

A Várbazár mögötti mélygarázs területének mérnökgeológiai vizsgálata, munkatérhatárolás számítása

Engineering geology of the underground garage behind the Várbazár, analyses of the supporting structure

Czinder Balázs

BME, Építőmérnöki Kar, czinder.b@gmail.com

Görög Péter

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, gorog.peter@mail.bme.hu

Török Ákos

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, torokakos@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A Várbazár területén épülő mélygarázs térségének mérnökgeológiai jellemzéséhez a területen mélyült fúrások által harántolt kőzetváltozatok kőzetzfizikai paramétereinek megállapítása volt szükséges. A lemélyített 2 fúrás az eocén korú budai márga kőzetváltozatait tárta fel, amelyek laboratóriumi vizsgálata alapján meghatároztuk a kőzettípusok sűrűségét, rugalmassági modulusát, Poisson-tényezőjét, egyirányú nyomószilárdságát, húzószilárdságát és pontszilárdságát légszáraz és vízzel telített állapotban. Ezek kiértékelése alapján meghatározhatóak voltak a számítógépes modell bemenő paraméterei. A munkagödör egy, a vizsgált fúrásokon keresztülhaladó szelvényének vizsgálata a RocScience programcsalád Phase2 programjával történt. A megtámasztó szerkezet a kezdeti tervek szerint egy hézagos cölöpfal, melynek cölöpátmérője 1,0 méter, tengelytávolsága 1,4 méter. Ennek a szerkezetnek a modellvizsgálati eredményei alapján az így megépült falazat biztonsága csökkenthető. A cölöpfal méreteinek optimalizálása érdekében a továbbiakban többféle szerkezeti méret hatását is elemeztük. A modellek felépítése során egy esetleges elárasztás hatása is megvizsgáltuk. A laborvizsgálatok eredményeivel kiegészítve pontosíthatók a területre jellemző kőzetzfizikai paraméterek. A modellvizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy a munkagödör állékonysága biztosított.

Kulcsszavak: Várbazár, mélygarázs, mérnökgeológia, kőzetzfizikai paraméterek, állékonyság vizsgálat.

ABSTRACT: The aim of the present study was to analyse the supporting structure of the underground garage behind the Várbazár. For the stability analyses rock mechanical parameters of core samples of an Eocene marl (Buda Marl) derived from two boreholes were studied under laboratory conditions. The measured parameters included bulk density, the modulus of elasticity, the Poisson-ratio, the uniaxial compressive strength and the tensile strength of the different lithotypes. Both air-dry and water saturated conditions were analysed. The laboratory tests results served as input parameters for the numerical models. To calculate the stability of the excavation Phase2 program was used. A cross-section was selected that contains two borehole data. First the actual structure a pile wall was analysed. The diameter of the piles was 1.0 meter, the distance between the piles was 1.4 meter. According to the calculations the safety factor was higher than it was necessary, thus the size and the gaps between the piles were reduced. The effect of accidental water inundation of the pit was also analysed. This database provides valuable new information on the rock mechanical parameters and the geological structure of the area. This information could be used in further construction projects at the Várbazár area, too. The results of the numerical models have proved that the walls of the garage are stable with the designed supporting elements.

Keywords: Várbazár, engineering geology, rock mechanical parameters, safety analyses.

1 BEVEZETÉS

A nagyvárosok egyre inkább szembeűnő problémája a személygépjármű forgalom növekedése, kezelhetetlensége. A növekedés okozta zsúfoltság nemcsak az utakon jelentkezik, hanem problémát jelent a parkolóhelyek csekély száma is a belvárosokban. Itt általában csak mélygarázs építése kerülhet szóba, mivel a felszínen egy ekkora létesítmény többnyire már nem fér el.

A forgalomnövekedés kellemetlen következményei Budapestet sem kímélték meg. A belvárosban hét közben gyakorlatilag lehetetlen parkolóhelyet találni. Ezt a problémát enyhíthetik az I. kerületben, a Várhegyen épülő mélygarázsok.

A Várhegy délkeleti oldalán, a Várbazár területére egy mélygarázs létesítését tervezték. A beruházás megkezdéséről 2011-ben határoztak, a 2012-ben kiírt közbeszerzési pályázatot a Középtülettervező Zrt. nyerte el. A létesítmény három szintes lesz 298 férőhellyel. A mélygarázs építése 2013-ban kezdődött és előreláthatólag 2014-ben fejeződik be. Az építkezés során a világörökség részét képező Várbazár épületeit is felújítják, így azok régóta tartó állag romlását is megállíthatják.

Jelen cikk témája a Várbazár mögötti mélygarázs területének mérnökgeológiai vizsgálata és a munkatér lehatárolás számítása. A terület kiértékeléséhez a korábbi vizsgálatok eredményeit és a szakirodalmat, valamint a laborvizsgálatokat (egyirányú nyomószilárdság, közvetett húzószilárdság és pontszilárdság vizsgálatokat) lehetett felhasználni. Ezek értelmezése után numerikus modellek is készültek, melyek célja a garázs munkagödrenek állékonyság vizsgálatán kívül a közelben lévő Budai Vár falmozgásainak megbecslése, valamint a munkagödört határoló cölöpfal méreteinek optimalizálása volt. A cikk több modellt és ezek kiértékelését is ismerteti.

