

Felszín közeli, lejtős térszín alatti alagút felbővítésének modellezése a Phase² végeselemes szoftverrel

Deák Ferenc

Kőmérő Kft, deakferenc@komero.hu

Mészáros Eszter

Kőmérő Kft., meszaroseszter@komero.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A magyarországi atomerőművi kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére a tervek szerint Bábaapátiban, bányászati módszerekkel kialakított felszín alatti létesítményrendszerben kerül sor. A Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló felszín alatti létesítmények be-ruházója a Radióaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Korlátolt Felelősségű Társaság (RHK Kft). A 2005 februárjában megkezdődött felszín alatti kutatás eredményeként a terület alkalmasnak bizonyult a tároló kialakítására és a hulladék befogadására, így a felszín alatti vágatrendszer hosszú távú kiszolgálását biztosító szellőző- és portálrendszer kiépítése szükséges. A Nyugati portál esetén az átépítési munkák részét képezi a lejtőszakna bevezető szakaszán mintegy 5 m-es hosszban az alagút felbővítése.

A bejáratnál található portál részsúja a portál átalakítási munkálatok során elvesztheti egyensúlyi állapotát, ugyanakkor az alagút felbővítésével párhuzamosan az alátámasztását veszített talaj- és kőzetrétegek gyorslefolyással, vagy fokozatosan deformálódva jutnak el egy új egyensúlyi állapotba. E folyamatok modellezése, nyomon követése és leképezése alapvető információt ad a tervezés és kivitelezés során figyelembe veendő reális talaj- és kőzetviszonyok megértéséhez.

Kulcsszavak: Phase2, Bábaapáti, lejtő, alagút

1. A MEGLÉVŐ PORTÁL KIVITELEZÉSE, BŐVÍTÉS MENETE

Az induló alagútszelvény kialakítása előtt a tervezett kontúr íve fölött átlagosan 50 cm távolságban előtűző csöveket (pipe canopy) helyeztek be 12 m-es hosszban, egymástól átlagosan 30 cm távolságra. A HQ méretű lyukakba behelyezett csöveket feltöltötték cementtejjel a lyuktalptól visszafele a fúrólyukak szájáig.

Az oldalszűkekre min. 25 cm vastag, acél rácshálós megerősített löttbeton réteg került, melyből szisztematikus kiosztásban talajhorgonyokat mélyítettek le. A portál fölötti részsú megerősítését szintén szisztematikus kiosztású talajhorgony biztosítással oldották meg.

A teljesen mállott gránit miatt a vágathajtás során a Mott MacDonald Ltd. által megállapított Q szerinti V. kőzetosztálynak megfelelő ($0 < Q < 0,02$) biztosítást alkalmazták, melynek elemei:

- 250 mm vastag löttbeton réteg
- 2 réteg acélháló
- 2400 mm hosszú kőzethorgonyok (1000x1000 mm kiosztásban)
- acélív (1 méteres közönként).

Azon szakasz mentén, ameddig az előtűző csövek beépültek, nem használtak kőzethorgonyokat. A kihajtás javarészt baggeres jövesztéssel történt, és 1 m-es fogásmélységgel haladtak (Mott MacDonald, Benkovis et al. 2004).

Az alagút felbővítése az előzőekben említett vágathajtási és biztosítási rendszerrel történik azzal a különbséggel, hogy előtűzőként 32 mm átmérőjű IBO horgonyokat fognak használni a bővítés kezdetétől a végéig egy hosszban, annak szögével megegyezően, így biztosítva a teljes felbővítési szakaszt a kialakított horgonyzott ernyővel, a leendő vágat felett mintegy 25 cm-rel.

2. A MODELL FELÉPÍTÉSE

A modellezést a Rocscience Phase² nevű, 5.0 verziószámú végeselemes szoftverrel végeztük el. A Phase² egy síkbeli, rugalmas-képlékeny anyagmodellt alkalmazó program, melyet széles körben alkalmaznak alagutak, külszíni fejtések, ércbányászati munkák tervezéséhez és elemzéséhez. A szoftver megalkotásánál figyelembe vett kezdeti fő profilok mellett bizonyítást nyert, hogy jól alkalmazható rézsúállékonyág elemzésére is, melyet a Rocscience Inc. (2001-2004) és Steven és Derek (2004) tanulmányai is igazolnak.

A feladat megoldását az adott szoftverben két keresztshelvény elemzésével végeztük el. Az első shelvénny a legkisebb bővítés, egyben legnagyobb takarás helyén, a második shelvénny a legnagyobb bővítés, egyben legkisebb takarás helyén vettük fel.

