

Budavár Várgarázs szerkezettervezési és mérnökgeológiai kérdései

Petik Csaba

Petik és Társai Kft, petikkft@t-online.hu

Török Ákos, Kleb Béla, Görög Péter

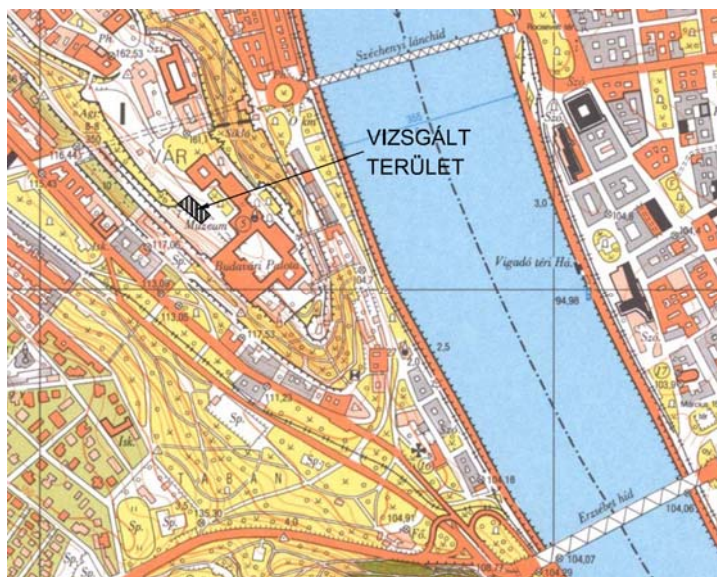
BME, Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék, torokakos@mail.bme.hu, kleb@t-online.hu, gorog.peter@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: A Budai várban épülő mélygarázs tervezéséhez szükséges mérnökgeológiai vizsgálatokat és a munkagödör lehatárolását és szerkezettervezését összefoglalóan ismerteti a cikk. A mélygarázs közetkörnyezete változó mértékben tagolt eocén budai márga. A fúrásos kutatással nyert magminták laboratóriumi vizsgálatával és a laboratóriumi mérési eredmények közettestre való átszámításával a tervezéshez szükséges mérnökgeológiai adatokat kaptuk meg. Ezeket az adatokat, mint input paramétereket vettük figyelembe a hátrahorgonyzott cölöpfalás munkagödör határolásának tervezésénél. A cölöpfal és horgonyok igénybevételeit, valamint a közetkörnyezet és a fal stabilitását PLAXIS végelelemes programmal modelleztük, valamint a Czap-féle résfal méretező programmal is kiszámoltuk.

Kulcsszavak: cölöpfal, mélygarázs, budai márga, végelelemes modellezés, Plaxis

1 BEVEZETÉS

A Budai Várhegy nyugati oldalában a Palota út felett, az Országos Széchényi Könyvtár előtti téren készül egy 5 szintes mélygarázs, melynek feladata a Várba érkező gépkocsik parkolásának biztosítása (1. ábra). A garázs megépítéséhez szükséges a hegy felőli oldalon a munkagödör megtámasztása. A munkagödör oldala közvetlenül a meglévő támfalak (Nyugati várfal, Támpilléres várfal) lábánál fut.



1. ábra. A Budavár Várgarázs elhelyezkedése a Várhegy DNY-i oldalán

A munkagödör határolás kivitelezőjének (HBM Kft) megbízásából el kellett készítenünk a terület talajmechanikai, mérnökgeológiai feltárását, és ennek ismeretében a cölöpfal kiviteli terveit. A helyszíni feltáró fúrásokat, a statikai számításokat, valamint a kiviteli terveket a Petik és Társai Kft, míg a közetkörnyezet vizsgálatát, értékelését, és a geológiai szakvéleményt a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéke készítette.

2 MÓDSZERTAN

A tervezéshez szükséges mérnökgeológiai adatokat a helyszínen létesített négy magfúrás anyagának vizsgálatából kaptuk meg. A fúrások rétegsorának leírása alapján a közet előfordulásokat mintacsoportokra bontva meghatároztuk az egyes közettípusok laboratóriumi közetfizikai paramétereit. Tömegösszetételi vizsgálatok a sűrűségi, tömörségi és víztartalmi tulajdonságok meghatározására az MSZ EN 1936:2000 számú szabvány előírását vettük figyelembe. Szilárdsági és alakváltozási vizsgálatok közül az egyirányú nyomószilárdság meghatározását az MSZ EN 1926:2000 a „A nyomószilárdság meghatározása” című szabvány szerint hossz- és keresztirányú alakváltozás méréssel kiegészített vizsgálatot végeztük el. A húzószilárdsági vizsgálatokat a korábban érvényes MSZ 18285/2:1989 számú „Közvetett húzóvizsgálat” című szabvány szerint, az ún. „Brazil-vizsgálattal” végeztük. A triaxiális vizsgálatokhoz névleges $\varnothing$ 5 cm-es átmérőjű próbatestek kellettek, amelyeket szintén a magdarab hossz tengelye irányába végzett befúrással állítottunk elő. A rugalmassági modulust és az ún. látszólagos belső súrlódási szöget (φ) szoftverrel számítottuk ki. Mivel a budai márga összeálló közet és nem talaj, így a törési határfeltétel nem mindig adható meg egyértelműen, de a tervezéshez szükséges input paraméterként a kohéziót és belső súrlódási szöget kiszámítottuk. A talajmintákat víznyomásos triaxiális cellával, míg a közetmintákat olajnyomásos triaxiális cellában öt különböző nagyságú oldalnyomás ($\sigma_1 = \sigma_2$) az ún. I. terhelési esetben (felterhelés) végeztük el. A talajnak tekintett közetváltozatok esetében a terhelési sebesség 0,2 mm/perc volt.