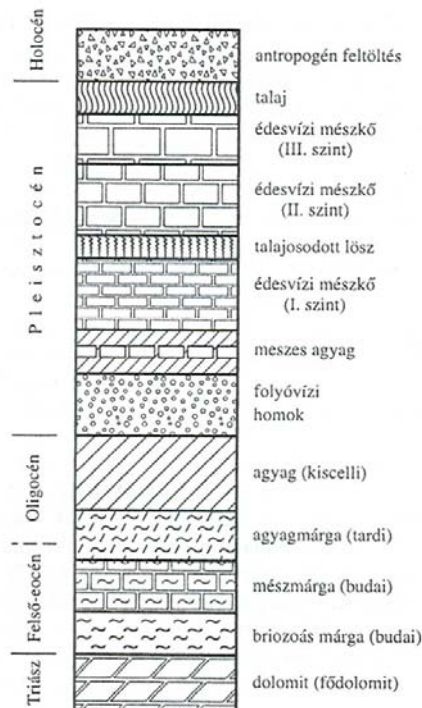
2 A TERÜLET ÁLTALÁNOS MÉRNÖKGEOLÓGIAI JELLEMZÉSE

2.1 A Várhegy keletkezése, jellemzése

A Várhegy Budán, a Duna partján, a Gellért-hegytől északra fekszik, részét képezi Budapest I. kerületének. A Budai-hegységhez tartozik, de egyik irányban sem függ össze annak más részeivel, önállóan emelkedik ki környezetéből. Kedvező földrajzi fekvése miatt már régóta lakott. Közkedvelt turisztikai célpont, amit vonzó természeti képének, valamint a rajta fekvő Budai Várnak köszönhet, ami 1987 óta az UNESCO Világörökség része. A hegy 2000 m hosszú (ebből 1500 m-t tesz ki a 120-450 m széles plató). Fennsíkja 405.000 m², lejtőinek területe 750.000 m² (Hajnal et al. 2012).

A hegy a pleisztocén korban alakult ki, ekkor meleg vizes forrásokból édesvízi mészkő vált ki, ami egy összefüggő platót alkotott. Az így kialakuló mészkő sapka védte meg a későbbiekben az alatta fekvő puhább rétegeket: az agyagos, márgás képződményeket, valamint a mélyebben fekvő kiscelli agyag és budai márga rétegeket (Török 2012). A mészkő réteg a Bécsi kapu tér környékén a legvastagabb, itt eléri a 14 m-es vastagságot, délnyugat felé vékonyodik. A sapkát a jégkorszakból visszamaradó lösz lepel fedi, amit mára az erózió teljesen felszabdalt (Schafarzik et al. 1964). A hegy a Mindel-végi szerkezeti mozgások révén emelkedett ki. A folyamat során három emelkedési fázis különíthető el: az első két emelkedés a középső-pleisztocén, a harmadik a középső pleisztocéntól napjainkig terjedő időszakban játszódott illetve játszódik még ma is le. Ezen folyamatok eredményeként kelet-nyugat irányban egy vető húzódik végig a hegyen, mely mentén a budai márga és a kiscelli agyag érintkezik (Hajnal et al. 2012).

A Várhegy déli végén 1938-ban feltáró fúrást végeztek, melynek mélysége 261 m volt. A vizsgálat alapján a Budai-hegységet alkotó felső-triász dolomit kőzet 238 m-es mélységben található. Fölötte fekszenek a felső-eocén kori bryozoás márga és a budai márga rétegek, melyek a Budai Márga Formációt alkotják (BME 2007). A formációra oligocén korban tardi illetve kiscelli agyag települt, majd erre az alsó-pleisztocénban folyóvízi homok rakódott. Ezt borítja pleisztocén kori mészkő sapka, majd a löszös, feltöltéses rétegek (Hajnal et al. 2012) (1. ábra).



1. ábra. A Várhegy rétegsora (*Stratigraphy of the Castle Hill*) (Hajnal et al. 2012)

2.2 A Várhegyet alkotó kőzetek

A budai márga a Budai-hegység egyik leggyakoribb kőzete, a felső-eocén korban keletkezett. A budai Várhegy, Krisztinaváros, Rózsadomb alapkőzete, körülöleli a Gellért-hegyet és a Sas-hegyet. A Budai-hegységben a felszín közelében fekszik. Ennek oka, hogy a fölötte lévő agyagrétegek puhábbak, mállásra hajlamosabbak, így az erózió áldozatává váltak (Pécsi 1959).

A budai márga átmenetet képez a törmelékes és a vegyi üledékes kőzetek közt (Görög 2008). Két fő alkotórésze a mész és az agyag. Ezek arányától függően beszélhetünk agyagmárgáról illetve mészmárgáról. Előbbi színe sötét, szinte fekete, míg a keményebb, ellenállóbb mészmárga fakó, világos színű. A mállott márga sárgás színű és agyagszerűen viselkedik.

A Budai Márga Formációban a kemény, meszesebb rétegek gyakran váltakoznak a puhább, agyagos rétegekkel. Néhol vékony, tufás padok (andezit tufa, riolit tufa), mészkő és homokkő betelepülések is megjelennek benne. A törési felületek közelében, a mállottabb zónákban limonitosodás figyelhető meg.

A Várhegy fedő takaróját alkotó édesvízi mészkő a pleisztocén korban keletkezett meleg- és langyos vizű források vizéből kiválva. A források hőmérsékletét 30-35°-ra becsülik. Vegyi üledékes kőzet, azonban néhol a korábbi források helyénél megkővesedett mohából álló részek figyelhetők meg. Színe a fehér és a világosszürke árnyalatok közt változik. A legtöbb helyen párhuzamos rétegződésű, de előfordulnak benne tömör, rétegmentes szakaszok is. Időtálló, szilárd kőzet, ugyanakkor jól faragható.

A mészkőösszlet két, jól elkülönülő részre osztható. Az északabbra eső területeken egységesebb a kőzet, míg délebben lencsés mészsizap és zöld agyagos betelepülések figyelhetők meg. Néhol aragonit (vesés-gumós és borsóköves változatok) is fellelhetők benne. A mészkősapka vastagsága 30 cm és 10 m között változik, az átlagos értéke 5 m körül van (Krolopp et al. 1976). Közvetlenül alatta egy barna talajos réteg található (Török 2003). A mészkő felett legtöbb helyen feltöltéses rétegek vannak, azonban néhol lösz is fellelhető (Schafarzik et al. 1964, Hajnal et al. 2012).

