

# Vegyes kőzetkörnyezetben alkalmazott EPB TBM teljesítményelemzése egy szingapúri példa alapján

## A case study of an EPB tunneling project in Singapore

Tóth Ákos

Laboratoire de Mécanique des Roches (LMR), EPFL, Lausanne, Switzerland. akos.toth@epfl.ch

**ÖSSZEFOGLALÁS:** Ez a cikk egy EPB TBM teljesítményének elemzését mutatja be két alagútfúró géppéldáján keresztül, amiket a Mélyvezetésű Szennyvíz Főgyűjtőcsatorna (Deep Tunnel Sewerage System, DTSS) északi szakaszán alkalmazták talajjal és mállott kőzettel borított alapkőzetben. Az alagútfúrógépek teljesítményének előrejelzésére és elemzésére többféle, széles körben elfogadott és alkalmazott módszere ismert, azonban ezek a módszerek csak homogén talajban és kőzetkörnyezetben alkalmazhatóak. Vegyes kőzetkörnyezetben, mint például a fent említett szingapúri esetben ezek a módszerek nem adnak megbízható eredményt.

Az elemzés során a számunkra érdekes szakasz geológia profilját és az alagútfúró gép működési paramétereit egy kapcsolt adatbázisban összesítettük, majd ezeket statisztikai módszerrel elemeztük. Az elemzés alapján meghatároztuk a különböző kőzetparaméterek és az alagútfúró gép teljesítménye közötti összefüggéseket ami alapján egy egyszerűsített teljesítményértékelő és előrejelző modellt dolgoztunk ki a talajjal és mállott kőzettel borított alapkőzetben való alagútfúráshoz.

*Kulcsszavak:* pajzsos alagútépítés, vegyes kőzetkörnyezet, EPB TBM, teljesítményelemzés

**ABSTRACT:** This paper investigates the performance of two Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines (EPB TBMs) in rock-soil interface mixed-face ground based on the north section of the Deep Tunnel Sewerage System project in Singapore. There are several accepted and widely used methods available for tunnelling performance estimation for homogenous geology. However, the existing models cannot be reliably used to estimate TBM performance rate in mixed ground such as the ground encountered during the construction of the above mentioned tunnels.

In this approach, the geological profiles and the TBM operational parameters are compiled in a database and analysed statistically. The influence of different geological face compositions on the performance of the TBMs is studied. Based on the results of the analysis, a simple method usable for the tunnelling industry is proposed to predict the TBM performance in Rock-Soil Interface mixed-face ground for project planning and optimization.

*Keywords:* mechanised tunnelling, mixed ground, EPB TBM, performance analysis

## 1 BEVEZETÉS

A vegyes és folyton változó kőzetkörnyezet a gépesített, pajzsos alagútépítés egyik legnehezebb esete. Azonban, túlnyomó részt belvárosi környezetben a felszín alatti tér beépítettsége miatt, illetve a korlátozott felszíni kapcsolati lehetőségek miatt az alagutak nyomvonalát már nem lehet az ideális, jól bevált módszerrel, a kőzetviszonyoknak megfelelően tervezni. Ezen megkötések mellett az új szemlélet nem csak az alagutak bekerülési költségét veszi figyelembe a tervezésnél, hanem azok teljes élettartamára optimalizál, ezért az alagutak tervezésénél mind jobban figyelembe veszik annak üzemeltetési és fenntartási költségeit, ami szintén befolyásolja azok nyomvonalát. Ezen feltételek alapján kijelenthetjük, hogy a vegyes kőzetkörnyezetből adódó problémák kérdésköre a modern alagútépítési gyakorlatban megkerülhetetlen.

Az elmúlt évtizedekben számos fúrt alagutat építettek kedvezőtlen talajviszonyok között. Annak ellenére, hogy ezeket az alagutakat jelentősen eltérő geológiai formációkban építették, mindegyik projektben megfigyelhető volt a TBM teljesítményének jelentős csökkenése, a pajzs kopóalkatrészeinek élettartamcsökkenése, ütemtervvel kapcsolatos problémák, és az alagútfúrás költségeinek számottevő emelkedése. Ezek alapján kijelenthető, egy az iparnak szüksége van olyan teljesítményértékelő modellekre, amelyek nem csak homogén, ideális kőzetkörnyezetben adnak megbízható eredményt, hanem változó, vegyes kőzetben is alkalmazhatóak.

## 2 A VEGYES KÖZETKÖRNYEZET

Toth et al. (2012) alapján vegyes kőzetkörnyezetnek nevezzük azokat a geológia formációkat, ahol az alagúthomlokokon kettő vagy több olyan kőzettípus található egyidejűleg, amelyek anyagtulajdonságának különbsége jelentősen befolyásolja (a) az alagútfúró pajzs előtolási sebességét, (b) illetve egyéb működési paraméterét, és/vagy (c) az alagútfúrás során beépítésre kerülő ideiglenes megtámasztási rendszert. "A táblázatokat és az ábrákat úgy kell elhelyezni, hogy az az olvasás szempontjából logikus helyen legyen.

