

Az alagútfejtés okozta felszínsüllyedések számítási módszereinek értékelése a budapesti 4. számú metróalagutak építése során mért felszínmozgások tükrében

Szepesházi Attila

BME, Építőmérnöki Kar, szepeshaziattila@hotmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Az alagúthajtás okozta felszínsüllyedések számítására kidolgozott hagyományos, azaz sztochasztikus-empirikus vagy analitikus eljárások mellett mind jobban teret nyernek a vége-selemes módszerek is. Bármelyik eljárást is alkalmazzuk, a számítás legfontosabb paramétere az alagúthajtás során létrejövő túlfejtés mértéke. Tradicionális eljárások, valamint a síkbeli és térbeli vége-selemes modellekkel készített süllyedésszámításaim eredményeit a 4. budapesti metróvonal vonali alagútjainak építése során mért értékekkel vetettem össze. Ezek alapján kijelenthető, hogy azonos túlfejtési arány számításba vétele esetén a hagyományos, „kézi” módszerek és a síkbeli vége-selemes modellek lényegében azonos, míg a térbeli modellek némileg alacsonyabb eredményeket szolgáltatnak. Ez az eltérés a térbeli modell néhány sajátossága miatt logikusnak tűnik, de ennek igazolásához további vizsgálatokra lenne szükség. A térbeli számítások jelentősen nagyobb munkaigénye miatt alkalmazásuk csak akkor lehet kifizetődő, ha a süllyedések meghatározása mellett olyan eredményekre is szükségünk van, melyek síkbeli modellel nem, vagy csak jelentős egyszerűsítések árán határozhatók meg.

Kulcsszavak: alagútépítés, felszínsüllyedés-számítás, vége-selemes modellezés

1 BEVEZETÉS

A budapesti 4. számú metró vonali alagútjainak építése 2010-ben befejeződött, ugyanakkor a projekt kivitelezését segítő monitoring-rendszer különböző mérési eredményeinek utólagos elemzése hasznos lehet a jövőbeni alagútépítési projektek lebonyolításához. A BSc-szintű diplomamunkám keretében a Kálvin tér és Rákóczi tér állomások közötti metróalagutak fejtése miatt létrejövő felszínsüllyedések elemzésével foglalkoztam. Összefoglaltam a szakirodalomban fellelhető felszínsüllyedés-számítási módszereket, majd a két állomás közötti vonalszakasz általam kiválasztott két keresztirányú metszetét (52+82 és 54+13 szelvényszámú) vizsgáltam. Több tradicionális számítási módszer alkalmazása mellett síkbeli és térbeli vége-selemes modelleket is készítettem, így a különböző alapelvek eljárások eredményeit összehasonlíthattam az alagutak fejtése során mért felszínmozgásokkal. Jelen cikkben a hagyományos süllyedés-számítási eljárások részleteire terjedelmi okokból csak nagyon röviden térek ki, elsősorban a síkbeli és térbeli vége-selemes modellek építésének lényegesebb kérdéseit ismertetem. Teszem ezt azért is, mert hasonló modellek épülhetnek egyéb alagútépítés-tervezési kérdések megválaszolására céljából is, így a modellépítés során szerzett tapasztalataim esetleg más alagútépítési feladatokkal foglalkozó mérnökök számára is hasznosak lehetnek.

2 ALAGÚTHAJTÁS OKOZTA FELSZÍNSÜLLYEDÉSEK SZÁMÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Az alagútépítési technológia rohamos fejlődése következtében a felszínsüllyedések manapság talán már kisebb problémát jelentenek, mint néhány évtizeddel korábban, ennek ellenére városi környezetben elengedhetetlen a felszínsüllyedések előzetes kalkulációja. A számítási módszerek alapelveiket tekintve három csoportba sorolhatók.

Elsőként a sztochasztikus alapon kidolgozott, empirikusan javított eljárások jelentek meg. Peck 1969-ben publikált eljárása ma is az egyik legelterjedtebben alkalmazott módszernek tekinthető, ezért röviden összefoglalom a lényegét (Suwansawat, 2002). A felszíni horpát Gauss-görbével közelítő eljárás az 1. képlet segítségével gyors becslésre kiválóan alkalmas.

$$\delta_z := \delta_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{2i^2}\right)} \quad (1)$$

Az összefüggésben x a vizsgált pont vízszintes távolsága az alagúttengely függőlegeséhez viszonyítva, i a függvény inflexiós pontjának vízszintes koordinátája, δ_{\max} pedig az alagúttengely függőlegesében bekövetkező maximális süllyedés értéke. A süllyedési horpa matematikai leírásához és így a felszín tetszőleges pontjában bekövetkező süllyedés meghatározásához tehát két ismeretlen, a maximális süllyedés és az inflexiós pont helyének ismerete szükséges. Mérési eredményekre támaszkodva több kutató készített ezek becslését segítő diagramokat. A két ismeretlenes függvény más úton való megoldásához később Cording és Hansmire megfigyelései adtak lehetőséget, miszerint, elsősorban kohéziós talajokban épülő alagutak esetén, az alagút végleges térfogatához képest kitermelt talajtöbblet, az ún. talajvesztesség térfogata megegyezik a felszíni horpa térfogatával. A felszíni horpa folyóméterre eső térfogata a Gauss-görbe integrálásával nyert 2. képlet szerint i és δ_{\max} függvényében adódik.

$$V_{\delta} := \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot \delta_{\max} \quad (2)$$

A túlfertés mértékét, vagyis a talajvesztéseket az alagút kifejtett térfogatához viszonyítva, százalékos formában szokás megadni:

$$V_L := \frac{V_{\delta}}{\left(\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \right)} \quad (3)$$

Így a süllyedési horpa alakja a V_L túlfertési arány és az i tényező értékéből határozható meg. Bár Cording és Hansmire megfigyeléseit kohéziós talajkörnyezetre vonatkoznak, szemcsés közegben is elfogadott az alkalmazása.

Az inflexiós pont helyének és így lényegében a felszíni horpa szélességének becslésére O'Reilly és New mérési eredmények alapján kidolgozott eljárása terjedt el. A túlfertés mértékére vonatkozóan pedig szakirodalmi adatok alapján, az alkalmazott technológia jellemzőinek mérlegelésével tehető becslés. A 4. számú budapesti metró előzetes süllyedésanalízise során a számítást végző cég úgy feltételezte, hogy EPB pajzsos építés esetén 1%-nál nagyobb mértékű túlfertés nem következhet be. Szakirodalmi vizsgálódásaim során egyetlen eljárást találtam, mely a talajvesztések analízisével foglalkozik. Rowe és társai (1983 és 1992) közöltek egy analitikus számítási lehetőséget a talajvesztések, vagy ahogy szakirodalmuk nevezi a hézag paraméter meghatározására. A módszer a fejtési technológia különböző paramétere mellett a talajkörnyezet jellemzőit és a felszíni terheléseket is bevonja a számításba. Diplomamunkáiban ezt az eljárást alkalmaztam a túlfertés mértékének számítására, jelen cikkben ennek részleteire nem térek ki. Franzius (2003) munkája említi még, hogy amikor londoni alagútépítések kapcsán Burland és társai a túlfertés felszínsüllyedésekre gyakorolt hatásaival részletesen foglalkoztak, végül azt javasolták, hogy a legjobb megoldás, ha a kivitelezővel kötött szerződésben a megengedhető felszínsüllyedések mellett a túlfertés megengedhető maximumát is megadják, azonban annak pontosabb meghatározását segítő eljárást nem találtak.

A sztochasztikus alapú módszerekkel párhuzamosan a rugalmas féltér vizsgálatán alapuló, ún. analitikus eljárásokat is megjelentek, említhető például Sagasetta, Verruijt és Booker valamint Loganathan és Poulos módszere. A különböző feltételezéseken alapuló, egyszerűbb és összetettebb módszerek szintén a talajvesztesség meghatározását igénylik. Chaiwonglek és Suwansawat (2009) a bangkoki metróépítések mérési eredményeit felhasználva kidolgozott új analitikus módszerének megjelenése jelzi, hogy a különböző műhelyekben még ma is javítgatják ezeket az eljárásokat. A thai kutatók eljárását friss megjelenése mellett azért is érdemes kiemelni, mert az általam fellelt módszerek közül ez az egyetlen, amely nem a talajvesztések függvényében számítja a felszínmozgásokat, hanem közvetlenül számításba vesz több, a fejtés technológiáját és a talaj viselkedését jellemző tényezőt is.

