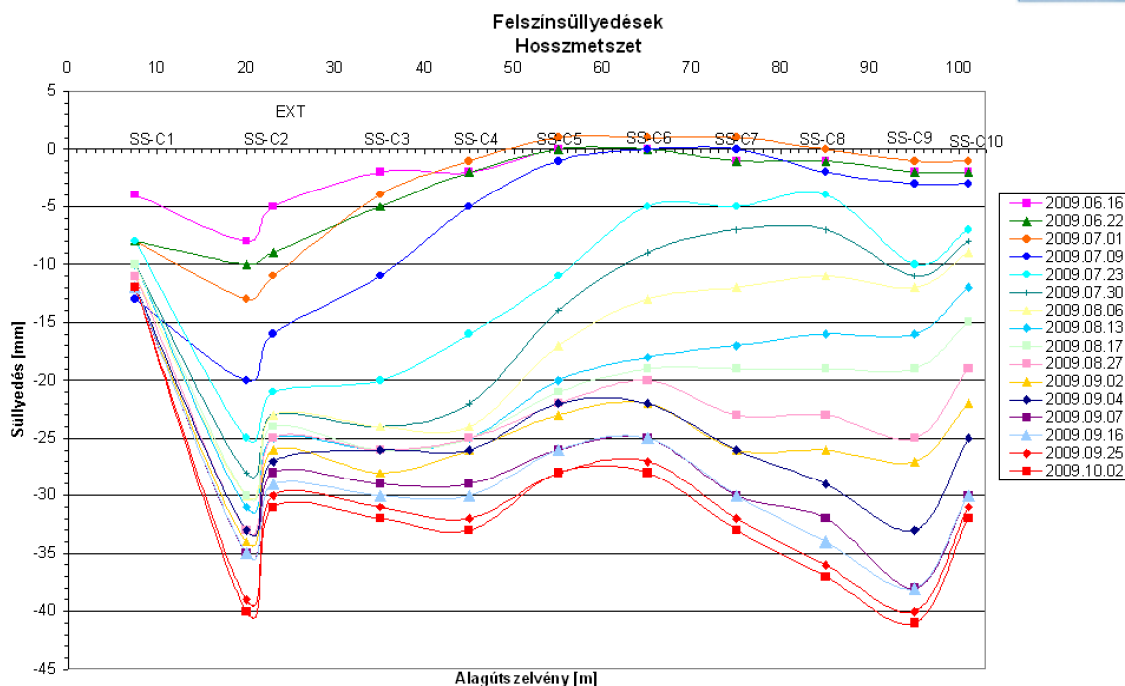
12. ábra. Vízszintes közetmozgások tartományai az alagút környezetében (24m alagútszelvény)

A felszínsüllyedés mérések elsődleges adatfeldolgozását a kivitelező készítette el. Az alagút hossz tengelyében végzett mérések eredményeit a 13. ábrán adjuk meg. Az alapmérést követő első méréskor már 4-5 kalott ív beépült az oldaltárhoz, melynek megfelelően az észlelt süllyedések kezdeti értéke 4-5 mm volt, maximálisan 8 mm a távhő vezeték szelvényében (23m alagútszelvényben). A görbék lefutása fokozatosan ellaposodik, ahogy az oldaltárhoz és kb. 20 m-rel azt követően a bővítmény rész fejtési és ívállítási munkafázisai elkészülnek. A görbékhez hozzárendelve az aktuális fejtési homlok helyzetét látható, hogy amikor eléri az üreg a felette lévő mérési pontot, ~5 mm értékű a kezdeti felszínsüllyedés értéke. Az alagút teljes építési hosszának elérésekor a felszínsüllyedés értékek 17 - 20 mm közöttiek. A mérési görbék jól mutatják - a szelvényezési munka megfigyeléseivel összhangban - a 45 m alagútszelvényig tapasztalt töredezett, tektonizált építési környezetet, melyben a maximális süllyedések 30 - 32 mm közöttinek adódtak (a tervezett értéket meghaladó). Jellegetes és tervezett értékeket meghaladó, nagy süllyedéseket mértünk a távhő vezeték szelvényében (23 m alagútszelvény), maximális értéke itt elérte a 40 mm-t. Az alagút portáljánál figyelembe kell venni a töredezett, tektonizált közettömegben korábban végzett rézsús terepkialakítás hatását. A 85 m alagútszelvényektől kijelölhető egy szintén nagy süllyedéserővel jellemezhető szakasz. Ennek oka egyrészt, hogy az oldaltárhoz fejtését utoléri a bővítmény, összeadódnak a fejtési homlokok hatásai. Eddig az időpontig 20 mm a mért felszínsüllyedés. A süllyedés értékek ezt követő 30 nap alatti

időszakban 37 mm értékre növekednek az alagút utolsó 10-15 m-es szakaszában, mialatt elbontják az oldaltárhoz ideiglenes falát a teljes hosszban, illetve lezajlik az üregnyitást követő átboltozódás, a feszültség - alakváltozás átrendeződése.