A modelleket az alábbi 3 fázisból építettük fel:

- kiindulási állapot
- a lejtősakna „B” (25 m²) shelvényének kihajtása és biztosítása utáni állapot
- a bővítés kihajtása és biztosítása utáni állapot

A modellezett keresztshelvényeket két ívtám közötti szakaszon vettük fel, így vágatbiztosításként csak a tervezett 250 mm-es löttbetonréteget vettük figyelembe. A ciklusidőt 1 napra terveztük, és ennek megfelelően az 1 napos korú löttbeton anyagjellemzőit definiáltuk a modellben (Farkas et al. 2006).

A modell felső határa a lejtő felszíne. Az oldalirányú határokat elsőként a felszín alatti vágathajtás modellezésénél alkalmazott háromszoros vágatátmérőnyi távolságra állítottuk be, de ebben az esetben a modellhatárok jelentős mértékben befolyásolták a kialakuló feszültségmezőt.

A peremfeltételeket az említett Rocscience Inc. (2001-2004) tanulmányban szereplő, a Phase² rézsústabilitási problémák alkalmazhatóságára vonatkozó példának megfelelően a modellter alsó határvonalán befogottunk, az oldalsó határvonalakon a függőleges elmozdulást megengedő csuklókkal definiáltuk.

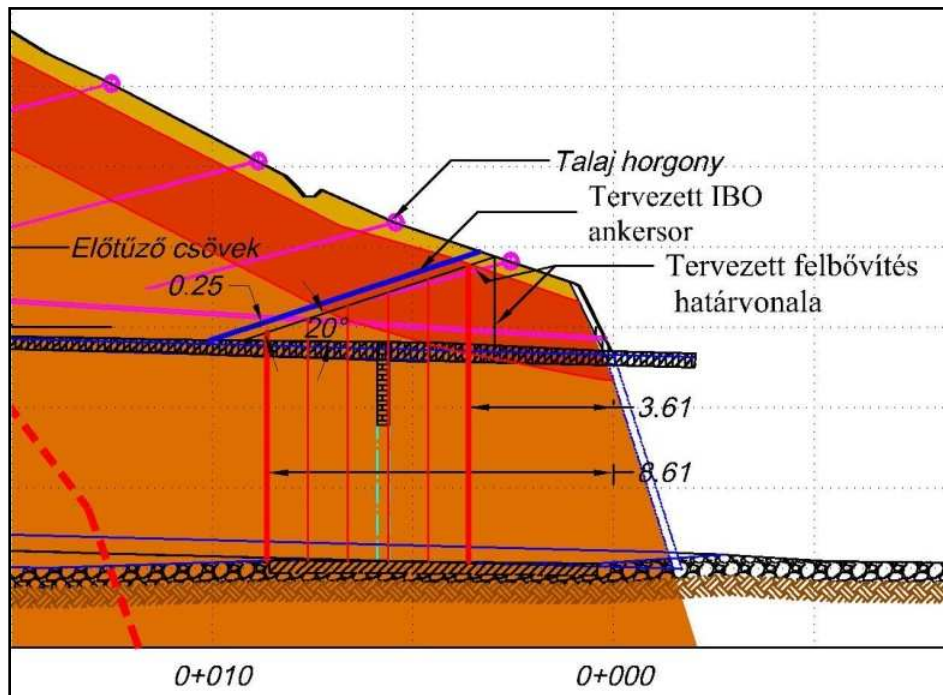
A talaj- és kőzetkörnyezet jellemzőinek a modellben definiált értékei Szabolcsi és Kecskés (2002), Deák et al. (2006) alapján, az adott szakasz vágatdokumentációit is alapul véve származtatás útján az 1. és 2. táblázatban szerepelnek, az alagút hosszsz metszeti elrendezését az 1. ábra mutatja (talaj- és kőzetrétegek, IBO ankersor, talajhorgonyok, piros vonallal az acél ívtámok). A kapott eredményeket összehasonlítottuk egy másik projekt közel azonos környezetben felvett adataival is (Babendererde et al. 2004).