A budai márga összlet közettestjének jellemzésére a teljes magkihozatalúnak tekintett fúrásokból tagoltsági jellemzőket határoztunk meg, a nemzetközi közetmechanikai gyakorlatban használt RQD értéket adjuk meg.

A tervezéshez szükséges statikai számításokat, a cölöpfal és horgonyok igénybevételeit, valamint a közetkörnyezet és a fal stabilitását PLAXIS végeeselemes programmal számoltunk. Összehasonlításként a cölöpfal és a horgonyok igénybevételeit a „hagyományos” Czap-féle résfal méretező programmal is kiszámoltuk.

3 FÖLDTANI VISZONYOK

A Várhegy vizsgált térségéből a felszín közelében ismert legidősebb képződményt, a felső eo-cént, a Budai Márga Formáció közei képviselik. A formáció alsó tagja bryozoákban gazdag, ez az ún. "bryozás márga", majd erre egy vastag mészmárga a tipikus "budai márga" települ. Az erre települő oligocén agyagos képződmények csak a Várhegy É-ÉK-i részén találhatók meg, csak ott jelentkezik az édesvízi mészkő alatt (Krolap et al. 1976, Hajnal 2003).

A hosszú szárazulati és lepusztulási időszak után a pleisztocénben indult meg a következő üledékképződés, amelyet teraszok, mészsap, tavi agyag, valamint a Várhegyen sapkaként megjelenő forrásvízi mészkő jellemez. Erre lokálisan lösz települhetett illetve talajos zóna alakult ki rajta (Horusitzky 1937, 1939). A legfelső réteget a Várhegy területén majdnem mindenhol az antropogén feltöltés képezi.

A fúrásokkal feltárt legfontosabb képződmények:

- feltöltés,
- áthalmozott lejtőtörmelék,
- mészhomok és édesvízi mészkő,
- mállott sárgás színű budai márga (2. ábra),
- kemény cementált többségében szürke budai márga (3. ábra).

A feltöltés és az áthalmozott lejtőtörmelék alatt vékony, lencsés megjelenésű, mészhomok réteget harántoltak a fúrások. A mészhomok mellett áthalmozottnak tekinthető édesvízi mészkő

törmelék is megjelent. A márga felső zónája erősen mállott, agyag-dús, heterogén. A mállott márga alatt megjelenő mészmárga sem egységes, több változatát is megismertük a fúrásszelvények alapján (4. ábra). A sárga kemény mészmárga mellett sárga lemezes, levelesen széteső agyagmárga betelepülés jelenik meg három fúrásban is (lásd 2. ábra). A sárgás színű cementált mészmárga és a szürke színű cementált mészmárga önmagában igen hasonló (lásd 3. ábra), a különbség az, hogy a sárgás színű változatba vékony mállott agyagmárga rétegek települnek, amelyek jelentősen lecsökkentik a kőzettest fizikai paramétereit.



2. ábra. Sárga levelesen széteső mészmárga (3F)



3. ábra. Sárgásszürke és szürke kemény, cementált mészmárga (2F)