DBR 4.sz.Metrvonal  
Kelenföldi pu. állomás

Kihúzó műtárgy - lött beton alagút



**13. ábra.** Felzingsüllyedés értékek az alagút hossz tengelye mentén

A portálrészű padkájában (SS-C1) végzett mérések értékükben (max. 13 mm) és jellegükben is eltérnek a többi mérési ponttól (nincs jellemző mozgástendencia). Ennek oka még a zavart kőzetkörnyezet és a résfal okozta hatások. A távhő vezeték nyomvonalában felvett kereszt-szelvényben (23 m alagútszelvény) mért értékek az építési folyamatok tükrében válnak érthetővé (14.ábra). A kiindulási és azt követő adatokban is asszimmetria mutatkozik az alagút jobb és bal oldala között, melynek oka a részfejtés, a kőzettöredezettség és az előzőekben ismertetett aszimmetrikus kőzetnyomás adottság. A mérési szelvényben elhaladó oldaltárhoz 10 mm-es süllyedést váltott ki maximálisan. A bővítmény építésének hatására nagyobb süllyedések alakulnak ki a baloldalon, mint az oldaltárhoz esetében. További 8 mm-es süllyedés tapasztalható a mérési szelvényben az ideiglenes oldaltárhoz fal elbontásakor. Ezt követő időszakban az alagút feletti süllyedési horpa belső része szimmetrikussá válik. Ugyanakkor a mérési pontok nem fedik le a teljes süllyedési horpa szélességét, melynek asszimmetricitása látszik a szelvény szélső adatai közötti különbségen.

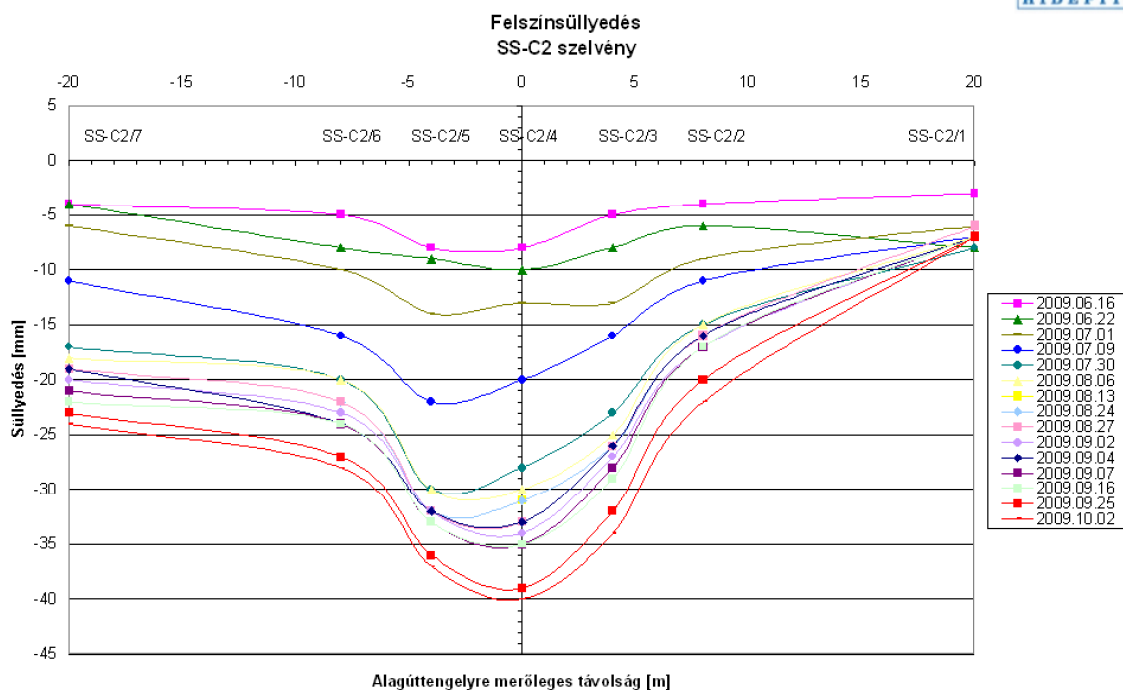
A felzingsüllyedés értékek időbeliségét vizsgálva azt találtuk, hogy a portálrészű padkában 6-9 hét alatt lezajlanak a felzingsüllyedések a homlok elhaladását követően. A távhő vezeték nyomvonalában szintén lezajló süllyedéseket mértünk az oldaltárhoz elhaladását követő 12 hét, a bővítmény építését követően pedig 8 hét elteltével. A 15. ábrán feltüntettünk az alagút hossz tengelyében lévő mérési pontok adatait az oldaltárhoz fejtési homlok előrehaladásának függvényében. Előzőek szerint a portálrészű padkában mért mozgások egyéniek. A távhő nyomvonalában (SS-C2) mért értékek szintén kilógnak a görbeseregből, az alagút fejtési ütemétől függetlenül végig nagy felzingsüllyedési értékekkel jellemezhető. Az alagút következő 23-40m-es szakaszában (SS-C3 – SS-C7) szintén befejeződnek a felzingsüllyedések az alagútépítés időszaka alatt. A befejező alagútszakaszokban összegződnek az egymást megközelítő homlokok hatásai és az ideiglenes fal bontása. Az oldaltárhoz fejtése esetében egy adott mérési pontot 10 - 20 m-re (1-2D) megközelítő homlok hatása mutatható ki. A 20 m-rel ettől elmaradó bővítmény homlokhatása 20 - 40 m-re megközelítően fejt ki egyértelmű, hozzáadódó süllyedés értékeket egy mérési szelvényben. A mérési szelvényt elhagyó bővítmény homlok 25 m-es (~2D) távolságban már nem okoz többsüllyedéseket.

A felzingsüllyedés adatait hely - idő - fejtési homlokok - végfal - építési fázisok és az egyes mérési pontok által kijelölt szelvények szerinti csoportosításban vizsgáltuk. A meghatározott süllyedésértékek, távolság és idő értékek az adott építéstechnológia, építési ütem és a geotechnikai

adottságok mellett érvényesek. Bizonyos, hogy jól lehatárolt helyeken a felszínsüllyedés értékek meghaladják a tervező által adott határértékeket, ami felveti a modellszámításokban használt geotechnikai paraméterek felülvizsgálatának igényét. A fejtési és elsődleges biztosító szerkezet beépítését, az ideiglenes fal bontását követően még 30 napon keresztül folytatódtak a felszínsüllyedés mérések. Ez idő alatt is történtek olyan munkafázisok, melyek hatással voltak az alagút szerkezetében és talajkörnyezetében kialakuló feszültségmezőre, további elmozdulásokat indikáltak, ezzel összefüggésben pedig bizonyára hozzáadódó felszínsüllyedéseket is okoztak.