Ugyan egy széles körben elfogadott ökol szabály alapján eddig is vegyes kőzetnek nevezték azon eseteket, amikor az alagúthomlokokon egyidejűleg jelen levő kőzettípusok egyirányú nyomószilárdságának aránya 1/10 vagy kisebb volt, a fenti meghatározás tágabb értelemben határozza meg a vegyes kőzetet. Erre azért volt szükség, mert több projekten, ahol a szimultán jelenlevő kőzetek nyomószilárdságának aránya messze nagyobb volt, mint 1/10, például a szingapúri Circle Line metróvonal meghosszabbításán során, hasonló problémákat figyeltek meg, mint „valódi“ vegyes kőzet esetén (Dong et al. 2006). Ezen kívül egy, csak egy kiválasztott tulajdonságra alapozott meghatározás a véleményünk szerint túlságosan egyszerűsített, mivel a megfigyelések alapján nem csak az egyirányú nyomószilárdság, de a jelen levő kőzetek területarány-indexe (face composition, Fc) is jelentősen befolyásolja az alagútfúrás teljesítményét.

### 2.1 A különböző megfigyelt vegyeskőzet osztályok

Toth et al. (2012) alapján az alábbi három fő vegyes kőzetosztályt különíthetjük el azok geológiai szerkezete és a pajzsos alagútépítés során megfigyelt viselkedése alapján: a talajjal és puhább kőzettel fedett alapkőzet (Rock-Soil Interface - RSI - mixed ground), a tajmátrixba ágyazott kőtömbök (Boulder-Soil Matrix - BSM - mixed ground) valamint a rétegzett vegyes kőzet (Layered-Banded Rock - LBR - mixed ground).

A talajjal, puhább kőzettel fedett alapkőzetet (RSI) az 1. ábra mutatja be. Az alapkőzet és mállott kőzet határán fúrt alagutak keresztmetszetében kettő vagy több különböző kőzet található egyidejűleg. Hasonló körülmények figyelhetők meg, amikor üledékes környezetben, vagy aktív vulkáni területen épül az alagút. Nyitott, vagy eltömörött nagyméretű karsztok szintén az extrém megnyilvánulásai az RSI kőzettípusnak.



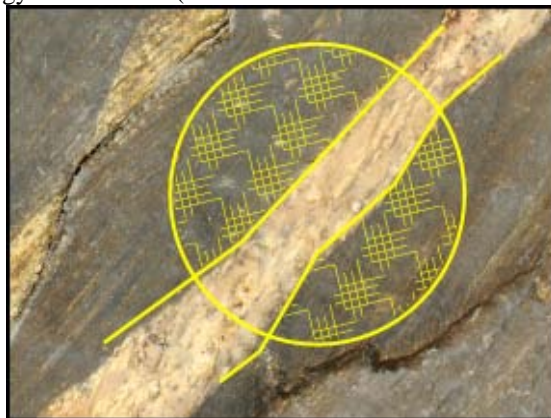
**1. ábra.** Talajjal és puhább kőzettel fedett alapkőzet (Rock-Soil Interface Mixed Face Ground) (Toth et al. 2013)

A második vegyes kőzetosztály a talajmátrixba ágyazott tömbök (BSM), ahol a beágyazott tömbök mérete a centiméterestől a méteresig változhat. Ebbe a kőzetosztályba tartoznak a nagyméretű tömböket tartalmazó üledékes kőzetek, gleccserhordalék, és speciális esetben az erősen mállott trópusi alapkőzet, ahol a repedések körüli erősen mállott anyagba van az eredeti, mállatlan kő ágyazva. A BSM kőzetben nem csak az alkotóelemek paraméterei, és előfordulásuk aránya a meghatározó a TBM teljesítménye szempontjából, hanem a tömbök mérete és fekvésük iránya is jelentősen lassíthatja az alagútfúrást.

A harmadik típus a rétegzett vegyes kőzet (LBR) (3. ábra). Ebbe a csoportba tartoznak a vetők melletti, lokálisan mállott kőzettömeg és a homogén kőzetbe nyomuló keményebb kőzet. Az LBR kőzetben fúrt alagutaknál nem csak a keményebb és puhább kőzet aránya valamint a kőzet tulajdonságai határozzák meg az alagútfúrás sebességét, de figyelembe kell venni a rétegződés irányát is.



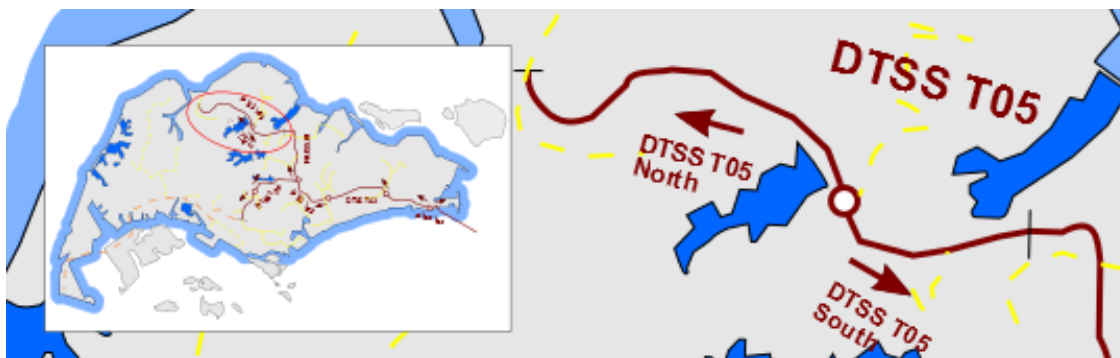
2. ábra. Talajmátrixba ágyazott tömbök (Boulder-Soil Matrix Mixed Face Ground) (Toth et al. 2013)



