

Schell Péter: Az M0 útgyűrű Északi Duna-hídjának cölöp próbaterhelései

Több ütemben, közel 10 éves munkával elkészültek az M0 útgyűrű Északi Duna hídjának ajánlati tervei, amelyek alapján jelenleg a kivitelezők versenyeztetése zajlik. A különböző tervfázisokhoz szükséges geotechnikai szakvéleményeket a GEOPLAN Mérnöki Szolgáltató és Kereskedelmi Kft. készítette. Társaságunk szakmai irányítóként szintén részt vett a kivitelezés megkezdése előtti próbaterhelések lebonyolításában, kiértékelésében és az alapozás véglegesen számításba vehető teherbírásának meghatározásában.

A híd pontos helyének kiválasztására hosszas hatósági, környezetvédelmi egyeztetéseket követően került sor. A műtárgy első változatára 1994-ben készítettünk engedélyezési tervet. Az évek során a híd szerkezete több alkalommal módosult, az illetékesek végül a már korábban is elfogadott ferdekábeles híd megépítése mellett döntöttek.

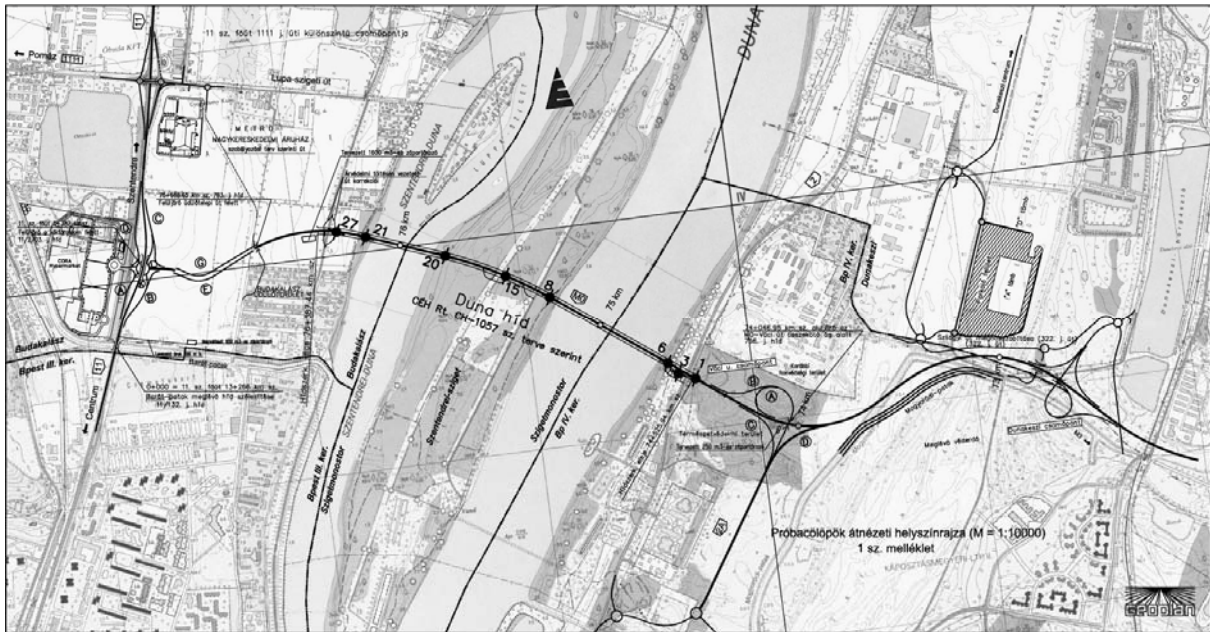


1. ábra - Az M0 Északi Duna-hídjának látványterve

Az új műtárgy ajánlati tervei 2004 év folyamán készültek el, a generáltervező CÉH Tervező, Beruházó és Fővállalkozó Rt. irányításával. A Duna két partján a forgalmi kapcsolatok biztosításához szükséges 2 sz., illetve 11 sz. főutak csomópontjainak tervezése az Unitef 83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Rt. tervezésében egyidejűleg, de külön tervezési szerződés keretében zajlott.

