

# BUDAPESTEN MEGVALÓSULT MÉLY MUNKATÉRHATÁROLÁSOK MOZGÁSMÉRÉSI EREDMÉNYEINEK ÉRTÉKELÉSE



Szepesházi Attila - Dr. Móczár Balázs

<https://doi.org/10.32969/VB.2022.1.4>

*Mély munkatérhatárolások témakörével foglalkozó doktori kutatási projektünk keretében Budapesten megvalósult munkagödörök mozgásmérési eredményeit rendszereztük és elemeztük. Vizsgálatunk eredményeit jelen publikációban ismertetjük. Bevezetésként összefoglaljuk a munkatérhatárolások deformációinak számítási lehetőségeit és összegezzük a nemzetközi szakirodalmak releváns, mozgásmérési tapasztalatait, ajánlásait. Bemutatjuk azt az adatbázist, amely az utóbbi 15 évben Budapesten, annak jellegzetes belvárosi talajkörnyezetében megvalósult 9 db mereven (támaszfödemes és/vagy csőtámaszos) vagy rugalmasan, talajhorgonyokkal megtámasztott mély munkatérhatárolás megvalósítása során mért deformációkat tartalmazza. Végezetül ismertetjük a faldeformációk és felszínüllyedések a munkagödörmélység és megtámasztási mód függvényében azonosított tendenciáit és az azokból levonható következtetéseket.*

**Kulcsszavak:** munkatérhatárolás, munkagödör, horgonyzott résfal, metróállomás, résfalmozgás, felszínüllyedés

## 1. BEVEZETÉS

Az 1990-es éveket megelőzően a térszín alatti mély munkatérhatárolások jellemzően a metróépítési projektek keretében valósultak meg Budapesten. Az 1990-es évek közepétől mind gyakrabban merült fel magánberuházások, jellemzően szálloda- vagy irodaépületek alá tervezett mélygarázsok megvalósításához szükséges mély munkatér kialakításának igénye. A 2007-es válságot követő néhány szűkebb esztendőt leszámítva elmondható, hogy Budapesten évente kb. 10-15 olyan beruházás valósul meg, amely legalább 8-10 méter mélységű térszín alatti munkatérrel tervezett. Ugyan az utóbbi 4-5 évben már egy-egy vidéki településen is megjelentek hasonló beruházások, az ilyen feladatok nagy többsége továbbra is Budapest belvárosára koncentrálódik.

A mély munkagödörök körüli mozgások minél pontosabb előzetes becslésére különösen nagy szükség van a városi foghíjtelek beépítéseken, ahol a környező sokszintes épületek jellemzően rosszabb állagúak, kisebb szerkezeti merevséggel rendelkeznek, alapozásuk teherbírás szempontjából határállapotban van és már kisebb süllyedések, relatív mozgáskülönbségek hatására is repedések jelenhetnek meg, rosszabb esetben szerkezeti károsodások alakulhatnak ki. Ezért lényeges minden egyes mélyebb munkagödör környezetében a csatlakozó épületek részletes tartószerkezeti vizsgálata és teherelemzése a munkagödör kiemelés során kialakuló várható deformációk, mint elmozdulási kényszerek figyelembevételével.

A főváros budai oldalán a folyópart közelében vagy a pesti oldalán a Duna és a Hungária körút közötti területen tervezett projekteken a mély munkatérhatárolások viszonylag hasonló geotechnikai adottságok között valósulhatnak meg. A jellemzően 2-5 méter vastag mesterséges feltöltés alatt a Duna néhány méter vastagságú, finom, mélyebben durvább szem-

csésű üledékei húzódnak. A terület alapkőzetét a 8-15 méter mélységben megjelenő, alacsony vízáteresztőképességű és kedvező mechanikai viselkedésű, Oligocén korú agyagfekű vagy a jellemzően heterogénebb, szemcsés, vízáteresztő rétegekkel átszótt Miocén korú agyagréteg jelenti. A talajvíz viszonylag magasan, 3-6 méter mélységben megjelenik és jellemzően a Duna vizével kommunikálva, az attól való távolságtól függő mértékben ingadozik.

A feladat megoldására tipikus esetben ideiglenesen megtámasztott, az agyagfekűbe befogott résfalas munkatérhatárolásokat alkalmaznak, melyek tervezését gyakran a környező létesítmények, a munkatérhatároló fal vízszintes mozgásából eredő, süllyedéseinek korlátozása vezérli. Amíg 15-18 méteres maximális munkagödör mélységig a résfalak ideiglenes megtámasztása, még jellemzően elfogadható elmozdulások mellett, ideiglenes talajhorgonyokkal és a sarkok közelében acél csőtámaszokkal megvalósítható, addig ennél mélyebb munkagödörök a szemközti résfalaik acél cső és/vagy vasbeton födémeikkel történő összetámasztásával kivitelezhetőek a szabványos biztonsági szintek betartásával.

Az ilyen projektek mind mérnöki, mind beruházói szempontból lényeges feladata a munkatérhatároló szerkezetek és a környező építmények mozgásmérése. A megfelelő gondossággal megvalósított monitoring program lehetőséget ad a méretezési modellek projekt közbeni verifikálására és olyan kivitelezői megoldások választására, melyekkel a környező létesítmények deformációi elfogadható mértékűek maradnak. A mérési eredmények egyúttal az érintettek, például a környező építmények tulajdonosainak megnyugtatásának vagy az esetleges károsodások miatti jogviták megelőzésének eszközei is lehetnek.

Az egyedi projektek szempontrendszerén túl, a minőségi monitoring a munkatérhatárolásokkal foglalkozó kutatók



**1. ábra:** Szervita téri munkagödör kivitelezés közben

számára értékes alapanyagot szolgáltat. Egy-egy projektről megjelentek hazai publikációk (pl. Deli, Kaltenbacher, Havas 2009, Szepesházi A., Móczár, Csapody 2016), de több projekt mérési eredményeit átfogóan értékelő és ezzel jövőbeni projektek előkészítési fázisában, a feladat kockázatértékelését támogató vagy a várható fal- és felszínmozgások becslését támogató hazai kutatások eddig nem születtek. A következő néhány oldalon a 2014-ben átadott 4-es számú metróvonal néhány állomásának, valamint a HBM Soletanche Bachy által, az utóbbi 7-8 évben megvalósított munkatérhatárolási projektek monitoring adatainak, a folyamatban levő PhD kutatási projektünk részeként megvalósított értékelésének eredményeit ismertetjük.

## 2. MÉLYMUNKATEREK ÉS KÖRNYEZETÜK DEFORMÁCIÓI

### 2.1 Mély munkatérhatárolások deformációinak számítási lehetőségei

Mély munkaterek méretezése a számítógépek megjelenése előtt „kézi”, analitikus eljárásokkal valósulhatott meg, melyekkel a falmozgások prognózisa nagyon korlátozott pontossággal volt lehetséges. A 1970-es és 1980-as évek mérnökei így elsősorban szakirodalmi analitikus és empirikus módszerekre hagyatkozhattak, melyek a munkagödörök geometria, szerkezeti és geotechnikai adottságainak változó részletességű figyelembevételével adtak eljárást a várható deformációk becslésére. A számítógépek megjelenésével nyílt lehetőség komplexebb, a talaj-szerkezet kölcsönhatás mind pontosabb számításba vételére és ezáltal a faldeformációk, abból empirikusan származtatva a felszínsüllyedések számítására. Az elérhető szakirodalmi módszerekről ad áttekintést az általunk összeállított *1. táblázat*.

A jelenlegi tervezési ipari gyakorlat továbbra is elsősorban a rugalmas ágyazás elvén működő síkbeli gerendamodellekkel történik. Az ilyen számítások során a szerkezetet körülvevő talajzónák mechanikai viselkedését és kölcsönhatásait a szerkezet és a talaj határfelületén elhelyezett kinematikai támaszokkal, rugókkal modellezzük. A falra ható földnyomások, mint rugóerők, az elmozdulásokkal arányosan kerülnek számításba. A mindennapi gyakorlatban gyakran alkalmaznak a módszeren alapuló szoftvereket (pl. GEO5). Szakirodalmak alapján ismert jelenség a munkatérhatároló fal körüli talajtömbök „tárcsaszzerű” deformációja (Kempfert és Raithel, 1998), melyek nagyobb munkagödör mélység esetén jelentősen növelhetik a munkatérhatároló fal mozgásait és a munkagödör körüli felszínsüllyedéseket, de kimutatásukra a rugalmas ágyazás elvén működő modellek nem képesek. A felszínmozgások analitikus eljárásokkal származtathatóak a modellezés eredményeként előálló faldeformáció diagramból.