DBR 4.sz.Metróvonal  
Kelenföldi pu. állomás

Kihúzó műtárgy - lőtt betonos alagút



2010.02.24

#### 14. ábra. Felszínsüllyedés értékek – 23 m alagútszelvény, távhő vezeték nyomvonalában

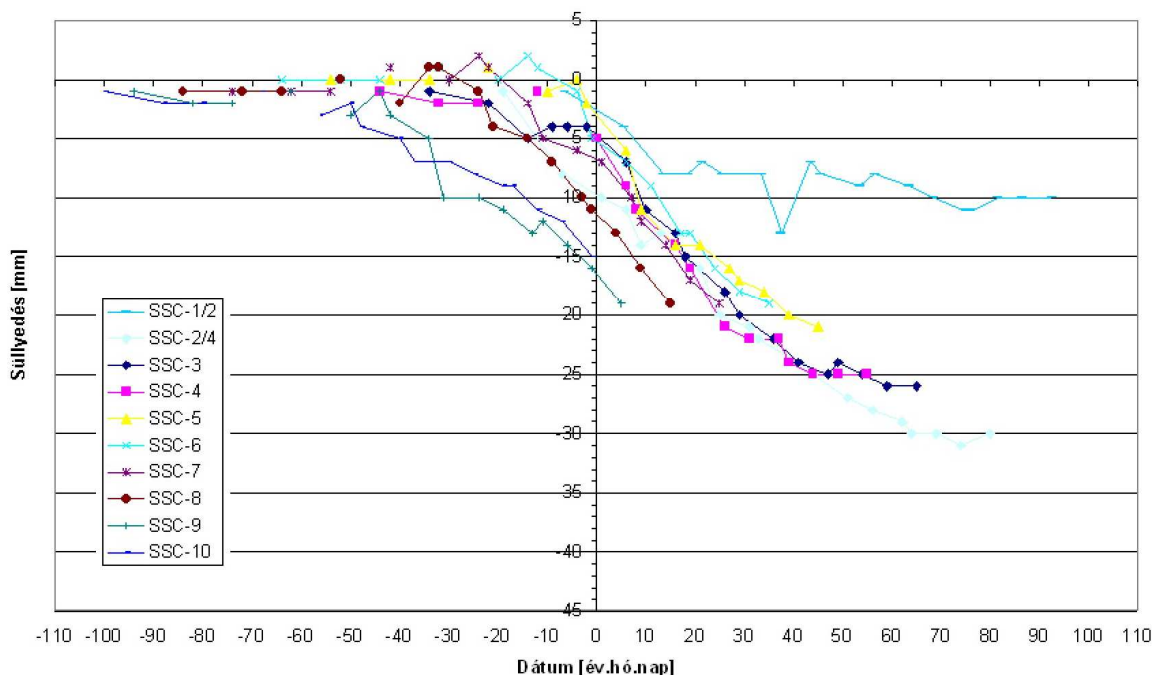
A távhő vezeték süllyedésméréseit a kivitelező készítette, geodéziai módszerekkel, digitális szintezőműszerrel. A kb. 1,0 - 1,2 m terepalatti mélységbe fektetett vezeték mérésére azért volt szükség, mert már az alagútépítés kezdeti szakaszában a vártnál nagyobb mértékű felszínsüllyedéseket tapasztaltak a vezeték nyomvonalában. A vezetékre előírt szögelfordulás maximum elérése idő előtt valószínűsíthető volt, a felszínsüllyedés mérések alapján. 2009. 07. 26-án négy helyen kutatógödrökkel tárta fel a kivitelező a vezetéket és azokban szabályos, védőcsöves mérési helyeket alakított ki (TV-1-4 jelű pontok É-D-i irányban számozva). A mérések kezdetén (2009. 07. 30-án) az oldaltárhoz 77 m alagútszelvényben, a bővítmény pedig 57 m alagútszelvényig elkészült, az ideiglenes falazatot pedig - a mérési szelvényt szintén meghaladóan - 35 m alagútszelvényig elbontották. A felszínsüllyedéseknél megállapítottuk, hogy egy mérési szelvényben az elhaladó fejtési homlok - a bővítmény esetében - annak 25 m-es eltávolodásáig mutatott ki általában hatást a felszínsüllyedés értékekre. A távhő vezeték esetében ezt a tapasztalati távolságot már a mérések kezdetén meghaladtuk, ennek ellenére a mérési eredmények szerint még további 8 héten keresztül mértünk süllyedés értékeket (ld. 16. ábra). Így a vezeték teljes süllyedésértéke nem ismert. A távhő vezetéken végzett mérések szerint itt hosszabb ideig tartó (2009. 10. 03-ig kimutatható) konszolidációs jellegű süllyedéseket mértünk. Az alagút környezetében feltárt asszimmetrikusság a távhő vezeték süllyedésének vizsgálatakor is szembejövő. Az alagúttól északra eső TV-1 jelű mérési pont 4 - 4,5 mm-es mért süllyedési értéke (nem abszolút érték!) a legkisebb, míg a legnagyobb érték a bővítmény felett alakult ki, 9 mm-es relatív értékkel.