1. Táblázat: Bemenő paraméterek a Mohr-Coulomb tönkremeneteli kritérium alapján

Rétegek	γ	σ_m	ν	σ_t	ϕ	c	ψ
	(kN/m ³)	(MPa)		(MPa)	(°)	(MPa)	(°)
1. Világosbarna iszap-agyag	19	10	0,2	0	5	0,02	0
2. Vörösesbarna homokos-kavicsos kitöltésű kőzetmáladék	19	100	0,2	0	26	0,001	0
3. Barna gránit-murva, mállott gránit (széteső)	22	1100	0,2	0,05	30	0,02	0

2. Táblázat: Hoek-Brown tönkremeneteli kritérium alapján (Hoek et al. 2002)

Réteg	Hoek-Brown				
	E_m (MPa)	ν	σ_{ci} (MPa)	m_b	s
Barna gránitmurva, mállott gránit (széteső)	1100	0,2	5	0,5	0.00



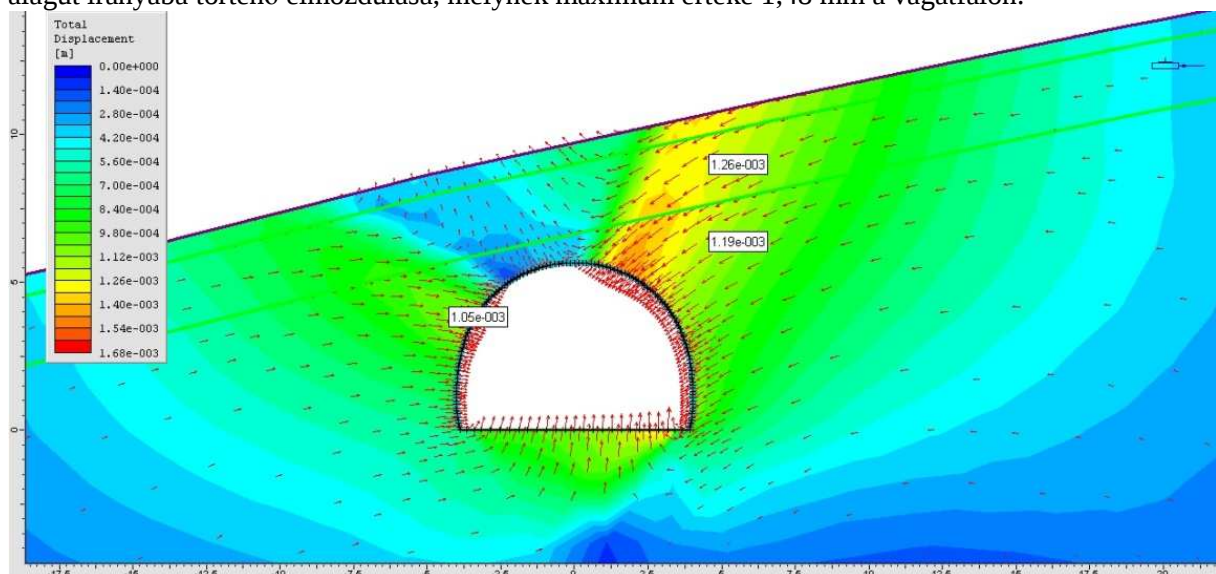
1. ábra: A tervezett felbővítés a hosszszelvényi szelvényen

3. EREDMÉNYEK

Az eredményeket mindkét modell esetében a második fázishoz viszonyítva olvastuk ki. Ezzel feltételeztük, hogy a lejtőszakna „B” szelvényének kihajtása során végbemenő elmozdulások már lezajlottak, vagyis egy-egy adott pont, bővítésből származó elmozdulásait nem szükséges a korábbi vágathajtás hatására végbemenő elmozdulásokkal integrálni.

3.1 Első keresztmetszet

A bővítés hatására történő elmozdulásokat a 2. ábra mutatja. Jól észrevehető a rézsű földtömegének az alagút irányába történő elmozdulása, melynek maximum értéke 1,48 mm a vágatfalán.