A fentiekben ismertetett sztochasztikus és analitikus lehetőségeket várhatóan lassan kiszorítják a különböző numerikus eljárások. A mélyépítési gyakorlat egyelőre főleg síkbeli modellekkel dolgozik, de a térbeli számítások megjelenése éppen alagútépítési feladatokhoz köthető, ugyanis az állandó keresztmetszetű vonalalagutak általában jól vizsgálhatóak a síkbeli modellek alagúttengely-irányú kiterjesztésével létrejövő, ún. „2,5D-s” modellekkel. Lényeges, hogy bizonyos jelenségek, mint például a homloknyomás, mint a fejtési homlokra definiált megoszló erő közvetlenül figyelembe vehetőek egy ilyen térbeli modellben, de számtalan a felszínsüllyedéseket befolyásoló tényező a tradicionális módszereknél is említett talajvesztések bevitelével kezelhető. Az alagútépítési feladatokra tervezett végeselemes szoftverek a túlfertést általában az alagútfalazat túlfertéssel arányos mértékű csökkentésével, kontrahálásával veszik számításba. A végeselemes eszközök jelentőségét fokozza az összetettebb anyagmodellek terjedése is. Jelenleg kiemelt szerepet játszik a földkiemelés okozta tehermentesülések hatását is tekintetbe vevő felkeményedő talajmodell, de ígéretesek a puha agyagok vagy a

repedezett kőzetek számítására fejlesztett típusok is. Franzius (2003) összegezte a szakirodalomban fellelhető térbeli végeselemes vizsgálatok tapasztalatait, kimutatva azt, hogy a pontos süllyedésszámításhoz az anyagmodellekben a mélységgel növekvő merevségi jellemzők és a kis alakváltozások jelenlégének figyelembevétele is lényeges.

Vizsgálataim során egyszerű, gyors elvégezhetősége miatt alkalmaztam Peck összefüggéseit. A felsorolt analitikus módszerek közül Loganathan és Poulos, illetve Chaiwonglek és Suwansawat eljárását teszteltem. A BME Geotechnikai Tanszék és az Uvaterv Zrt. rendelkezésemre bocsátotta a Plaxis szoftvercsalád síkbeli (2D) analízisre alkalmas programja mellett a Plaxis 3D Tunnel nevű modult is, így a síkbeli végeselemes analízis mellett térbeli számításokat is végezhettem. A talajveszteségek konzervatív becslése helyett a már említett hézag paraméteres módszert használtam.

3 FELSZÍNSÜLLYEDÉSEK ALAKULÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

A végeselemes modell felépítéséhez elengedhetetlen volt, hogy részletesen megvizsgáljam, hogy milyen tényezők határozzák meg a kialakuló felszínmozgásokat és, hogy ezek hogyan vehetők figyelembe egy végeselemes modellben. A szakirodalmi vizsgálódásaim tapasztalatai alapján a felszínmozgások kialakulásában szerepet játszó tényezőket három csoportra érdemes osztani: az építési technológia egyes részleteihez kapcsolódó, az alagút fekvésétől, geometriájától és elrendezésétől függő, valamint az alagútkörnyezet mérnökgeológiai, hidrogeológiai és geotechnikai jellemzőitől függő tényezőkre. Az alábbiakban sorra veszem ezeket és tisztázom, hogy az általam vizsgált szakaszon melyeket lehet és érdemes figyelembe venni. Minden esetben kitérek arra, hogy túlféjtés mértékét befolyásoló hatások közül melyek vehetők figyelembe a korábban említett, Rowe és társai által publikált hézag paraméter számítása során. Emellett, ha egy síkbeli vagy térbeli végeselemes modellbe közvetlenül figyelembe vehető a hatás, akkor röviden megemlítem, hogy miként.

3.1 Az építési technológiával kapcsolatos tényezők

3.1.1 A munkakamrában alkalmazott homloknyomás

A régi, aktív homlokmeztámasztásra nem képes pajzsok esetében a legnagyobb mértékű túlféjtés és így felszínmozgás a homlokon bekövetkező fellazulásból eredt. A Metro4 projekten alkalmazott EPB pajzsos építési technológia előnye, hogy a fejtési homlokon alkalmazott megfelelő nyomásokkal szinte teljesen megszüntethető a homlok expanziója, lazulása. A homloknyomásokat az alagúthajtás során folyamatosan ellenőrizték, de sajnos ezen mérési eredményeket nem sikerült beszerezni, ezért azok számításának dokumentációira és az ahhoz kapcsolódó tervekre kellett hagyatkoznom. A pesti oldal változékony talajviszonyai miatt a beszámolók szerint a kivitelező szigorúan követte a terveket, így vélhetően ezek is kielégítően pontos számításokat eredményeztek. Számításaimban az alagút főtepontjára megadott ún. nagynyomási értéket alkalmaztam, mely az 52+82 metszetben 192 kPa, míg az 54+13 metszetben 199 kPa. A nyomás a főteponttól lefelé a munkakamrában levő talajmassza térfogatsúlyának megfelelően növekszik, amit 14 kN/m^3 nagyságúnak feltételeztem. A hézag paraméteres számítási eljárás közvetlenül az alagúttengelynél számított homloknyomás értékét veszi számításba, a térbeli végeselemes modellben pedig, mint a fejtési homlokon definiált megoszló teher vehető figyelembe.

3.1.2 A pajzs geometriai kialakításából adódó túlféjtés

Jelentős mértékű túlféjtés jöhet létre a fejtőeszközök pajzsköpeny-átmérőn való túlnyúlásából vagy a pajzs esetleg kissé kúpos kialakításából. A Metro4 projekten alkalmazott fűrőpajzs tervrajzai alapján úgy értékeltem, hogy ezeknek köszönhetően semmilyen számottevő túlféjtés nem eredeztethető. A hézag paraméteres módszer közvetlenül a fejtőeszköz túlnyúlását veszi számításba, míg végeselemes modellben csupán a kontrakció beállításánál vehető figyelembe.

3.1.3 A TBM pontatlan irányításból adódó túlféjtés

Az előírt vonalvezetés követését korszerű alagútépítő gépek esetében, ahogy a Metro4 projekt során is, automata vezérlőrendszer biztosítja. Lokálisan, kisebb mértékű (~10 cm) iránytévesztések még így is gyakran előfordulnak, de ezek süllyedésnövelő hatása elhanyagolható. A hézag paraméteres eljárás ezen tényező számításba vételére is alkalmas, de az általam vizsgált két keresztmetszet esetében, az alagút viszonylag magas szilárdsági és merevségi paraméterei miatt az irányításból adódó túlféjtés alig befolyásolja a számításokat.

3.1.4 *A hátúr mérete, az injektálás minősége, az injektálási nyomás nagysága*

A felszínsüllyedések nagy hányada, a túl alacsony homloknymások működtetése mellett, a hátúr elégtelen injektálásából ered. A hézag paraméteres eljárás során azt kell megbecsülni, hogy a pajzsköpeny külső átmérője és a falazat külső átmérője közötti több centiméteres eltérésből adódó hátúr térfogatának hány százalékát tölti ki az injektáló anyag. A szakirodalmi tapasztalatok (Rowe és társai, 1983, 1992) szerint a korszerű, faroklemezen keresztül végzett injektálás szinte teljesen kiküszöböli a hátúr kialakulása miatti mozgásokat, bár a tapasztalatok szerint kevésbé állékony, puha talajban annak hatásfoka jelentősen csökkenhet. A pesti oldalon – tekintettel a gyengébb minőségű altalajra – nagy gonddal végezték az injektálást, így elég magas hatásfok feltételezhető. Az injektálás technológiai utasításait alapján végül 95%-os hatékonyságot becsültem. Előzetes süllyedésszámítások esetén nyilvánvalóan célszerű ennél konzervatívabb becslés.

3.1.5 *A beépített falazat jellemzői*

A korszerű falazatokban olyan kismértékű alakváltozások jönnek létre, hogy azok deformációinak süllyedésnövelő hatásának vizsgálatától gyakran eltekintenek. Az Uvaterv Zrt. rendelkezésemre bocsátotta a Metro4 projektben alkalmazott falazat terveit, így elég pontosan meghatározható annak merevsége. Az előregyártott elemek méretei és anyagminősége alapján becsülhető jellemzőknél valószínűleg kedvezőbbek a valós viszonyok, hiszen a cementáló hatású hátúrinjektáló anyag és az elemek egymáshoz feszítése tovább növeli a szerkezet merevségét. A legtöbb tradicionális süllyedésszámítási módszer nem ad lehetőséget a falazat alakváltozásainak számításba vételére, ugyanakkor a végeselemes szoftverekbe pedig a tervrajzok szerint anyagminőségek és geometriai méretek figyelembe vételével a falazat is véges elemekkel kerül modellezésre, így azok nagyon csekély deformációi is számításba kerülnek. A tervrajzoknak megfelelően C50/60 minőségű betont vettem figyelembe 30 centiméteres vastagságban.

3.1.6 *A fejtés sebessége*

Suwansawat (2002) mérési tapasztalatai szerint, ha valamilyen oknál fogva túl lassan folyik az alagútfejtés, akkor nem igazán lehet kiküszöbölni a talajvesztések és így a felszínmozgások növekedését. A hézag paraméteres eljárásban az időtényező közvetlenül nem vehető figyelembe. Egy térbeli végeselemes modellel elméletileg tekintetbe lehet venni az alagútépítés sebességét adott időtartamra vonatkozó konszolidációs számítás beépítésével, de ennek helyes elkészítéséhez pontosabban ismerünk kellene például az alagútkörnyezet vízáteresztő-képességét is, ráadásul egy ilyen térbeli modell magas elemszáma miatt egy ilyen konszolidációs számítás mai informatikai lehetőségeinkkel nem kivitelezhető. Az általam vizsgált szakaszon az alagútfúró gépek viszonylag egyenletesen és gyorsan haladtak, így a fejtési sebesség figyelmen kívül hagyása nem lehetett probléma.