A távhő vezetéken mért elhúzó, határértékeket kismértékben meghaladó elmozdulások, továbbá a szelvényben mért hasonlóan magas felszínsüllyedés értékek felvetették az alagút portálrészűjén korábban végzett mozgásmegfigyelések fenntartását. E méréseket a kivitelező végezte a részüben korábban létrehozott geodéziai mérési hálózat használatával. A méréseket 3 héten keresztül végezték, heti rendszerességgel, mivel a mérési hibán belül szóró értékeket kaptak (1-2 mm-en belül),

megállapítottuk, hogy a mérési szelvényben tapasztalt nagyobb süllyedések nem a rézsú esetleges oldalirányú mozgásából erednek.



Felszínsüllyedés  
SSC-1/2 - 10 pontok - az oldaltárhoz fejtésének ütemében



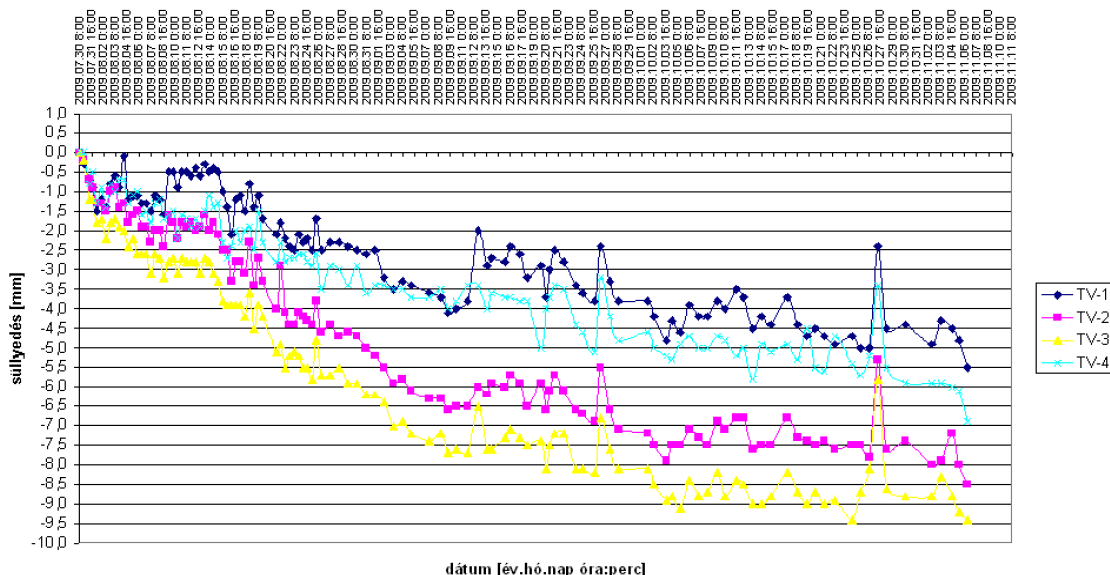
15. ábra. Felszínsüllyedés értékek az alagút hossz tengelye mentén az oldaltárhoz homlok helyzet függvényében

DBR 4.sz.Metróvonal  
Kelenföldi pu. állomás

Kihúzó műtárgy - lőtt beton oszlop alagút



Távhő vezeték süllyedése  
Idődiagram



2010.02.24

15. ábra. Távhő vezeték süllyedés mérése 4 mérési ponton – SS-C2 kereszt-szelvény (23m alagút szelvény)

## 6. AZ ALAGÚT KÖRNYEZETÉBEN MÉRT TALAJ-, RÉTEGVÍZSZINTEK A KIVITELEZÉS IDŐSZAKÁBAN

Az alagút építési közetkörnyezetét jelentő kiscelli agyagban összefüggő rétegvíz nem jelent meg. A közetkörnyezet mátrixukat tekintve (kőzettest) vízzáróak, állékonyak. Fedőjében állandó, összefüggő talajvíz sem alakul ki, azonban a csapadékból történő beszivárgás lokálisan, a vetőzónák környezetében leszivárog az alagút szintjéig. Más víztartóból, pl. a talajvízből történő áramlást megakadályozza a felső, maximálisan méterrendi vastagságú mállott kőzetzóna, mely plasztikus agyag, így vízzáró. Tektonikai zónákban, vagy olyan területeken, ahol e mállott zóna nem folytonos, lehetőség van a talajvízből történő hozzáfolyásra. A repedezett zóna ezekben az esetekben tartalmazhat rétegvizet, a kivehető hozama, vagy a bányászati munka során fennálló rétegvíz-veszélyt meghatározó vízmennyiség függ a kőzet repedezettségétől.

Az építési területen lévő negyedidőszaki képződmények áthalmozott harmadidőszaki agyagos, üledékek, melyben összefüggő talajvíz nem alakul ki. A területet átszelő Sasad-árok - annak rendezett medre - burkolt, abból elszivárgás nem lehetséges még záporokat követő extrém vízszintek esetében is biztosított a csapadékvíz azonnali elvezetése.

A kelenföldi alagút környezetében a kiscelli összlet repedezett zónája elvégződik az alagút főtéjében ugyanakkor a feltárt vetőzóna az alagút szintjébe hatolóan leér, így rétegvíz megjelenésére számítani kellett. Az alagútépítés monitoring terveiben két mérési szelvényben (23m és 76m), oldalanként 2 - 2 db rétegvíz megfigyelő kút kialakítása és folyamatos észlelése szerepelt. A megfigyelő kutakat feltüntettük a 8. ábrán, a kutak szűrőzött szakaszai és a mért vízszintek együtt láthatók a szerkezet és geotechnikai adottságokkal. A kutak fele az alagút főtéjében és felette 5 m vastagságú kőzetoszlopban van beszűrőzve (A jelűek), fele részben pedig az alagutak középső részébe lettek megnyitva, 4 m hosszban.