3. ábra. Rétegzett vegyes kőzet (Layered-Banded Rock Mixed-Face Ground) (Toth et al. 2013)

### 3 A MÉLYVEZETÉSŰ SZENNYVÍZ FŐGYŰJTŐCSATORNA (DTSS)

A Mélyvezetésű Szennyvíz Főgyűjtőcsatorna T05 és T06 alagútjainak jelentős szakaszát vegyes kőzetkörnyezetben, talajjal és puhább kőzettel fedett alapkőzetben építették. Az alagút környezetében a gránit alapkőzet mellett annak minden mállott osztálya megtalálható az enyhén mállott gránittól a teljesen átalakult talajig. Az itt tárgyalt elemzés a 3,6 m belső átmérőjű, 12,6 km hosszúságú T05 szakasszal foglalkozik. Ezen a szakaszon a kifejtett homlok 18,7 m<sup>2</sup> területű ami felett 20 – 41 m takarás található.



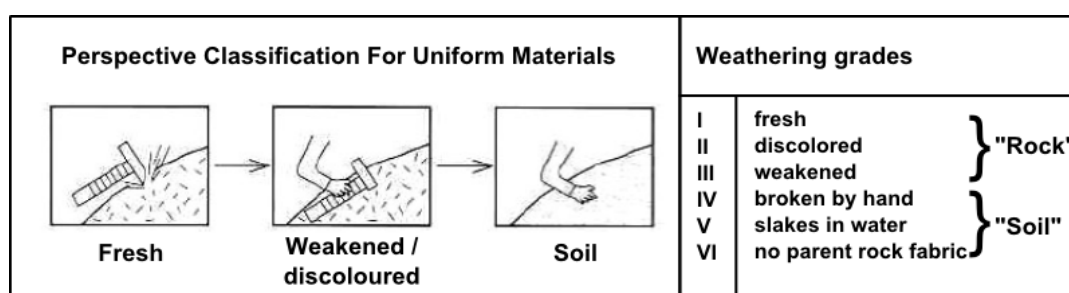
4. ábra. A Mélyvezetésű Szennyvíz Főgyűjtőcsatorna T05 szakaszának vonalvezetése (Alignment of the Deep Tunnel Sewerage System T05 tunnels)

#### 3.1 Geológia

Az alagút kőzetkörnyezetét mind a kivitelezés megkezdése előtt mind annak során részletesen elemezték. A kőzetet hat osztályba lett sorolva annak mállása szerint. A friss gránitot a „G I” kőzetosztály jelöli, míg a teljesen mállott kőzetosztály jelölése a „G V” valamint a visszamaradt talaj jelölése a „G VI”. Helyszíni megfigyelések alapján megállapításra került, hogy egyes helyeken a „G V” és „G VI” kőzetek alsó határa eléri a 70 méteres mélységet, annak ellenére hogy az alapkőzet jellemző határa 20 és 50 méter között található. A változó talajtakarást jellemzi, hogy az alagút nyomvonalában az alapkőzet több helyen megjelenik a felszínen is (Zhao et al. 1994), valamint az alagút tengelyében mind a hat megkülönböztetett kőzetosztály megjelenik.

Az alagútúrás során az tervezés során alkalmazott kőzetosztályozási rendszert egyszerűsítették. Három kőzetosztályt állapítottak meg azok viselkedése alapján. A friss, valamint a kismértékben mállott gránit (G I – G II) kemény kőzetként viselkedett. Ebben a kőzetosztályban 5,9 km alagút lett kihajtva. Puha kőzetre jellemző viselkedés figyeltek meg a G III – G IV kőzetben, 1,6 km hosszon kihajtott alagútszakaszon. A G V – G VI kőzetosztály pedig jellemzően talajként viselkedett. Ebben a kőzettípusban 3,2 km alagutat fúrtak. A fennmaradó 1,9 km-es szakaszt vegyes kőzetkörnyezetben építették. Az alagútúrás során a várt fokozatosan változó kőzetarányoktól eltérően az alapkőzet felső határa nagyon változó volt, így vegyes kőzetben fúrt rövid szakaszok voltak jellemzőek az alagútra.

Az építés során több cikk is foglalkozott a feltárt kőzettel. Shirlaw et al. (2000) megállapították, hogy a G IV és G V kőzettípusok főbb mechanikai jellemzői hasonlóak, valamint az alagút környezetében a G III kőzettípus csak egy vékony rétegben található meg. Ezek alapján az alagútúró gép teljesítményelemzéséhez egy tovább egyszerűsített kőzetosztályozási rendszert alkalmaztunk. A G I – G III kőzetosztályokat összevontuk, azokra mint kőzet hivatkozunk. Ezek a szakaszokon az alagúthomlok jellemzően stabil, ezért itt nyílt módon, aktív talajmegtámasztás nélkül lehetett a TBM-et alkalmazni. A G IV, G V és G VI gránit talajként viselkedik, ezekben az anyagokban az alagúthomlok már nem áll meg megtámasztás nélkül, részlegesen, vagy teljesen feltöltött munkakamrával kellett az alagutat építeni. Azon szakaszokat, ahol mindkét kőzettípus megjelenik, vegyes kőzetben fúrt szakaszoknak neveztük, függetlenül attól, hogy milyen arányban volt a kőzet és a talaj jelen.