3.2 *A vonali alagutak helyétől, geometriai kialakításától függő tényezők*

3.2.1 *Az alagút átmérője, az alagút feletti takarás vastagsága*

Ha a vizsgált keresztmetszet vagy zóna feletti terület beépített, akkor az épületek alapozási szintjét kell, mint felszínt vizsgálni. A különböző tervrajzok alapján az alagúttengely feletti takarást és az építmények alapozási mélységét is egyértelműen megadják, így az mind a hagyományos, mind a végeselemes számításokban pontosan megadható.

3.2.2 *Az indítóműtárgytól való távolság*

Az alagútépítési gyakorlatban kedvelt megoldás, hogy mikor a fúrópajzs egy állomásból újabb vonalszakasz fejtésének indulva az első néhány tíz méteren az állomásban munkagödörben elhelyezett indítókeretre támaszkodva sajtolja magát előre, majd az újabb és újabb falazóelemek beépítésével az előresajtolási erő egyre inkább azokra hárul. Ilyen helyzetben gyakran a sajtolási erő csökkentése szükséges az első néhány beépített falazatgyűrű megóvása érdekében. A szükséges előrenyomási erő az alkalmazott homloknymás csökkentésével minimalizálható, ami viszont a felszínmozgások növekedéséhez vezethet. Az általam vizsgált egyik metszet viszonylag közel fekszik a Kálvin téri állomáshoz, azonban úgy értesültem, hogy egyéb beavatkozások eredményeként nem kellett számottevően csökkenteni a homloknymást, így ezzel a jelenséggel számításaimban nem foglalkoztam.

3.2.3 Párhuzamosan haladó alagutak építésének sorrendje

A szakirodalomban többször említik, hogy páros alagutak esetén, a mérési eredmények alapján az elsőnek érkező alagút valamivel nagyobb süllyedéseket generál, mint a nyugalmi állapotokhoz képest már módosult állapotú talajkörnyezetbe érkező második alagút. A hagyományos számítások során páros alagutak esetében a két alagút fejtéséből adódó horpát egyszerűen szuperponálják, végeeselemes számítások esetében ugyanakkor, ha a modellter mindkét alagutat tartalmazza, akkor bekerülnek a számításba a megváltozott alakváltozási és feszültségi állapotoknak köszönhető módosulások is, bár a valóságos állapotokat az időtényező bevonásával lehetne igazán jól követni. Ettől azonban a fejtési sebességről szóló pontban már közölt okok miatt eltekintettem. Síkbeli modellek esetében nem jelenthet gondot az, hogy mind a bal, mind a jobb oldali alagút a modellbe kerüljön, térbeli számítások esetén viszont már gyakran van szükség arra, hogy spóroljunk az elemszámmal.

3.2.4 A felszíni szerkezetek elrendezése, merevsége

A kérdéskörrel Franzius (2003) foglalkozott részletesen. A végeeselemes eljárások esetén a környező épületek merev alaplemezőnek a süllyedésekre gyakorolt, vélhetően csökkentő hatását is be lehet vonni a vizsgálatba, míg a tradicionális módszerek esetén, csak az épületterhek talajfeszültség-növelő hatását lehetséges. Az alaptestnek a modellbe való építéséhez az épület merevségi jellemzőinek közelítő meghatározása szükséges, de a talajszerkezet-interakciók korrekt számításba vétele is számos kérdés megválaszolását várja, ezért a végeeselemes modellekbe kizárólag a felszíni szerkezetek terheit építettem be. A felszíni szerkezetek jellemző terhelési viszonyait az adott épületek méretei, szintjeinek száma és rendeltetése alapján becsültem.

3.3 Mérnökgeológiai, hidrogeológiai, geotechnikai jellemzők

3.3.1 A talaj- vagy kőzetkörnyezet jellemzői

A kialakuló felszínmozgások természetesen jelentősen függenek az altalaj geotechnikai adottságaitól. A hagyományos süllyedésszámítási módszerek általában egy-egy, az altalaj merevségét vagy szilárdságát jellemző paraméter megadását igénylik. Végeeselemes számítások során azonban nem alkalmazhatunk egyszerűbb, lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny anyagmodellt, mert így az alagútfúrás eredményeként adódó földkiemeléssel járó tehermentesülés miatt az altalaj „fellélegzik”, így reális süllyedésértékeket semmiképpen nem várhatunk. Ennek elkerülése céljából érdemes az már egyre elterjedtebben alkalmazott felkeményedő talajmodellt alkalmaznunk. Egy ilyen modell felépítéséhez szükséges paraméterek meghatározása egy-két kivételtől eltekintve egyelőre nem megszokott a mélyépítési gyakorlatban. Célszerű a szakirodalom és a szoftverfejlesztők különböző ajánlásaira támaszkodni, hogy az elvégzett kis számú vizsgálatból is megbízható modellt kaphassunk. Az általam vizsgált szakasról a GEOVIL Kft. által készített összefoglaló szakvélemény elegendő alapot adott az alagútkörnyezet anyagmodelljének felépítéséhez, ráadásul egy-egy újonnan mélyített fúrás mintáin a felkeményedő talajmodell egyik kulcsparaméterét, az újratelhelési modulust is meghatározták. Az anyagmodell összeállítását részletesen bemutatom a következő fejezetben.

3.3.2 A talajvíz szintje

A talajvíz szerepe a felszínsüllyedések tekintetében akkor jelentős, ha az alagúthajtás során nagy mennyiségű víz kivételére kerül sor. A korszerű, aktív homlokmegettámasztású pajzsok esetén ez kevésbé jelent problémát, mint korábban. A talajvíz szintje az analitikus módszereknél az alagúttengelynél működő feszültségek nagyságát befolyásolja, míg a végeeselemes analízis során közvetlenül kell megadni. A már említett geotechnikai szakvélemény részletesen foglalkozik a terület hidrogeológiai viszonyaival, ami alapján a talajvízszint elég pontosan becsülhető volt.

4 VÉGESELEMES SZÁMÍTÁSOK

Mint korábban szó volt róla, a vizsgált metszetekben a felszínsüllyedések meghatározására a Plaxis szoftvercsalád programjait alkalmaztam. A Plaxis 8.2 modullal kettő, részben eltérő síkbeli megoldást dolgoztam ki, míg a Plaxis 3D Tunnel szoftverrel térbeli modelleket hoztam létre. Az alábbiakban elsősorban az alkalmazott anyagmodelleket mutatom be, majd a síkbeli és térbeli modellépítés érdekesebb részleteit ismertetem.

4.1 Anyagmodellek létrehozása

A vizsgált területen a 0,5-2,5 m vastag feltöltés alatt a negyedidőszaki holocén rétegek vastagsága 9,7-11 m között változik, melynek felső, iszapos, homokos, homoklisztes rétege alatt vastagabb kavicsos homok vagy homokos kavics réteg fekszik. A nyílt tükrű talajvíz ezen holocén telep felső rétegeiben mozog. A kisebb mélységben fekvő negyedidőszaki rétegeknek az alagúttervezés szempontjából kevésbé lényeges talajfizikai paramétereire vonatkozóan az idézett szakvélemény különböző intervallumokat ad meg, melyek vélhetően elsősorban adattári munka eredményeként születtek. A feltöltés rendre a felszíni épületek alapozási síkja felett van, így nem szerepel az általam készített modellekben. A negyedidőszaki rétegsorban mind a felső homoklisztes, iszapos mind az alsó homokos, kavicsos rétegre az ideálisan rugalmas és tökéletesen képlékeny viselkedést Coulomb-féle törési feltétellel kombináló Mohr-Coulomb modellt alkalmaztam. Az egyes talajparamétereket a szakvéleményben megadott intervallumok közéértékének megfelelően vettem fel. Ezekben a rétegekben azért elegendő a Mohr-Coulomb modell alkalmazása, mert az alagútfejtés okozta feszültség-szint-változás kevésbé érvényesül.

A szakvélemény szerint a holocén rétegsor alatt fekvő, 13-15 m vastagságú harmadidőszaki képződmények változatos összetételűek, még a laboratóriumi vizsgálatokhoz vett magminták sem voltak mindig homogénnek tekinthetőek. A projekt előkészítésekor készített feltárásokhoz kapcsolódó vizsgálatok szerint egyes összetételű miocén réteget alkotó agyag, bentonitos agyag, homokos agyag, illetve a homok és agyagos homok megnevezéssel illetett talajok között szilárdsági paramétereiket tekintve lényeges eltérés nem mutatható ki. Emiatt a szakvélemény az előbbieket agyagos, utóbbiakat pedig homokos kifejlődésként kezeli, talajfizikai paramétereikre pedig az 1. táblázatban olvasható intervallumokat ajánlja.