A megfigyelő kutakban automatizált rendszerű vízszintmérések történtek 4 órás észlelési gyakorisággal. Az egyes kutakba elektromos (vibrációs húr elvén működő) piezométerek kerültek, melyeken a mérést, adatrögzítést és az adatok továbbítását a kutak láthatóságát és védelmét biztosító oszlopokra szerelt szenzor modul biztosította. Az egyes szenzor modulok vezeték nélküli, rádiófrekvenciás módon kapcsolódtak egymáshoz, majd a láncolat valamely eleme végül a központi modulhoz (gateway). A központi modulon keresztül lehetséges a vezeték nélküli (WiSe) rendszer egyes elemeinek beállítása, programozása. Az automatizált rendszer utolsó eleme az adatgyűjtő (logger) mely saját programozásának megfelelően begyűjti az adatokat a központi modulról, továbbá gprs adatforgalom útján beküldi az adatokat az üzemeltető Geovil Kft. webszerverére. Innen az adatfeldolgozás emberi beavatkozást igényel, az időszakos rendszer felügyeleti tevékenységeket követően a beérkezett adatokat (rezgőhúr frekvencia, hőmérséklet) konvertálni kell vízszint, majd abszolút magassági rendszerben meghatározott vízszint adatokká és ki kell egészíteni az új mérési eredményekkel a már meglévő grafikus megjelenítéseket. Az adatok alapfeldolgozását követően a mérési eredményeket „visszatöltöttük” a webszerverre, a már említett korlátozott felhasználói kör részére. A vízszintmérések adatait a 16. ábrán mutatjuk be.

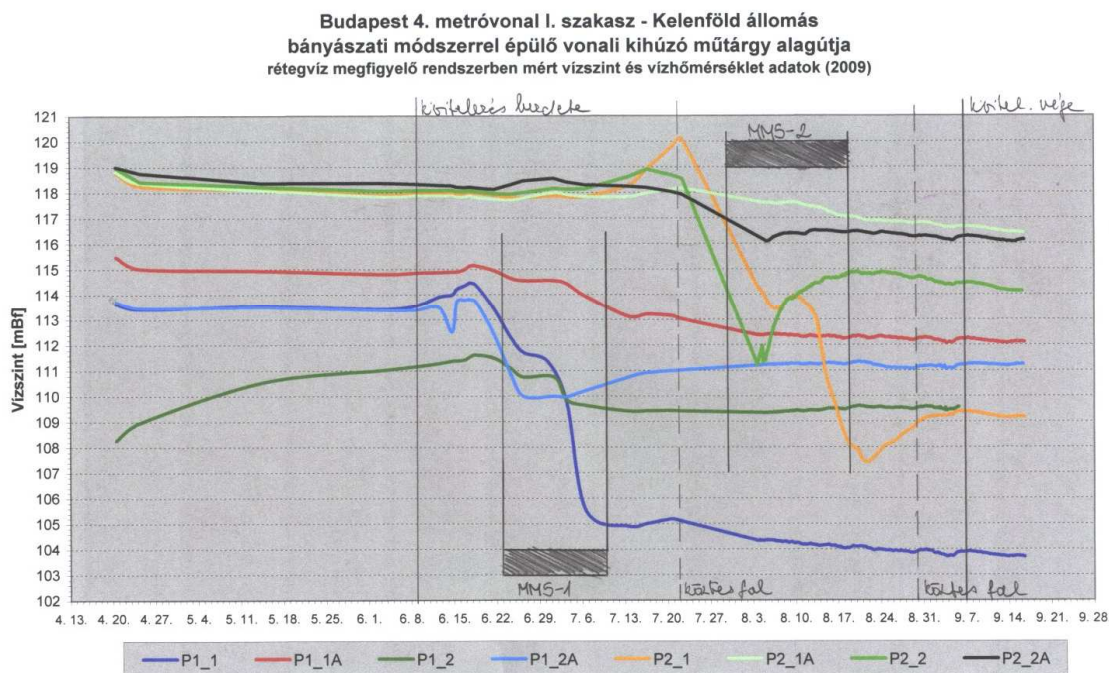
Az ábra első 2009. 06. 09-ig tartó szakaszában még nem kezdődött el az alagútépítés, az elkészített és üzembe állított kutakban regenerálódó vízszinteket mértük. Már ekkor megállapítható, hogy a két mérési szelvényben (MMS-1 -- 0+24 hm és MMS-2 -- 0+76 hm) egymástól eltérő vízszinteket mértünk. Az MMS-2 szelvényben 117,9 - 118,5 mBf-i szintek között, egymáshoz közeli vízszintek, míg az MMS-1 szelvényben 111 - 115 mBf-i szintek között nagyobb szórást mutató vízszinteket.

2009. 06. 09 - 06. 23 közötti időszakban megkezdődik az alagútépítés és az oldaltárhoz megközelíti az MMS-1 mérési szelvényt. A 16. ábra további szakasza 3 részre tagolható:

- 2009. 06. 23 - 07. 10. (07. 22) közötti szakasz, amely időszakban az alagút építése (oldaltárhoz és bővítés) folyamatban van az MMS-1 mérési szelvényben; (07. 22. az ideiglenes fal elbontása a mérési szelvényben);
- 2009. 07. 29 - 08. 19. (08. 30) közötti szakasz, amely időszakban az alagút építése (oldaltárhoz és bővítés) folyamatban van az MMS-2 mérési szelvényben; (08. 30. az ideiglenes fal elbontása a mérési szelvényben);

2009. 08. 30 - 09. 06.-a közötti időszakban elkészül az alagút teljes hosszában, továbbá elkészül a végfal (homlok dóm).