A 2 meder- és 3 ártéri hídból álló, 1862 m hosszú műtárgy az M0 74+525 - 76+387 km szelvényei között 28 támasszal épül. A pesti oldalon 5, a Szentendrei-szigeten 13, a budai parton 6 támasz készül. A Duna két ágában 2 - 2 mederpillér építésére kerül sor. A balparti ártéri híd Budapest IV. kerületében, Székesdűlő és Káposztásmegyér határában készül. A Szentendrei-szigeten tervezett ártéri hidat a

sziget déli csücskének közelében, Szigetmonostorhoz tartozó területeken, míg a jobbparti ártéri hidat az Omszki tótól délkeletre, Budakalász területén építik.



2. ábra - Átnézeti helyszínrajz

A vizsgált terület geomorfológiai értelemben a Duna völgyének egy szakaszán, a Budai hegység lábánál, a Pesti-síkság teraszfelszínén helyezkedik el. A részletes geológiai ismertetéstől eltekintve összefoglalóan megállapítható, hogy a tervezett műtárgy helyén nagy vastagságban oligocén agyag alapréteg jellemző, amelyre a Duna pleisztocén homokos kavics - kavicsos homok rétegei, majd holocén futóhomokok, ártéri üledékek települtek.

A műtárgy végleges helyén a talajrétegződés feltárására több ütemben összesen 18 db 25 - 30 m mély nagyátmérőjű parti fúrás, 4 db mederfúrás, 13 db dinamikus verőszonda és 7 db statikus szonda (CPT) készült.

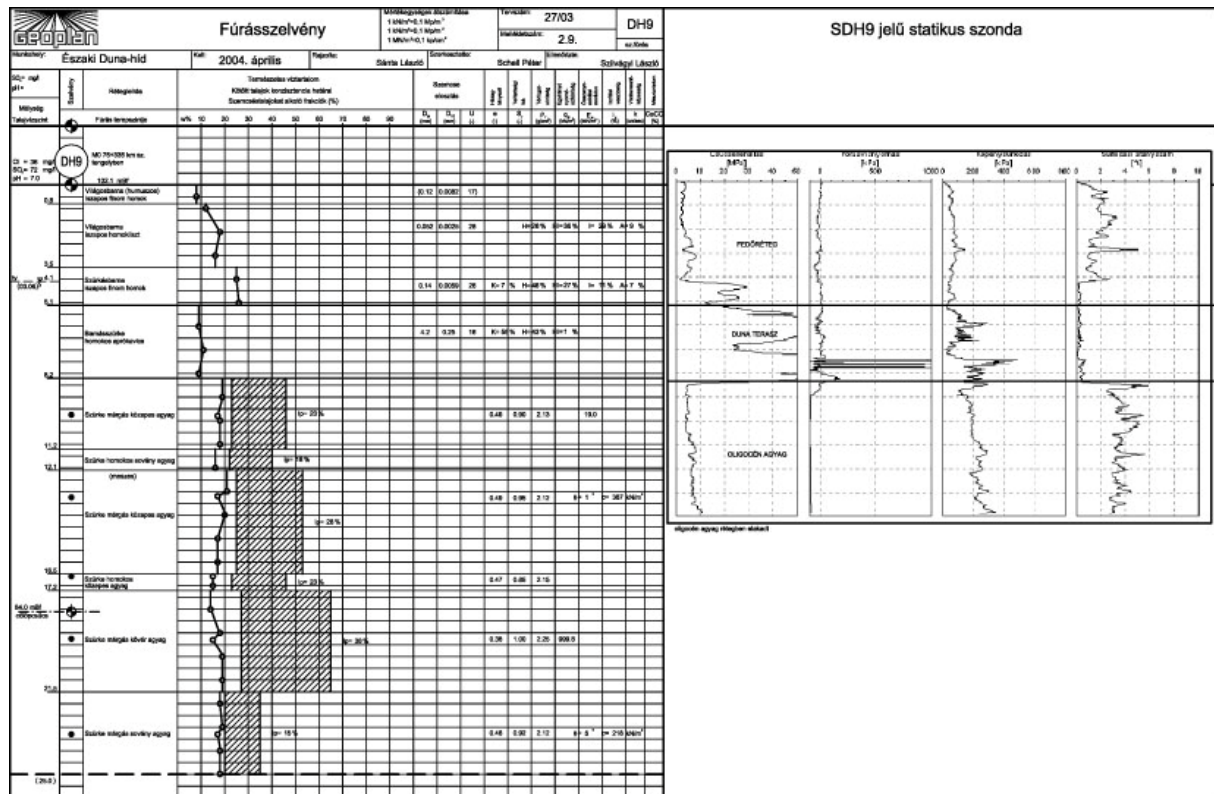
A feltárások adatai alapján a folyó két partján, illetve a Szentendrei-szigeten a 2.2 - 6.9 m vastagságú fedőréteg, igen változatos kifejlődésben jelentkezett. Különböző kötöttségű agyagok, átmeneti talajok és finom szemcsés rétegek egyaránt előfordultak. A rétegsor döntően laza, helyenként közepesen tömör településű, átlagos teherbírású.