Mélyebb munkaterek vagy komplex kölcsönhatások model-

lezésének szükségessége esetén, jellemzően síkbeli komplex anyagmodellek kezelésére képes végeelemes modellek (is) születnek a rugalmas ágyazás elvén működőek mellett (2. ábra). A végeelemes módszerrel dolgozva nem különítjük el a tervezés menetében a szerkezetet érő hatások megállapítását és a szerkezet méretezését, ugyanis a végeelemes modell létrehozásakor a fal mellett a fal körüli talajtömeget és az esetleges megtámasztásokat (horgony, dúc) is véges elemekkel modellezzük. Tehát a földnyomás nem valamely földnyomáselméleti megközelítés alapján definiált terhelésként működik, hanem a talajt és a falszerkezetet modellező véges méretű elemek kölcsönhatásaként kerül a számításba, függve az alkalmazott talajmodellek típusától és bemenő paramétereitől. A talaj végeelemekkel történő modellezésének következménye, hogy nemcsak a munkatérhatároló fal, hanem a környező talaj deformációról is tájékozódhatunk, így például a munkagödör körüli felszínsüllyedésekről. A térbeli modellek ipari alkalmazása, vélhetően a modellezés komplexitása, számítógépes hardverigénye és ezekkel összefüggésben jelenlegi viszonylagos lassúságára, meglehetősen ritka. Az elérhető szoftverek és a hardverek rohamos fejlődését, valamint a mind összetettebb építészeti igényeket figyelembe véve, a térbeli modellek fokozatos térnyerése várható, melyekkel a síkbeli modellek szükségszerű egyszerűsítései kiküszöbölhetők és így a számítások bizonytalanságai nagy mértékben csökkenthetők.

A mérési eredmények és különböző modellezési eljárásokkal számított falmozgások összehasonlító értékelése a bevezetőben említett PhD kutatás részét képezi, jelen cikkben ezen kutatási irány eredményeit terjedelmi okokból nem publikáljuk. Jelen fejezettel a célunk az, hogy rávilágítsunk arra, hogy a mai gyakorlatban alkalmazott eljárások is jelentős egyszerűsítésekkel, például sík alakváltozási állapot feltételezésével dolgoznak, így a számítási eredmények hitelesítése a mozgásmérési tapasztalatok figyelembevételével lehetséges.

### 2.2 Mély munkatérhatárolások mozgásmérési tapasztalatai a szakirodalomban

A témakörben részletes nemzetközi szakirodalmi áttekintést adott Szepesházi Róbert (2007). Az áttekintésben szerepel Clough és O'Rourke (1990), Tomlinson (2001), Katzenbach és Moormann (1999, 2000) és Schweiger (2007) publikációi alapján korábban megvalósult néhány tucat munkagödör mozgásmérési eredményeinek összegző értékelése. Példaként a 3. ábrán Clough és O'Rourke diagramjait közöljük.

A témakörben érdemes még kiemelni Cording és társai (2010) publikációját, mely a geotechnikai aspektusokon túl részletesen foglalkozik a felszínmozgások vízszintes komponensével és a munkagödör körüli építmények károsodás elemzésével is. Érdemes még megemlíteni Moorman (2004) publikációját, melyben 530 nemzetközi esettanulmány eredményei alapján összeállított mozgásmérési adatbázist értékelése olvasható. Ugyan részletesebben puha agyagokban megvalósított munkagödörök tapasztalatait értékel, rámutat arra, hogy a szakirodalmi empirikus összefüggésekkel ellentmondó eredményekre juthatunk, mivel a kialakuló mozgások nagy számú tényezőtől függenek.

Ahogy a *1. táblázat* is sugallja, a munkatérhatárolások deformációinak nagysága elsődlegesen:

- a munkagödör mélységétől,
- a fal és az azt megtámasztó szerkezetek merevségétől,
- a geotechnikai viszonyoktól függ.

1. táblázat: Munkáthatárolások deformációnak számítási módszerei – áttekintés

		Munkáthatárolás számításba kerülő jellemzői																									
		Geometria					Technológiai és környezeti						Megtámasztott és munkagödörön belüli talaj jellemzői														
Szerző/módszer	Év	Eredmény	H	B	L	t	$h_{hor}$	$h_{ver}$	$h_{ver,botom}$	Fal típusa (részfal/ cölöpfal/ szádfal/...)	Fal merevsége	Megtámasztás típusa (horgony/ dúcolat/ földémtámasz)	Megtámasztás merevsége	Kivitelezés minősége	Kivitelezés sebessége	Felszíni szomszédos építmények jelenléte	Felszín alatti szomszédos építmények jelenléte	Merevség nagy alakváltozások tartományában	Merevség nagy alakváltozások tartományában tehermentesülés esetén	Merevség kis alakváltozások tartományában	Nyugalmi földnyomási tényező	Aktív földnyomási tényező	Passzív földnyomási tényező	Nyírószilárdsági paraméterek feszültségszint függvényében	Talajvíz szintje		
			x	x	x	x	x	x	x	x	E<I	C	x	x	x	x	x	x	$E_{tot} - E-G-v$	$E_{ur} - G_{ur} - v_{ur}$	$G_0, \gamma_{0,7}$	$K_0^{NC}, K_0^{OC}$	$K_p$	$K_{\phi,c}$	$h_w$		
<b>Szakirodalmi empirikus ajánlás/számítási eljárás</b>																											
Peck	1969	felszínstüllyedés ábra	x			x																					
Rumsey & Cooper	1982	maximális felszínstüllyedés	x																								
Clough, Smith & Sweeney	1989	vízszintes falmozgás és felszínstüllyedés	x			x																					
Clough & O'Rourke	1989	maximális vízszintes falmozgás és maximális felszínstüllyedés	x																								
Tomlinson	2001	maximális vízszintes falmozgás és maximális felszínstüllyedés	x																								
Katzenbach & Moorman	1999-2000	maximális vízszintes falmozgás	x																								
Vermeer	2000	maximális vízszintes falmozgás	x			x																					
Schweiger	2007	maximális vízszintes falmozgás	x																								
rugalmas ágyazású falmodell		vízszintes falmozgás	x			x																					
Ulrichs	1981	vízszintes falmozgás	x																								
FEM 2D		vízszintes falmozgás és felszínstüllyedés	x			x																					
FEM 3D		vízszintes falmozgás és felszínstüllyedés	x			x																					

**Megjegyzések**

x

□

Hosszúság

Szélesség

Peck (1969)

Katzenbach &amp; Moorman (1999-2000)

a sor elején szereplő eljárás figyelembe veszi az oszlopban szereplő tényezőt

a sor elején szereplő eljárás KÖZVETVE/RESZLEGESEN figyelembe veszi az oszlopban szereplő tényezőt

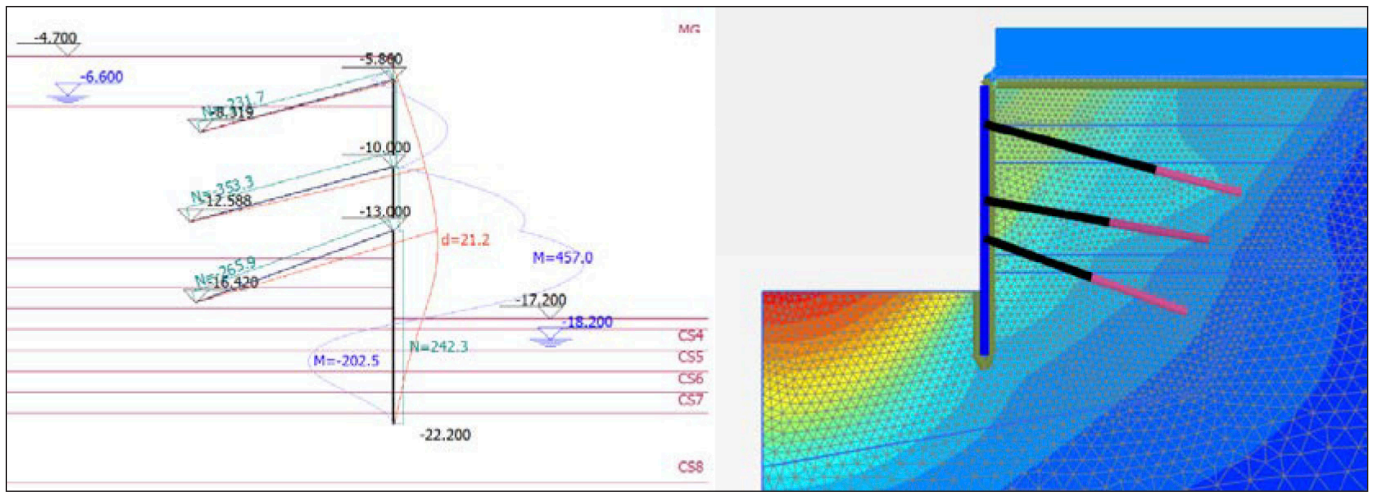
vizsgált keresztmetszet-re merőleges hossz

vizsgált keresztmetszettel párhuzamos oldal hossz

bemenő adatként a fal melletti felszínstüllyedéseket igényli

Katzenbach &amp; Moorman (1999-2000) eljárása a frankfurti agyagokra lett kidolgozva, talajjellemző ezért nem jelenik meg





2. ábra: Rugalmas ágyazású (bal) és végeselemes modell (jobb) eredményei

A fenti szakirodalmak alapján összefoglalóan elmondható, hogy a nem szélsőségesen puha, kötött talajokban megvalósult résfal munkatérhatárolások monitoring tapasztalatai szerint, a munkagödör mélységére viszonyítva a munkagödör menti mozgások alakulása az alábbi:

- 0-6‰ közötti, de jellemzően 2-3‰ alatti maximális vízszintes falmozgások,
- 0-7‰ közötti, de jellemzően 2-3‰ alatti maximális felszín-süllyedések,
- munkagödör mélység 2-2,5-szeresének megfelelő szélességű felszín-süllyedési horpa.