2. ábra: Az első fogás bővítése utáni elmozdulások

3.2 Utolsó keresztmetszet

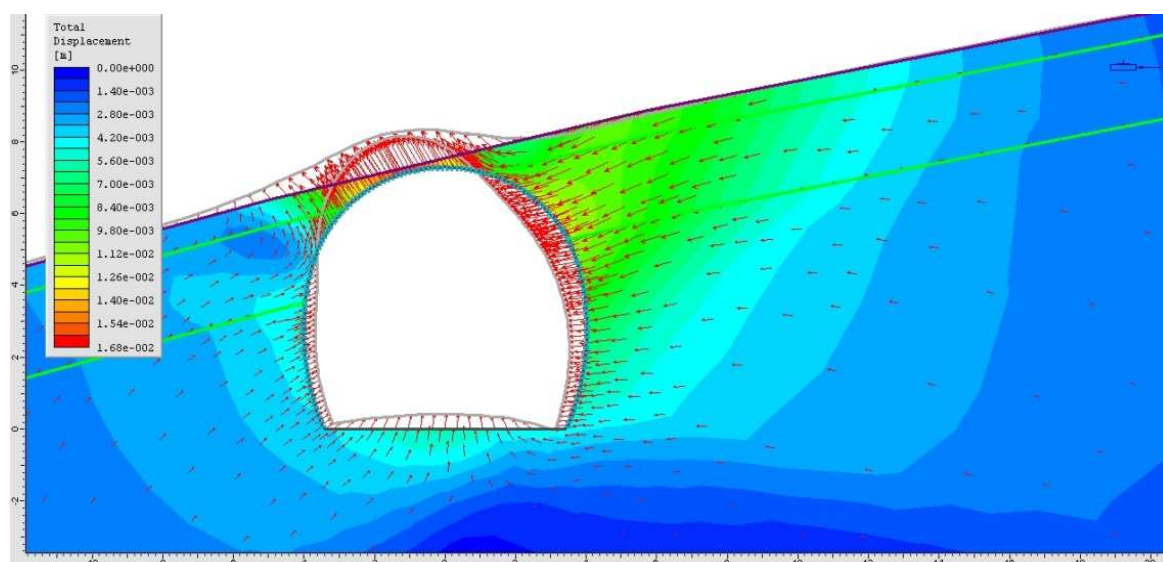
Az utolsó fogásban a kiindulási feltételekkel felépített modellben egyértelműen kirajzolódik a rézsű földtömeg alagút irányába történő csúszása, az alagút tönkremenetele, ahol az elmozdulások centiméteresek (3. ábra).

Ezért felépítettünk egy új modellt, melyben az alagút fölé egy leterhelő löttbetonréteget, az alagút mellé pedig talajhorgonyokat definiáltunk az elmozdulások csökkentésére. A kritikus alagút felé mozgó földtömeg megszűnt, a maximális elmozdulás 2,85 mm (4. ábra).

Még a portál átalakítási munkálatokat megelőzően el kell végezni a pótbiztosítás beépítését. Először egy 25 cm vastag löttbeton réteget kell fellőni 8 m hosszan az utolsó legnagyobb felbővítés szelvénye fölött kezdődően, a vágat fölött, hossz tengelye mentén 4 m szélességben. A modellezésben mi 12 m hosszú beton réteget használtunk, ám lecsökkentve 8 m-re ugyanazokat az eredményeket kaptuk (19. ábra).

Két talajhorgony sort kell beépíteni. A modellben a sorok közti távolságot 8,7 m-ben állapítottuk meg, ám ez az érték 1 m-en belüli távolságban változtatható. A soron belüli horgony kiosztás 1 m távolságú kell, hogy legyen. Tehát összesen 4 db. horgonyt kell beépíteni a keleti és 4-et a nyugati oldalra. A modellezés során használt horgonyhosszak a 19. ábrán láthatóak. A kivitelezés során lehetséges hosszabb horgonyok használata.

A horgonyok tulajdonságai és beépítési technológiája megegyezik a rézsűbe korábban beépített horgonyokéval.



3. ábra: Az utolsó fogás bővítése utáni elmozdulások és az alagútfalazat deformációja kiegészítő biztosítás alkalmazása nélkül

4. A VÁGATBIZTOSÍTÁS ERŐTANI ELLENŐRZÉSE

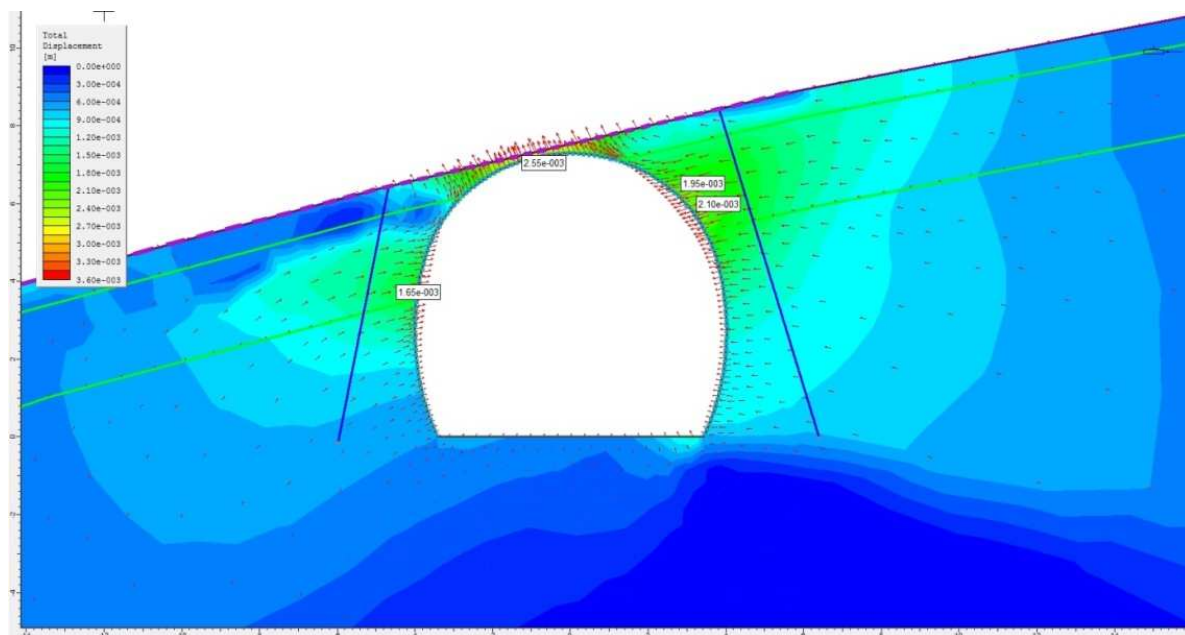
A löttbeton ellenőrzése a teherbírasi vonal alapján történt (5. ábra). A teherbírasi vonal számításánál figyelembe vettük az acél rácsáló jelenlétét ($\Phi 6/150$ mm). Az acélminőséget S240B-re vettük fel.