1. táblázat. A miocén réteg jellemző paraméterei

Megnevezés	e [-]	ρ [t/m^3]	I_c [-]	φ [°]	c [kPa]	k [m/s]
Agyagos kifejlődés	0,3-0,5	1,9-2,1	0,8-1,5	32-38	181-240	10^{-9} - 10^{-6}
Homokos kifejlődés	0,3-0,5	1,9-2,1		26-32	0-300	10^{-7} - 10^{-6}

A homokos kifejlődés gyakran meszes kötésű, ami helyenként jelentős kohéziót kölcsönöz a talajnak. Ennek köszönhető a fenti táblázatban látható széles kohéziótartomány. A szakvélemény készítése után mélyített fúrások mintáin végzett kísérletek szilárdsági paraméterei jelentős szórást mutattak a 2. táblázatban közölt tartományokhoz képest, de az összességében erősen inhomogénnek tetsző miocén összletre jellemző átlagos értéként elfogadhatónak látszanak. A homokos és agyagos kifejlődés bizonytalan váltakozása és összességében nagyon hasonló talajfizikai jellemzői miatt ezt a teljes miocén réteget egy egységként kezeltem a felkeményedő anyagmodell definiálása során. Az egyik metszet közelében mélyített fúrás esetében összesen 12, a másik metszet esetében pedig 4 különböző talajmintán végeztek vizsgálatokat. A modellhez szükséges paramétereket tehát a korábbi tapasztalatokat összegző fenti táblázat és az újonnan készült vizsgálatok eredményeinek együttes mérlegelése alapján választhattam meg.

A felkeményedő talajmodell definiálásához további megfontolásokra is szükség van. A laboratóriumi vizsgálatok során meghatározott rugalmassági modulus és a szakirodalmi ajánlások alapján becsülhető Poisson-tényező ismeretében az összenyomódási modulus is meghatározható. A laboratóriumi vizsgálatok viszonylag nagy szórása miatt végül csökkentett, 100 MPa nagyságú rugalmassági modulusal számoltam. A felkeményedő modell alkalmazása esetében a szoftvergyártó ajánlásai alapján úgy vehető, hogy az E_{50} húrmodulus megegyezik az összenyomódási modulusal, míg az E_{ur} újratelhelési modulus ezek háromszorosa. A merevség teherszinttel való növekedésének mértékét az m hatványkitevő határozza meg. A szoftvergyártók ajánlásai szerint ennek értéke kavicsra 0,5, míg kővér agyagra 1 körüli érték reális. Ezek alapján mivel a miocén rétegekben az iszapfrakció az uralkodó $m=0,9$ -t alkalmaztam. A felkeményedő modell igényli a megadott merevségi értékhez tartozó nyomási referencia érték (p_{ref}) megadását is. A laboratóriumi vizsgálatok jegyzőkönyveinek hiányában a minták mélységében becsülhet teljes függőleges feszültséget adtam meg. Az újratelhelési harántkontrakciós tényező felvételére alig található ajánlás a szakirodalmakban, így azokat az alapértelmezett $v_{ur}=0,2$ -es értéken hagytam.

Az alagút fejtési keresztmetszete teljes egészében a miocén rétegekben fekszik, de a földkiemelés miatti teherszint változásnak köszönhetően a felszín-süllyedéseket a miocén alatt fekvő alsó oligocén rétegek is befolyásolhatják. A miocén rétegsorhoz hasonló megfontolások vezették az egyes paraméterek felvételét, azokat most terjedelmi okokból nem közlöm.

A 2. táblázat az általam vizsgált 52+82 szelvényszámú metszetben alkalmazott paramétereket összegzi. Az 54+13 számú metszetben hasonló értékeket alkalmaztam, de az ezeket összegző táblázatot terjedelmi okokból nem közlöm.

A végleges falelemek és a pajzsköpeny lineárisan rugalmas modellel definiáltam. A 3. táblázatban összefoglaltam a falszerkezet tervrajzai és a pajzs technológiai leírása alapján felvett anyagjellemzőket.

2. táblázat. Az 52+82 metszetben megjelenő talajrétegek modelljéhez alkalmazott anyagjellemzők

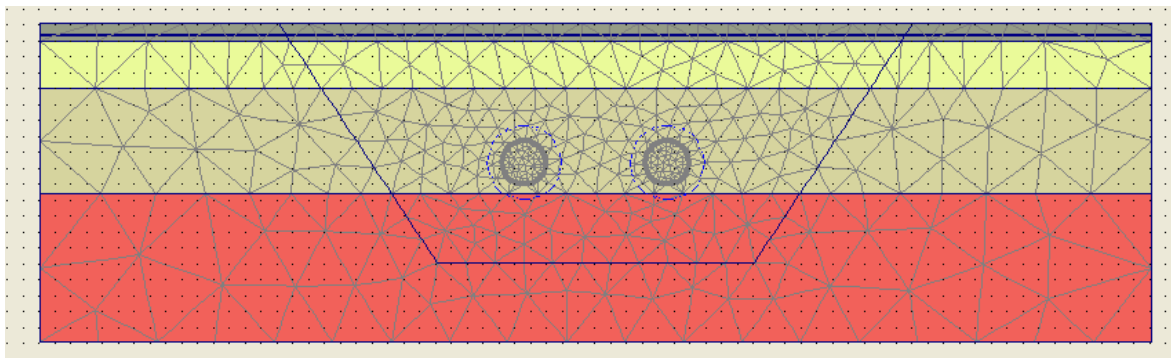
52+82 metszet	Feltöltés	Izapos homokliszt	Homokos kavics	Miocén alagút-környezet	Alsó oligocén
γ_N [kN/m ³]	19,00	18,00	20,00	19,00	20,00
γ_T [kN/m ³]	20,00	20,00	22,00	21,00	22,00
φ [°]	20	13	34	30	30
c [kPa]	0	25	0	60->220	220
E [kN/m ²]	10000	5500	18000	100000	100000
ν [-]	0,30	0,35	0,30	0,40	0,35
E_s [kN/m ²]	13462	8827	24231	214286	160494
E_{50} [kN/m ²]	-	-	-	214286	160494
E_{ur} [kN/m ²]	-	-	-	642857	481481
m [-]	-	-	-	0,9	0,7
vastagság [m]	1,00	4,20	6,00	13,20	-

3. táblázat. Az alagútfalazat és a pajzsköpeny modelljének anyagjellemzői

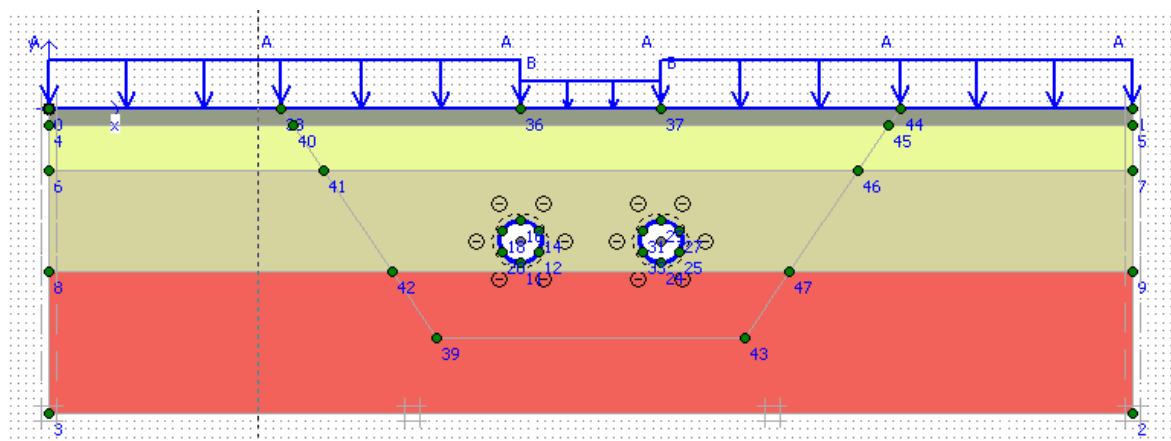
	Alagútfalazat	Pajzsköpeny
Anyagmodell	Elastic	Elastic
EA [kN/m]	11100000	40000000
EI [kNm ² /m]	83250	133333
ν [-]	0,2	0,3
w [kN/m/m]	24	36

4.2 A síkbeli végeelemes modellek

A fentiekben ismerttettem az altalaj és a szerkezeti elemek modellezésének fontosabb részleteit. Az ezek alapján felépített egyik modellt a végeelemes hálóval ábrázolja az 1. ábra. Az alagutak alatt futó vízszintes és az abból két irányban ferdén induló, a felszín vonalát metsző vonalak kizárólag a végeelem háló megfelelő sűrítését segítik, egyéb szerepük nincsen. A kezdeti állapotban a talajkörnyezet még zavartalan, de a felszíni szerkezetek terheit aktiváltam. A felszínsüllyedések lényegében a túlfejtés eredményeként jönnek létre, a Plaxis szoftverben ennek figyelembe vétele, mint korábban már szó volt róla, a falazatra definiálható kontrakcióval, azaz annak sugárirányú "összehúzásával" lehetséges. Számításaimban a hézag paraméteres eljárással határoztam meg a túlfejtés mértékét, ami az 52+82 metszet esetében 0,6%-ra, az 54+13 metszet esetében pedig 0,45%-ra adódott. A Rowe és társai által publikált számítási eljárás előnye azonban, hogy a számítás eredményeként adódó talajvesztésben elkülöníthető, hogy mekkora hányad jelentkezik a pajzs homloka előtt, mennyi a pajzs körül és mennyi pajzsfaroknál. Ennek hasznosításával két részben eltérő verziót készítettem. Az első megoldás során a földkiemeléssel egy lépésben a falazat is beépítésre került és egyszerre lejátszódik a teljes kontrakció. A második verzióban a földkiemeléssel együtt a pajzsot modellező elemeket aktiváltam és a homlok előtt lejátszódó kontrakciót, hogy aztán a következő lépésekben a pajzs helyére a falazat kerüljön és a fennmaradó kontrakció. Az adódó eredmények, ahogy azt még a későbbiekben bemutatom, alig tértek el egymástól, úgy tűnik felesleges a második megoldásban alkalmazott finomítás. Az 52+82 metszet utolsó építési fázisának állapotát mutatja a 2. ábra.