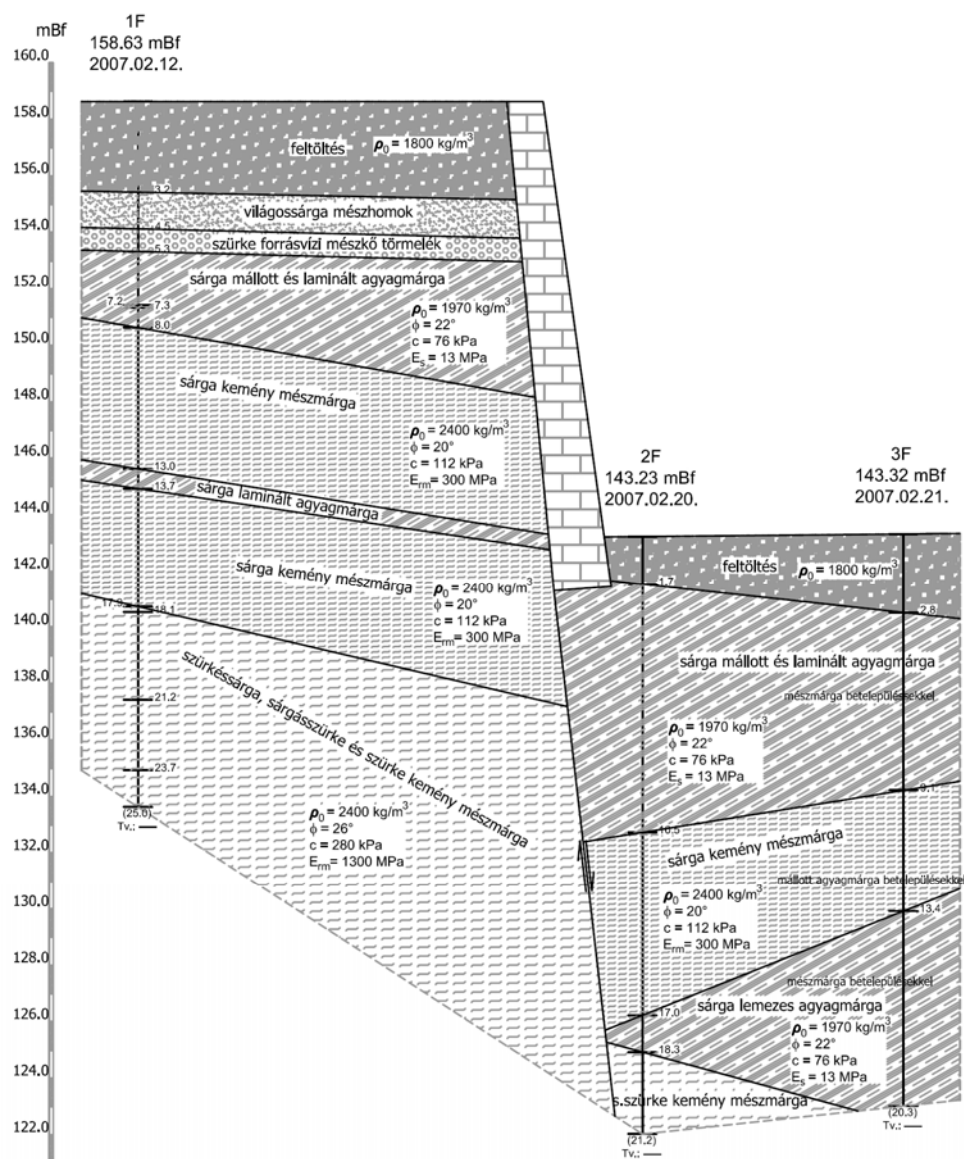


4. ábra. Mállott agyagmárga, sárga mállott mészmárga és szürke üde mészmárga a 2F jelű fúrás rétegsorában

A fúrásokból kereszt- és hossz-szelvények készültek, amelyek a statikai számítás geometriai alapját képezték (5. ábra).

A rétegszelvények és a korábbi szakirodalmi adatok (Horusitzky 1939, Wein 1977) alapján a márga rétegek kedvezőtlenül, általában 14°-18°-os DNY-i dőléssel települnek. A meglévő támfal mellett egy törési zónát kell feltételeznünk, amelynek lefutása ÉNy-DK-i (lásd 5. ábra). Az elvetési magasságát és a zóna pontos helyét a jelen adatok alapján megállapítani nem lehet, de figyelemreméltó, hogy a Várhegy platón létesített fúrás és a támfal melletti fúrások rétegsora közötti különbség legalább 10-m-es elvetést feltételez.

A réteglapok mentén szivárgó vizek megjelenésére lehetett számolni, és a munkagödör kialakítását követően, kis mértékű időszakos vízszivárgás volt észlelhető.



5. ábra. Keresztirányú (K-Ny) szelvény a Várhegy platón és a mélygarázs területén létesített fúrásokon át

4 TALAJMECHANIKAI ÉS KÖZETFIZIKAI ÉRTÉKELÉS

A fúrásokban feltárt agyagmárga felső mállott zónája minden esetben agyagszerű, így vizsgálata és értékelését talajmechanikai módszerekkel kell elvégezni. A feltárt fúrásszelvényekben a mállott agyagmárga és a mészhomokos, néhol mészszipos sok helyen forrásvízi és márgatörmelék-tartalmazó áthalmozott lejtőtörmelék jelenik meg nagyobb tömegben, mint talajösszlet. A labormérések alapján az alábbi tervezési paramétereket kaptuk (1. táblázat).

1. táblázat. A statikai számításnál figyelembe vett talajfizikai paraméterek

Megnevezés	ρ_0 [kg/m ³]	φ [fok]	c [kPa]	E_s [MPa]	k [m/s]
mállott agyagmárga	1970	22	76	13	10^{-8}
áthalmozott lejtőtörmelék	1800	25	10	15	10^{-6}

A mészmárga-minták légszáraz sűrűsége átlagosan 2382 kg/m³-nek adódott. Az egyirányú nyomószilárdságok átlagértéke 31 MPa volt, amelyhez nagyon eltérő szélső értékek tartoztak (13 – 53 MPa). A rugalmassági modulus átlagértéke légszáraz állapotban 5,7 GPa, de ez esetben is jellemző a nagy szórás: 3,1 GPa. A triaxiális vizsgálatok szerint az ép mészmárga közettömb-jének belső súrlódási szöge: $\varphi = 52^\circ$, a kohéziója pedig: $c = 6,5$ MPa.

A közzetest szilárdságát a közzetmechanikában leginkább elterjedt Hoek-Brown törési feltétel (Hoek és Brown, 1980, Hoek 1994) alapján számítottuk a laborvizsgálati eredmények és a GSI érték (Marinos és Hoek 2000) figyelembe vételével. A mélyebben fekvő, kevésbé töredezett közzetest esetén $GSI = 40-50$, az erősen feltöredezett közzetest esetén $GSI = 20-30$ értéket alkalmaztunk. A tervezéshez felhasználható paramétereket a közzetestek állapotát és tagoltságát is figyelembe véve két eltérő közzetváltozatra is meghatároztuk, figyelembe véve a fúrásokkal feltárt márga típusokat (2. táblázat).