Az első keresztmetszet esetén a modellből kiolvasott összes igénybevétel pár a teherbírasi vonalon belülrre esik, az utolsó keresztmetszet esetén található néhány kritikus pont, ami a teherbírasi vonalon kívülrre esik. A modellben azonban nem tudtuk figyelembe venni az acél ívtámok tehermentesítő hatását és a tengely menti lejtő földtömegének nyomásából eredő, a függőleges terhekhez adódó igénybevétel többletet. Továbbá a modellt a vágatbiztosítás hosszú távú viselkedésének ellenőrzésére építettük fel és a rugalmassági modulus esetén a tartós terhekhez tartozó effektív alakváltozási tényezőt definiáltuk, a végtelen értékhez tartozó 2-es beton alakváltozási tényező felhasználásával. Mivel a modell az elmozdulások, feszültségek és igénybevételek változását nem elemzi az idő függvényében, így a modell alapján csak azt a következtetést vonhatjuk le, hogy hosszú távon a vágatbiztosítás a definiált körülmények mellett nem bizonyul állékonynak.

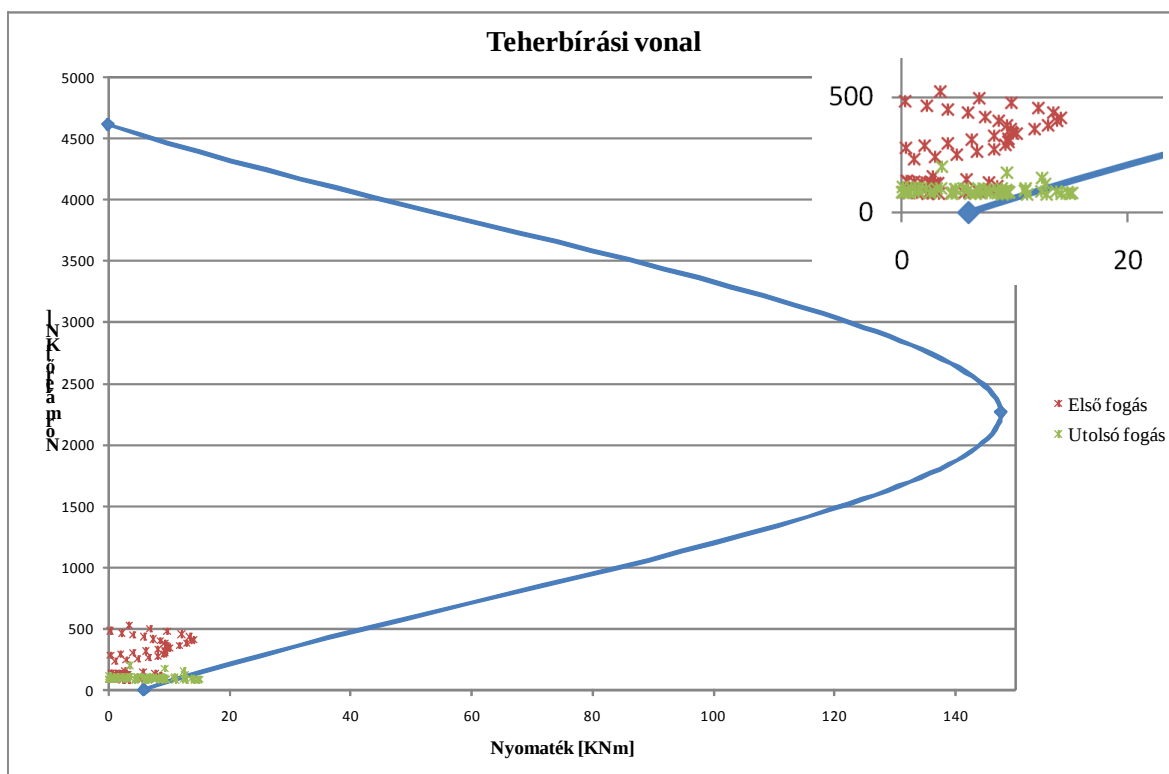
A terv szerint a portálépület megépülése után a vizsgált keresztmetszelen fölé visszatöltés készül. Mivel annak pontos geometriai kialakításáról nincs információnk, ezért ezt a fázist teljes részletében nem vizsgáltuk. A keresztmetszelen fölé helyezett földtömeget úgy adtuk meg, hogy a vágat tengelyé-