1. ábra. A 52+82 metszet végeelemes modellje



2. ábra. A végleges állapot és a felszíni terhek az 52+82 metszetben

4.3 A térbeli végeelemes modellek

A Plaxis 3D Tunnel modul az előzőekben ismertetett síkbeli modellek alagúttengely irányú kiterjesztésével ad lehetőséget térbeli analízis végrehajtására. A hosszirányú kiterjesztés esetében meg lehet választani, hogy milyen sűrűn helyezkedjenek el a kiindulási metszethez hasonló metszetek, melyek között elhelyezkedő térfogatelemekre vonatkozólag lehetőség van a talajparaméterek, a talajvíz és a felszíni terhek beállításainak módosítására. A metszetek sűrítését az elemszám és azzal a szükséges számítási idő túlzott növekedése korlátozza.

Suwasawat (2002) szerint általában a pajzshomlok előtt körülbelül 30 m-rel már megindulnak a felszínsüllyedések, és körülbelül a pajzsfarok mögött 30 m-rel fejeződnek be. Eszerint egy keresztmetszetben az alagútfejtés hatására bekövetkező teljes süllyedések meghatározásához közelítőleg a fúrópajzs 70 m-nyi előrehaladását kellene vizsgálni. Emellett nyilvánvaló, hogy e kb. 70 m-nyi szakasznak a vizsgálatát már úgy kell végrehajtani, hogy a felépített modell peremei már ne befolyásolják az előrehaladás miatti alakváltozásokat, azaz nem elég a 70 m hosszú modell felépítése, hiszen a pajzs előrehajtása miatti alakváltozásokat az első métereken lényegesen befolyásolnák a modell peremfeltételei. A precíz analízishez, számításaim szerint a síkbeli modelleknél ismertetett $40 \text{ m} \times 140 \text{ m}$ méretű keresztmetszet körülbelül 140 m hosszúságú kiterjesztésére lenne szükség.

Egy ilyen méretű modell a megfelelő sűrűségű végeelemes hálóval a mai számítógépeink kapacitásával kezelhetetlen lenne, ezért néhány egyszerűsítéshez kellett folyamodom. Első lépésben a szimmetria kihasználását céloztam meg, azaz a két alagút között félúton szimmetriasíkot definiáltam. Ezzel még mindig óriási adatmennyiség maradt, ezért végül úgy kellett döntenem, hogy kizárólag az egyik alagút kivitelezését analizálom. Az alagúttengely függőlegesét szimmetriatengelynek tekintve, így egy fél alagutat modelleztem.

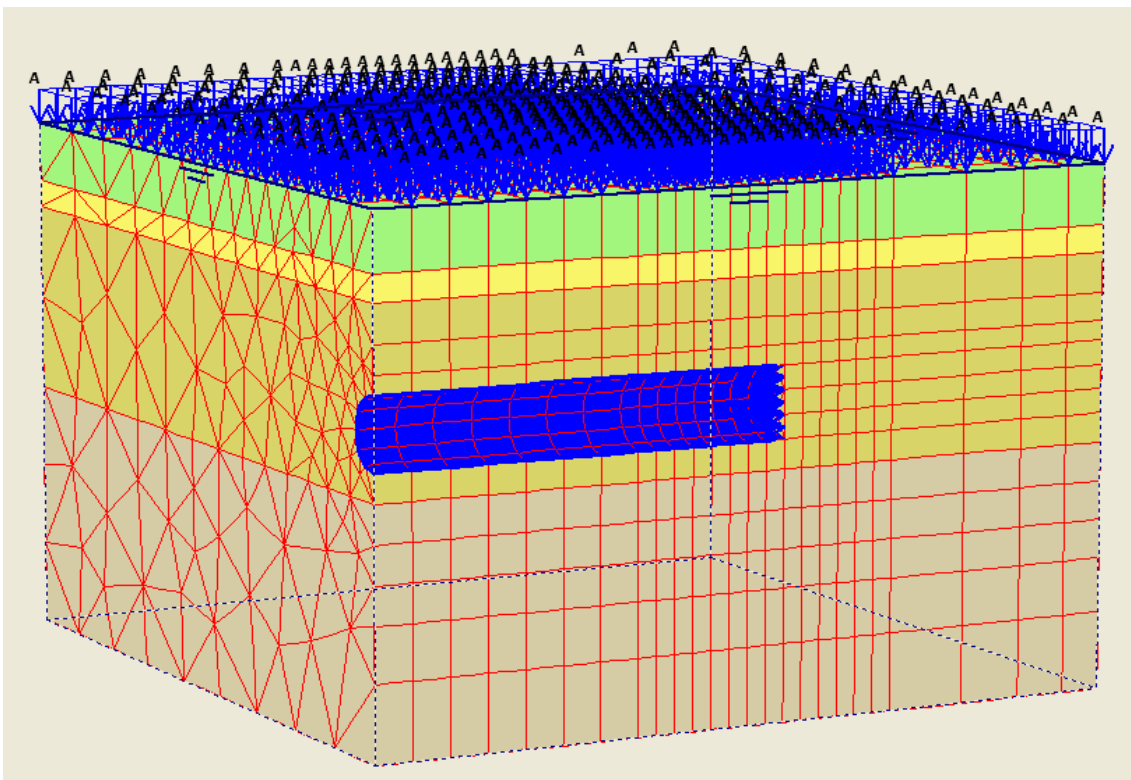
A 140 m hosszú, alagúttengely irányú kiterjesztés terve még így is túl soknak bizonyult, ezért az alagúttengely irányában is tovább kellett egyszerűsíteniem a modellt. Egy megoldás kínálkozott: egy keresztmetszet teljes süllyedéseit az alagútfúrógép egyszeri előretolása miatt bekövetkező felszínsüllyedések összegzésével állítottam elő. A falazat 1,5 m hosszú falgyűrűkből épül fel, így a fúrópajzs előrehajtása 1,5 m hosszú előresajtolásokból való felépítése a valós folyamatot elég jól közelíti. Ha tehát 1,5 m hosszú előretolást hatására létrejövő süllyedéseket vizsgálom, akkor a süllyedések összegzése nem a teljes felszíni horpa integrálást jelenti, hanem 1,5 méterenként fekvő pontok süllyedesei-

nek összegzését. Így tehát a modell méreteit kizárólag az határozta meg, hogy az egyszeri előretolás futtatását a peremek ne befolyásolják.

Számítógépem kapacitása miatt csak egy fél alagutat tudtam vizsgálni, így a két vonali alagút hatására bekövetkező süllyedésekhez a fél alagút építése miatti süllyedési horpa tükrözésére és szuperpozíciójára van szükség. Az alagutak feletti felszíni terhek nem teljesen egyenletesek, így az alagúttengelyben definiált függőleges szimmetriasík nem teljesen helytálló. A kialakuló süllyedésekre viszont ezek viszonylag csekély hatással bírnak, ráadásul a bevitt teherértékek is csupán becslések, így ez a közelítés elfogadhatónak látszik.

Ezek alapján az első lépésként létrehozott síkbeli metszet végül 61 m széles és 40 m magas lett és felső élét, ahogy a síkbeli modelleknél is, a felszíni szerkezetek alapozási síkja adja. A talajrétegződés megegyezik a síkbeli modellek esetében definiáltakkal. A síkbeli metszetet végül összesen 60 m hosszban terjesztettem ki az alagúttengely irányába. A homloksík után 3 méterenként, majd a süllyedések számítására szánt belső részekben 1,5 méterenként állnak ezek a függőleges metszetek. A hátsó laphoz közeledve aztán ismét ritkább a végeselemes háló.

Röviden összefoglalom, hogy miként is modelleztem a fúrópajzsot, a homloknyomást, a beépített falazatot és a túlfejtés hatásait adó kontrakciót. A fejtési homlokra a 3.1.1. pontban ismertetett nagyságú megoszló erőt működtettem a homloknyomás modellezése céljából. A homlok mögötti 5 darab 1,5 m hosszú alagútgyűrű a pajzsköpeny anyagjellemzőivel rendelkezik, így a valós pajzshosszal lényegében megegyezik. A pajzsköpeny mögött pedig egészen a modell széléig az összes alagútgyűrű az falazat paraméterei szerint működik. Egy előretolási lépés esetén a homlok előtti, 1,5 m vastag talajtestet kiemelve és az alagútgyűrűt a pajzsköpeny jellemzőivel aktiválva halad előre a pajzs. Ilyenkor természetesen a homloktól számított 6. gyűrű esetében a vonatkozó anyagmodellt át kell állítani a falazat modelljére. A 3. ábra mutatja az így létrehozott modellt.