A feltárások ez alatt, a 95.1 - 100.2 mBf szinten érték el a Duna terasz durva szemcsés rétegsorát. A feltárt talajok a geotechnikai osztályozás szerint döntően aprókavicsos közepes homoknak - homokos aprókavicsnak minősülnek, 19 - 89% közötti kavicsstartalommal. A rétegsor osztályozottsága igen változó, egyenlőtlen mutatója (U) 1.9 - 82 közötti. A feltárt rétegsor döntően közepesen tömör, tömör településű, teherbírása jó.

A területre jellemző oligocén korú alapkőzet a parti fúrásokban a felszín alatt 9.0 - 16.8 m, a vízi fúrásokban 0.4 - 3.2 m mélyen, a 86.8 - 94.8 mBf szinten jelent meg.

A réteg szürke, kékesszürke színű, geológiai előterhelése jelentős, kora következtében márgásodó jellegű, rendszerint kissé meszes, helyenként homokos. Gyakorlatilag vízzárónak tekinthető, csak helyenként homokszemcsés, homokcsíkos részein tekinthető gyengén vízvezetőnek. Felső 1 - 2 m vastag része a fölötté fekvő víz alatti kavics áztató hatása miatt általában néhány helyen kissé felpuhult, átázott. Mélyebben kiváló teherbírású, közetszerű viselkedésű, nem kompresszibilis. Állapota, talajfizikai jellemzői alapján - eltekintve a ritkán előforduló cementált homok, homokliszt lencsétől, erekől - homogénnek tekinthető. A felszín alatt 20 - 25 m

mélységben az igen jelentős geológiai előterhelés következtében már kifejezetten márgás jellegű.



3. ábra - A DH9 jelű fúrásaszelvény és az SDH9 jelű CPT szonda görbéje

A réteget a 83 db zavartalan talajmintán végzett nagy számú laboratóriumi vizsgálat eredményeinek statisztikai kiértékelése alapján az alábbi átlagértékekkel jellemeztük: hézagtévesző $e = 0.43$, telítettségi fok $S_r = 0.91$, téfogsúly $\gamma = 21.6 \text{ kN/m}^3$, egyirányú nyomószilárdság $q_u = 763 \text{ kN/m}^2$, összenyomódási modulus $E_s = 35.9 \text{ MN/m}^2$, súrlódási szög $\phi = 20^\circ$, kohézió $c = 200 \text{ kN/m}^2$.

A vizsgált helyszín a Duna által befolyásolt területre esik, így a folyómederhez közeli sávban a talajvíz követi a folyó vízállásának változásait. A tervezett műtárgy környezetében a becsült maximális, egyben mértékadó vízszintnek a mértékadó árvízszint (104.50 mBf) tekinthető.