2. táblázat. A mészmárga közzetesetek nyírószilárdsági jellemzői

Megnevezés	ρ_0 [kg/m ³]	φ [fok]	c [kPa]	E_m [MPa]	ν [-]
feltöredezett mészmárga mállott agyagmárga betelepülésekkel	2400	20	112	300	0,35
tagolt mészmárga	2400	25	10	15	0,35

5 MUNKATÉR HATÁROLÁS MÓDJA

5.1 A technológia kiválasztása

Egy munkatér határolására többféle technológia is rendelkezésre áll. Városi beépítési környezetben, meglévő épületek mellett, vagy ahol függőleges oldalfal kialakítása szükséges ott legál-talánosabban résfal készül. Emellett gyakori az acél szádfal, a cölöpfal, illetve a jet-grouting is. Öt pinceszint esetén az állékonyság biztosítása statikailag csak résfallyal, vagy cölöpfallyal biztosítható. Az adott területen a kemény közzetkörnyezet miatt a résfalias technológia nem alkalmazható, mivel a hagyományos réselőgépek nem képesek az ilyen keménységű talaj markolására. Ebből adódóan a választott mód a cölöpfal lett. Tekintettel arra, hogy összefüggő talajvíz – a munkagödör fenékszintjéig – a területen nem található, így vízzáró határolásra sem volt szükség, ezért a cölöpfalat hézagossal terveztük. Ezt lehetővé tette az összeálló megtá-masztott közzetömb is, mely a cölöpök közti hézagokban nem képes beomlani, kiperegni. A 80 cm átmérőjű cölöpök 20 cm-es hézagokkal készültek.

5.2 A cölöpözési technológia

Az egyes cölöpök folyamatos spirál technológiával (CFA, vagy SOB) készültek. A cölöp fúrása – nevéből adódóan – folyamatos spirál fúrószárral történik, mely belül üreges. A tervezett alapozási sík elérése után a fúrószárat forgatás nélkül felhúzzák, miközben a belső üregen keresztül – a rácsatlakoztatott betonszivattyú segítségével – folyamatosan nyomás alatt tartva kibetonozzák. Így a cölöp körüli földtömeg folyamatosan megtámasztást kap (6. ábra). Az elkészült friss beton cölöptestbe vibrálással juttatják be az előre összeszerelt armatúrát.



6. ábra. Cölöpözés a helyszínen

5.3 A cölöpfal kialakítása

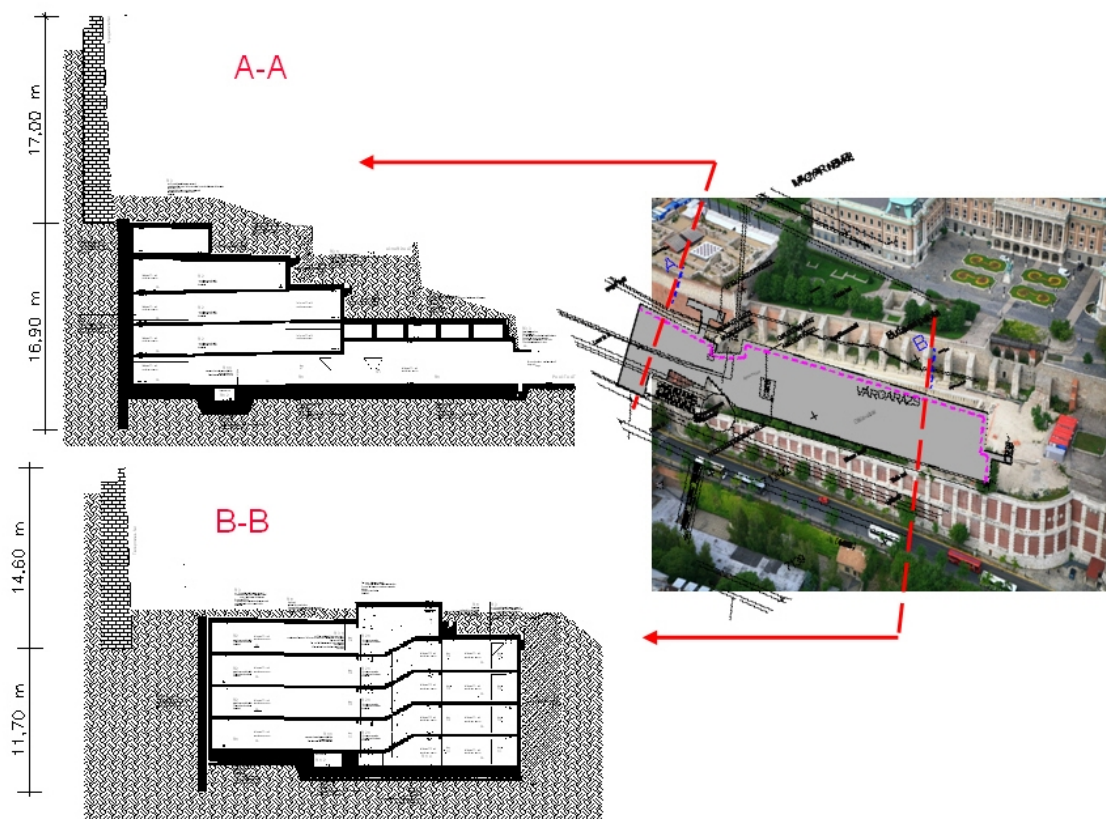
Az egyes különálló cölöpök statikai együttdolgozását a felső síkon végigfutó vasbeton fejgerenda, valamint a különböző szinteken készülő vasbeton mellgerendák biztosítják. Ezzel a módszerrel mind a függőleges, mind a vízszintes erőátadás biztosítható, így folyamatos falként lehet figyelembe venni. A megtámasztandó magasság miatt a cölöpfalat több szinten is hátra kell horgonyozni a mögöttes közzetömeghez. Az ideiglenes talajhorgonyokkal ily módon hátrafeszített cölöpfal biztonsággal megtartja a munkagödör oldalfala mögötti talaj- és közzetömeget, valamint biztosítja a cölöpök fölötti meglévő támfalak állékonyságát. Az egyes talajhorgonyok a cölöpök közeiben készülnek előre meghatározott szinteken. A talajhorgonyokat a cölöpfal előtt végigfutó vízszintes vasbeton mellgerenda fogja össze.