ben 1 m-es fedést adjon, oldalirányban tetszőleges rézsűhajlásszöget vettünk fel, a földtömeg állékonyságával nem foglalkoztunk (így peremfeltételt sem adtunk meg neki, szabad felszínként hagytuk.) Célunk csak a vágatfalban megváltozott igénybevételek vizsgálata volt. A modellből exportált igénybevételeket szintén a teherbírasi vonallal vizsgáltuk. Ebben az esetben az igénybevételek már a teherbírasi vonalon belülre estek.

Ezekből az eredményekből kiindulva javasoljuk a tervezett terhelő földtömeg mielőbbi elhelyezését.



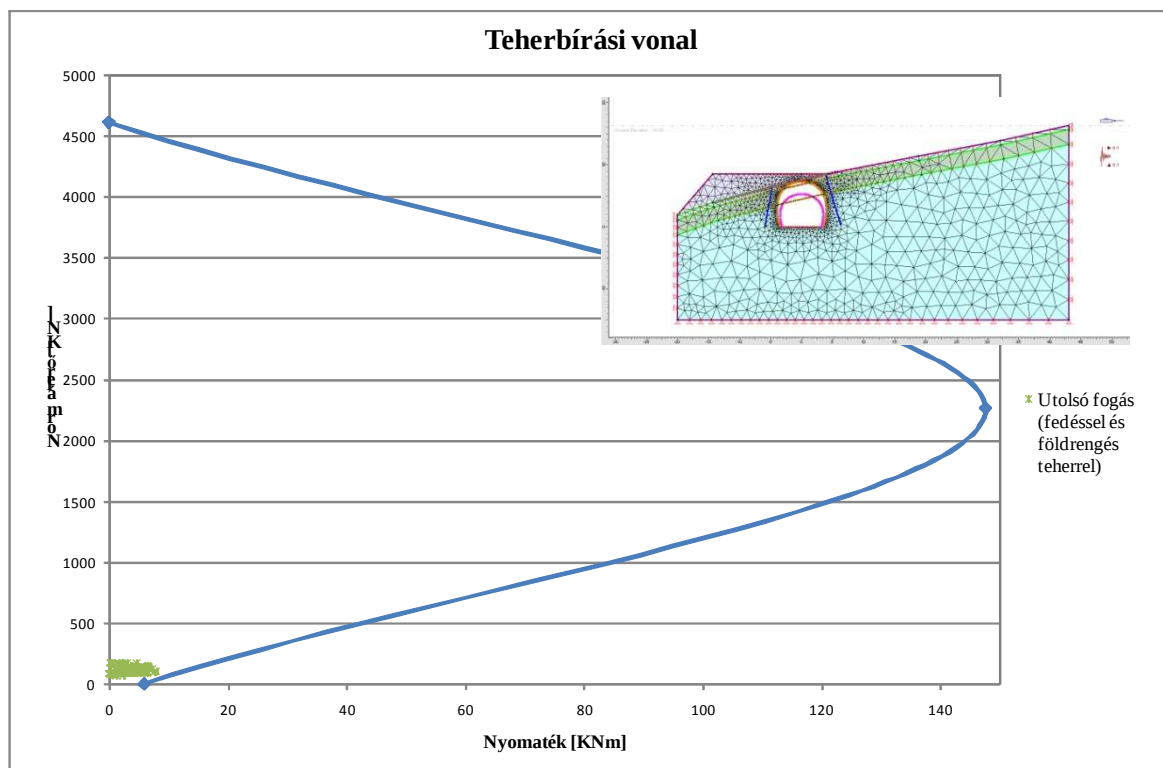
4. ábra: Az utolsó fogás bővítése utáni elmozdulások kiegészítő biztosítással