2.3 A mélygarázs területének mérnökgeológiája

A létesítendő mélygarázs területe a Várhegy dél-délkeleti oldalán található, a Várfal és a Várbazár épületsora között, tehát a Budai Vár előterében (2. ábra). A lejtő teraszosan rendezett füves, fás terület.

A várlejtőt aszfalt burkolatú járdák szelték ketté az építkezés megkezdése előtt. Az építési terület morfológiailag két részre osztható: a Várhegy lejtőjére (itt helyezkedik el a tervezett cölöpsor) és a hegy lábától a Dunáig terjedő, közel sík területre.



2. ábra. A Várbazár területe (*The location of the study area: Várbazár*) (www1)

A Várkert területe Magyarország szeizmikus zónatérképe alapján a 4. zónába tartozik. Eszerint 50 év alatt 10 %-os valószínűséggel a földrengésből adódó horizontális gyorsulás $a_{gR}=0,14 \cdot g$.

A területen kutatóödröket létesítettek az építkezés megkezdése előtt. Ezek és az itt készített fúrások eredménye szerint a Várhegy alapkőzete, a budai márga rétege általában 10-20 méteres mélységben jelentkezik. Felsőbb része agyagos márga, agyagmárga rétegekből épül fel. Mélyebb szintjein cementáltabb mészmárga jelenik meg. Az alapkőzet vetőkkel, törésekkel szabdalts.

A felszín közelében mesterséges feltöltés majd egy erősen erodált, mállott zóna található. A feltöltés vastagsága igen változó, 0,4m és 5,7 m közötti a kiterjedése. Anyaga épülettörmelékes, közettörmelékes agyag és iszap, tömörsége változó.

A terület ezek alapján az „A” altalaj osztályba sorolható. („A” altalaj osztály: Szilárd kőzet vagy kőzetszerűen viselkedő geológiai képződmény, amely felett legfeljebb 5 m gyengébb fedőréteg van.) A Várbazártól nem messze mélyítették le 1938-ban azt a fúrást, melynek eredményéről már többen is beszámoltak (Krolopp et al. 1976).

Csakúgy, mint a Várhegy többi részén, itt is találhatóak üregek, pincék. A Várkert Casino-nál 2003-ban készített fúrás esetében 98,8-96,3 m B.f. között találtak üreget (Szörényi 2003).

A fúrásokban a víz szintje 97,0-102,7 m B.f. között változott. Az építési terület a Dunától nem messze fekszik, ezért a felszín alatti víz járását a Duna határozza meg. A parton kavicssterasz nem található, de a vastag feltöltés rétegen keresztül a kapcsolat a Duna vizével biztosított. Szörényi (2003) szerint a mélygarázs rámpájának területére jellemző becsült minimális víz szintje 99 m B.f., a becsült maximális vízszint pedig 103 m B.f., erre azonban csak árvíz esetén kell számítani.

Mivel a tervezett mélygarázs építése során a munkagödör 6 m-nél mélyebb lesz, a létesítmény a 3. geotechnikai kategóriába (GC3) osztható be. Ennek értelmében alapos terepi és laboratóriumi vizsgálatokat szükséges végezni, amit részletes tervezésnek kell követnie.

3 KÖZETFIZIKAI VIZSGÁLATOK, KÖZETTEST OSZTÁLYOZÁSOK

3.1 A laboratóriumi vizsgálatok

Az építkezés megkezdése előtt 2013-ban két fúrást készítettek a mélygarázs területén. Ezeket laborvizsgálatok céljára a rendelkezésünkre bocsátották. A laboratóriumi vizsgálatokban közreműködött Balog Zsolt építőmérnök hallgató is.

A fűrásminták anyagait négy közettípusra osztottuk fel a vonatkozó szabványok értelmében (MSZ EN 12670:2001 – Természetes kőzetek megnevezése; MSZ EN 12407:2000 – Kőzettani vizsgálat):

1. mállott, sárgásbarna meszes agyag, agyagmárga;
2. sötétszürke, fekete agyagmárga;
3. középszürke, kissé rétegzett, foltos márga;
4. fakószürke, világosszürke mészmárga.

Vizsgálataink során légszáraz és vízzel telített próbatestekkel is foglalkoztunk. Telítés előtt a mintákat 2-3 napra szárítószekrénybe helyeztük. A telítés során több darab (esetenként akár a vizsgált minták fele) tönkrement vagy hajszálrepedések jelentek meg rajtuk (3. ábra). A vízben való áztatást két napig folytattuk folyamatos víztartalom mérés mellett és ezután végeztük el a szükséges méréseket. A korai vizsgálatokra azért volt szükség, mert féltő volt, hogy a még ép próbatestek is tönkremennek, és így nem tudjuk a szükséges mennyiségű vizsgálatot elkészíteni.



3. ábra. Telítés során szétesett próbatest (*Failure of the specimen caused by water saturation*)

A vizsgálatok során meghatároztuk a közettípusok tömegösszetéti jellemzőit, szilárdsági jellemzőit (egyirányú nyomószilárdság, közvetett húzószilárdság, pontszilárdság), valamint a Poisson-tényezőjét és a rugalmassági modulusát. Az elvégzett vizsgálatok számát és az alkalmazott szabványokat az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az elvégzett vizsgálatok típusa és a minták száma (*Number of test specimens and types of laboratory tests*)