5 ábra. A mállott kőzet osztályozása (Classification of weathered rock) (Shirlaw et al. 2000)

Az alagút geológiai hossz-szelvényét az alagútúrás megkezdése előtt fúrt magmintákból állapították meg. Mivel a kivitelezés során a megállapítottól jelentősen eltérő kőzetviszonyokat találtak, a hossz-szelvényt folyamatosan frissítették mind további magmintákból nyert információk alapján, mind a vágotárcsa felülvizsgálata során az alagúthomlok szemrevételezésével. Jelen tanulmányhoz a megvalósulási dokumentációban található végleges geológiai hossz-szelvényt alkalmaztam.

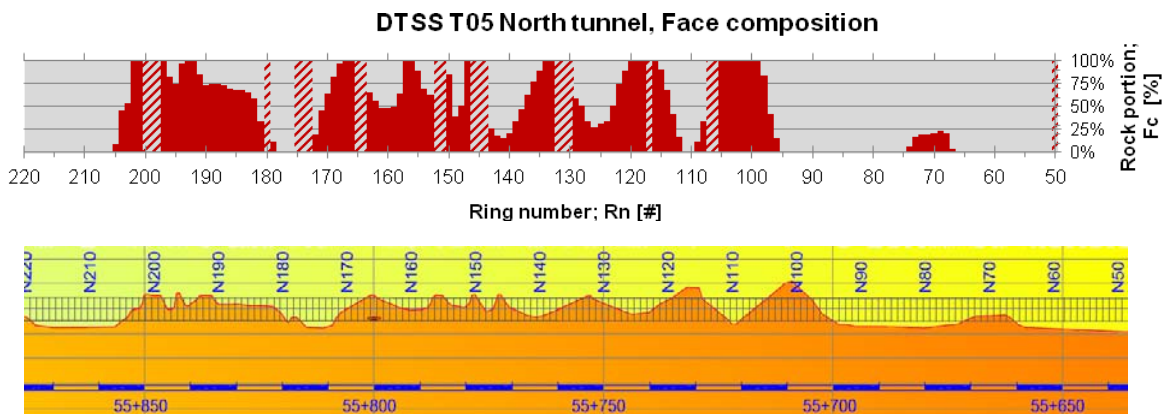
Az alagút tengelyéből nyert minták alapján megállapításra került, hogy a kőzet egytengelyű nyomószilárdsága 19 MPa és 209 MPa közé esik 85 MPa várható értékkel a kemény kőzet (G I – G II) esetén, valamint 51 MPa várható értékkel a puha kőzet (G III - G IV) esetén. Gyengébb, erősen mállott (G V - G VI) kőzeten az egytengelyű nyomókísérletek nem szolgáltatnak használható eredményt. A szilárdsági vizsgálatok eredményeit az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. A Bukit Timah gránit jellemző szilárdsági paraméterei (Geotechnical parameters of the Bukit Timah granite) (Zhao et al. 2007)

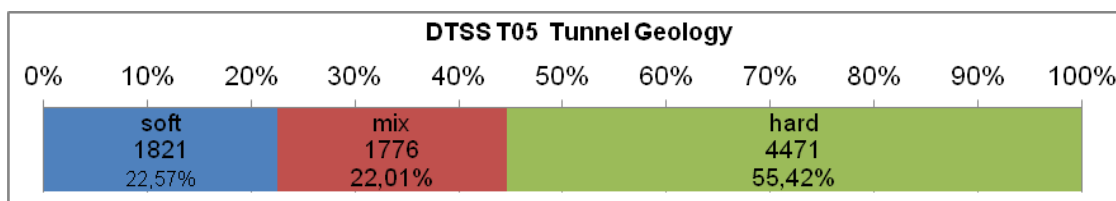
Rock type	Weathering grade	RQD [%]	UCS		Point load test	
			Max [MPa]	Avg [MPa]	Max [MPa]	Avg [MPa]
Granite I	G I – G II	0-94	19-209	85	14.5	7
Granite II	G III-G IV	0-25	-	51	5.1	1.8

A 6. ábra a DTSS T05 északi szakasz hossz-szelvényének egy jellegzetes részletét valamint annak már egy, az adok elemzésére fejlesztett program által feldolgozott adatsorát mutatja. A feldolgozott adatsor egy csatolt adatbázisban tartalmazza a vizsgált alagútszakasz geológiai paramétereit, valamint az adott szakaszon a TBM működése közben rögzített paramétereket. Mivel az adatbázis feldolgozása során találtunk hibás adatpontokat, azokat kiszűrtük a végleges elemzés során. A hibás pontokat a 6. ábrán a sraffozott szakaszok jelentik. Ezek a hibák két okra vezethetők vissza. Az első esetben a geológiai adatokban találtunk ellentmondásokat. Más esetekben az alagútúró gép automata adatrögzítő berendezése rögzített hibás adatokat, vagy tárolta azokat hibásan.

A geológiai adatok statisztikai elemzése alapján a vizsgált DTSS T05 alagutak ~55%-a épült stabil kőzetben, ~22%-a vegyes kőzetben, míg a fennmaradó alagútszakasz talajban és talajszerűen viselkedő puha kőzetben lett kihajtva (7. ábra).