Emellett, összhangban a műszaki megfontolásokkal, a me-rev megtámasztású, dúcolt munkagödörök esetében jellemzően alacsonyabb deformációk tapasztalhatóak, mint a rugalmas, talajhorgonyokkal megtámasztott munkagödörök esetében.

## 2.3 Mély munkatérhatárolások hazai mozgásmérési gyakorlata

Mély munkatérhatárolások hazai gyakorlatban elterjedt eszközei:

- hagyományos geodéziai mérési eljárások alkalmazása a felszíni létesítményeken, valamint a földmunkával párhuzamosan láthatóvá váló munkatérhatároló falfelületen elhelyezhető mérési pontokon,
- inklinométeres mérés a munkatérhatároló fal kiválasztott néhány függőlegesében a résfal betonacél armatúrájához rögzített és bebetonozott inklinométer mérőkútban, mely-

lyel lehetővé válik a fal deformációinak mérése az eltartat mélységben is,

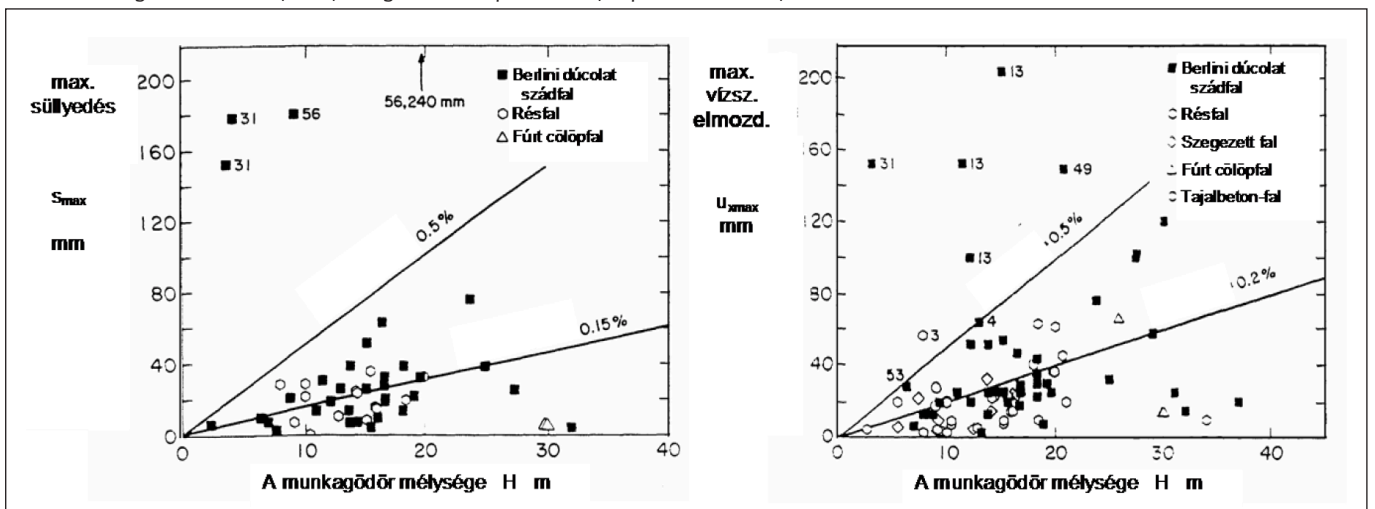
- esetlegesen horgonyerő mérés a horgonyfejen elhelyezett erőmérő cellával,
- esetlegesen csőtámban keletkező erő mérése nyúlásmérő bélyegek elhelyezésével.

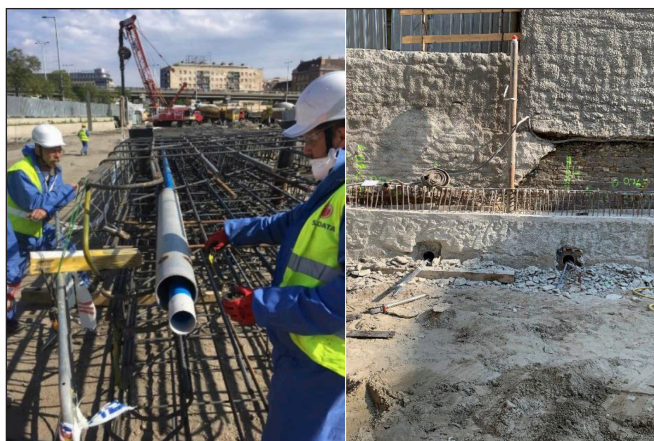
A hagyományos geodéziai eljárásokat kivéve, a fenti eljárások az 1990-es években szóróványosan már megjelentek, de rutinszerű alkalmazásuk a 4-es számú metróvonal megvalósításától figyelhető meg. Érdeemes megjegyezni, hogy voltak kísérletek további speciális eszközök (pl. talajnyomásmérők) beépítésére és mérésére is, de vélhetően komplexitásuk és mechanikai érzékenységük, valamint költségességük miatt nem terjedtek el.

Az alábbiakban elsősorban a hagyományos geodéziai és inklinométeres mérések eredményeit ismertetem, melyekből olyan mennyiségű és minőségű adat áll rendelkezésre, hogy átfogó elemzésük lehetővé vált. A geodéziai mérések kapcsán érdemes megjegyezni, hogy a tapasztalatok szerint munkatérületi körülmények között jellemzően  $\pm 2$  milliméteres mérési pontosság érhető el. Ugyanakkor az egymás után néhány napos, esetleg 1-2 hetes időközökkel megvalósuló mérések lehetőséget adnak a kirívó pontatlanságok (ki)szűrésére és kutatási célra is elfogadható pontosságú középértékek határozhatóak meg.

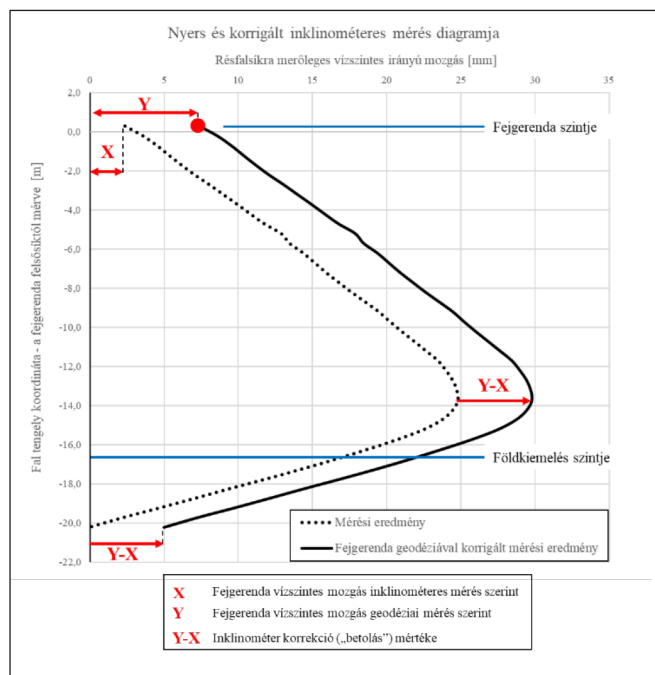
Az inklinométeres mérések a hazai gyakorlatban jellemzően a résfalakba kerülő betonacél armatúrához a beépítés előtt rögzített, majd a résfalba bebetonozott műanyag inklinométer

3. ábra: Clough és O'Rourke (1990) mozgásmérési tapasztalatai [Szepesházi R., 2007]





4. ábra: A résfalba kerülő inklinométer mérőkút az armatúrába történő beszerelés (bal) és beépítést után a résfalból kilógva (jobb) közben



5. ábra: Az inklinométeres mérési eredmények korrekciójának elve

mérőkutakkal történik (4. ábra). A mérés pedig ebbe a mérőkútban a mérés során leengedett elfordulásmérővel történik a fal magassága mentén fél méterenként. A fal deformált alakja ezen értékek réstálpól felfelé történő kumulációjából áll elő. Az egyszeri mérés hibája a fél méterenként történő egyedi elfordulásmérések hibájának kumulációjával adódó, lentől felfelé bővülő hibátölcser, jellemzően 0,2 milliméter/méter hibanövekménnyel. A résfal beton megszilárdulását követő első mérés már deformációval terhelt, de a résfal deformált alakját ezen „nullméréshez” viszonyított deformációk, mivel a mérés célja a résfal földkiemelés és támaszbeépítés hatására történő deformációjának mérése.