	<i>Légszáraz minták száma (db)</i>	<i>Telített minták száma (db)</i>	<i>Alkalmazott szabvány, utasítás</i>
<i>Tömegösszetéti vizsgálatok</i>	67	23	MSZ EN 1936:2000 - Az anyagsűrűség, a testsűrűség, a nyílt porozitás és az összes porozitás meghatározása
<i>UH terj. vizsg.</i>	63	19	MSZ EN 14579:2005 - A hangterjedés sebességének meghatározása
<i>Egyirányú nyomószil. vizsg.</i>	49	10	MSZ EN 1926:2000 - A nyomószilárdság meghatározása
<i>Közvetett húzószil. vizsg.</i>	16	9	MSZ EN 18285/2:1989 - Közvetett húzóvizsgálat
<i>Pontszil. vizsg.</i>	51	-	ISRM 1985; Görög (2008)

Egyirányú nyomószilárdság vizsgálat céljára a szabványok 50 mm átmérőjű, 2:1 arányú hengeres próbatesteket írnak elő. A mért nyomószilárdság erre az arányra rendkívül érzékeny. A szabályos

alakú, de a fenti méreteknek meg nem felelő próbatesteken mért nyomószilárdságot lehetőségünk van átszámolni szabványos méretre vonatkozó nyomószilárdságra (Gálos és Vásárhelyi 2006):

$$\sigma_{c(2:1);50} = \frac{\sigma_c \cdot d^{0,18}}{1,78 + 0,485 \cdot \left(\frac{d}{h}\right)} \quad (1)$$

Az egyenletben szereplő tagok: σ_c a mért nyomószilárdság, d a próbatest átmérője mm-ben, h a próbatest magassága szintén mm-ben és $\sigma_{c(2:1);(50)}$ az 50 mm átmérőjű, 2:1 arányú próbatestre vonatkozó nyomószilárdság.

A terhelés során szabályos időközönként mértük a vízszintes és a függőleges elmozdulásokat. Az elmozdulások és a próbatest magasságának a hányadosaként kapjuk meg az alakváltozásokat. A felrajzolható feszültség-alakváltozás és axiális-laterális alakváltozás diagramok alapján meghatározható a minta rugalmassági modulusa és Poisson-tényezője.

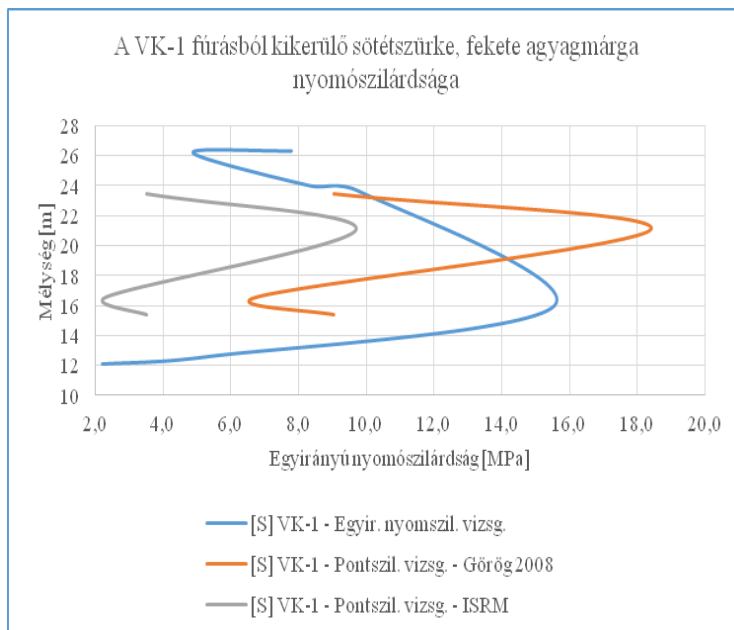
Fontos közetfizikai jellemző a kőzet húzószilárdsága is. Ezt a közvetett húzóvizsgálattal, vagy más néven Brazil-vizsgálattal határoztuk meg. Ekkor is henger alakú próbatesteken kell dolgozni, melyek magasság-átmérő arányának lehetőleg 1:1 közelében kell lennie. A mintát a palástja mentén terheljük. A próbatest húzószilárdsága (σ_t) egyenesen arányos a törőerővel (F_t) és fordítottan arányos az átmérő (d) és a magasság (h) szorzatával (Gálos és Vásárhelyi 2006):

$$\sigma_t = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F_t}{d \cdot h} \quad (2)$$

A nyomószilárdság becslésére pontszilárdság vizsgálatokat is készítettünk. Azt tapasztaltuk, hogy a hagyományos módon, azaz a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság (ISRM, 1985) által javasolt átszámítási eljárással kapott értékek rosszul közelítik az egyirányú nyomószilárdság vizsgálatok eredményeit. Ezzel szemben egy, a budai márgára meghatározott összefüggés (Görög 2008) jó közelítést ad a nyomószilárdságra:

$$\sigma_c = 25 \cdot I_{S(50)}^{0,7} \quad (3)$$

Az összefüggésben szereplő $I_{S(50)}$ tényező a korrigált pontszilárdság. A 4. ábrán összehasonlítottuk az egyirányú nyomószilárdságot (kék vonal), a Görög (2008) által javasolt módon a pontszilárdságból számított nyomószilárdsággal (szürke vonal) és az ISRM szerint számított nyomószilárdsággal (piros vonal).



4. ábra. A különböző módon meghatározott nyomószilárdságok meghatározása (*Compressive strength, determined by several methods*)

A 2. táblázat tartalmazza a vizsgálatok kiértékelése után kapott, légszáraz állapotban mért köztetfizikai paraméterek átlagértékeit a különböző köztettípusok esetében. A táblázatban szereplő, nem SI szerinti mértékegységek SI szerinti megfelelője: $1 \text{ km/s}=1000 \text{ m/s}$, $1 \text{ GPa}=10^9 \text{ (kg}\cdot\text{m/s}^2\text{)/m}^2$, $1 \text{ MPa}=10^6 \text{ (kg}\cdot\text{m/s}^2\text{)/m}^2$.