A feltárások adatait összegezve megállapítható, hogy a tervezett műtárgy kedvező geotechnikai adottságú helyen épül. A kemény, kiváló teherbírású alapkőzet elérhető mélységben van, felette vastag kavicssterasz települt, melynek nyírószilárdsága szintén kedvező. Az egyes alátámasztások között nincs jelentős rétegződésbeli különbség, így számottevő terhelés - alakváltozás differencia nem várható.

Az alapozás a műtárgy méreteit, terheléseit, továbbá a vízi építési körülményeket figyelembevéve nagytérű, fűrt cölöpökkel készül. Az egyes alátámasztási helyeken a cölöpök törőterhét előzetesen az MSZ ENV 1997-1, Eurocode 7 szerint határoztuk meg, a jól ismert $P_H = \alpha \cdot P_t = \alpha \cdot (P_{cs} + P_p) = \alpha \cdot (A_{cs} \cdot \sigma_{cs} + k \cdot \sum h_i \cdot \tau_i)$ összefüggés alapján, ahol:

- P_H - cölöpök határereje (kN),
- α - biztonsági tényező
- P_t - cölöp törőereje (kN),
- P_{cs} - csúcsellenállás (kN),
- A_{cs} - cölöpcsúcs keresztmetszeti felülete (m^2),
- σ_{cs} - fajlagos csúcsellenállás (kN/m^2),

- P_p - palástellenállás (kN),
- k - palást kerülete (m),
- h_i - a palást egyes rétegekre eső hossza (m),
- τ_i - a fajlagos palástellenállás (kN/m²).

A biztonsági tényezőt $\alpha = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 = 0.65 * 0.75 * 1.0 = 0.488$ az alábbiak szerint választottuk meg:

- $\alpha_1 = 0.65$ (a törőteher meghatározása szondázási eredmények alapján történt),
- $\alpha_2 = 0.75$ (a létesítmény esetleges romlása által okozott gazdasági kár nagy, az életveszély kicsi),
- $\alpha_3 = 1.0$ (a rétegződés jól ismert).

Számításaink során az alábbi értékeket vettük figyelembe:

- Fajlagos csúcsellenállás: 10 - 15 MN/m²,
- Fajlagos palástellenállás fedőrétegben: 30 - 60 kN/m²,
- Fajlagos palástellenállás Dunai terasz rétegben: 60 - 120 kN/m²,
- Fajlagos palástellenállás oligocén agyag rétegben: 80 kN/m².

A teherbírásszámítások alapján a mederpillérek és a meder- illetve ártéri hidak közös hídfőinek cölöpjeit 1.5 m átmérővel, 17 - 19 m hosszal terveztük. Az ártéri hidak esetében 1.2 m átmérőjű és terheléstől függően 14 - 20 m hosszú cölöpök szerepelnek a tervekben. A nagy Duna-ág mederpillérei alatt 46 db, a további támaszok alatt 12 - 16 db cölöp alkalmazására volt szükség.

A tervezés első fázisainak befejezését követően, a műtárgy kivitelezésének megkezdése előtt a nagyátmérőjű fúrt cölöpök teherbírásának ellenőrzésére, illetve pontosítására Megrendelő cölöp próbaterhelések elkészítését rendelte el.

A próbacölöpök végleges kialakításának és helyének meghatározására - a geotechnikai szakvélemény javaslatai alapján - Megrendelő (Nemzeti Autópálya Rt.), Mérnök (UTIBER Közúti Beruházó Kft.), Generáltervező (CÉH Rt.) és a geotechnikus szakági tervező (GEOPLAN Kft.) részvételével egyeztető tárgyalásokra került sor. Végeredményben 2 db hagyományos, terhelőhidas és 6 db ún. önlehorgonyzós (VUIS) próbaterhelés készítéséről született megállapodás, a próbacölöpök helyét, geometriai jellemzőit az 1. sz. táblázat tartalmazza.