- 2009. 09. 06.-a utáni időszakban mért vízszintek az elsődleges löttbetonos héjazat elkészültét követően történnek, 2009. 09. 06.-án befejeződik az alagútépítés;



**16. ábra.** A rétegvíz megfigyelő rendszerben mért vízszintadatok és az egyes építési fázisok

A kutakban mért vízhőmérsékleti adatok nem változtak az észlelési időszakban, azok mindvégig 14 - 15°C közöttiek. Az észlelt rétegvíz hőmérséklet értékek a várt értéknél kicsit magasabbak, mely érték nem változott a kivitelezés időszakában.

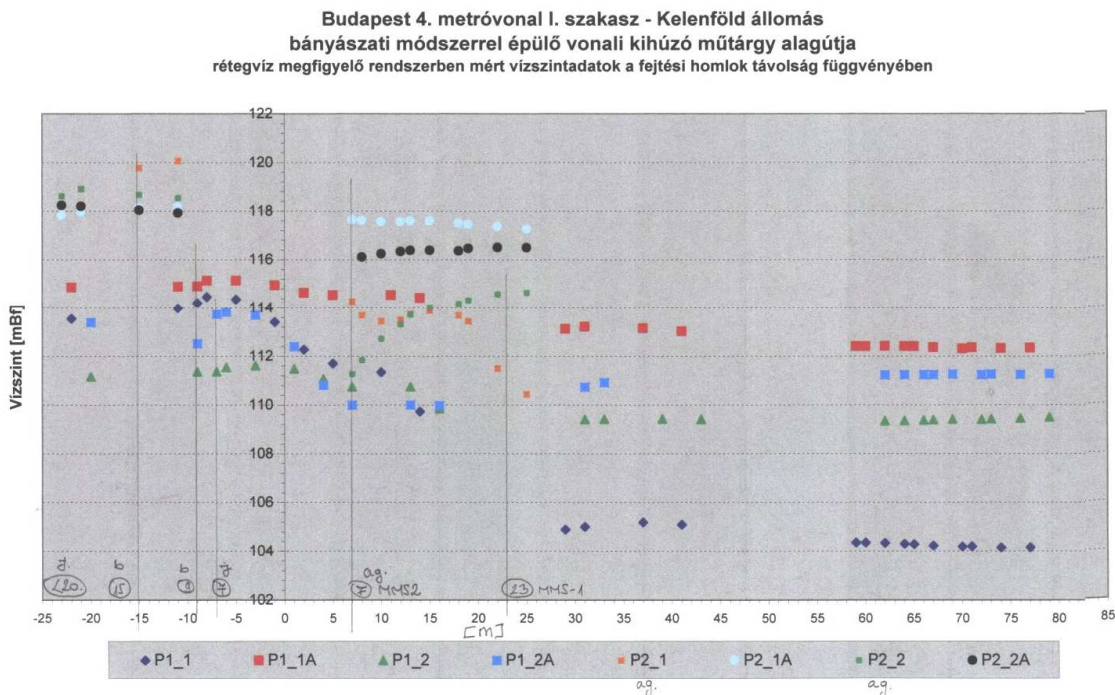
A kivitelezés során - mindkét mérési szelvényben - a fejtési homlokok közeledésével előbb vízszintemelkedéseket tapasztaltunk. Az egyes mérési szelvényekben folyó építés során 1,5 - 9 m közötti mértékben lecsökkentek a vízszintek az észlelő kutakban. A mérési szelvényt elhagyó fejtési homlok következtében egy bizonyos idő elteltével állandósulnak a kutakban a lecsökkent vízszintek. (Csak két kút esetében tapasztaltunk a minimális vízszinthez képest 2 - 3 m-el magasabb szinteken állandósuló vízszinteket. Az egyes kutakban mért vízszintek a kutak által beszűrőzött szintekben a megnyitott repedésrendszerben kialakult víznyomások értéke. Emiatt pl. a 8. ábrán adott geotechnikai kereszt-szelvényben nem is kötöttük össze folyamatos vonallal az egyes kutak vízszintjeit. Az alagútépítés során a homlok mögötti térrészben bekövetkező feszültség átrendeződés és ezzel együtt járó alakváltozás hatása kimutatható a vízszintadatokon keresztül is, melyhez a 17. ábra szerinti feldolgozást készítettük el. Az ábrán a mért vízszintadatokat a mérőkutak szelvényeitől lévő fejtési homlok mindenkorai távolsága függvényében ábrázoltuk.

A 17. ábrán összehasonlíthatóvá váltak az egyes kutak és kútcsoportok adatai. A fellelt különbségek a köztömeg repedezettségével és az egyes kutak szelvényen belüli távolságával állnak összefüggésben. A kapott görbéket vizsgálva a következő megállapításokat tesszük:

- az alagút fejtési homloka mögötti térrészben átrendeződő feszültségek a fejtés mögött 7 m és 9 m ( $<1D$ ) távolságokban kimutathatók az MMS-1 mérési szelvényben az alagút jobb és bal oldalán; Ugyan ez az érték az érték az MMS-2 mérési szelvényben 25 m-ben jelölhető ki az alagút mindkét oldalán ( $\sim 2D$ );
- a fejtési homlok elhaladásával állandósulnak a vízszintek, az MMS-1 mérési szelvényben ez a távolság 23 m ( $2D$ ). Az MMS-2 szelvényben ez a távolság egybeesik az alagút végével, így biztonságosan nem adható meg.
- Az MMS-2 szelvény esetében két kút esetében is tapasztaltuk, hogy amikor a fejtési homlok 7 m távolságra túlhalad a mérési szelvényen, m-es nagyságrendű vízszintemelkedést követően állandósulnak a vízszintek.