3. ábra. A vizsgált előretolás állapota és a felszíni terhek az 52+82 metszet térbeli modelljében

Amíg a síkbeli számítások esetében viszonylag egyszerű volt a kontrakció megadása, addig ez a térbeli modell esetében már összetettebb feladatot jelentett. A homloknyomás működése miatt a hézag paraméter módszerével számított kontrakció értékét csökkentettem az egyébként szinte jelentéktelen nagyságú, homlok előtt lejátszódó mozgásokból származtatott kontrakcióval, hiszen azok hatása most a végeselemekkel modellezett fejtési homlok és a megoszló erőként modellezett homloknyomás interakciójából adódik. A hézag paraméteres eljárás alapján pajzs körül létrejövő veszteségeket a pajzsot jelképező 5 db gyűrű mentén egyenletesen osztottam el, míg a pajzsköpeny és a falazat külső átmérőjének különbségéből adódó, de a hátrú injektálással jelentősen csökkentett talajvesztéseket az első falazatgyűrűhöz definiáltam. A kontrakció ilyen módon való szétosztásának elsődleges szempontja az volt, hogy minden olyan metszet, amelyen a pajzs keresztül halad és amelyben beépítésre kerül alagút-

falazat, az egymás utáni előretolási fázisokban összesen a hézagparaméter módszerével számított s a homlok előtti mozgásokkal csökkentett értékű kontrakciót szenvedje el.

Az ilyen térbeli modellek esetében jelentősen megnövekszik a szükséges építési fázisok száma, hiszen az alagútfejtéstől érintetlen modelltől lépésenként kiemelve egy-egy egységet a tervezett alagúttérfo-gatból kell eljutni egy olyan állapotba mikor az alagútfejtést szimuláló földkiemelés már elegendően távol van a modelltér peremeitől. Ennek figyelembevételével összesen 18 építési fázist definiáltam:

1. fázis: Épületterhek megadása

2-12. fázis: Előkészítés

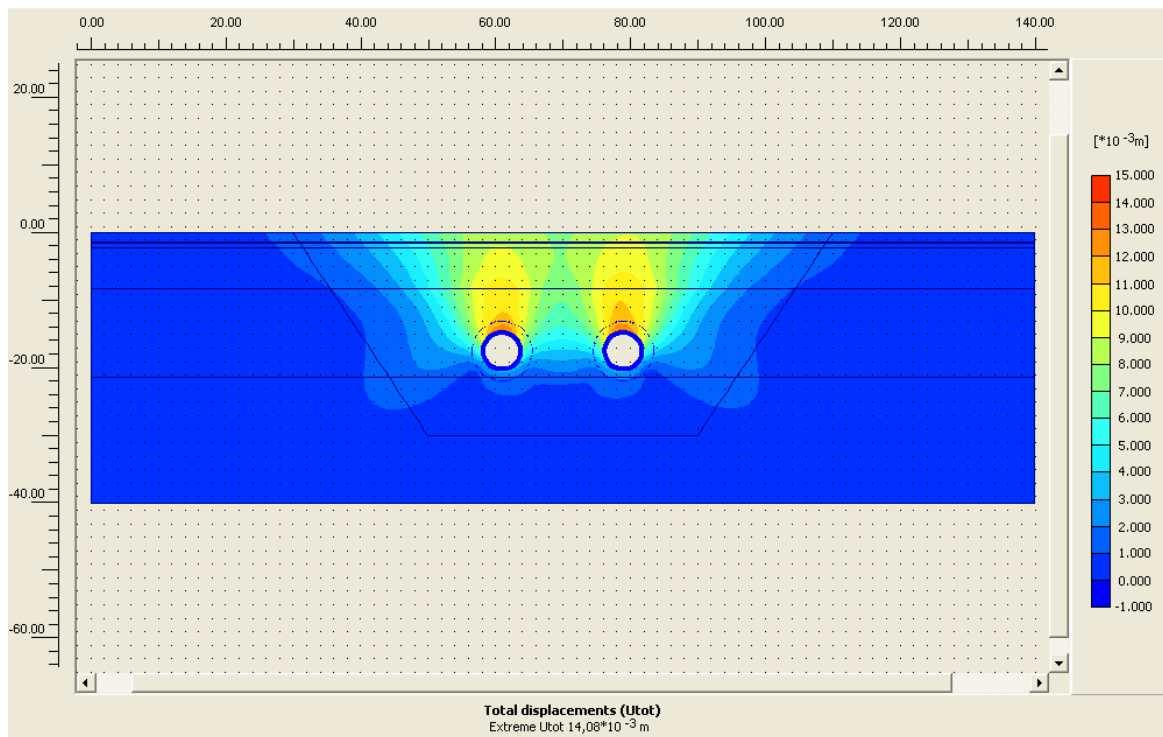
13-18. fázis :Vizsgálat

Az 1. fázis lényegében azonos a síkbeli modellnél definiált lépéssel, a modell teljes felszínére megad-tam a terheket, a talajmodell érintetlen. A 2. lépésben az érintetlen modelltérben megjelenik a pajzs-köpeny első része és lépésenként egy „szeletet” előrehaladva, a 12. lépés után a modelltérben olyan pozíciót ér el a pajzs, hogy az előrehajtás hatásait már nem befolyásolják a modell peremei. Az Előké-szítés fázisai után a korábbi lépések miatti elmozdulásokat kiiktatva összesen 6, egyenként 1,5 m hosszú előrehajtást modelleztem. Valójában elég lett volna egy lépést vizsgálni, de az eredmények el-lenőrzése céljából célszerűnek látszott többet lefuttatni. Az eredmények értékeléséhez végül a 4. vizs-gált lépés (16. építési fázis) eredményeit használtam fel, mivel összességében ez van legtávolabb a modelltér két végétől.

5 A SZÁMÍTÁSOK EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA, ÖSSZEHASONLÍTÓ ÉRTÉKELÉSE

5.1 Síkbeli végeselemes modellek eredményei

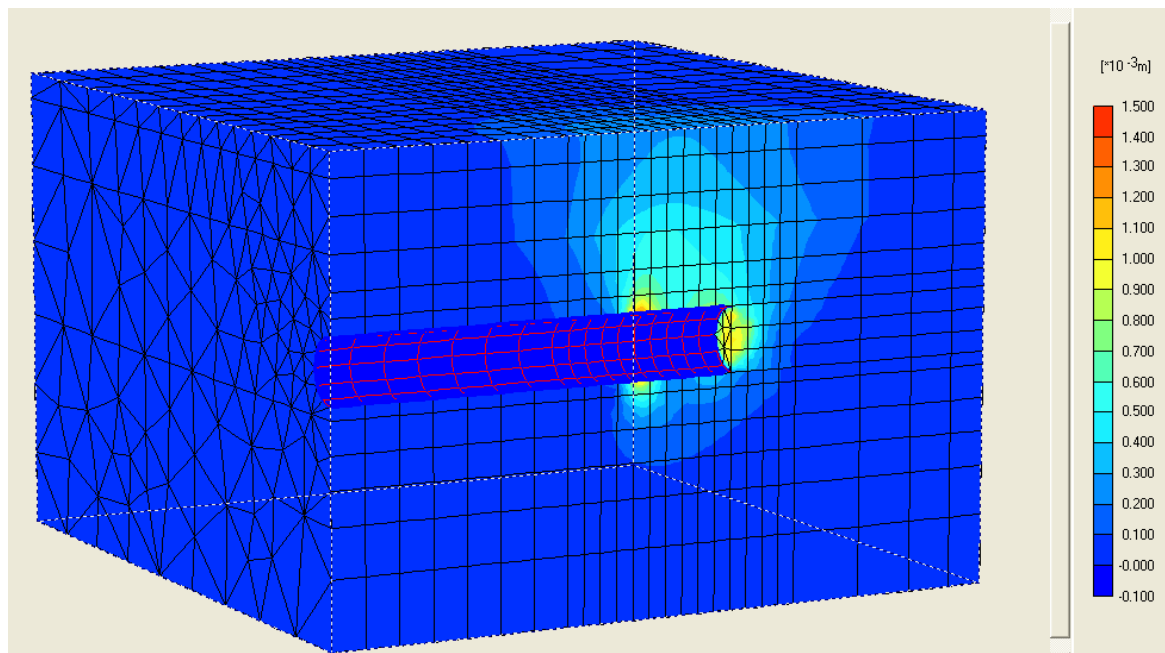
A síkbeli számítások közül az 52+82 számú metszetben létrejövő mozgásokat mutatja a 4. ábra. Látha-tó, hogy az alagúthajtás miatti elmozdulások már a modell peremétől távol megszűnnek, a peremek nem zavarják a számításokat, azaz a modelltér felvett méretei megfelelőek voltak. A metszet szimmet-rikus felszíni terhelése ellenére, az elsőként érkező déli alagút, azaz az ábrán jobb oldalt fekvő felett némileg nagyobb mozgások jöttek létre, ahogy az a szakirodalmakban olvasottak alapján várható volt. A felszínen a legnagyobb süllyedések meghaladják a 8 mm-t is. Az 54+13 számú metszetben némileg alacsonyabb, 7-8 mm közötti süllyedések adódtak, s az aszimetria, vélhetően a jobb oldali alagút fe-letti nagyobb felszíni teher miatt, még erősebb.