Támasz			Cölöpátmérő (m)	Összefogás (mBf)	Cölöpcsúcs (mBf)	Dolgozó cölöphossz (m)
sz.	szelvénye	megnevezése				
1	74+521	hídfő	1,2	104,2	85,0	19,2
3	74+590	balparti ártéri híd	1,2	99,2	83,0	16,2
6	74+665	imitált meder pillér	1,5	92,0	72,0	20,0
8	75+285	közös hídfő	1,5	98,0	80,0	18,0
15	75+585	szigeti ártéri híd	1,2	100,0	84,0	16,0
20	75+815	közös hídfő	1,5	97,5	76,0	21,5
21	76+175	imitált meder pillér	1,5	92,2	72,0	20,2
27	76+310	jobbparti ártéri híd	1,2	101,0	80,0	21,0

1. sz. táblázat - A próbacölöpök helye és geometriai jellemzői

A megállapodás értelmében a cölöpök egy része a tervekben szereplő hosszal, másik része pedig annál 2 - 4 m-rel nagyobb hosszal készült. Ennek az volt az oka, hogyha a helyszíni kísérletek a számított eredményeket esetleg nem igazolták volna, ellenőrzött keretek között legyen lehetőség a cölöpök meghosszabbítására. A terv szerinti cölöpök határteherbírásának számítására ilyen körülmények között szintén lehetőség van. A próbaterhelések alapján a további - a gyakorlatilag azonos talajadottságok között készülő közeli - támaszok cölöpjeinek teherbírás számítása szintén megoldható.

A próbacölöpök kivitelezésére és a próbaterhelésben való közreműködésre a HBM Hídépítő-Soletanche Bachy Mélyalapozó Kft. kapott megbízást.

Társaságunk a munka geotechnikai részének koordinálását, a próbaterhelések szakmai irányítását, a kiértékelő szakvélemények elkészítését kapta feladatul. Ezenkívül a próbaterhelések eredményei alapján vizsgálnunk kellett az elkészült terv megfelelőségét, szükség esetén pedig javaslatot adni a változtatás módjára.

A próbaterhelések szakmai irányításában és a kiértékelő szakvélemények összeállításában alvállalkozók működtek közre. A VUIS cölöpök esetében az ANKA Mérnökiroda Bt., a hagyományos cölöpöknél az UNIVERSITAS-Győr Kht.

Eltekintve a próbaterhelések lefolytatásának és az eredmények kiértékelési folyamatának részletes közlésétől az eredményeket a 2 és 3 sz. táblázatban foglaljuk össze.

VUIS cölöpök

Próba- terhelés száma	Cölöp felső rész teherbírása				Cölöp alsó rész teherbírása				Teljes cölöp határ- teher- bírása
	Cölöp- hossz	Törő- teher	Bizton- sági tényező	Határ- teher- bírás	Cölöp- hossz	Törő- teher	Bizton- sági tényező	Határ- teher- bírás	
	(m)	(kN)	(-)	(kN)	(m)	(kN)	(-)	(kN)	
3	12,3	5000	0,570	2850	3,9	8700	0,570	4959	7809
6	15,6	10100	0,570	5755	4,4	8700	0,606	5265	11020
8	15,0	9200	0,570	5244	3,0	8755	0,606	5302	10546
20	17,7	10400	0,570	5928	3,8	7008	0,606	4244	10172
21	16,2	11700	0,570	6669	4,0	9600	0,700	6720	13389
27	17,5	10400	0,570	5928	3,5	6400	0,606	3876	9804

2 sz. táblázat - A VUIS cölöpök próbaterhelésének eredményei

Hagyományos cölöpök

Próba- terhelés száma	Cölöp teherbírása				Határ- teherbírás
	Palást- súrlódás	Talp- ellenállás	Törőteher	Biztonsági tényező	
	(kN)	(kN)	(kN)	(-)	
1	7200	11300	18500	0,570	10545
15	6250	11750	18000	0,570	10260