2. táblázat. A köztetfizikai paraméterek átlagértékei (*Mean values of the rock mechanical parameters*)

	<i>Mállott, sárgásbarna meszes agyag, agyagmárga</i>	<i>Sötétszürke, fekete agyagmárga</i>	<i>Fakószürke, világosszürke mészmárga</i>	<i>Középszürke, kissé rétegzett, foltos márga</i>
Testsűrűség ρ [kg/m ³]	2060	2349	2483	2553
UH terj. seb. [km/s]	0,14	1,65	3,09	2,85
Rug. modulus E [GPa]	0,05	0,74	3,58	2,50
Poisson-tényező v [-]	0,08	0,07	0,09	0,06
Egyir. nyomószil. $\sigma_{c(2-1);(50)}$ [MPa]	0,5	7,7	22,4	17,3
Húzószilárdság σ_t [MPa]	-	1,3	2,4	2,8

3.2 Kőzettest osztályozás

A kapott köztetfizikai paraméterek alapján elkészült az egyes rétegcsoportok kőzettestek szerinti besorolása, melynek során egy egyszerűsített rétegsort vettünk figyelembe. Minden réteg esetében 75 % felett volt a szakaszra leginkább jellemző kőzettípus jelenléte.

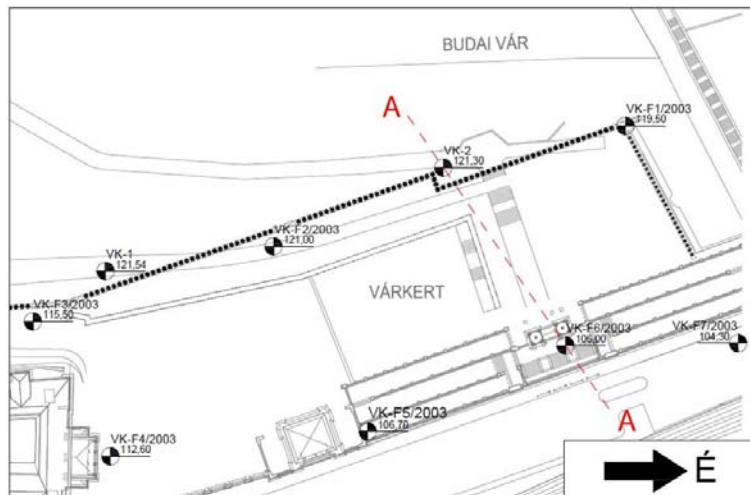
A tagoltság jellemzésére az RQD módszert lehetett alkalmazni. Az RQD érték 84 és 96 között változott, ennek megfelelően a rétegeket az „Ép” és a „Kissé töredezett” kategóriákba lehetett besorolni (Deere 1964). A kőzettest osztályozást ezután a Bieniawski (1973) által kifejlesztett RMR módszer szerint végeztük el. A módszer során figyelembe veendő bemenő adatok a kőzettest egyirányú nyomószilárdsága, az RQD tényező, a tagoltságok sűrűsége, a tagoltságok állapota, a réteg és talajvíz jelenléte és a tagoltságok iránya.

A kőzettest osztályozás során az RMR értékek 37 és 44 közé adódtak, a rétegeket így a „Gyenge” és a „Megfelelő” kategóriákba oszthattuk be. Mivel az érték minden esetben 23 fölé adódott, a Geológiai Szilárdsági Indexet (GSI) az RMR értékből származtathattuk (Gálos és Vásárhelyi 2006)

4 NUMERIKUS MODELLEZÉS

4.1 A modell felépítése

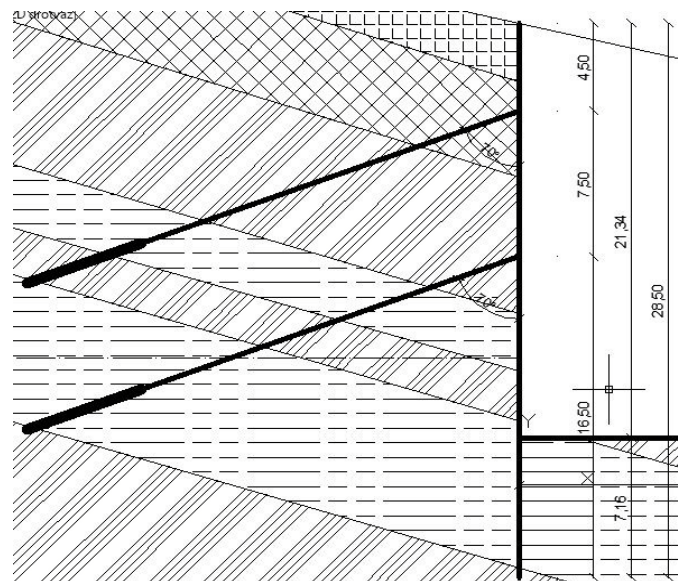
A végeselemes vizsgálatok céljára egy 2013-as (VK-1 jelű) és egy, a területen korábban fúrt, 2003-as fúrás (KV-F6/2003 jelű) keresztülménő szelvényt jelöltünk ki (5. ábra). A köztetfizikai paraméterek bemenő adataként a VK-2 fúrás magjából készített fúrásminták átlagos paramétereit tudtuk figyelembe venni. Gondot okozott, hogy vízzel telített állapotban csekély mennyiségű próbatest állt csak rendelkezésre, így a telített állapotú köztetfizikai paramétereket a szakirodalom alapján vettük fel.



5. ábra. A fúrások és a vizsgált 'A-A' szelvény (*The boreholes and the studied 'A-A' cross-section*)

A felső két réteg (feltöltés, mállott agyagos zóna) tulajdonságait talajmechanikai laboratóriumban határozták meg. A mért paraméterek a következők: testűrűség, kohézió és súrlódási szög. Ennek megfelelően ezekre a rétegekre Mohr-Coulomb anyagmodell volt alkalmazható, míg az alsóbb rétegeknél már a Hoek-Brown anyagmodell figyelembe vételére is lehetőség volt.

