

SZAKDOLGOZAT

Gertner Tünde
BSc építőmérnök szak
2015. január



SZENT ISTVÁN
EGYETEM



YBL MIKLÓS ÉPÍTÉSTUDOMÁNYI KAR, BUDAPEST

**Különböző építési technológiák
összehasonlítása
a budapesti 4-es metró építése kapcsán**

(SZAKDOLGOZAT)

Készítette:

Gertner Tünde

Budapest, 2015.



SZAKDOLGOZAT KIÍRÁS
2015

Gertner Tünde

Levelező Építőmérnök szakos
hallgató részére

A feladat címe:	Különböző építési technológiák összehasonlítása a budapesti 4-es metró építése kapcsán
Belső konzulens:	Kecskés Gábor
Külső konzulens:	Németh Mihály Tibor, BKV Zrt. osztályvezető

A szakdolgozat beadási határideje: 2015. január 16., péntek 12⁰⁰

Budapest, 2014. november 24.

Dr. Dombay Gábor
intézetigazgató



Részletes feladatkiírás

Gertner Tünde

Levelező Építőmérnök
hallgató részére

Különböző építési technológiák összehasonlítása a budapesti 4-es metró építése kapcsán
című szakdolgozatához

A szakdolgozat felépítése:

1. Bevezető
2. A budapesti 4-es metró nyomvonala
3. Geotechnikai adottságok a metróépítés környezetében
4. Alagútépítés
5. A pajzsos alagútépítés
6. Alagútépítés bányászati módszerrel
7. Alagutak vízszigetelése
8. Az alagútépítés meglévő épületekre, közművekre gyakorolt hatásainak vizsgálata
9. Állomásszerkezetek
10. A budapesti metrónál alkalmazott állomástípusok történeti áttekintése
11. Nyitott építési módszerrel épített állomások szerkezeti felépítése
12. Víztelenítési technológiák, talajvízszint süllyesztés
13. Résfalas technológiával készült műtárgyak
14. Milánói módszer
15. Csatlakozás tervezése meglévő földalatti műtárgyakhoz
16. Számítási mellékletek
17. Rajzi mellékletek

Budapest, 2014. november 24.


Kecskés Gábor

Tartalomjegyzék

I.	Bevezető	2
I.1.	A budapesti 4-es metró nyomvonala	3
I.2.	Geotechnikai adottságok a metróépítés környezetében	5
I.3.	Monitoring rendszerek az építés alatt és után.....	14
II.	Alagútépítés	16
II.1.	A pajzsos alagútépítés	19
II.2.	Alagútépítés bányászati módszerrel.....	29
II.3.	Alagutak vízszigetelése	31
II.4.	Az alagútépítés meglévő épületekre, közművekre gyakorolt hatásainak vizsgálata	31
III.	Állomásszerkezetek	34
III.1.	A budapesti metróknál alkalmazott állomástípusok történeti áttekintése	34
III.2.	Nyitott építési módszerrel épített állomások szerkezeti felépítése.....	41
III.3.	Víztelenítési technológiák, talajvízszint süllyesztés.....	43
III.4.	Résfalas technológiával készült műtárgyak.....	44
III.4.1.	Milánói módszer.....	47
IV.	Csatlakozás tervezése meglévő földalatti műtárgyhoz	49
V.	Mellékletek	50
VI.	Felhasznált irodalom.....	50

I. Bevezető

2014. március 28-án átadásra került Budapest 4. számú metróvonal, amelynek építése során a XXI. század legmodernebb műszaki megoldásait, technológiáit sorakoztatták fel minden szakág tekintetében. A BKV Zrt. Metró Infrastruktúra Főmérnökségének munkatársaként lehetőségem nyílt betekintést nyerni a kivitelezés különböző fázisaiba, az elkészült létesítmények üzemeltetői tapasztalataival pedig ismereteim folyamatosan bővülnek. E dolgozat témája az építés során alkalmazott különböző mélyépítési technológiák részletes bemutatása, kialakulásuk történeti áttekintése. A terjedelmi korlátok miatt a tanulmány kizárólag a budapesti metróépítés történetében előforduló technológiákkal foglalkozik.