Lényeges, hogy az egyedi mérések kumuláció során azzal a feltételezéssel élünk, hogy a résfal talpsíkja körül a legalsó mérési pontban a résfal mozdulatlan. Kisebb befogási mélységű befogott vagy támaszkodó falak esetén a földkiemelés befejeztével ez ritkán igaz és a talp néhány mm nagyságrendű elmozdulása reális. Ilyen esetekben az inklinométer mérőkút felső, a térszínen a kezdetektől látható pontjának geodéziái mérésével lehet korrigálni és tulajdonképpen a fal egészének merevtestszerű bemozdulását a deformált alakhoz adni, ahogy azt a 5. ábra szemlélteti. A vizsgálatok során mi is ezt a módszert alkalmaztuk.

### 3. AZ ÖSSZEÁLLÍTOTT ADATBÁZIS

A kutatási munka során az alábbi projektek mozgásmérési eredményeiből állt össze a vizsgálatok alapját adó adatbázis.

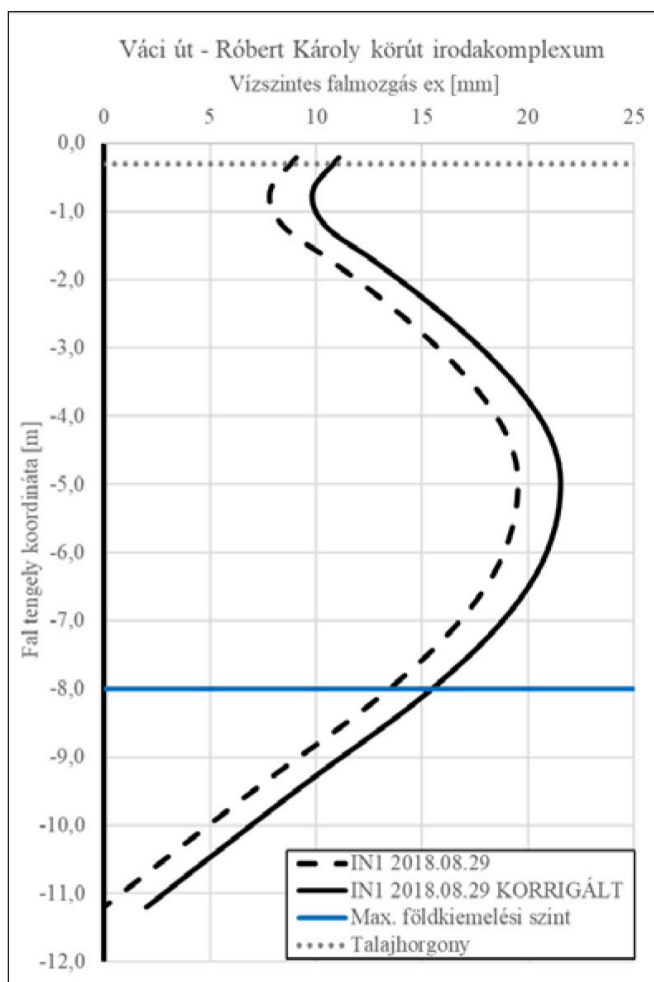
- Közepes, mintegy 7-17 méter mélységű, egy vagy több sorban ideiglenes talajhorgonyokkal megtámasztott résfalas határolású munkateretek
  - o Bajcsy-Zsilinszky úti irodaház (Budapest V. kerület) ~16 méter mélységgel,
  - o Váci út és Róbert Károly körút keresztezésében épült irodaház komplexum (Budapest XIII. kerület) ~11-14 méter mélységgel,
  - o Szervita téri vegyes rendeltetésű épület (Budapest V. kerület) ~17 méter mélységű munkagödre,
  - o Pozsonyi úti vegyes rendeltetésű épület (Budapest XIII. kerület) ~9 méter mélységgel,
  - o Fiumei út szomszédságában épült szálloda épület (Budapest, VIII. kerület) ~7 méter mélységgel.
- Nagy mélységű, ideiglenes acél csőtámaszokkal vagy végleges földemekkel megtámasztott résfalas határolású munkateretek a 4. számú metróvonal építéséhez kapcsolódóan
  - o Szent Gellért téri állomás ~36 méter mélységgel,
  - o II. János Pál Pápa téri állomás ~25 méter mélységgel,
  - o Móricz Zsigmond körtéri állomás ~27 méter mélységgel,
  - o Fővám téri állomás ~37 méter mélységgel.

A teljes adathalmaz így összesen 22 függőleges falmetszet inklinométeres mérési adatsort és 6 munkatérhatárolás mentén bekövetkezett felszínmozgások adatait tartalmazza. Bár jelen értékelés szempontjából nem lényeges, de a Szervita téri és a Fiumei út menti munkagödrök esetében horgonyerő mérések is készültek, melyek a kutatás keretében megvalósított back-analízis modellekhez hasznos eredmények voltak.

Az adatbázisban minden projekthez készült egy egységes formátumú digitális adatlap, mely tartalmazza a projekt közreműködőit, a fontosabb tervi részleteket, a monitoring rendszer bemutatását, a rendszerezett mérési eredményeket és azok mérnöki értékelését lehetővé tevő diagramokat is. Ezeket az egyedi adatlapokat terjedelmi okok miatt itt nem ismertetjük, de kiragadott példaként egy inklinométeres eredménystort bemutatunk az 6. ábrán.

Teljes egészében közöljük viszont az összesítő adattáblát (2. táblázat), mely az egyes projektek műszaki értékelése szempontjából lényeges geometriai, geotechnikai és szerkezeti jellemzőit, valamint a legfontosabb mozgásmérési eredményeket ismerteti. Így szerepel a táblázatban az inklinométerrel mért fal deformált alakja (P vagy P1 típusú), a mért maximális vízszintes faldeformáció, a mért maximális felszín-süllyedés értéke és a süllyedési horpa szélessége. A műszaki jellemzők közé bekerültek olyan szakirodalmi ajánlások szerinti tényezők, melyek a munkatérhatárolás geometriai és merevségi jellemzőit egyetlen számértékbe sűrítik és melyekkel más kutatók a bekövetkezett mozgásokkal korrelációkat állítottak fel. Emiatt szerepel a táblázatban a Rowe- („p flexibility number”), Clough- („Ks System stiffness/ flexibility”) és Addenbrooke-féle („Kd displacement flexibility,”) tényezők (Addenbrooke, 1994) értéke. Rowe-féle tényező egy sorban mereven megtámasztott munkatérhatárolásokra dolgozták ki, de a megtámasztás merevségét nem veszi figyelembe, csupán a fal teljes magassága és hajlítási merevsége szerepel benne (ld. 2. táblázat). Minél mélyebb és karcsúbb a fal, a Rowe-féle rugalmassági szám annál magasabb. Clough- és Addenbrooke-féle számokat merev megtámasztású munkagödrökre dolgozták ki és már a megtámasztások osztásköze is szerepel bennük. Összességében célszerűnek láttuk megvizsgálni, hogy felállítható-e valamilyen korreláció





6. ábra: A Váci út – Róbert Károly körű csomópontban megvalósult munkagödör IN1 (bal) és Szervita téri munkagödör IN1 (jobb) inklinométeres mérések adataira

a deformációk és ezen tényezők értéke között.

Fontos megjegyezni, hogy az inklinométeres mérési eredményesorból a maximális földkiemelés állapotára reprezentatív, az ideiglenes támaszok elbontását megelőző utolsó adatsort vettük figyelembe, mivel jellemzően ez a munkatérhatárolás tervezését vezérlő építési állapot. A felszínüllyedések esetében bemutatjuk az ideiglenes támaszok bontását és a végleges támaszok beépítését követő végállapot eredményeket is.

## 4. MUNKATÉRHATÁROLÓ FALAK DEFORMÁCIÓI

A mozgásmérési adatbázisban szereplő vízszintes falmozgásokra vonatkozó eredményeket, a 2.2. és 3. fejezetben említett szakirodalmi tapasztalatokhoz hasonló koncepció szerint elemeztük, olyan összefüggéseket keresve, melyek segítségével lehetnek jövőbeni, hasonló talajkörnyezetben megvalósuló projektek előkészítési fázisában a környezet várható süllyedéseinek becslésére vagy a részletes számítások validálására.

A vizsgálatokkal kapcsolatosan az alábbiakat meg kell jegyezni:

- Ahogy a 2. táblázatban szereplő „Megjegyzés” oszlopban olvasható, az inklinométeres mérés korrekciójának mértéke a Szervita téri munkagödör IN2 (35 milliméter) és a Pozsonyi úti munkagödör IN1 és IN2 (8-8 milliméter) inklinométerei esetében meghaladják a mért abszolút értéket. Ennek ellenére - értékelve a teljes mérési adatsort és

a részfal felületén készült további kontrollméréseket - ezeket is megbízható eredményesornak tekintettük és az értékelés során figyelembe vettük.