6 GEOMETRIAI KIALAKÍTÁS

A tervezett cölöpfal mentén két jellemző metszetet lehet felvenni. Az A-A metszet a Nyugati várfal melletti, ahol a cölöpfal közvetlenül a meglévő fal tövében fut kb. 60 méter hosszon. Itt a cölöpfal felső síkja és a meglévő támfal mögötti terepszint között 12,6-16,6 méter magasságkülönbség van, a tervezett kiemelés pedig 12,8-15,5 méter. Így a teljes kiemelés esetén a magasságkülönbség a munkagödör alja és a támfal mögötti terepszint között 28,1-29,4 méter lesz. A

B-B metszet a Támpilléres várfal előtt húzódik kb. 100 méter hosszon. Itt a cölöpfal a támpillérek előtt fut a várfaltól távolabb, valamint a teljes magasságkülönbség is kisebb: 22,5 méter (7.ábra).

A cölöpök a terepszint változásait is figyelembe véve 12,85 m - 23,60 m hosszakkal készültek. A horgonysorok száma a megtámasztandó földtömeg függvényében változik. A Támpilléres várfal előtt 2 sor készül, míg a Nyugati várfalnál, a legmagasabb kiemelésnél 5 sor.



7. ábra. A tervezett cölöpfal metszetei

7 STATIKAI SZÁMÍTÁSOK

A cölöpfal és horgonyok igénybevételeit, valamint a közetkörnyezet és a fal stabilitását PLAXIS végeselemes programmal számoltunk. Ezen kívül a cölöpfal és a horgonyok igénybevételeit a „hagyományos” Czap-féle résfal méretező programmal is kiszámoltuk. A szerkezet vonatkozásában a két módszer közel hasonló eredményeket adott, a tönkremenetel módját azonban csak a végeselemes programmal lehetett vizsgálni. A kétféle módon végzett számítás eredményeit 3. és 4. táblázatban foglaltuk össze.

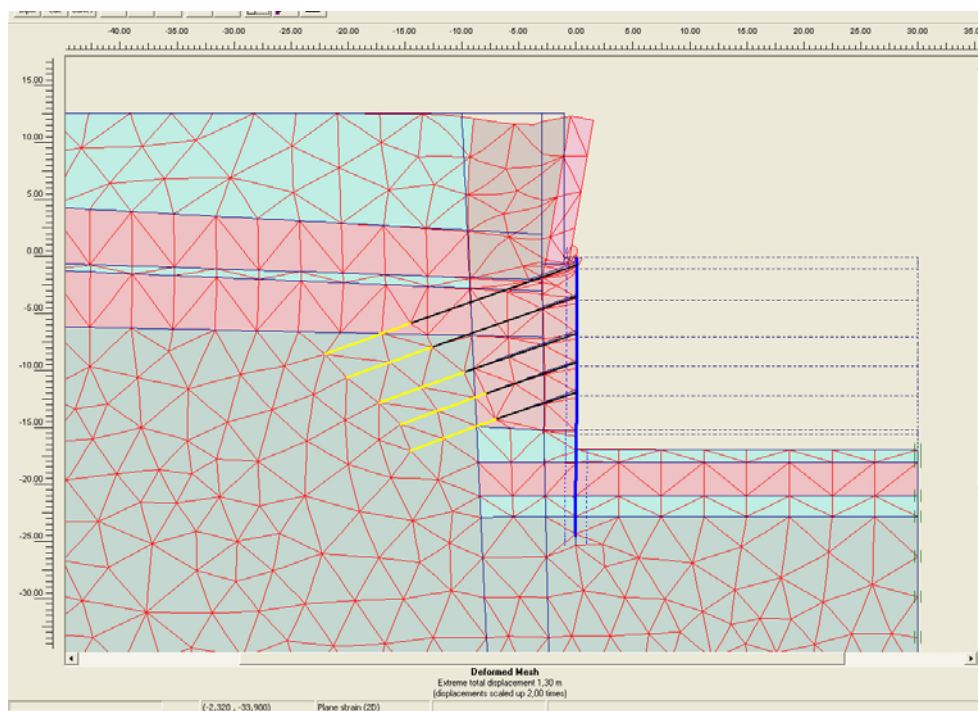
3. táblázat. Statikai számítások eredménye; támbordás támfal előtti hézagos cölöpfal 2 sorban kihorgonyozva

	Max nyomaték [kNm/m]		20°-os horgonyirányú erők [kN]	
	Külső oldal	Belső oldal	H1	H2
Czap program	234	263	716	744
Plaxis program	275	300	798	784

4. táblázat. Statikai számítások eredménye; nyugati várfal támfal előtti hézagos cölöpfal 5 sorban kihorgonyozva

	Max nyomaték [kNm/m]		20°-os horgonyirányú erők [kN]				
	Külső oldal	Belső oldal	H6	H7	H8	H9	H10
Plaxis program	360	432	646	792	792	770	848

A mérnökgeológiai vizsgálatok alapján felvettük a tervezett cölöpfal és a meglévő támfal környezetének modelljét (8. ábra).