*„A metró olyan földalatti, vagy felszíni zártpályás, zártperonos, villamos-üzemű városi gyorsvasút, amelynek forgalmi vágányait szintben, közúti, vasúti, vagy gyalogos forgalom nem keresztezheti.”**

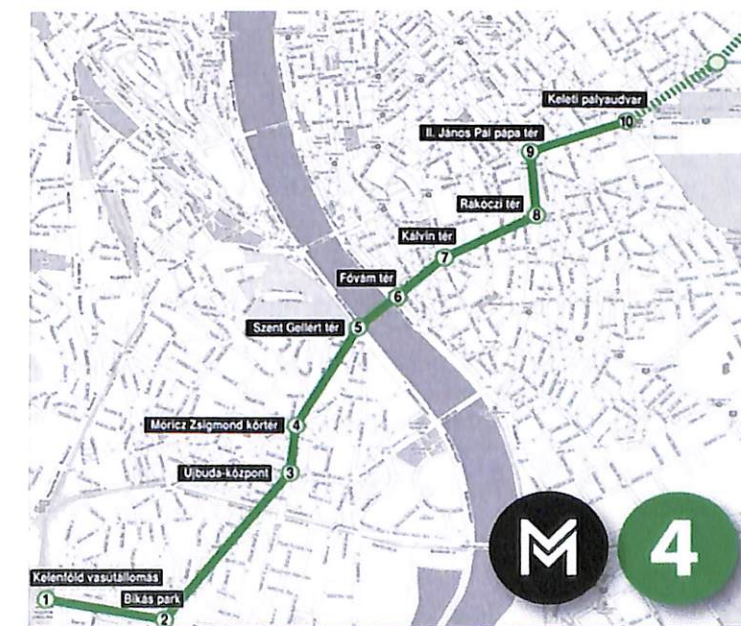
A budapesti 4-es metróvonal már az 1950-es évektől szerepelt a fővárosi közlekedésfejlesztési tervekben, mint a Dél-Budát a városközponton át Zuglóval összekötő földalatti gyorsvasút. A vonal koncepciójának kialakítása 1972-ben kezdődött el. Nem sokkal az után, hogy átadták a kelet-nyugati (M2) metróvonalat, elkészült Budapest és Környéke Közlekedésfejlesztési Terve, melyben a már üzembe helyezett 2-es és az épülő 3-as vonal mellett szintén helyet kapott a 4-es metró. Ekkor három változat készült, mindhárom elágazó vonalként. A vonalvezetési változatok megegyeztek abban, hogy a Móricz Zsigmond körteret és a Bosnyák teret kell a városközponton áthaladva, a 2-es és 3-as vonalakkal hálózatot alkotva összekötni. A Bosnyák tér utáni továbbépítés irányát az újpalotai lakótelep határozta meg, a budai oldalon pedig a körtér után elágazást terveztek Budafok irányába. A tervek megvalósítása azonban az országban fennálló gazdasági nehézségek és a fejlesztés körüli politikai viták miatt a 2000-es évekig váratott magára. A kivitelezés 2006 elején kezdődött és több mint nyolc évig tartott. Az utasforgalom számára 2014. március 28-án adták át az új metróvonal I. szakaszát, mely a Keleti pályaudvar és Kelenföld

* Bata István: A budapesti metróközlekedés három évtizede

vasútállomás között biztosítja a gyors és akadálytalan közösségi közlekedést a belvároson keresztül. A 10 állomásból álló vonalszakasz forgalmi hossza 7,34 km, az állomások közötti alagútszakaszok átlagos hossza 663 m. A kör keresztmetszetű vonalalagutak végig mélyvezetésben, egymástól függetlenül, többnyire párhuzamosan haladnak. Az állomások a felszíntől 14,5-31 m közötti mélységben helyezkednek el, középperonos kialakításúak, egyterűek, a peronok hossza 80 m. Az építészeti tervezéskor nagy hangsúlyt fektettek a régebbi metróállomásoknál megszokott nyomasztó, alacsony belmagasság helyett a tágas, monumentális terek érzékeltetésére és a természetes fény bevezetésére, kihasználva az alkalmazott állomásszerkezet adta lehetőségeket. A vonalon 15 db 4 kocsiból álló, automata vezérlésű, egyterű szerelvény szállítja az utasokat.

I.1. A budapesti 4-es metró nyomvonala

Budapest negyedik metróvonalának nyomvonala számos vita forrása volt az építést megelőző évtizedek során. Végül a különböző urbanisztikai és környezeti hatásvizsgálatok után 1996 októberében elkészült a Budapesti 4-es metróvonal megvalósíthatósági tanulmánya, melyet hazai és nemzetközi szakértők közreműködésével készítettek el. Közel tucatnyi nyomvonalváltozatot elemeztek, és ezek közül választották ki a mára megvalósult 10 állomásos verziót, mint optimális megoldást.