3 sz. táblázat - A Hagyományos cölöpök próbaterhelésének eredményei

Ezt követően az eredmények felhasználásával támaszonként elvégezhetjük a tervekben szereplő alapozás ellenőrzését. Ahhoz, hogy valamennyi támasz cölöpjeinek határteherbírását kiszámíthassuk a fajlagos teherbírési értékek meghatározására volt szükség. A cölöpök törőterhét a korábbi tervfázisokban is alkalmazott módszerrel, az MSZ ENV 1997-1, Eurocode 7 szerint határoztuk meg, a már ismertetett összefüggés alapján.

A teljes hídra vonatkozó kiértékelés során az előzetes számítások, illetve a próbaterhelések egyedi kiértékelésekor alkalmazott biztonsági tényezőket az alábbiak szerint egységesítettük:

- $\alpha_1 = 0.80$ (a törőteher közvetlenül nem volt meghatározható, de értéke jó közelítéssel becsülhető),
- $\alpha_2 = 0.70$ (mederpillérek esetén),
- $\alpha_2 = 0.75$ (minden további támasznál),
- $\alpha_3 = 0.95$ (a rétegződés jól ismert, de a próbacölöpözés tapasztalatai alapján kissé változékony).

A mederpillérek esetén tehát $\alpha = 0.80 * 0.70 * 0.95 = 0.532$, az egyéb támaszoknál pedig $\alpha = 0.80 * 0.75 * 0.95 = 0.570$ érték adódott.

A *fajlagos palástsúrlódás* értékeire - a helyszíni kísérletekkel meghatározott törőterhekből visszaszámolva - mindkét próbaterhelési típus esetében közel azonos eredményt kaptunk. A fedőréteg esetében 20 kN/m^2 , a dunai terasz anyagban 110 kN/m^2 , az oligocén agyag esetén 135 kN/m^2 adódott.

Az eredmények alapján megállapíthattuk, hogy az előzetes számítások során a fedőréteg teherbírását kissé túlbecsültük, a teraszanyag teherbírását körülbelül jól határoztuk meg, míg az agyag alapréteg fajlagos teherbírása az előzetesen becsülnél több mint másfélszer nagyobbra adódott.

Megfigyelhető azonban, hogy az agyagnál a számításba vehető fajlagos érték függ a mélységtől, vagyis attól, hogy az adott cölöp az alaprétegbe milyen hosszan van bekötve. (Pl. a pesti hídfőnél 3.5 m bekötés mellett kb. 120 kN/m^2 adódott, a mederpillérek cölöpjeinél - amelyek gyakorlatilag teljes hosszban az agyagban vannak - viszont közel 160 kN/m^2 fajlagos palástellenállás számítható.)

A végleges cölöpteherbírások meghatározása a helyi adottságok és a legközelebbi azonos geometriájú próbaterhelés figyelembevételével a fedőréteg esetében $\tau = 20 \text{ kN/m}^2$, a homokos kavics - kavicsos homok esetében $\tau = 100 - 124 \text{ kN/m}^2$, az oligocén agyag esetében pedig $\tau = 109 - 157 \text{ kN/m}^2$ határértékekkel történt.

A *fajlagos csúcsellenállás* tekintetében az eredmények már változatosabb képet mutatnak. A VUIS cölöpök jellemzően 80 mBf , vagy az alatti cölöpcsúcsok esetén $4.6 - 6.7 \text{ MPa}$ fajlagos csúcsellenállást jeleztek. A 2 db hagyományos próbacölöpözés $84 - 85 \text{ mBf}$ cölöpcsúcs mellett az előbbinél jóval nagyobb, 10 MPa körüli fajlagos csúcsellenállást mutatott.