6. ábra. A DTSS T05 alagút északi szakaszának egy tipikus részlete (A typical mixed ground section of the DTSS T05 North tunnel)



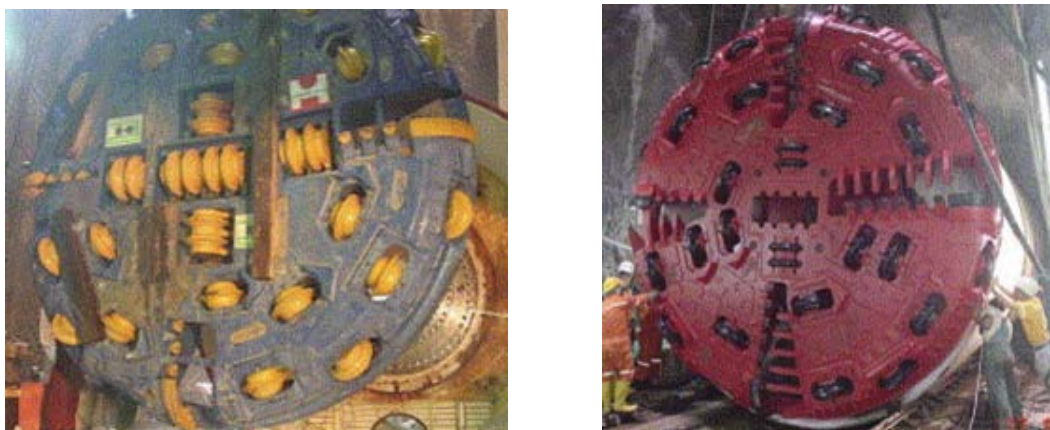
7. ábra. A DTSS T05 alagutak geológiája (DTSS T05 North and South section geology)

#### 4 AZ ALAGÚTFÚRÓ GÉPEK

A Mélyvezetésű Szennyvíz-Főgyűjtőcsatorna T05 szakaszát két, 4,88 m átmérőjű vágótárcsával felszerelt Herrenknecht EPB fúrópajzsral hajtották ki. A gép alkalmas volt állékony, kemény kőzet fejtésére, de instabil, puha kőzet, talajban is képes volt alagutat építeni. A változó geológiai viszonyok miatt a pajzs egyaránt fel volt szerelve a kemény kőzet kitermelésére alkalmas 17” átmérőjű vágótárcsákkal és talaj kitermelésére alkalmas fejtőszerszámokkal. A vágótárcsák átlagosan 90 – 100 mm távolságra voltak elhelyezve. A projekten alkalmazott pajzsok paramétereit a 2. Táblázat foglalja össze. A pajzs meghajtását változtatható sebességű motorok, míg az előtolást 10 pár, 2,30 m löket-hosszú hidraulika biztosította, melyek maximális kapacitása elérte a 26 600 kN-t.

A TBM főbb működési paramétereit, mint például az alagútfúró gép helyzete, a fejtési mód, az előtolás sebessége, a pajzs forgási sebessége, 10 másodperces időközönként egy automata rendszer rögzítette a projekt során. A rendszer minden fogás során számította a működési paraméterek átlagértékét, ami egy másik adatbázisban került tárolásra. A rendszer folyamatos kapcsolatban állt a projektirodával, a műszaki ellenőrrrel és a beruházóval, akik a megfelelő jogosultságukkal, az interneten keresztül bárholonnan le tudták ellenőrizni az alagútfúró gép állapotát, és vissza lehetett keresni az addig elkészült alagútszakasz során rögzített adatokat.

Jelen elemzés a végleges, megvalósulási dokumentumokon alapuló geológia mellett ezzel, a TBM által rögzített adatbázissal dolgozott.



8. ábra. Az északi szakaszt fúró TBM vágótárcsája a módosítás előtt és után (TBM cutterhead for DTSS T05 North section before and after the modification) (Zhao et al. 2007).

Az északi szakaszt fúró TBM vágótárcsáját az alagútfúrás során módosították, mivel a kezdeti szakaszon az TBM csak nagyon lassan tudott előrehaladni (8. ábra). A módosítás során nem csak a vágótárcsák elrendezését változtatták, hanem a vágótárcsa nyílásainak fizikai méreteit is csökkentették és talajfejtő szerszámokat is szereltek a vágótárcsára. Ezen felül a fejtett anyagot továbbító csiga hosszát is megnövelték a nyomásproblémák kiküszöbölése végett (Zhao et al. 2007).

## 5 TELJEÍTMÉNYELEMZÉS

Az elemzés során az összegyűjtött geológiai paramétereket és a TBM teljesítményadatait egy a TBM helyzetére épülő kapcsolt adatbázisba rendeztük. Egy fúrt egység során homogén kőzetkörnyezetet és konstans kőzetmechanikai paramétereket és teljesítményadatokat feltételeztünk.

### 5.1 A vegyes kőzetkörnyezetre kifejlesztett teljesítménymodell

Mind a kemény, mind a puha kőzetben fúrt szakaszokra meghatároztuk az átlagos előtolás mértékét:

$$p_{avg,soil} = \sum_{i=1}^n p_{soft,n} / n \quad (1)$$

$$p_{avg,rock} = \sum_{i=1}^m p_{rock,m} / m \quad (2)$$

ahol  $p_{avg, soil}$  és  $p_{avg, rock}$  az átlagos puha és kemény kőzetben számított előtolási mértékek.  $p_{rock}$  és  $p_{soil}$  a mért előtolási mérték,  $n$  és  $m$  a különböző anyagokban fúrt alagutak hossza.