A megtámasztó szerkezet a kezdeti tervek szerint egy hézagos cölöpfal, melyben a cölöpök átmérője 1 m és a köztük lévő távolság 40 cm volt. A beton C30/37, a betonacél B500B anyagminőségű. A szerkezetet két sor ideiglenes horgonyzással is megtámasztják az építés ideje alatt, melyek egy 20 m hosszú horgonyszárból és egy 6 m hosszú, kiinjektált horgonyhagymából állnak, dőlésük 20°. A kábelek átmérője 32,5 mm, a horgonyhagymaé 300 mm. A feszítőkábel Fp 139/1770 jelű. (A szerkezet a későbbiek más, kisebb méretekkel épült meg, azonban a vizsgálat idejekor csak korábbi tervek álltak rendelkezésre.) A munkagödör a vizsgált szelvényben 21 m mély (6. ábra).



6. ábra. A megtámasztó szerkezet (*The supporting structure*)

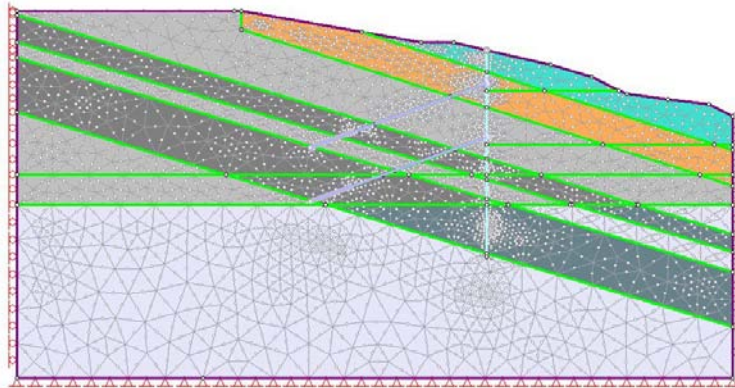
A Budai Vár fala a cölöpfaltól 34 m-re fekszik. A Várfalat, mint terhet modelleztük. Ennek a közelítésnek a létjogosultságát a későbbi vizsgálatok igazolták: a kialakuló csúszólapok jóval a Várfal előtt metszik a felszínt. A Várfal mögötti feltöltés szintén teherként lett figyelembe véve.

A Phase² program használata során lehetőségünk van építési fázisok alkalmazására. A mélygarázs építése során ezek az alábbiak:

1. Kiindulási alap felvétele, a rétegzettség megadása.
2. A Várfal terhének megadása.
3. A cölöpfal beépítése.

4. Földkiemelés az első szintig.
5. Első horgonysor beépítése.
6. Földkiemelés a második szintig.
7. Második horgonysor beépítése.
8. Teljes földkiemelés.
9. Horgonyok eltávolítása.
10. A vízszint maximálisra emelése.

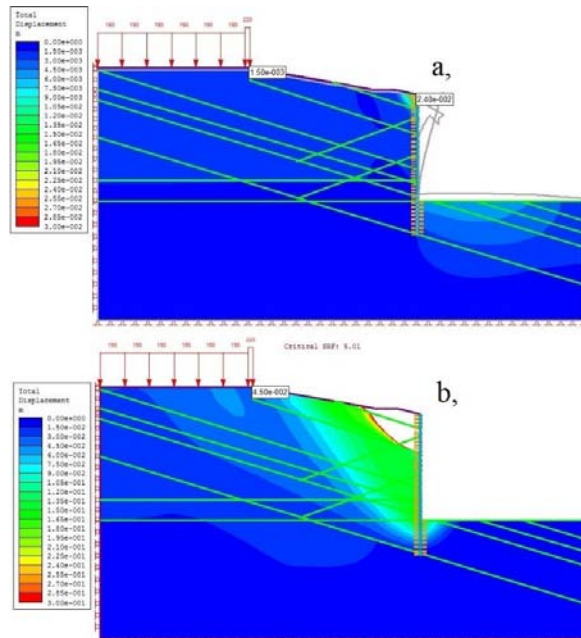
A 7. ábra a behálózott modellteret mutatja. A rétegek fentről lefelé haladva: feltöltés, mállott zóna, majd fakószürke mészmárga és középszürke márga rétegek váltakoznak.



7. ábra. A behálózott modellter (The model with the final elements)

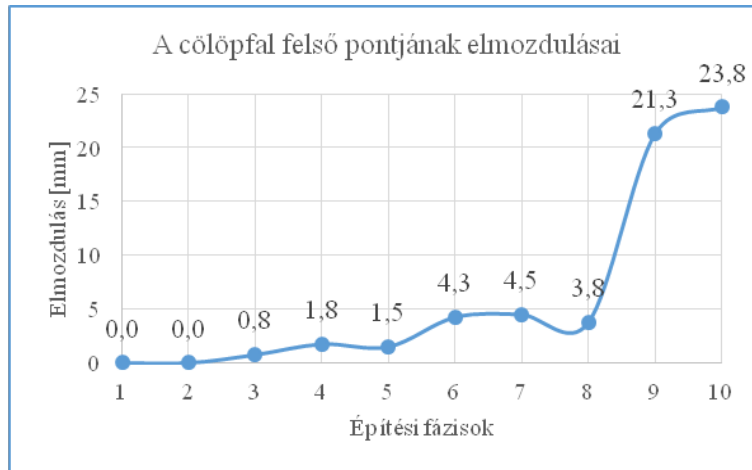
4.2 A megtámasztó szerkezet állékonyságának vizsgálata

Elsőként a szerkezet állékonyságát vizsgáltuk. A teljes elmozdulás ábrázolásával jól szemléltethető a csúszólap kialakulásának mechanizmusa. A 8.a ábrán az elmozdulások láthatóak a végállapotban, azaz a talajvíz maximálisra emelésekor. Ekkor a megtámasztott köztömegben jelentős elmozdulások nem történnek. A nyírószilárdsági paraméterek csökkentésével jutunk el a kritikus csúszólap kialakulásához (8.b ábra). A biztonság értéke 5,01.