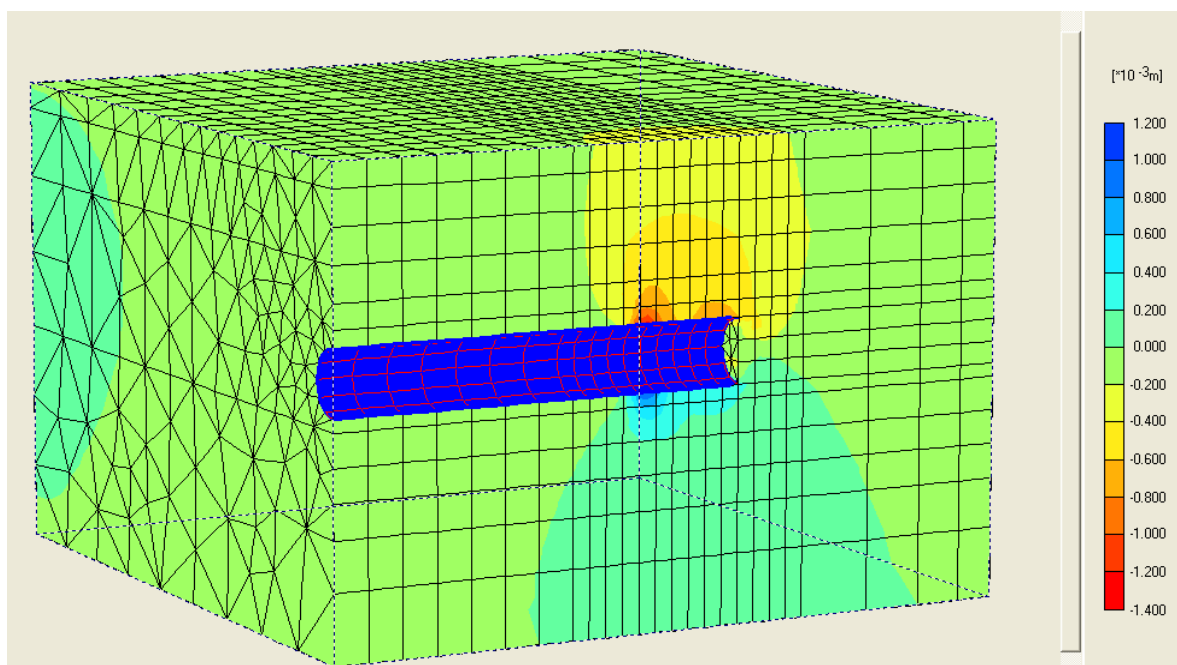
4. ábra. Az abszolút elmozdulások az alagútfejtés hatására az 52+82 metszet síkbeli modelljében

5.2 Térbeli végeelemes modellek eredményei

A térbeli végeelemes modellek esetében szintén csak az 52+82 metszethez tartozó elmozdulási ábrákat mutatom be. Az 5. ábrán jól látszik az 1.5 m hosszú előretolás miatt bekövetkező homlok előtti fellazulás, a pajzsköpeny mentén egyenletesen szétosztott kontrakció miatti mozgás és az első falazategyűrű körül létrejövő elmozdulás is. A létrejövő mozgások a peremekhez közeledve megszűnnek, a modellezett térrész elegendően nagy. Ezen mozgások függőleges komponensei adják a felszín süllyedéseit, melyek alakulását a 6. ábra mutatja.



5. ábra. Az abszolút elmozdulások az alagútfejtés hatására az 52+82 metszet térbeli modelljében



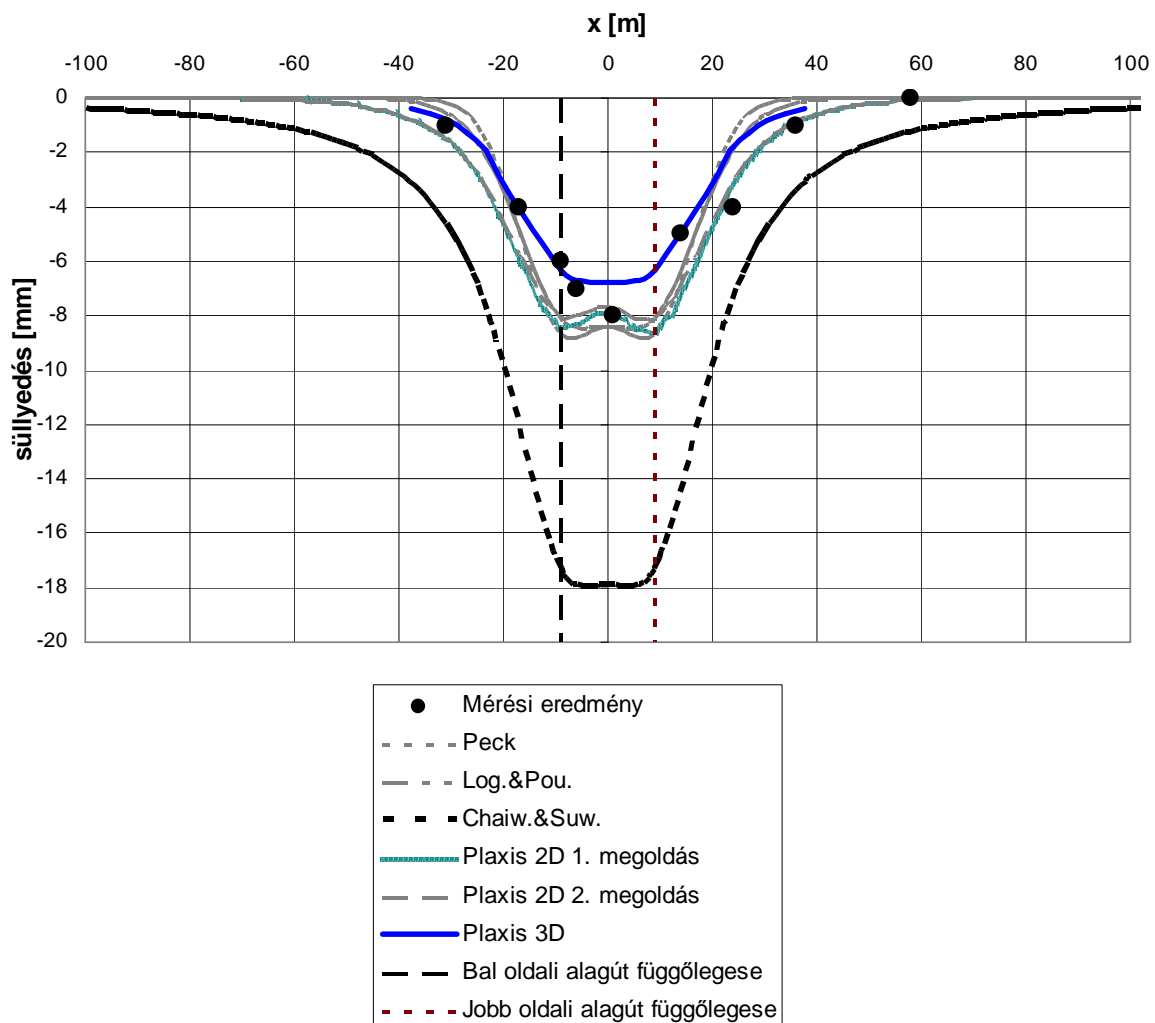
6. ábra. A függőleges elmozdulások az alagútfejtés hatására az 52+82 metszet térbeli modelljében