Az elemzés során megállapítottuk, hogy a vizsgált teljesítmény-paramétereket leginkább a homogén kemény és puha közegben elért átlagos teljesítményadatok és a alagúthomlok jelen lévő kőzetek területi aránya befolyásolják. Ezek a megfigyelések megegyeznek Steingrimsson et al (2002) megállapításaival. A megfigyelések alapján a 3. és 4. egyenletekben bemutatott vegyes kőzetre alkalmazható teljesítménymodellt határoztuk meg.

$$\Delta p = p_{avg,soil} - p_{avg,rock} \quad (3)$$

$$p_{avg,mix} = \begin{cases} Fc = 0 & \rightarrow p_{avg,soil} \\ Fc \neq 0 & \rightarrow p_{avg,soil} - 0.5 * \Delta p * \log(Fc) \end{cases} \quad (4)$$

ahol  $p_{avg, mix}$  a vegyes kőzetkörnyezetben elérhető átlagos előtolási mérték.  $\Delta p$  a  $p_{avg, soil}$  és a  $p_{avg, rock}$  homogén teljesítményadatok különbsége és  $Fc$  a kemény kőzet százalékban kifejezett területaránya az alagúthomlok.

### 5.2 A vizsgálatban alkalmazott paraméterek

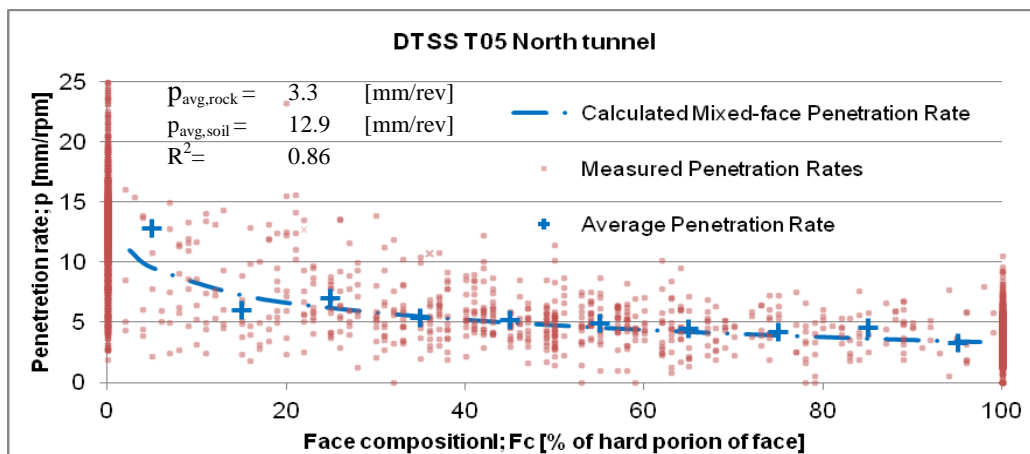
Ezt a számítási modellt az homogén kőzetben elérhető átlagos teljesítményadatokra alapoztuk. Az elérhető teljesítmény felső határa a talajban elérhető átlagos teljesítmény.  $\Delta p$  a talajban és kőzetben elért átlagos előtolási mérték különbsége, ami geológiának az alagútfúrásra kifejtett hatásait valamint az alagútfúró gép geológiához alkalmazkodásának képességét írja le. Az  $Fc$  paraméter az alagúthomlok kőzetviszonyait leíró paraméter.

A teljesítményelemzés eredményét a 9. és 10. ábra foglalja össze. Az összehasonlítás megkönnyítése érdekében a mért eredményekkel együtt ábrázoltuk a 10 %-os lépésekben számítottuk átlagos előtolási mértéket is.

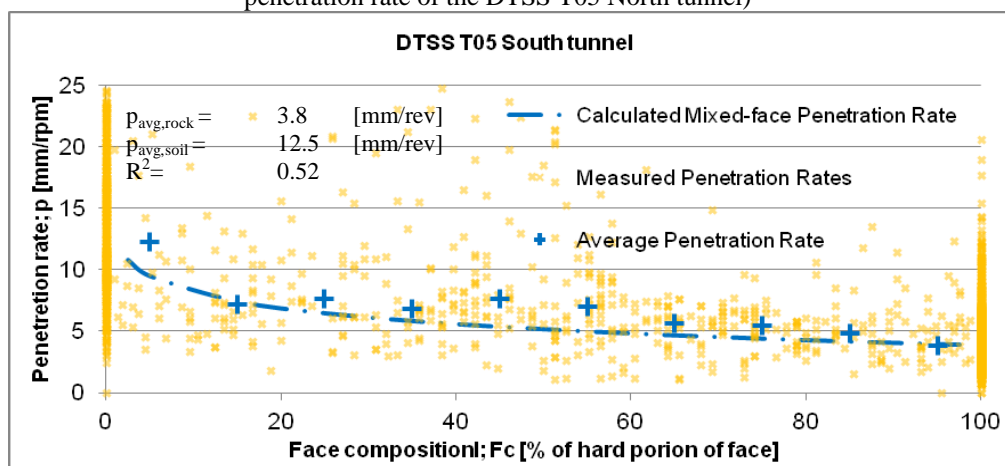
Megfigyelhető, hogy a TBM teljesítménye jelentősen esik a 0–30% kemény kőzetet tartalmazó alagútszakaszokon. Ez a jelentős teljesítményelemzés megegyezik a kutatás kezdetekor feltételezett sejtésekkel és (Steingrimsson et al. 2002) megfigyeléseivel. A modern vágótárcsákkal jelentős alagútfúrási sebességet lehet elérni puha talajokban. Azonban amint akár egy kis mennyiségű, jelentősen keményebb kőzet jelenik meg a homlok, az  $b$  előtolási mértéket már nem az TBM kitermelési kapacitása határozza meg. Ebben az esetben csökkenteni kell az előtolást és a vágótárcsa forgási sebességét annak érdekében, hogy a vágótárcsák, fejtőszerszámok sérülését megakadályozzák. Ezek együttesen jelentősen csökkentik az alagútfúrás sebességét. A működési paraméterek módosítása után a gép viselkedése stabilizálódik, és a teljesítmény egy lassú, egyenletes csökkenés után eléri a homogén kemény kőzetre jellemző minimális előtolási mértéket.