- A 4. számú metróvonalról két munkagödörre vonatkozóan áll rendelkezésre inklinométeres mérési adat. Ezek értékét nem korrigáltuk, mert nem állt rendelkezésre geodéziai mérési adat. Ugyanakkor ilyen, a szemközti falak összetámasztásával megvalósuló, nagy mélységű részfalak esetében az inklinométerrel nem mérhető merevtestszerű bemozdulás nem várható, így a korrekció elhagyása is elfogadható.
- Az egyes projekteken változó, két héttől néhány hónapig terjedő időtartam telt el a teljes földkiemelés és az alaplemez, mint legelső végleges támasz beépítése között. A rövidebb időköz esetén nem állt rendelkezésre kellő számú mérés, hogy megítélhessük, hogy a jellemzően a munkatérhatároló fal passzív megtámasztását biztosító agyagfekü konzolidációja milyen mértékben zajlott le. A Váci út és a Róbert Károly körű kereszteződésében megvalósult munkagödör esetében (Szepesházi, 2019) még több hónap után is kúszás jellegű deformációkat lehet megfigyelni, így vélhetően gyakoribb, hogy egy alacsony konzolidáltsági fokhoz tartozó, közel drénezetlen állapotra vonatkozó eredményeink vannak. Ugyan átlagos körülmények között hasonló időtartam várható a földkiemelés vége és az alaplemez beépítése között, de fontos megjegyezni, hogy a vizsgált adatsorok nem szélsőségesen lassú projektelőrehaladás esetén tekinthetők reprezentatívnak.
- Talajhorgonnyal megtámasztott munkaterek esetében lényeges, hogy a munkatér sarkaihoz közelítve a térbeliség miatt, kisebb elmozdulások várhatóak, mint a sarkoktól távolabb. A sarkokhoz legközelebbi mérési függőlegék a Fiumei út közelében megvalósult projekt IN1 (11,90 méter), és az Bajcsy-Zsilinszky úti irodaház EP\_IN1 (13 méter) inklinométerek voltak. Értékelve az adott munkagödör mélységét és hogy ezek is az adott falszakasz felezőpontjánál helyezkednek el, a „sarkhatás” figyelembevételétől az értékelés során eltekintettünk.
- A vizsgált munkatérhatároló részfalak vízszintes falmozgásaival kapcsolatosan a 7-10. ábrákon szereplő eredmények értékelésével, a következő megállapításokat tettük:
  - A nemzetközi szakirodalmi tapasztalatokkal összhangban, a hasonló talajkörnyezetben, hasonló merevségű részfalas határolással megvalósult munkagödörök deformációinak mértékét a megtámasztás típusa és a munkagödör mélysége határozza meg.
  - A 7. ábrán szereplő két diagram alapján, összhangban a 2.2 fejezet szerinti nemzetközi szakirodalmi adatokkal, megállapítható, hogy:
    - o A talajhorgonyokkal megtámasztott, jellemzően 17 métert nem meghaladó mélységű munkagödörök határoló falainak maximális vízszintes elmozdulása jellemzően meghaladja merev megtámasztású, akár 35-40 méter mély munkagödörök határolását adó falakét.
    - o A munkatérhatároló falak maximális vízszintes falmozgásainak a munkagödör mélységgel normalizált értéke:
      - talajhorgonyos megtámasztás esetén 0,77-2,79% közötti, 1,76% átlagértékkel,
      - merev megtámasztás esetén 0,25-0,84% közötti, 0,49% átlagértékkel.
    - o A maximális vízszintes falmozgás, összhangban a nemzetközi tapasztalatokkal, csak extrém esetben haladhatja meg a munkagödör mélység 3%-t.
    - o 5-10 milliméter közötti minimális vízszintes falmozgás minden esetben bekövetkezik, függetlenül a munkagödör



- mélységétől vagy a megtámasztás módjától.
- A 8. ábrán szereplő két diagram alapján megállapítható, hogy a talajhorgonyokkal megtámasztott munkagödörök esetében a maximális vízszintes falmozgás értéke a munkagödörmélység függvényében növekszik, de a pontfelhő szórása olyan mértékű, hogy kellően megbízható összefüggés nem állítható fel. Hasonló tendencia vagy összefüggés a merev megtámasztású munkagödörökre nem állítható fel, igaz összesen 2 projekt eredményosra áll rendelkezésre.
- A 9. ábrán szereplő bal oldali diagram, a várakozásoknak megfelelően azt mutatja, hogy a talajhorgonnyal megtámasztott munkatérhatároló falak vízszintes mozgásai csökkennek a Rowe-féle rugalmassági szám, azaz a munkatérhatároló fal merevségének növekedésével. A felvett lineáris trendvonal jellemzői ugyanakkor az látszik, hogy kellően megbízható összefüggés nem állítható fel, csupán tág határok közötti becslés válhat lehetővé. A jobb oldali ábra a több sorban mereven megtámasztott munkatérhatárolások eredményeit is rögzíti, melyek nem mutatnak összefüggést a Rowe-féle rugalmassági számmal.
- A 10. ábrán szereplő diagramok alapján megállapítható, hogy sem a Clough-féle rendszer merevségi szám, sem az Addenbrooke-féle elmozdulás rugalmassági szám nem korrelál a hazai mozgásmérési eredményekkel, mely arra utal, hogy a fal hajlítási merevsége és a megtámasztások átlagos függőleges távolságából képzett szám önmagában nem elegendő a munkagödör deformációs hajlamának leírására.

## 5. MUNKAGÖDÖRÖK MENTÉN BEKÖVETKEZETT SÜLLYEDÉSEK

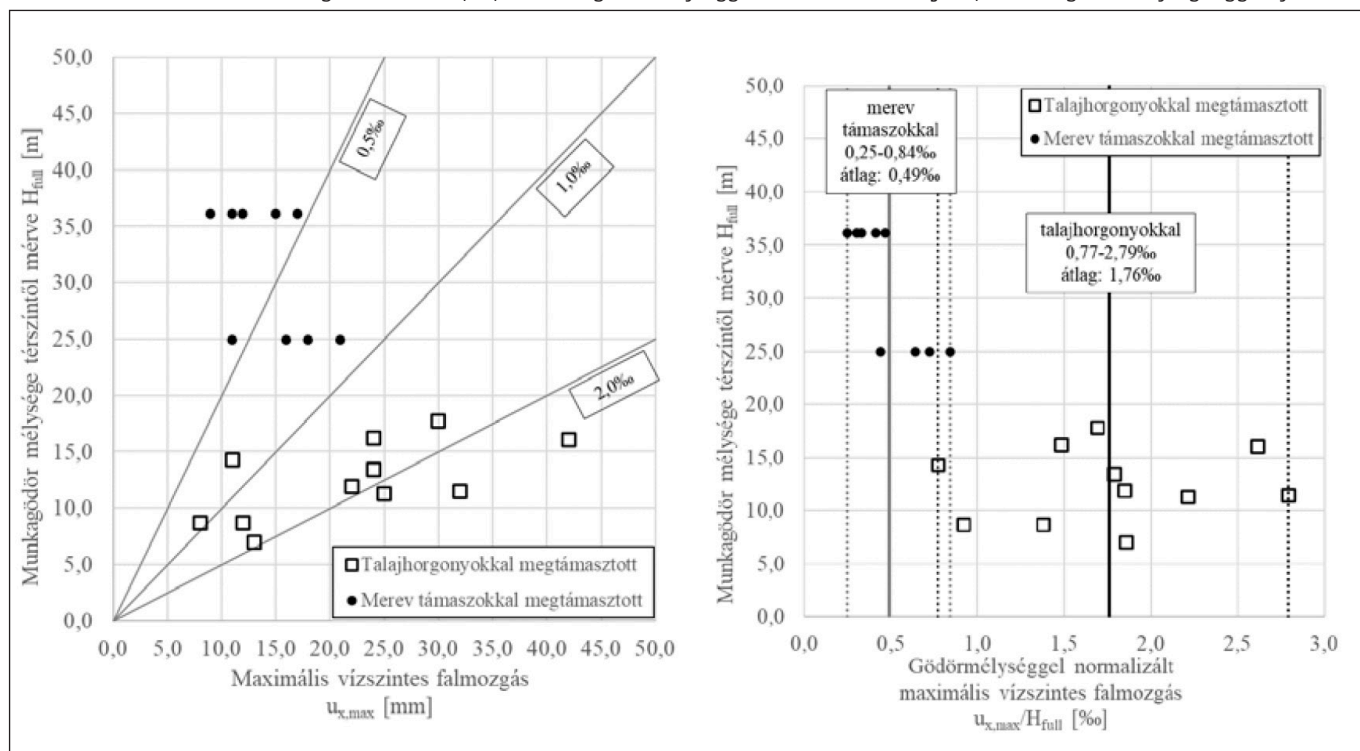
A felszínsüllyedési eredmények értékelését a 4. fejezetben közöltekhez hasonló koncepció szerint végeztük. A megállapítások ismertetése előtt, a vizsgálatosorozattal kapcsolatosan fontos megjegyezni a következőket:

- A felszínsüllyedési eredményosorok a falmozgásokhoz hasonlóan jelentősen eltérnek a kétféle megtámasztási mód esetén, így az eredmények értékelését külön végeztük.
- Az inklinométeres mérések esetében a maximális földkiemelés állapotához tartozó monitoring eredményeket vizsgáltuk, míg a felszínsüllyedések esetén nem. A talajhorgonyos megtámasztású munkagödörök esetében a horgonyok feloldását követő végső állapothoz tartozó süllyedéseket ábrázoltuk. A metróállomások esetében az alaplemez megépítését követő állapotban mért felszínmozgásokat vizsgáltuk, hogy még a viszonylag jelentős felszínsüllyedéseket kiváltó alagútúrójó pajzs érkezése előtti, a munkagödör építésével összefüggésbe hozható eredményeket elemezhesük.
- A felszínsüllyedések esetében a vízszintes mozgáskomponensekkel nem foglalkoztunk.
- A felszínsüllyedési értékeket minden esetben a mérési pont részaltól mért távolság függvényében vizsgáltuk. Nem vettük figyelembe, hogy a vizsgált pont magassági értelemben hol helyezkedik el a felszíni építményen, vagy hogy az adott pont helyzete miként viszonyul alaprajzi értelemben a munkatérhatárolás sarkaihoz, mint merevebb megtámasztású és kevésbé deformálódó szakaszokhoz.
- A résfalak közvetlen közelében levő építmények néhány mm-es süllyedése a résfal kivitelezése során bekövetkezhet. Ezen többlet süllyedés értékeket nem szűrtük ki a vizsgálatok során.

A vizsgált munkatérhatárolások mentén bekövetkezett felszínsüllyedésekkel kapcsolatosan, a 11-13. ábrákon szereplő eredmények értékelésével a következő megállapításokat tettük:

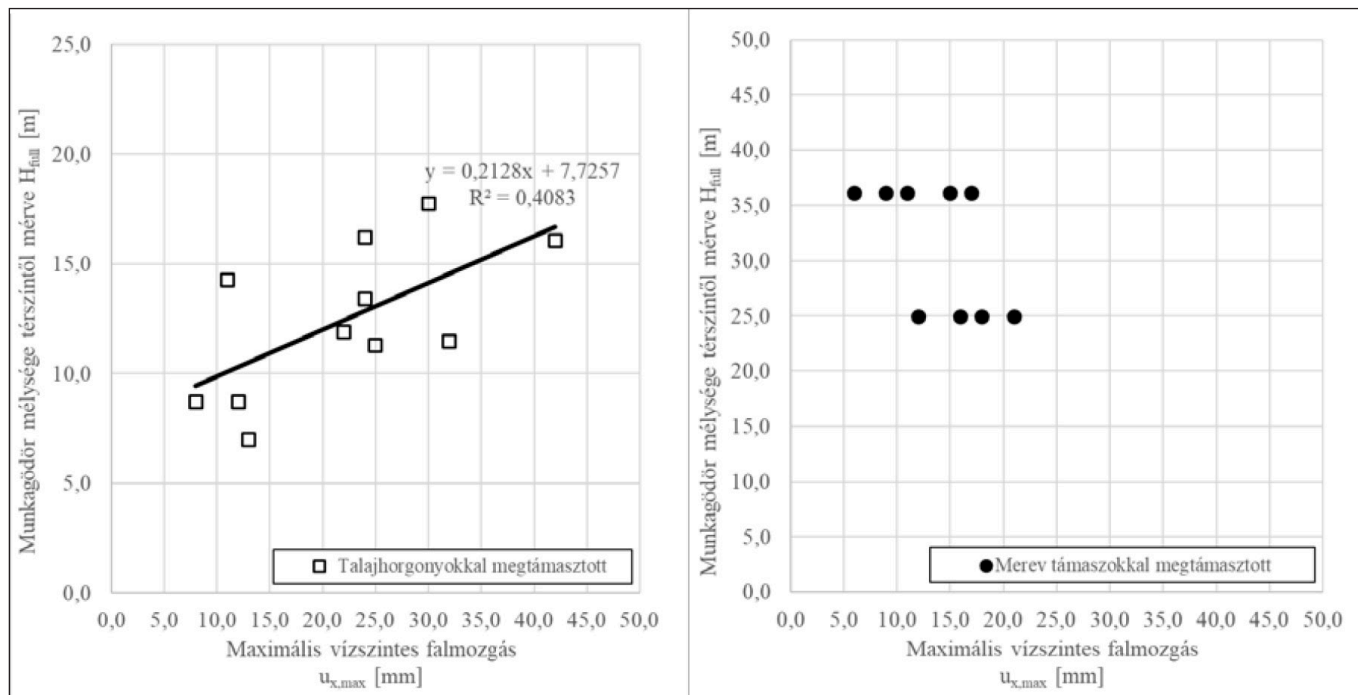
- A nemzetközi szakirodalmi tapasztalatok szerint a munkagödörök mentén bekövetkező felszínsüllyedések mértékét, a geotechnikai viszonyok mellett, elsősorban a megtámasztás típusa és a munkagödör mélysége határozza meg. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a megtámasztás módja a hazai tapasztalatok szerint is releváns és a munkagödör mélységére viszonyítva a talajhorgonyos megtámasztású résfalak mentén következnek be nagyobb mozgások. Nem áll rendelkezésre kellő számú, talajhorgonnyal megtámaszt-

7. ábra: Maximális vízszintes mozgások abszolút (bal) és munkagödör mélységgel normalizált értéke (jobb) a munkagödör mélység függvényében