5. ábra: A vizsgált keresztmetszetek löttbeton vágatbiztosításának ellenőrzése a teherbírasi vonal alapján

5. A FELADAT MODELLEZÉSÉNEK KORLÁTAI

A síkbeli modellezés minden esetben a térbeli rendszer leegyszerűsítését igényli. A jelen feladat, sajátosságaiból fakadóan (két irányban lejtős térszín; kis szilárdságú, mállott kőzet; kis takarási mélységű alagút; konoid felület) több olyan problémát illetve elgondolást is felvet, amelyet a Phase² szoftverrel nem tudtunk kezelni (Trinh et al. 2009), de a valósághoz közeli modellezés szempontjából kiemelt fontosságúnak tartunk. Az alábbiakban szeretnénk felhívni ezekre a figyelmet:



6. ábra: A teherbírési diagram alakulása a leterhelés figyelembevételével, földrengési tényező alkalmazásával (felső sarokban a modell)

- Az vizsgált alagút szakasz erősen mállott, kis szilárdságú gránitban található, melyet durva közelítéssel talajként kezelhetünk. Ebben a környezetben az állékonyság szempontjából különösen fontos szerepe van az elmozdulások időbeli alakulásának. Mivel ezt nem tudjuk modellezni a szoftverben, feltételezzük, hogy az alkalmazott előtűző csövek kellő erősítést nyújtanak addig, amíg a vágatfal nem kapja meg a löttbeton biztosítást. (A beépített előtűző csövek és a beépítésre kerülő IBO ankorsor hatását Hoek (2004) alapján próbáltuk a modellben figyelembe venni. Ehhez először felépítettünk egy kalibrációs modellt a „B” szelvény kihajtására, mellyel az volt a célunk, hogy a módszer alkalmazhatóságát ellenőrizzük. Az eredmények alapján az előtűző csövek egyéb biztosító elemek nélkül a teljes terhelést nem tudták tartani, az alagút beomlott. Ugyanakkor egymagában a löttbeton réteg definiálásával lezajló teljes elmozdulások értékeiben nem mutat számottevő változást az előtűző csövek jelenléte. Tehát az előtűző csövek a szabad vágatfal ideiglenes megtámasztását biztosítják, a terhelés növekedésével hatásuk kimerül.)

- A kis takarási mélység miatt az alagút bővítése jelentős elmozdulásokat okoz a felszínen. Ugyanez fordítva is igaz, azaz a lejtős térszín jelentős befolyással van a kis takarási mélységű alagút falának elmozdulásaira. (Kezdeti koncepciónkban a két keresztaszelvény mellett egy hosszszelvényű modell megalkotása is szerepelt. A modelfelépítés közben azonban szembesültünk azzal a problémával, hogy a vágatbiztosítást nem tudjuk megfelelően modellezni – ötletünk az volt, hogy az ívtámokat befogott pontként definiáljunk, ezt azonban csak peremfeltételként lehet megadni, amit nem lehet változtatni a modellezés fázisai között, azaz az alagútbővítés lépcsői nem működtethetők. Következésképpen azt láttuk megoldásnak, hogy az ívtámokat egyensúlyi erővel helyettesítsük- ez szintén körülményes tekintve, hogy nem sík térszínről van szó. A továbbiakban ezért az idő hiányában csak a két keresztmetszetre koncentráltunk.)

- Az előző bekezdésben foglaltakkal összefüggésben a löttbeton alagútfalazatra jutó terhek mértékét ugyancsak befolyásolja a tengely menti szintén ferde térszín, az igénybevételek nem csak a függőleges terhekből keletkeznek adott keresztmetszetben, hanem a rézsús földtömeg nyomásából

is. (Ezt a problémát egy esetleges hosszszelvény sem tudja megoldani, tekintve, hogy síkbeli, azaz alagútfalazat méretezésére alkalmatlan.)

- Az adott anyagkörnyezetben ugyancsak kiemelt szerepe van a méterenként elhelyezett ívtámoknak, melyek fontos szerepet játszanak a vágatbiztosításra háruló terhek elosztásában. A síkbeli modell a definiált keresztmetszetet végtelen hosszúnak tekinti, azaz végtelen hosszú, csak löttbeton réteggel biztosított alagút síkbeli terheit számolja ki. További konzervativizmus a modellben, hogy nem tudunk a vágatbiztosítás részeként acélhálót sem definiálni.