A kifejlesztett modell alapján az alagútfúró gép teljesítményét két paraméter határozza meg, a homogén kőzetben elérhető átlagos előtolási mérték és a kifúrt kőzet struktúrája. Ezek a paraméterek szintén megtalálhatók a Steingrimsson et al. (2002) által kifejlesztett modellben. Egyéb kutatások (Hassanpour et al. 2009; Delisio et al. 2013) arra is rámutattak, hogy egyéb kőzetmechanikai paraméterek – például UCS, tagozódás – jelentősen befolyásolják a TBM előtolási mértékét. Mivel nem csak

a kőzet összetétele, hanem egyéb többek között az UCS és a tagozódás is változhatnak az alagút nyomvonalára mentén, ezért a teljesítmény-előrejelzés során homogén szakaszokat kell lehatárolni, és azokat függetlenül kell kezelni. A homogén kőzetszakaszokra már alkalmazhatók a széles körben alkalmazott teljesítményszámítási modellek amik alapján meghatározhatóak a vegyes kőzetkörnyezetre alkalmazható modell bemeneti paraméterei.



9. ábra A mért és számított teljesítményadatok a DTSS T05 északi szakaszán (The measured and the predicted penetration rate of the DTSS T05 North tunnel)



10. ábra A mért és számított teljesítményadatok a DTSS T05 északi szakaszán (The measured and the predicted penetration rate of the DTSS T05 South tunnel)

Mivel a jelen cikkben elemezett alagút építése során a kőzet paramétereinek meghatározási módszerei, a mintavétel gyakorisága és minősége nem volt egyenletes, a teljesítményelemzést nem tudtuk kőzetmechanikai paraméterekre alapozni. Azonban az alagútszakasz hossza, és a részletes TBM működési adatok megengedték statisztikai módszerek alkalmazását. A megbízható kőzetmechanikai paraméterek hiányában a kőzetmechanikai paramétereket változását nem lehetett az elemzés során modellezni. Azonban a rendelkezésre álló minták alapján megállapítottuk, hogy egyes rövid szakaszok kivételével a kőzetszilárdság közel állandó, ezért a kőzetmechanikai paramétereket konstansnak feltételeztük. A számított és mért eredmények alapján megállapíthattuk, hogy a közelítés megalapozott volt (11. ábra).

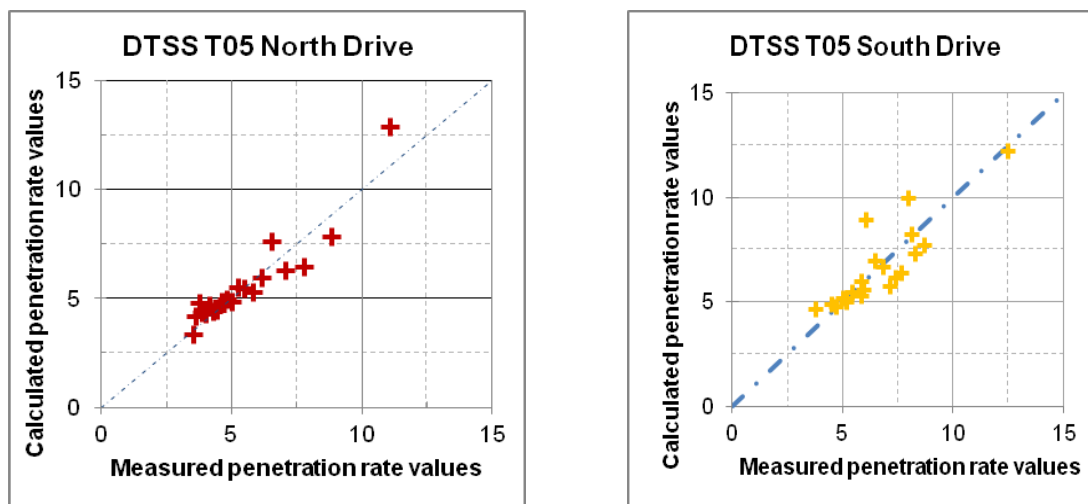
## 6 AZ ELEMZÉS SORÁN FELMERÜLT KÉRDÉSEK