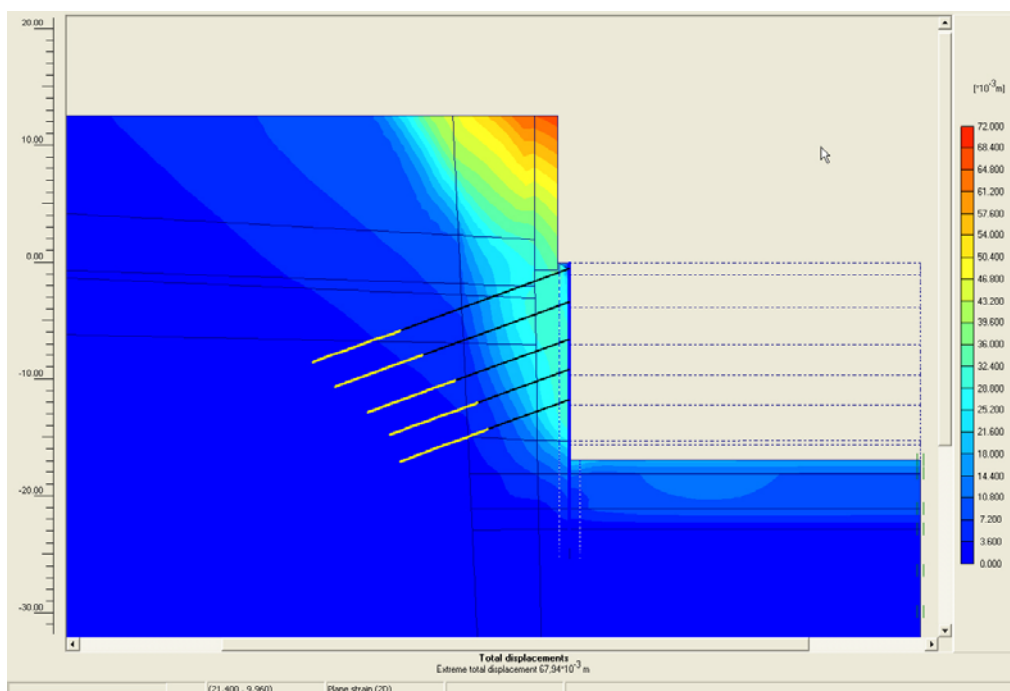
8. ábra. A tervezett cölöpfal és a meglévő támfal környezetének modellje

A végeelemes programban modellezni lehetett a feltárt vetőt, valamint a támfal mögötti és a cölöpfal előtti igen eltérő rétegződést. A számítás menete gyakorlatilag követte a majdani kivitelezés menetét, azaz lépésenként vizsgáltuk az egyes horgonyzási szintekig történő földkiemelés, valamint az egyes horgonyok beépítését és feszítését. A cölöpfalra ható igénybevételek alapján a 20 cm közzel fűrt, 80 cm átmérőjű, C20-as betonból készült cölöpökbe 10-11 db $\phi 25$ -ös betonacél került betervezésre.

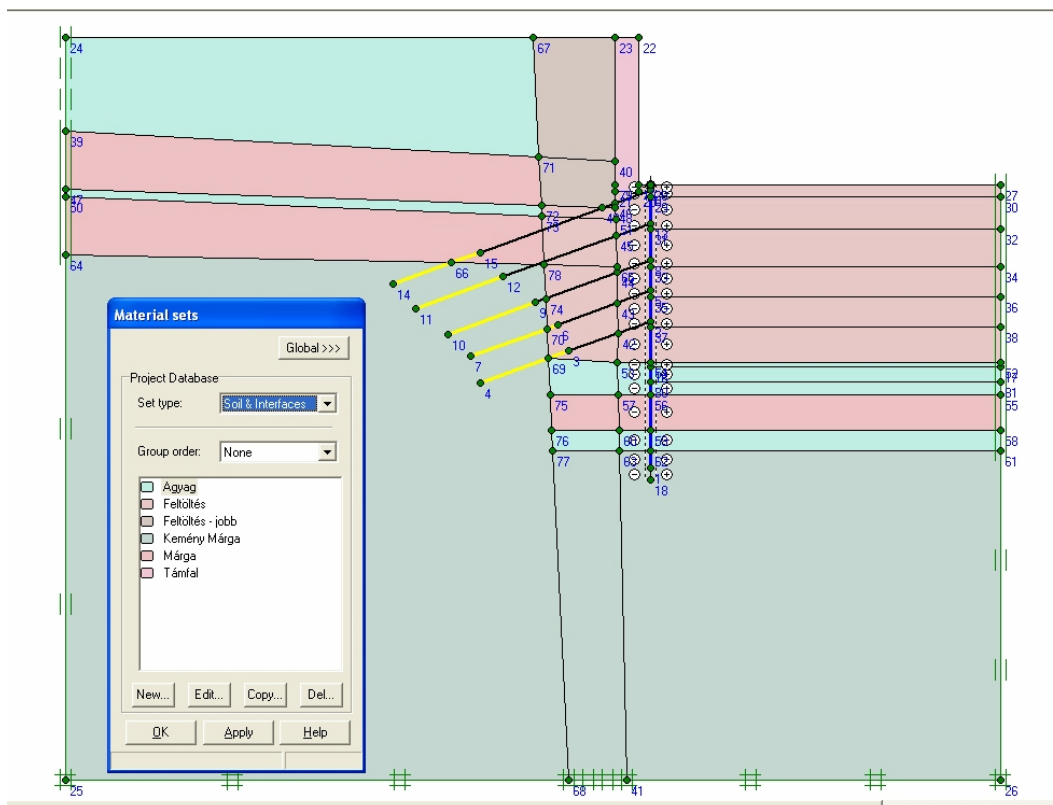
A teljes kiemeléskor – a kritikus 5 horgonysoros szakaszon – a globális biztonsága a rendszernek $\sim 1,9$ -szeres. Az elmozdulásokat a 9. ábra szemlélteti.