6. JAVASLAT AZ ÉPÍTÉSI MONITORING RENDSZERRE

A portál átépítésének és rézsűjének monitoringja azt a célt szolgálja, hogy érzékelje a jövesztési területek környezetében a talaj- és köztömeg elmozdulásait, amelyek meggyorsíthatják a kialakított műtárgy tönkremenetelét. Erre a célra inklinométeres méréseket és optikai prizmás méréseket tanácsos használni. Az alagútfalazat mozgásának mérésére javasolt az utolsó felbővített keresztmetszetbe optikai konvergencia mérő csapok telepítése 8-10-12-2-4 óra kiosztásban.

Ezekkel a mérésekkel ellenőrizhető a szelvényfelbővítés és a végleges rézsűkialakítás munkáinak deformációs hatása. Az esetleges vágatbiztosításon megjelenő betonrepedéseket szemrevételezéssel, illetve műszeres vizsgálattal kell monitorozni, pl. crack méter, nyúlásmérő bélyeg segítségével.

A felszín alatti vizek befolyásolják a rézsű stabilitását, nagyban elősegítik potenciális csúszó rétegek kialakulását, ezáltal leronthatják a biztonsági tényezőt. Ebből az okból kifolyólag, legalább egy piezométer lyuk lefúrását és monitorozását ajánljuk. Ezáltal információk lehet a rézsű környezetében észlelhető vízszintváltozásokról.

7. KÖVETKEZTETÉSEK

A Nyugati-portál tervezett átalakításának síkbeli modellezése a valóság jelentős leegyszerűsítését igényli. Mindemellett a lejátszódó folyamatok alakulását az idő függvényében nem tudjuk vizsgálni. A modellek ugyanakkor egyértelműen mutatják a rézsűs földtömeg alagút irányába történő elmozdulását. Ezért rendkívül körültekintő kivitelezés szükséges. Az előrehaladással a bővítés egyre kritikusabbá válik, a második fogás már eléri a második fedőréteget, ami nagyon alacsony, 0-3 kPa-os kohézióval rendelkezik. Az előrehaladással emellett csökken a fedés, és nő a szabad homlok mérete. A rézsűs földtömeg csúszása miatt javasolt az alagút lépcsős bővítése és a szabad alagútfal és homlok azonnali löttbetonozása. A jelentős oldalnyomások kiegyenlítésére ajánlott a tervezett visszatöltés mielőbbi megvalósítása. A kivitelezési munkák folyamán elengedhetetlen az építési terület szakszerű monitorozása.

IRODALOM

Babendererde S., Hoek E., Marinos P., Cardoso A.S. 2004: Characterization of Granite and the Underground Construction in Metro do Porto, Portugal *Selected papers from a course on geotechnical Risk in Rock Tunnels*, Aveiro, Portugal (1-8)

Deák F., Molnos I., Kovács L., Vásárhelyi B. 2006: A Bátaapáti radioaktív hulladéktároló építése. Geotechnikai vágatdokumentálás. *Mélyépítés*, 2006. október–december, 7–13.

Farkas Gy., Huszár Zs., Kovács T., Szalai K. 2006: *Betonszerkezetek méretezése az Eurocode alapján*, Terc Kft., Budapest

Hoek E., Carranza-Torres C. T., Corkum B. 2002: *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. In: Proceedings of the 5. North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 267–273.

Hoek E. 2004: *Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock*, www.rocscience.com, 1-16.

Mott MacDonald, Benkovics I., Berta J., Hámos G., Takács A., Varga M., Bakainé Papp K. 2004: *Létesítési engedélyezési terv az „Üveghuta” megnevezésű területen mélyítendő kutató lejtőszaknák építéséhez*. 2004. október 25., Kézirat, Mecsekérc Zrt. Adattára, Pécs, J–3807.

Rocscience Inc. 2001: Phase² 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations, User's guide

Rocscience Inc. 2001: Phase² Interpret program reference manual

Rocscience Inc 2001-2004: Application of the Finite Element Method to Slope Stability, www.rocscience.com, 1-57.

Steven C., Derek M. 2004: *Ground Deformations Above a Large Shallow Tunnel Excavated Using Jet Grouting*, EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquy, VGE, Essen, 155-160.

Szabolcsi B., Kecskés G. 2002: *Területismertető geotechnikai szakvélemény a Bátaapáti, Nagymórági-völgy térségében épülő felszíni létesítmények tervezéséhez*, DRILL-URBAN ÉPÍTÉS-TERVEZÉSI ÉS GEOTECHNIKAI BT., Budapest

Trinh Q.N., Broch E., Lu M. 2009: *2D versus 3D modelling for tunneling at a weakness zone*, Taylor&Francis Group, London, 1-6.