A kutatás során egy olyan ipar számára is alkalmazható, egyszerű de megbízható modell kidolgozására törekedtünk, ahol a bemenő paraméterek viszonylag egyszerűen meghatározhatóak az alagútépítés minden fázisában és a modell megbízhatóan közelíti a valós teljesítményadatokat. A kifejlesztett modell bemenő paraméterei, mind a homogén kőzetben elérhető előtolási mérték, mind a kőzettípusok eloszlása a homlokon mérhető vagy számítható. A modell megbízható eredményeket ad az elméletileg elérhető átlagos vegyes kőzetben elérhetőtől. Azonban megfigyeltük, hogy többek között a betanulási görbe és a kiszolgáló személyzet tapasztalata lényegesen befolyásolja az aktuálisan elért teljesítményt. Ezeket és hasonló, csak szubjektíven meghatározható teljesítményt befolyásoló tényezőket a kutatás során nem vettünk figyelembe.

Mivel a kőzetmechanikai tényezők csak a vizsgált alagút rövid szakaszain voltak megbízhatóan dokumentálva, a kifejlesztett modell a kőzetmechanikai adatokból a homogén kőzetre alkalmazható telje-

sítménymodellek alapján is számítható előtolási mértékre támaszkodik. A tényleges kőzetmechanikai paraméterek csak közvetve befolyásolják a kapott eredményeket.

A modellt csak a talajjal és mállott kőzettel fedett alapkőzetben épített alagutakon teszteltük. Ebben a kőzetkörnyezetben a modell megbízhatóan írta le a vizsgált TBM-ek teljesítményét. Mindazonáltal nem javasoljuk a modell alkalmazását egyéb vegyes kőzetkörnyezetben, mivel azokban a vizsgálttól eltérő hatások befolyásolhatják az alagútfúró gép működési paramétereit.



**11. ábra.** A mért és számított átlagos behatolási mélységek összevetése a DTSS T05 északi és déli szakaszán (The calculated and measured penetration rates for the DTSS T05 North and south drive)

## 7 ÖSSZEFOGLALÁS

A szingapúri Mélyvezetésű Szennyvíz Főgyűjtőcsatorna T05 szakasza a város északi részén, komplex kőzetkörnyezetben épült. Az alagutak jelentős része talajjal és puhább kőzettel fedett alapkőzetben került kihajtásra. Az alagútfúrás során rögzítésre került az alagút környezetének részletes geológiája valamint az alagútfúró gép működési paramétereit. Az adatokat egy kapcsolt adatbázisba rendeztük, és statisztikai módszerekkel elemeztük. Az elemzés alapján egy erre a kőzetkörnyezetre jellemző teljesítményértékelő valamint teljesítmény-előrejelző modellt határoztunk meg. A modell a homogén, egy-nemű kőzetekeben a TBM által elérhető ideális sebesség, valamint az alagúthomlok jelen lévő kőzetek területi aránya alapján jó közelítéssel megadja az alagútfúrás várható sebességét. A modell használható teljesítmény-előrejelzésre, ahol a bemenő adatok a homogén kőzetre alkalmazott, széles körben használt teljesítménymodellek alapján valamint a geológiai hossz-szelvény alapján határozhatók meg. Az alagútfúrás során a modell a megfigyelt és rögzített adatokkal használható az alagútfúró gép teljesítményének ellenőrzésére, valamint előre nem létható hibák feltárására, például jelezheti a vágótárcsák túlzott kopását és felhívhatja a figyelmet nem várt geológiai formációkra.

## 8 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom Dr. Hanbin Zhou-nak, a Woh Hup Pte Ltd szingapúri részlegének projektmérnökének és Nick Shirlnawnak, a Golder Associates szakértőjének a kutatáshoz biztosított adatokért valamint Dr. Jian Zhao-nak, az Lausanne Műszaki Egyetem kőzetmechanika tanszékének vezetőjének, konzulensemnek, hogy biztosította a feltételeket a doktori kutatásomhoz.

## 9 IRODALOMJEGYZÉK

- Delisio, A. Zhao, J. Einstein, H.H. 2013. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötschberg Base Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 131-142
- Dong, A. Ma, G. Gong, Q. Zhao, J. 2006. Numerical Simulation on Rock Cutter Performance in Mixed Ground. *Proceedings of GeoShanghai 2006*, 199-204, Shanghai: American Society of Civil Engineers.
- Hassanpour, J. Rostami, J. Khamsehchiyan, M. Bruland, A. Tavakoli, H.R. 2009. TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel. *Rock Mech. Rock Engng*, 43, 1-19.
- Shirlaw, J.N. Hencher, S.R. Zhao, J. 2000. Design and construction issues for excavation and tunnelling in some tropically weathered rocks and soils. *Proceedings of GeoEng2000*, Australia, Melbourne: 1286-1329.
- Steingrímsson, J.H. Grov, E. Nilsen, B. 2002. The significance of mixed-face conditions for TBM performance. *World Tunnelling*, 9, 435-441.
- Toth, A. Zhao, J. Gong, Q.M. 2013. Analysis of TBM tunnelling performance in rock-soil interface mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 4, 140-150.
- Zhao, J. Broms, B. Zhou, Y. Choa, V. 1994. A study of the weathering of the Bukit Timah granite Part A: Review, field observations and geophysical survey. *Bull. Engng Geology and the Env.*, 49, 1, 97-106.
- Zhao, J. Gong, Q.M. Eisensten, Z. 2007. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 4, 388-400.