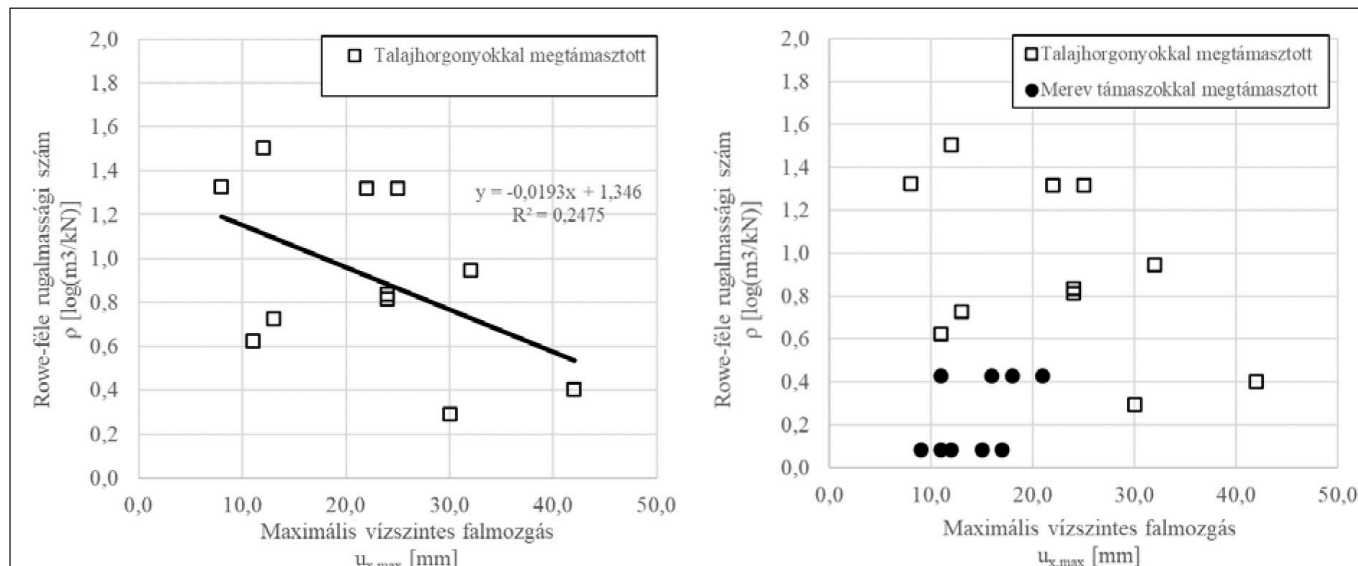




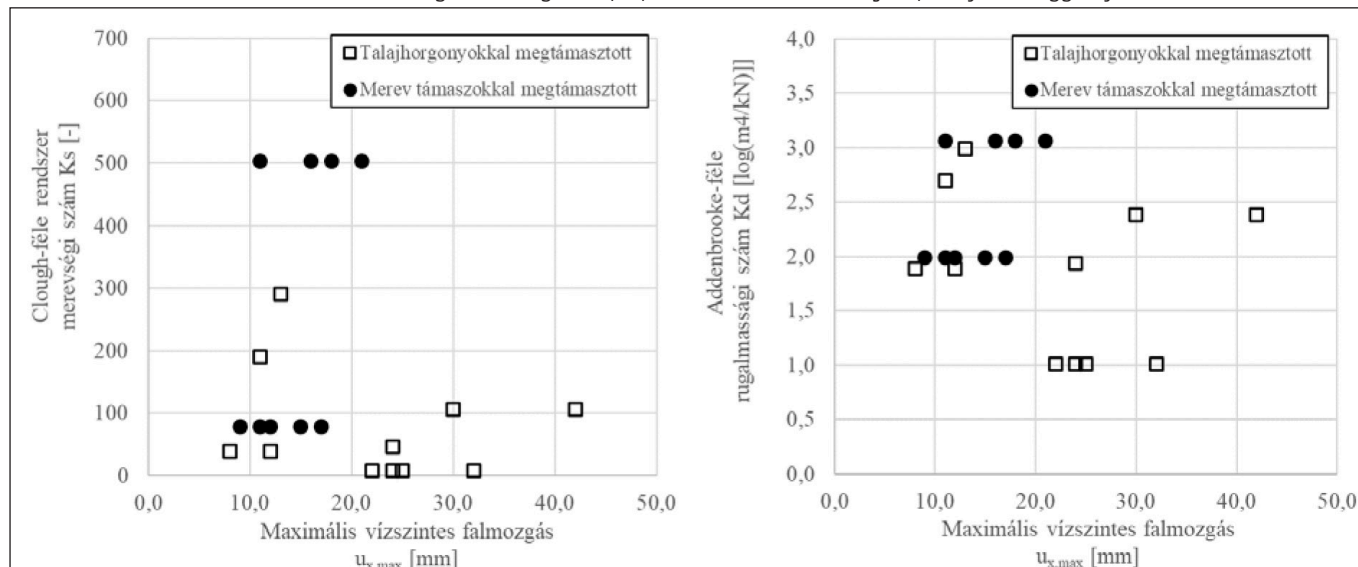
8. ábra: Talajhorgonyokkal támasztott munkagödörök maximális vízszintes falmozgása a munkagödörmélység függvényében



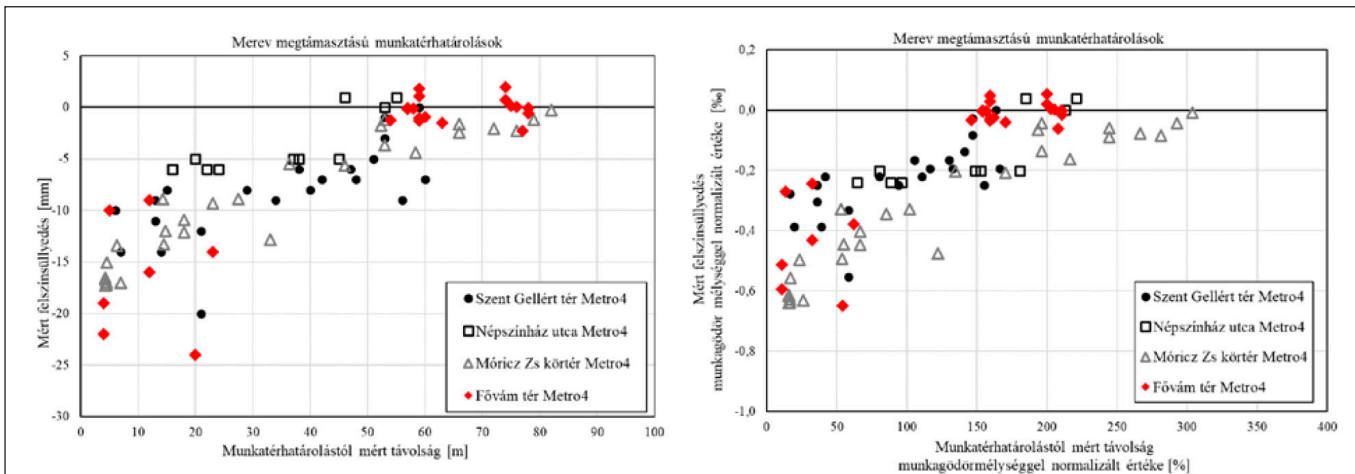
9. ábra: Munkatérhatároló falak vízszintes mozgása a Rowe-féle arányszám függvényében



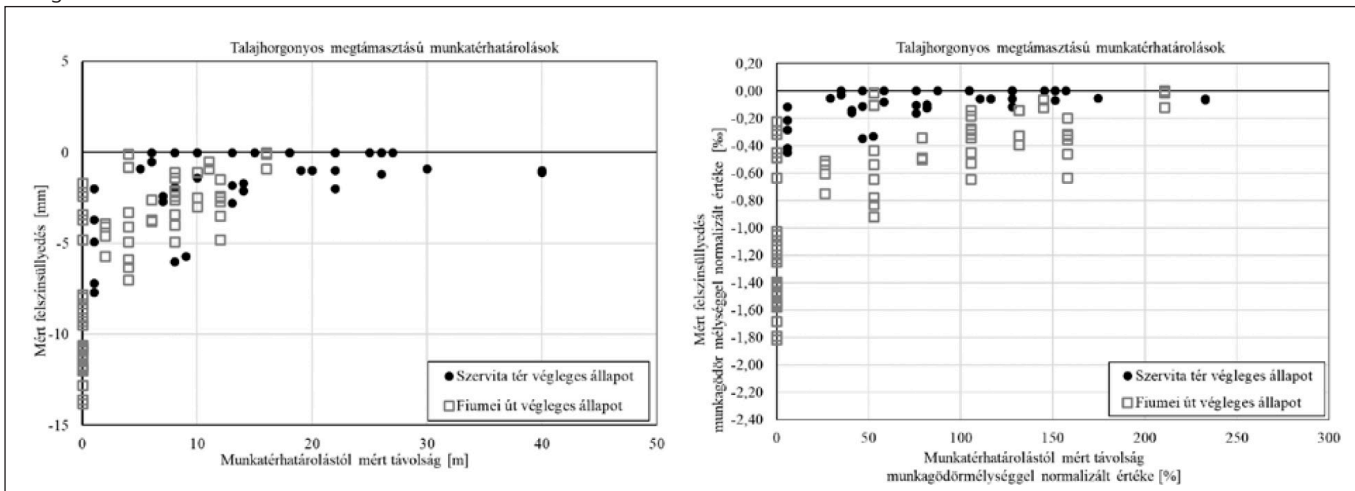
10. ábra: Munkatérhatároló fal vízszintes mozgása a Clough-féle (bal) és az Addenbrooke-féle (jobb) arányszám függvényében



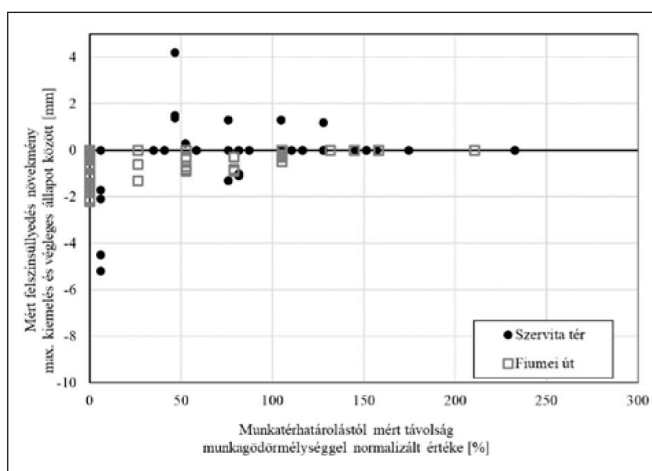
**11. ábra:** Munkagödör mentén bekövetkezett felszínsüllyedések a munkatérhatárolástól mért távolság függvényében – merev megtámasztású gödörök



**12. ábra:** Munkagödör mentén bekövetkezett felszínsüllyedések a munkatérhatárolástól mért távolság függvényében – talajhorgonyos megtámasztású gödörök



**13. ábra:** Talajhorgonnyal megtámasztott munkagödörök mentén bekövetkezett felszínsüllyedések a maximális földkiemelés állapotát követően



tott munkagödör eredményosora, hogy mélységtől való függéssel kapcsolatosan megállapításokat tehesünk.

- A 11. ábrán szereplő két diagram alapján, a merev megtámasztású munkatérhatárolások mentén mért felszínsüllyedésekről megállapítható, hogy:
  - o a mért maximális felszínsüllyedések 10-25 milliméter közöttiek, mely a munkagödör mélységének 0,3-0,7 %-e,
  - o a legnagyobb süllyedések közvetlenül a munkatérhatároló fal mellett következtek be,
  - o a süllyedési horpa szélessége 50-80 méter közötti, mely

intervallum a munkagödör mélységének 150-250, szélsőséges esetben 300 %-a.