5.3 A mérési eredmények és a számítási eredmények összehasonlító értékelése

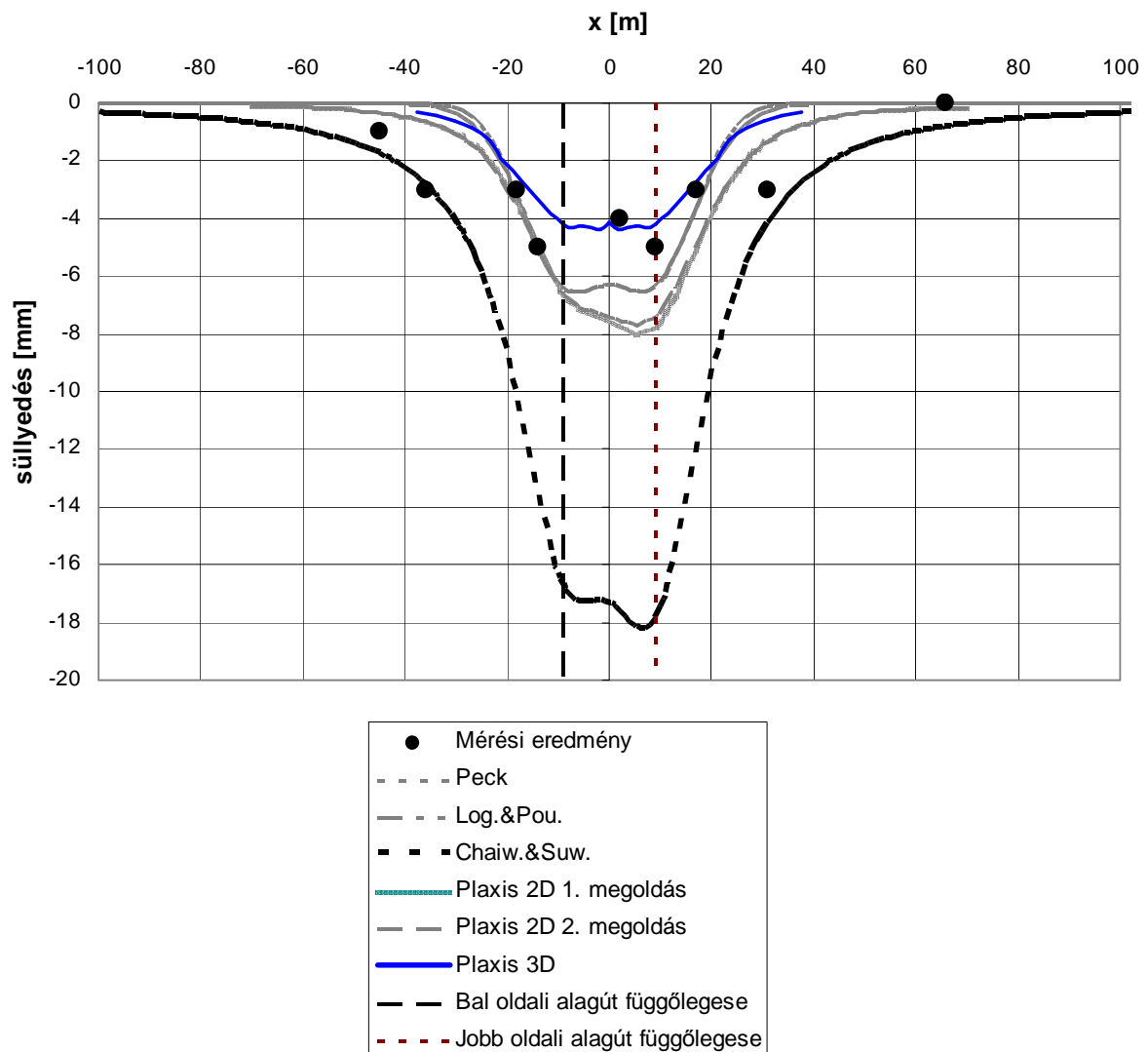
Az általam készített hagyományos és végeelemes számítások és az alagútfejtés során nyert mérési eredmények összehasonlítása az 7. és 8. ábrákon látható. Az 52+82 metszet eredményeit a 7. vizsgálva az látszik, hogy Peck, illetve Loganathan és Poulos hagyományos eljárása valamint a síkbeli Plaxis modellek gyakorlatilag azonos eredményeket szolgáltatottak, s a mérési eredmények is jól illeszkedtek ezen görbékre. Ezeknél valamivel kisebb süllyedéseket kalkuláltam a térbeli végeelemes modellel,

míg Chaiwonglek és Suwansawat eljárása körülbelül kétszeres süllyedéseket szolgáltatott. A térbeli Plaxis-modell kisebb eredményei logikusnak látszanak, hiszen a számításba bekerültek olyan tényezők is, mint az alagútszerkezet térbeli merevsége vagy az alagút feletti talaj hosszirányú átboltozódásának lehetősége. A mérési eredmények pontosságát figyelembe véve nem egyértelmű, hogy inkább a síkbeli számítások eredményeihez közelítenek, vagy inkább a térbeli modelléhez. Chaiwonglek és Suwansawat eljárása vizsgálódásaim szerint nagyon érzékeny az alagútkörnyezetre jellemző rugalmassági modulus értékére, mely számításaim egyik legbizonytalanabb eleme volt, tekintettel az erősen inhomogén általajra.

Az 54+13 metszet eredményeit a 8. ábra alapján értékelve elmondható, hogy Peck, illetve Loganathan és Poulos eljárásával adódó görbék gyakorlatilag fedik egymást, de az 52+82 metszethez képest valamivel jobban eltérnek a síkbeli végeselemes számítások görbéitől, bár ez nyilvánvalóan annak is köszönhető, hogy a végeselemes számítások esetében erősebben érvényesül az aszimmetrikus felszíni terhelés hatása. A térbeli modell ismét kisebb süllyedéseket produkált, a létrejövő különbség némileg talán növekedett is. Chaiwonglek és Suwansawat módszere az 52+82 metszethez hasonló, kiugró eredményeket adott. A mérési eredmények kevésbé követik a számított görbéket, de az egyezés még mindig jónak minősíthető. Összességében azonban a thai kutatók eljárását leszámítva az összes eljárás elfogadhatóan pontos értékeket szolgáltatott. Úgy tűnik tehát, hogy a síkbeli számítások is elegendően pontos eszközt jelenthetnek, ha alagútépítés miatt bekövetkező süllyedések előzetes vizsgálatára van szükség, bár mindenképpen célszerű volna a beszerzett mérési eredményeknél nagyobb süllyedéseket szenvedett metszetek elemzése is.



7. ábra. A különböző módszerekkel számított felszínsüllyedési görbék és a mért süllyedések az 52+82 metszeten



8. ábra. A különböző módszerekkel számított felszínsüllyedési görbék és a mért süllyedések az 54+13 metszetben

6 ÖSSZEGZÉS

Vizsgálódásaim alapján kijelenthető, hogy a vizsgálthoz hasonló talajviszonyok és alagútépítési technológia esetén az alagúthajtás okozta felszínsüllyedések meghatározásához nem érdemes térbeli végeselemes számításokat végezni. A modellek felépítése, a számítások lefuttatása és az eredmények kiértékelése is nagyságrendekkel több munkát jelentenek, mint a síkbeli vizsgálatok elkészítése, ráadásul a modell különböző részleteinek egyszerűsítése (nagyobb hálóelemek, süllyedésértékek összegzése, stb.) megkérdőjelezi a számítási pontosságnak a síkbeli vizsgálatokhoz viszonyított javulását. A fentiek szerint megbízhatónak tűnő módszerek alkalmazásának legfontosabb tényezője a hézagparaméter, illetve az abból adódó kontrakció értékének meghatározása. A hézagparaméter számítását jelentősen befolyásoló, ugyanakkor csak durva becsléssel meghatározható néhány tényező, mint például az injektálás hatékonyságát vagy a fejtőeszközök pajzshomlok való túlfejtését kifejező paraméter némileg csökkentik az eljárás alkalmazásának előnyeit, de úgy vélem, hogy a túlfejtés konzervatív becslése helyett mégis célszerű lehet alkalmazni azt. Ezen következtetések megerősítéséhez és újabbak levonásához olyan területeken kellene további vizsgálódásokat végezni, ahol a vizsgáltknál nagyobb süllyedések is kialakultak.

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- Chaiwonglek, C., Suwansawat, S., 2009. Shield's three-zone mechanism approach for predicting ground deformations, World Tunnel Congress, Budapest.
- Chow, L., 1994. *The prediction of surface settlements due to tunneling in soft ground*. MSc Thesis, University of Oxford.
- Franzius, J. N., 2003. *Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence*. PhD Thesis, University of London.
- Lee, K. M., Rowe, R. K., Lo, K. Y., 1992. Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal* 29.
- Lunardi, P., 2008. *Design and Construction of Tunnels - Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS)*. Springer, Berlin.
- Müller, M., 2008. *Pajzsos építés*. Egyetemi előadás, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnikai Tanszék.
- Ocak, I., Bilgin, N., 2009. The performance of two EPB machines in Istanbul metro tunnel drivages in soft and shallow ground. World Tunnel Congress, Budapest.
- Oggeri, C., 2009. Monitoring of EPBM Tunnelling at LOT 2 of Turin Metro. World Tunnel Congress, Budapest.
- Pap, Zs., 2010. A monitoring rendszerek működése a 4-es metró építése során. *Közlekedésépítési Szemle*, 60. évfolyam, 1. szám.
- Petrasovits, G., Fazakas, Gy., Kovácsházy, F., 1992. *Városi földalatti műtárgyak tervezése és kivitelezése*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Rowe, R.K., Lo, K. Y., Kack, G.J., 1983.: A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground. *Canadian Geotechnical Journal* 20.
- Srijunthong, P., Suwansawat, S., 2009. A study of shield operational factors on surface settlements using ANN. World Tunnel Congress, Budapest.
- Suwansawat, S., 2002. *EPB Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Wittke, W., 2007. *Stability Analysis and Design for Mechanized Tunnelling*. WBI-Print, Aachen.