A vonali kihúzó műtárgy alagútépítését követően rendelkezésre álló rövid időszakban állandósult vízszinteket mértünk, nem tapasztaltuk a vízszintek regenerálódását. Az okozott vízszintváltozás nem jelenti az építési környezet terhelését, inkább további kutatási célra használható.





**17. ábra.** A rétegvíz adatok a fejtési homlok helyzete függvényében

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓK

A kelenföldi vonali kihúzó alagút térségében a kivitelezés során a Vállalkozó által végzett előzetes kutatásoknak megfelelő kőzettípusok és azokhoz rendelhető kőzetállapotok jelentkeztek. A földfejtés és az elsődleges biztosító szerkezet beépítése az épített és természetes környezetben nem okozott változást. A keresztmetszet löttbetonos héj elsődleges biztosítása biztonságos és állékony. A kivitelezés érdekében létrehozott geotechnikai monitoring rendszer megfelelt az elvárt elsődleges céljának, biztosította a kivitelezés és az épített környezet védelmét. Ehhez a folyamatos kivitelezés során a különböző monitoring eszközökről érkező adatáradat alapfeldolgozását rövid időn belül el kellett készíteni, az azonnali döntéshozatalhoz. Ezt követően a projekt céljára létrehozott, dinamikus adatportálon tematikus rendszerben helyeztük el az adatokat az érintett felhasználók, döntéshozók részére. Az internetes adatbázist használtuk a heti rendszerességű geotechnikai kockázatelemző értekezletek alkalmával is.

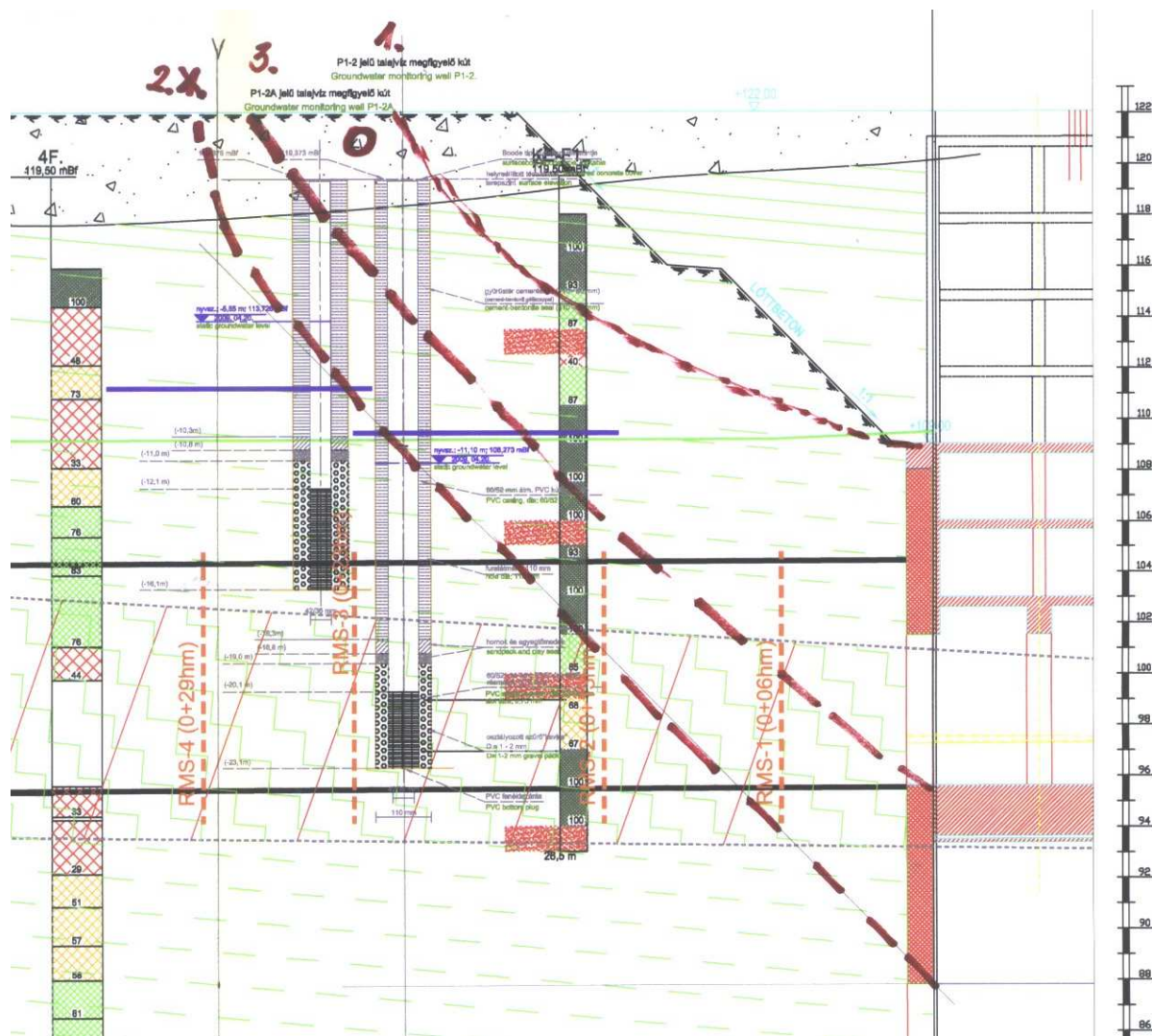
A cikkben ismertetett geotechnikai monitoring rendszer másodlagos céljának is megfelelt, adatain keresztül lehetőség nyílik a szerkezet-kőzet kölcsönhatásának időbeli vizsgálatára. Ehhez optimális feltételt teremtett a fegyelmezett, valóban ciklikus alagútépítési módszer, így az alagútépítés környezetre gyakorolt hatásai a mindenkori fejtési homlokok helyzete szerint vizsgálhatók. Az egyes monitoring elemek mérési eredményei így a közös hatásnak való megfeleltetéssel összehasonlíthatók. Megállapítottuk, hogy az oldaltároló fejtési homlok hatása 1-2D távolságon belül valamennyi monitoring elem jelentkezett a kőzetkörnyezetben bekövetkező feszültségátrendeződés, elmozdulások, fellazulás és repedésekben lévő víznyomások változásában. Az egyenletesen 20m távolságban „érkező” bővítmény homlokhatása fokozatosan épült rá az addigi állapotokra. A bővítmény homlok elhaladását követően nagyobb szórással (1D) - 1,5D - 2D kaptunk visszajelzést az egyes elemekről. Ennek oka lehet bizonyos elemek tekintetében az ideiglenes fal bontásának - fejtéstől elmaradó - megvalósulása.