Fentiek alapján a globális tönkremenetel úgy jön létre, hogy a kihorgonyozott cölöpfal bemozdul, ezáltal a mögöttes földtömeg a meglévő támfal lábánál fellazul, így a támfal munkagödör felé megbillen, majd bedől (lásd 10. ábra). Tehát nem a cölöpfal, illetve az azt tartó horgonyok mennek tönkre, hanem a megtámasztott, meglévő támfal mozdul be annyira, hogy a stabilitását veszti. Ez azonban csak a teljes rendszer globális vizsgálatával derülhetett ki. Amennyiben a támfalat és a mögötte lévő földtömeget csak felszíni teherként kezeltük volna, (mint azt a „hagyományos” Czap programban tettük) akkor a tönkremenetel módja, és a rendszer globális biztonsága nem derült volna ki. A számítógépes modellezés alapján tehát a kivitelezés során nem csak a cölöpfal mozgásait, hanem elsősorban a meglévő támfal felső élének mozgásait kell mérni.

A végeelemes vizsgálat alapján a tönkremenetel a 10. ábra szerinti geometriával jön létre:



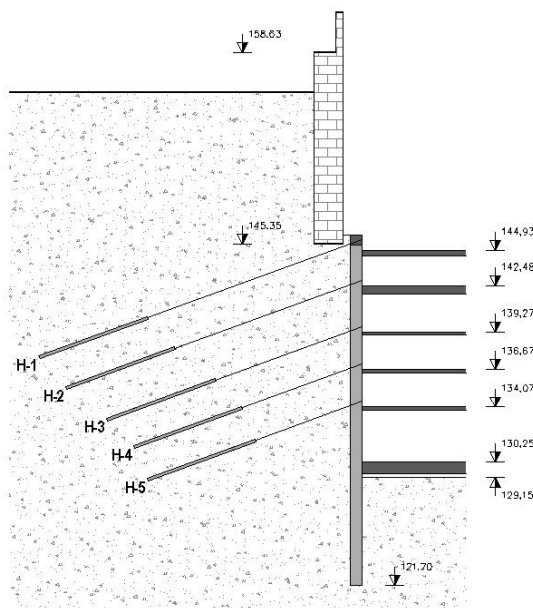
9. ábra. A Plaxisal számított elmozdulások az 5 horgonysoros szakaszon a márga teljes kiemelésekor



10. ábra. A Plaxisal számított tönkremenetel az 5 horgonysoros szakaszon

8 KIVITELEZÉS

A kivitelezés a munkaszint kialakításával, durva földmunkával kezdődött. Ezt megelőzően megtörténtek a régészeti feltárások valamint a közműkiváltások. A cölöpök elkészítése után készül a vasbeton fejgerenda. A nyugati várfalnál a fejgerendán keresztül is készültek horgonyok, így itt, az előre elhelyezett átvezető nyílásokon keresztül fűrták meg az ideiglenes talajhorgonyokat. Ezt követően – illetve a Támbordás várfal előtt közvetlenül a fejgerenda elkészülte után – a következő horgonyzási szintig kiemelték a kőzetet. A horgonyok a cölöpök közeiben készültek, és a cölöpfal előtt végigfutó vasbeton mellgerendába kötnek be. Az egyes horgonyzási szintek igazodnak a végleges szerkezetek földémszintjeihez (11. ábra). Így a cölöpfal erőjátéka az ideiglenes és a végleges állapotban megegyező lesz.



11. ábra. A tervezett horgonyzási szintek és a végleges földémszintek geometriája