A különbség feltehetően a VUIS cölöp viselkedésében keresendő. Az osztott cölöp esetében ugyanis a köpeny kihúzása során fellépő húzóerők miatt feszültség átrendeződés következik be a talajban, ami az elválasztás alatti talajzónát, a cölöpcsúcs térségében kedvezőtlenül érinti, ezért a cölöpcsúcsok vélhetően a valósnál kisebb teherbírást és nagyobb alakváltozást jeleznek.

Véleményünk szerint a hagyományos próbaterheléssel meghatározott 10 MPa körüli értékek - amelyek egyébként az előzetes számításainkban is figyelembe vett fajlagos csúcsellenállás nagyságrendjét elérik - közelebb állnak a jelentősen előterhelt, helyenként közetszerű agyag alapréteg teherbírásához, amit a korábban készült nagyszámú laboratóriumi vizsgálat is igazolt (pl. az egyirányú nyomószilárdság átlaga: $q_u = 763 \text{ kN/m}^2$).

A végleges számítások során - kiértékelve valamennyi eredményt és a biztonság javára történő közelítéssel élve - a VUIS próbaterhelések környezetében a helyszíni kísérlettel meghatározott értékeket (4.6 - 6.7 MN/m²), a hagyományos próbaterhelések környezetében pedig csökkentett (7.0 - 7.5 MN/m²) fajlagos csúcscellenállás értékét vettük figyelembe.

A fajlagos teherbírási értékek meghatározását követően készítettük el a *támaszonkénti részletes teherbírás számításokat*. Tekintettel arra, hogy a próbacölöpök egy része a terv szerinti hosszal, másik része annál 2 - 4 m-rel nagyobb hosszal készült, első ütemben a számolt fajlagos értékekkel ellenőriztük a próbaterhelés során alkalmazott cölöphosszhoz tartozó törőterheket. Ezt követően a terv szerinti cölöphosszakra számítottuk át - a fajlagos teherbírásnak megfelelően a palást- és a talpellenállás értékét csökkentve - a teherbírásokat. Utolsó lépésként a helyi adottságok alapján módosított fajlagos értékekkel, a legközelebbi azonos geometriájú próbaterhelés figyelembevételével elvégeztük a további támaszok terv szerinti alapozásának ellenőrzését.

Azon támaszoknál, ahol próbaterhelés készült a cölöpök végleges egyedi teherbírását a 4 sz. táblázatban foglaljuk össze.

Támasz			Cölöp- átmérő	Összefogás	Cölöpcsúcs	Cölöphossz	Törőteher	Határte- herbírás
	szelvénye	megnevezése						
			(m)	(mBf)	(mBf)	(m)	(kN)	(kN)
1	74+531	hídfő	1,2	104,2	85,0	19,2	17392	9913
3	74+601	ártéri pillér	1,2	99,2	85,0	14,2	12687	7232
6	74+825	meder pillér	1,5	91,0	75,0	16,0	17801	9470
8	75+270	közös hídfő	1,5	99,0	80,0	19,0	19112	10894
15	75+595	ártéri pillér	1,2	100,0	84,0	16,0	14575	8308
20	75+831	közös hídfő	1,5	97,5	80,0	17,5	20134	11476
21	75+925	meder pillér	1,5	92,2	75,2	17,0	21413	11392
27	76+338	ártéri pillér	1,2	102,0	82,0	20,0	14550	8294

4. táblázat - A végleges cölöpgeometria és cölöpteherbírások táblázata

Összegzésképpen megállapítható, hogy a próbaterhelések a támaszok mindegyikénél a feltárások alapján figyelembe vett kedvező adottságokat igazolták, vagyis a korábban tervezett cölöpök megfeleltek, így áttervezésre nem volt szükség.

A cölöpalapok teherbírása a szokásosnál több helyszínen elkészült próbaterhelés eredményei alapján műszakilag igazolt, a szükséges engedélyek a műtárgy kivitelezéséhez rendelkezésre állnak, így remélhetőleg a tender lezajlását követően az M0 útgyűrű legjelentősebb műtárgyának építése az alapozási munkákkal a közeljövőben ténylegesen megkezdődhet.