8. ábra. A teljes elmozdulások ábrázolása (a: elmozdulások, b: csúszólap) (Total displacements, a: displacements, b: slide surface)

A cölöpfal legfelső pontjának elmozdulását is vizsgáltuk az építési fázisok során, ezek grafikus ábrázolását a 9. ábra tartalmazza. Végállapotban az elmozdulás 2,5 cm-nek adódott.

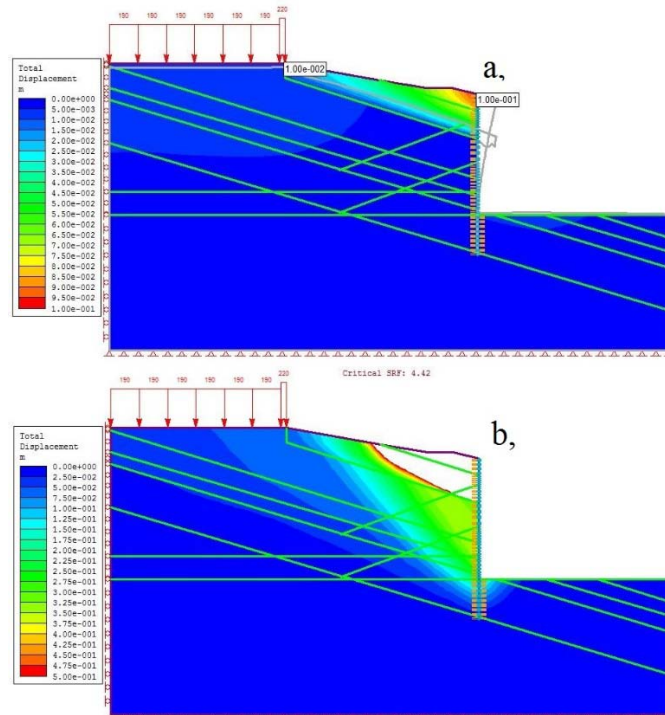


9. ábra. A cölöpfal legfelső pontjának elmozdulása (The displacement of the pilewall)

4.3 Elárasztott állapot vizsgálata

A laborvizsgálatok során meggyőződünk róla, hogy a márga tulajdonságai jelentősen megváltoznak, ha telített állapotban vizsgáljuk őket. Erre alapozva megvizsgáltuk a munkaterületet egy olyan állapotban, amikor valamilyen külső tényező miatt (pl. hirtelen, intenzív csapadék vagy egy közművezeték meghibásodása) a Várlejtő elázik és a kőzetek telítődnek. Ennek értelmében az utolsó építési fázisban minden réteget a vízzel telített állapotban meghatározott köztérfizikai paraméterével vettünk figyelembe.

A teljes elmozdulások ábrázolása esetén látható, hogy azok megnövekednek az elárasztás hatására. A gyengébb felső rétegek, a feltöltés és a mállott zóna tömb-szerűen kezd el mozogni, a cölöpfal legfelső pontjának az elmozdulása 10 cm (10.a ábra). Az elmozdulások a kritikus csúszólap kialakulásakor a 10. b ábrán látható módon alakulnak. A biztonság értéke 4,4.



10. ábra. A teljes elmozdulások elárasztás után (a: elmozdulások cölöpfal tetejénél, b: csúszólap) (Total displacements when the rock is water saturated, a: displacements at the top of the wall, b: slide surface)

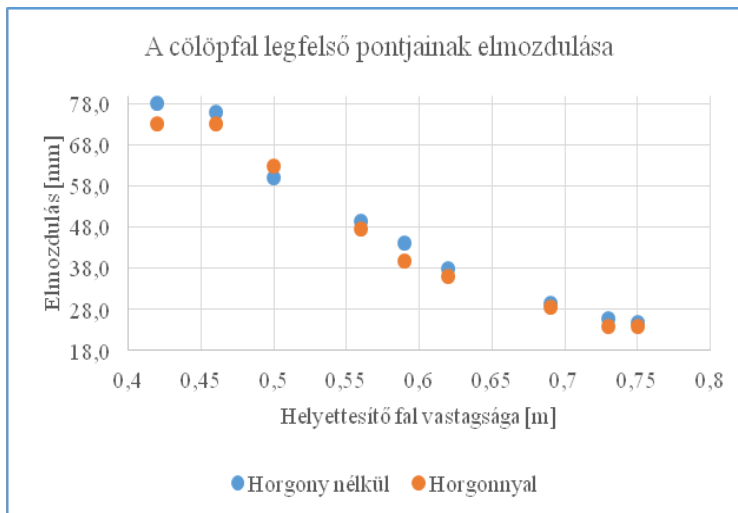
4.4 A cölöpfal méreteinek optimalizálása

A biztonság magas értéke felveti a kérdést, hogy a cölöpfal méretei optimalizálhatóak-e. Ezt további modellekkel vizsgáltuk, melyekben a cölöpök átmérőjét és tengelytávolságának méreteit fokozatosan csökkentettük. Az alkalmazott cölöpátmérőket, tengelytávolságokat és az így kapott biztonság értékeit (SRF) a 3. táblázat tartalmazza. A legkisebb szerkezet, amellyel az állékonyság még biztosított, a 60 cm átmérőjű, 1 m tengelytávolságú hézagos cölöpfal (vastaggal szedve a 3. táblázatban).