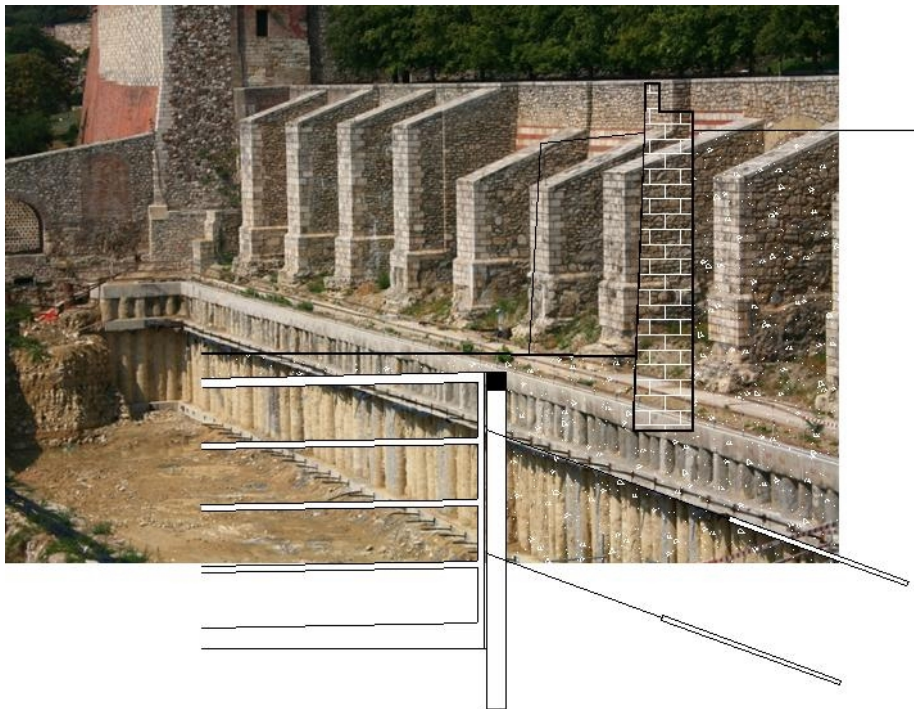
A szakaszos földkiemeléssel és horgonyzással végül elérték a munkagödör végső fenékszintjét, ahonnan elkezdődhet az épület szerkezetének építése alulról felfelé. Az alaplemez elkészülte után történik a falak majd a legalsó földem kivitelezése. Amikor a földem betonja megszilárdul és a szerkezet többi azon része is elkészül amelyekre szükség van a vízszintes erők felvételéhez, akkor történik a horgonyok tehermentesítése, elvágása, valamint a mellgerenda elbontása. A szerkezet építését így módon követi a legfelső szintig a horgonyok és a mellgerenda megszüntetése (12. ábra). A cikk írásakor a munkagödör kiemelése és a horgonyzási munkák nagy része elkészült. A munkagödör északi végén még a változó dőlésű és tagoltságú, eltérő cementációt mutató mészmárga és agyagmárga váltakozásából álló rétegek látszottak (13. ábra).

9 ÖSSZEFOGLALÁS

A fúrások a mélygarázs területének változatos rétegsorát tárta fel. A fő kőzet a budai márga amely szélsőségesen változó kőzettani és kőzetfizikai paraméterekkel rendelkezik. A támfal mellett a fúrasszelvények, és a korábbi szakirodalmi adatok alapján egy töréses zónát kell feltételeznünk a támfal környékén, amelynek lefutása ÉNy-DK-i.

A márgát két eltérő tulajdonságokkal rendelkező kőzettől osztályba soroltuk tagoltsági jellemzői és laborvizsgálataink alapján. A mészmárga felső sokszor agyagos zónájára GSI = 25 körüli értéket állapítottunk meg, míg a mélyebb tagolt zóna GSI = 45 körüli értékkel jellemezhető.

A statikai számítások (Plaxis) alapján a fő tönkremenetel úgy következne be, hogy a kihorgonyzott cölöpfal bemozdul, ezáltal a mögöttes földtömeg a meglévő támfal lábánál fellazul, így a támfal munkagödör felé megbillen, majd bedől. Ennek megakadályozását a tervezésnél úgy vettük figyelembe, hogy a horgonyok a cölöpök közeiben készülnek, és a cölöpfal előtt végigfutó vasbeton mellgerendába kötnek be. Minden egyes horgonyzási szint igazodik a végleges szerkezetek földémszintjeihez és számításaink szerint a szerkezet biztonsági tényezője megfelelő.



12. ábra. A tervezett földémszintek és a horgonyok geometriája a kiemelt munkagödör fényképére rávetítve



13. ábra. A munkagödör É-i végén a cölöpsor és a horgonyok mellett még szálban álló cementált mészmárga és agyagmárga váltakozásából álló rétegsor látható

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönettel tartoznak Dr. Hajnal Gézának a vízföldtani viszonyokkal kapcsolatos adatokért, Dr. Vásárhelyi Balázsnak a GSI adatok értelmezésében nyújtott segítségéért, valamint a laborvizsgálatokért Emszt Gyulának és Árpás Endre Lászlónak.

HIVATKOZÁSOK

- Hajnal G. 2003. *A budai Várhegy hidrogeológiája*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 129p.
- Hoek, E., Brown, E.T. 1980. *Underground excavations in rock*. London, Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2, 2, 4-16.
- Horusitzky H. 1937. A budai Várhegy csuszamlási okairól új megvilágításban. *Földtan. Köz-
löny* 67, (4-6), 101-109.
- Horusitzky H. 1939. Budapest Duna-jobbparti részének (Budának) hidrogeológiája. *Hidrologiai
Közöny*, 18 (1-6), 404p.
- Krolopp E. et al. 1976. A budai Várhegy negyedkori képződményei. *Földtan. Közöny* 106, (3),
193-228.
- Marinos P., Hoek E. 2000. Estimating the geotechnical properties of heterogenous rock masses
such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 85-92
- Wein Gy. 1977. *A Budai-hegység tektonikája*. Földtani Intézet Alkalmi Kiadványa, Budapest,
76p