- A 12. ábrán szereplő diagramok alapján, a talajhorgonyos megtámasztású munkatérhatárolások mentén mért felszínsüllyedésekről megállapítható, hogy:
  - o a mért maximális felszínsüllyedések 0-15 milliméter közöttiek, mely a munkagödör mélységének 0,0-1,8 %-e,
  - o a legnagyobb süllyedések közvetlenül a munkatérhatároló fal mellett következtek be, mely vélhetően elsősorban annak tudható be, hogy a réselés, valamint a felső horgonysor oldását követő konzolos bemozdulás viszonylag nagy mozgásokat eredményezhet,
  - o a süllyedési horpa szélessége 15-25 méter közötti, mely intervallum a munkagödör mélységének 150-200 %-a.
- A 13. ábrán a két talajhorgonyos megtámasztású munkatérhatárolás mentén, a maximális földkiemelés állapotában és a horgonyok feloldását követő végállapotban mérhető felszínsüllyedések különbségét ábrázoltuk. Az eredményosor alapján megállapítható, hogy a horgonyok feloldását követően, a mérési pontatlanságot meghaladó mozgások csak a fal közvetlen környezetében voltak mérhetőek, de ott akár ~5 milliméter is bekövetkezhet. Ezen többlettmozgások forrása vélhetően az, hogy a horgonyok feloldását követően a résfal támaszfödém feletti része konzolos behajlást szenvedhet, mely relatív nagy elmozdulásokkal járhat.

## 6. KONKLÚZIÓK

Mély munkatérhatárolások koncepcionális tervezése és részletes méretezése során is szükséges lehet összehasonlító mozgásmérési tapasztalatok figyelembevételére, mivel az alakváltozások korlátozása a tervezést vezérlő kritérium lehet, viszont a rendelkezésre álló és ipari körülmények között használható modellezési eljárások pontossága és megbízhatósága, természetüknél fogva korlátozott. Bízunk benne, hogy a felépített adatbázis és a mozgásmérési eredmények értékelése praktikus segítséget jelenthetnek a jövőben Budapesten, hasonló talajkörnyezetben megvalósítandó mély munkaterek tervezéséhez és kivitelezéséhez, valamint a környező, kölcsönható építmények várható viselkedésének értékeléséhez.

A 4. és 5. fejezetben ismertetett mozgásmérési tapasztalatokkal kapcsolatos legfontosabb megállapításaink:

- A talajhorgonyokkal megtámasztott résfalak vízszintes falmozgásai a munkagödörök mélységével arányosan növekednek, de jellemzően nem haladják meg a munkagödör mélység 3%-ét. Támaszfödemes vagy csótámaszos, merevebb megtámasztás esetén a vízszintes falmozgások alacsonyabbak, jellemzően a gödörmélység 1%-e alatt maradnak. A nemzetközi szakirodalmak a munkagödör mélység 2-3%-ét nem meghaladó vízszintes mozgásokról számoltak be.
- A felszínüllyedések talajhorgonyokkal történő megtámasztás esetén a munkagödörmélység 2%-e alattiak, míg merev megtámasztású munkaterek mentén ennél alacsonyabb, a munkagödör mélység 1%-ét el nem érő mozgásokat mérünk, míg a feldolgozott szakirodalmak jellemzően 2-3% alatti maximális felszínüllyedésekről számoltak be.
- A felszínüllyedések kiterjedése a munkatér mentén a mélység legfeljebb háromszorosára tehető, de a geodéziai mérési pontatlanságot nem meghaladó felszínüllyedések jellemzően a gödörmélység kétszeresén belül lejátszódnak, illeszkedve a munkagödörmélység 2-2,5-szöröséről értekező nemzetközi szakirodalmakkal.
- A szakirodalmakban megjelent Rowe-, Clough- és Addenbrooke-féle tényezők és a faldeformációk maximális értéke között pontos összefüggést nem sikerült felállítani, de elképzelhető, hogy az adatbázis bővítésével, a Rowe-féle tényező és a mozgások között felállítható egy olyan összefüggés, mellyel a falmozgások a munkatérhatároló fal merevségi viszonyai alapján pontosabban becsülhetővé válnak.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk minden közreműködő kollégának az egyes projektek mozgásmérési eredményosorainak, tervrajzainak, talajvizsgálati jelentéseinek és egyéb műszaki dokumentumainak rendelkezésünkre bocsátásáért. Köszönjük továbbá Dezső Zsigmond és Dr. Szendefy János lektor uraknak, hogy értékes javaslataikkal, meglátásaikkal segítették a cikk véglegesítését.

## 8. HIVATKOZÁSOK

Addenbrooke, T. I. (1994) A flexibility number for the displacement controlled design of multi propped retaining walls” *Ground Engineering* 27 (7), pp. 41.45.

- Cording, E. J., Long, J. L., Son, M., Laefer D., Ghahreman B. (2010) “Assessment of excavation induced building damage” Proceedings of Earth Retention Conference 2010. Egyesült Államok, pp. 101-120.
- Clough, G. W., Smith, E. M., Sweeney, B. P. (1989) “Movement control of excavations support systems by iterative design” Proceedings of Congress on Foundation Engineering – Current principles and Practices, Egyesült Államok.
- Clough, G. W., O'Rourke, T. D. (1990) “Construction induced movements of insitu walls” Design and Performance of Earth retaining structures. Geotechnical Special Publication No.25. Egyesült Államok. pp.439-470.
- Deli Á., Kaltenbacher T., Havas P. (2009) „A monitoring szerepe a mély munkagödörök készítésénél”. Deep Excavations and Retaining Structures, ISSMGE Hungarian National Committee, Budapest.
- Kempfert, H. G., Raithel, M. (1998) „Schäden an tiefen, rückverankerten Baugruben durch Verformungen des Systems Bodenblock-Verankerung. Schadensfälle in der geotechnik.“, Beiträge zum 13. Christian Veder Kolloquium, Beobachtungsmethode in der Geotechnik. Graz, Ausztria.
- Katzenbach, R., Moormann, Ch. (1999) „Anwendung der Beobachtungsmethode auf die Erstellung tiefer Hochhausbaugruben neben scherer Bebauung.“, Beiträge zum 14. Christian Veder Kolloquium, Beobachtungsmethode in der Geotechnik. Graz, Ausztria.
- Moormann, Ch., Katzenbach, R. (2000) „Entwurfsoptimierung von tiefen, wasserdichten Baugruben bei anisotropen Baugrund- und Grundwasserverhältnissen.“ Baugrundtagung 2000 Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Verlag Glückauf, Essen, Németország.
- Moormann, C. (2004) „Analysis of Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Soft Soil Based on a New Worldwide Database” Soils and Foundation 44(1), pp. 87-98. <https://doi.org/10.3208/sandf.44.87>
- Szepesházi A., Móczár B., Csapody G. (2016), „Budapesti mély munkatérhatárolás 2D és 3D numerikus back-analizise”, Vasbetonépítés: A FIB Magyar Tagozat lapja, pp. 34-41.
- Szepesházi A., Móczár B. (2019), „Numerical back-analysis of a monitored deep excavation in Budapest considering time dependency of wall deformations”, Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Reykjavik, Iceland, Paper 136, 8p. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0136>
- Szepesházi R. (2007) „Mély munkagödörök mentén bekövetkező mozgások”, PhD kutatászeminárium, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Mikoviny Sámuel Doktori Iskola, 56 p.
- Tomlinson, M. J. (2001) „Foundation design and construction” Pearson Education, Harlow, Egyesült Királyság.

**Dr. Móczár Balázs** (1971) okl. építőmérnök, okl. igazságügyi szakmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Geotechnika és Mérnökgeológiai Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: talaj és szerkezet kölcsönhatása, sík- és mélyalapozások, mély munkagödörök. Az MMK Geotechnikai Tagozat elnökségi tagja. Az MMK Geotechnikai Tagozat Szakértői Testület tagja. Az ISSMGE és a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja.

**Szepesházi Attila** (1988) okl. építőmérnök, a HBM Soletanche Bachy műszaki csoportvezetője, a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék PhD hallgatója. Fő érdeklődési területei: geotechnikai végeselemes modellezés, talaj és szerkezet kölcsönhatása, speciális mélyépítési technológiák. Az ISSMGE és a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja. Az MMK Geotechnikai tagozati munkatérhatárolásokról szóló továbbképzések előadója. Az Alapozási Vállalkozók Szövetségének műszaki bizottságának tagja.

### Deep excavation works in Budapest - Evaluation of deformation monitoring results

**Dr. Balázs Móczár - Attila Szepesházi**

Database of monitoring results of deep excavation walls and adjacent structures has been built summarizing experiences of excavation works in Budapest in the framework of our ongoing PhD research project. As an introduction of present article deformation prediction methods of deep excavations and synthesis of related international literature are summarized. The database of measured deformations of 9 deep excavations with rigid (slabs and/or steel struts) or flexible, anchor supported diaphragm walls are presented. Finally, the tendencies of the wall deformations and surface settlements in relation with the excavation depth and the type of support system are summarized leading to the conclusions of the research.

**Keywords:** deep excavations, anchored diaphragm wall, metro station, diaphragm wall deformations, surface settlements