A kőzetnyomás mérések rávilágítottak az alagút környezetében a löttbetonos primer héj szilárdulását követően kialakuló asszimmetrikus kőzetnyomás viszonyokra. Az alagút körül felépülő kőzefeszültségek összhangban állnak a biztosító szerkezeten mért deformációkkal és az alagút körüli vízszintes kőzetmozgásokkal egyaránt. A kőzetkörnyezet elmozdulás-képének értelmezésekor figyelemmel kell lenni a részfejtések okozta asszimmetriára. Az alagút környezetében többnyire egymással összhangban álló elmozdulásképet kaptunk. Az alagút főtéjében a különböző

mélységszintekben eltérő elmozdulásokat vártunk, ehelyett közel azonos mértékű függőleges elmozdulást kaptunk. Viszont az adatok összhangban állnak a mért felszínsüllyedés értékekkel.

A felszínsüllyedés mérések rávilágítottak az alagút hossz tengelye mentén bizonyos inhomogenitásokra. Ezek egy része volt visszavezethető kőzetviszonyokra, az alagút befejező szelvényeiben egyértelmű a szuperonáló homlokhatások. Az alagút portáljához közeli, rézsű koronájában kedvezőtlen adottság az ott lévő távhő vezeték. E szelvényben tapasztalt tervezői határértékeket meghaladó felszínsüllyedések és ebből vélelmezhető közműelmozdulások vizsgálatára figyelni kellett a távhővezetékét külön. A távhővezeték és e kereszt-szelvényben mért felszínsüllyedés értékek nagyobbak lecsengésük pedig tovább tartott más monitoring elemekhez képest. A lehetséges okokat a 18. ábrán rajzoltuk le.

Az alagút kezdeti szakasza több korábbi beavatkozással igénybevett. 1. jellel jelöltük a rézsűs tereprendezés által befolyásolt közettömeget, potenciális csúszólappal lehatárolva. 2. számmal jelöltük a réselés által befolyásolt térrész elképzelhető határát. 3. hatás a résfal meggyengítése, áttörése és az alagútépítés megkezdése. Előző hatások határvonala egybeesik a 25-28 m alagútszelvényvel, így okozhatták a 23m alagútszelvényben tapasztalt kiugró értékeket.



18. ábra. Az alagút többszörösen igénybevett kezdeti szakasza

A bányászati munkák során egyes szelvények között elenyésző mennyiségű rétegvíz szivárgás jelentkezett a kőzettörések mentén, ami fejtési, építéstechnológiai problémát nem jelentett.

A kivitelezés során a geotechnikai monitoring rendszer működése - csökkentve az építés kockázatát - hozzájárult a sikeres kivitelezéshez. Cikkünkben érdekes összefüggéseket tártunk fel a kőzetviszonyok - az építési fázisok - az okozott feszültségek - elmozdulások rendszerében. A kapott eredmények alkalmasak a tervezői „back analysis” elvégzésére, melyen keresztül értékelhetők és minősíthetők a geotechnikai előkészítés fázisában elvégzett igen sokrétű és költséges kutatási módszerek. Kiválasztható az a vizsgálati módszer, mely a legjobban megközelíti a megvalósult

viszonyokat. Ez a későbbiekben a gazdaságos beruházás feltétele is. A felhalmozott adatok, az eddig elvégzett értékelő munka kiindulópontja lehet további, tudományos igényű feldolgozásnak is.

#### IRODALOMJEGYZÉK:

- Budapest 4. metróvonal I. szakasz, Kelenföld pu. állomás bányászati módszerrel épített vonali kihúzó alagúti műtárgy - összefoglaló jelentés az építés geotechnikai viszonyairól; (Geovil Kft., GT – 07/2010; 2010. március 5.)
- Budapest 4. metróvonal I. szakasz, Kelenföld pu. állomás vonali kihúzó alagúti műtárgy - Geotechnikai monitoring elemek megvalósulási dokumentációja; (Geovil Kft., GT – 08/2009; 2009. május 12.)
- Budapest 4. metróvonal I. szakasz, Kelenföld pu. állomás és vonali kihúzó műtárgy - Kiviteli geotechnikai terv a bányászati módszerrel épülő vonali kihúzó műtárgy tervezéséhez; (Geovil Kft., GT – 36/2008; 2008. szeptember 30.)
- Budapest 4. metróvonal I. szakasz, Kelenföld pu. állomás vonali kihúzó műtárgy - Talajvizsgálati jelentés in situ SBP (önbefúró presszióméteres) mérésekről; (Geovil Kft., GT – 20/2008; 2008. július 18.)