3. táblázat. Az optimalizálás során vizsgált méretek és eredmények (*The studied structures and results*)

	Átmérő	Tengelytávolság	Helyettesítő falvastagság	SRF	
	D [m]	t [m]	v [m]	horgony nélkül	horgonnyal
1.	1	1,4	0,75	5,03	5,01
2.	0,9	1	0,73	5,08	5,01
3.	0,9	1,2	0,69	2,4	5,15
4.	0,8	1	0,62	2,29	5,17
5.	0,8	1,2	0,59	2,19	5,2
6.	0,8	1,4	0,56	2,17	5,31
7.	0,6	0,6	0,5	2,09	5,49
8.	0,6	0,8	0,46	1,95	3,92
9.	0,6	1	0,42	1,59	1,49
10.	0,6	1,2	0,4	1,13	1,16
11.	0,6	1,4	0,38	1,3	1,19
12.	0,4	0,4	0,34	0,99	1,21

Megvizsgáltuk a cölöpfal legfelső pontjának az elmozdulásait a különböző szerkezeti méretek esetében, majd ezeket grafikonon ábrázoltuk (11. ábra). Látható, hogy a horgonyzás kismértékben befolyásolja a kapott értékeket.



11. ábra. A cölöpfal legfelső pontjának elmozdulása a különböző szerkezeti méretek esetében (*The displacement of the pilewall when the size of the supporting structure is reduced*)

5 KÖVETKEZTETÉSEK

Az általunk végzett laborvizsgálatok eredményeivel kiegészítve az eddig is rendelkezésünkre álló adatokat a közetfizikai paraméterekről és a terület földtani felépítéséről pontosabb információkat

kaphatunk. Ezek a jövőben a Várbazár környékén történő további vizsgálatokhoz megfelelő alapadatokat szolgáltathatnak.

A modellvizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a szerkezet állékonysága a rendelkezésünkre álló adatok szerint biztosított, a biztonság értéke mind alapállapotban (5,01), mind elárasztott állapotban (4,4) meghaladja a minimálisan előírt értéket (1,35).

A számítógépes modellezés alapján megállapítható, hogy az építési folyamat a Budai Vár falát nem veszélyezteti, a csúszólapok minden esetben Várfal előtt metszik a felszínt. A fal süllyedése 2 mm-re becsülhető.

A felhasznált adatok és modellezési eredmények alapján a szerkezeti méretek csökkenthetők. Számításaink szerint egy 60 cm átmérőjű, 1 m tengelytávolságú hézagos cölöpfal horgonyzás nélkül is biztosítani tudja a megtámasztott köztömeg állékonyságát.

6 IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of rock masses. *Trans. S. Afr. Inst. Civil Eng.*, **15**. 335-344.
- BME 2007. *A Széchenyi könyvtár mellett létesítendő mélygarázs területének mérnökgeológiai vizsgálata*. Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék. Szakvélemény. 1-27.
- Deere, D.U. 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. Engng Geol.* 1. 17-22.
- Gálos M., Vásárhelyi B. 2006. *Közettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban*. Műszaki Egyetemi Könyvkiadó, Budapest. 1-144.
- Görög P. 2008. *Budai eocén és oligocén korú agyagtartalmú kőzetek mérnökgeológiai értékelése*. Ph. D. értekezés.
- Hajnal G., Karay Gy., Görög P. 2012. A Várhegy földtana. In: Görög P., Hajnal G. (eds), *Mérnöki kutatások a budai Várhegyen*. Hantken Kiadó, Budapest. 15-19.
- Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, Vol. 2(2). 4-16.
- Hoek, E., Brown, E. T. 1980. Underground excavations in rock. *Inst. Mining and Metallurgy*, London. 527 p.
- Hoek, E., Brown, E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abst.* **34**. 1165-1186.
- IAEG 1979. Report of the commission on engineering geological mapping. *Bull IAEG*, 19. 364-371 pp.
- ISRM 1978. Suggestive methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abst.*, **16**. 135-140.
- ISRM 1981. Suggested methods: rock characterization testing and monitoring. Brown, E.T. (ed). Pergamon Press, Oxford. 211.
- ISRM 1985. Suggestive methods for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abst.*, **22**. 51-60.
- Krolopp E., Schweitzer F., Scheuer Gy, Dénes Gy., Kordos L., Skoflek I., Jánossy D. 1976. A budai Várhegy negyedkori képződményei. *Földtani Közlöny*, 106. 3. Budapest. 193-228.
- Pécsi M. 1959. *Budapest természeti képe*. Akadémiai Kiadó, Budapest. 744 p.
- Romana, M.R. 1993. A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. In: Hudson, J.A. (Ed.) *Comprehensive Rock Engineering*. Pergamon Press, 3. Oxford. 575-599.
- Romana, M.R. 2003. DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dams foundations. ISRM 2003. *Technological roadmap for rock mechanics*, South Africa, CD-Rom.
- Schafarzik F., Vendl A., Dr. Papp F. 1964. *Geológiai kirándulások Budapest környékén*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. 1-368.
- Şen, Z., Sadagah, B.H. 2003. Modified rock mass classification system by continuous rating. *Engng Geol.*, **67**: 269-280.
- Scheuer Gy., Szentirmai L., Szörényi J. 2003. *Hidrológiai szakvélemény a Várbazár mélypincéjének tervezéséhez*. Bohn Mélyépítő Kft. Budapest, 1-21.
- Szörényi J. 2003. *Területismertető talajmechanikai szakvélemény a Várbazár alá tervezett mélygarázs lejáró rámpájának tervezéséhez*. Bohn Mélyépítő Kft. Budapest, 1-6.
- Török Á. 2003. Facies analysis and genetic interpretation of travertine. Buda Vár-hegy, Hungary. *Acta Geol. Hung.*, **46**(2): 177-193.
- Török Á. 2012. A budai várhegy mérnökgeológiája és a mérnöki kutatás örökségvédelmi jelentősége. In: Görög P., Hajnal G. (szerk.), *Mérnöki kutatások a budai Várhegyen*. Hantken Kiadó, Budapest. 9-14.
- www1: <https://maps.google.hu/>