1. ábra: A budapesti 4-es metró nyomvonala

A nyomvonal vízszintes és magassági vonalvezetésének részletes leírása a következő:
A metró Kelenföldi pályaudvar állomásától induló egyenes pályaszakasz után a vonal bal irányú ívvel érkezik a Bikás park állomásra. Azt elhagyva egyenesen halad tovább, majd ismét bal ívvel fordul a Fehérvári út alá és éri el Újbuda-központ állomást. A vonalon itt a legnagyobb a két állomás közötti távolság, 1470 méter. Ezután a vonal nagy sugarú ellenívekkel éri el a Móricz Zsigmond körteret, ahonnan ismét elleníves vonalvezetéssel halad a Szent Gellért tér irányába. Az állomás körtér felé eső végén egy egyvágányú fordító műtárgy létesült, mely a vonalon bekövetkező esetleges műszaki meghibásodás vagy egyéb forgalmi akadály esetén vonatfordításra alkalmas. A vonal egyenes vezetéssel halad tovább a Duna alatt a Fővám tér állomásig. Ez a legrövidebb állomástávolság a vonalon, mindössze 378 méter. A Fővám teret elhagyva az alagút jobb irányú ívvel éri el a Kálvin teret. Ezen az állomáson a 3-as vonalra történő közvetlen átszállás biztosítására szolgáló műtárgy is épült. A vonal a 3-as metró felülről keresztezve egyenesen halad tovább, majd egy jobb irányú ívvel éri el a Rákóczi tér állomást. Az ezt követő egyenes pályaszakasz után bal irányú ívvel érkezik a II. János Pál pápa tér állomáshoz. Innen jobb irányú ívekkel halad a vonal a 2-es metró alagútjai felett és éri el a Keleti pályaudvar állomást. Itt van a vonal északkeleti irányú ideiglenes végállomása. A Thököly út alatt egy kihúzó műtárgyban fordítóvágányok épültek, melyek fővágányként működnek majd a vonal Bosnyák tér irányába történő meghosszabbításakor.

Magassági szempontból a vonal végig mélyvezetésben épült. Ezt több tényező is indokolta, így a Duna alatti átvezetés, a városi beépítettség, a kelenföldi MÁV-pályaudvar alatti keresztezés, valamint a már üzemelő metróvonalak és a 4-es metró közötti közvetlen átszállási lehetőség kialakítása. A mélyvezetésű alagutak függőleges vonalvezetése különböző lejtők és emelkedők sorozatából áll. Vízszintes pályarész sehol nincsen (a vízelvezetés biztosítása érdekében). A vonalon a legkisebb emelkedő 3,0 ‰, a legnagyobb 36,3 ‰. A vonal legmélyebb pontja a Fővám térenél 73,34 mBf, legmagasabb pontja a kelenföldi pályaudvarnál található a Balti tengerszint felett 96,27 méteren.

A szakasz a későbbiekben három irányban fejleszthető tovább:

- a Kelenföldi pályaudvartól - Gazdagrét érintésével - Budaörs irányába,
- a Keleti pályaudvartól a Bosnyák tér, majd onnan Rákospalota felé,
- az Újbuda-központ állomásból kiágazva - a Fehérvári úton át - Budafok városközpont felé.

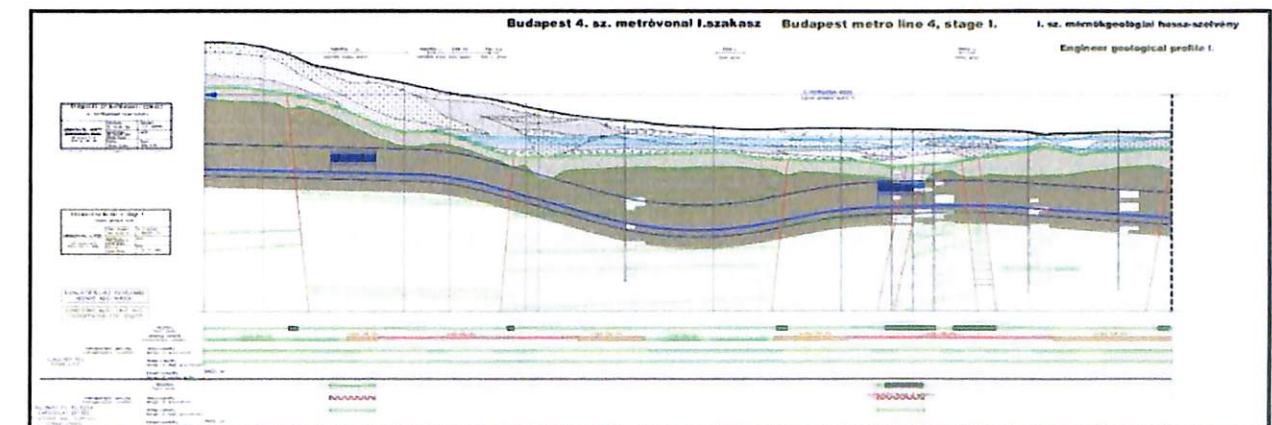
I.2. Geotechnikai adottságok a metróépítés környezetében

A metróvonal által érintett terület földtani felépítése, nagyléptékű tektonikája a földtani szakemberek előtt már ismeretes volt. Az újabb kutatások e nagyléptékű ismereteket a nyomvonal mentén pontosították, illetve igazolták például a Duna alatti átvezetés környezetében.

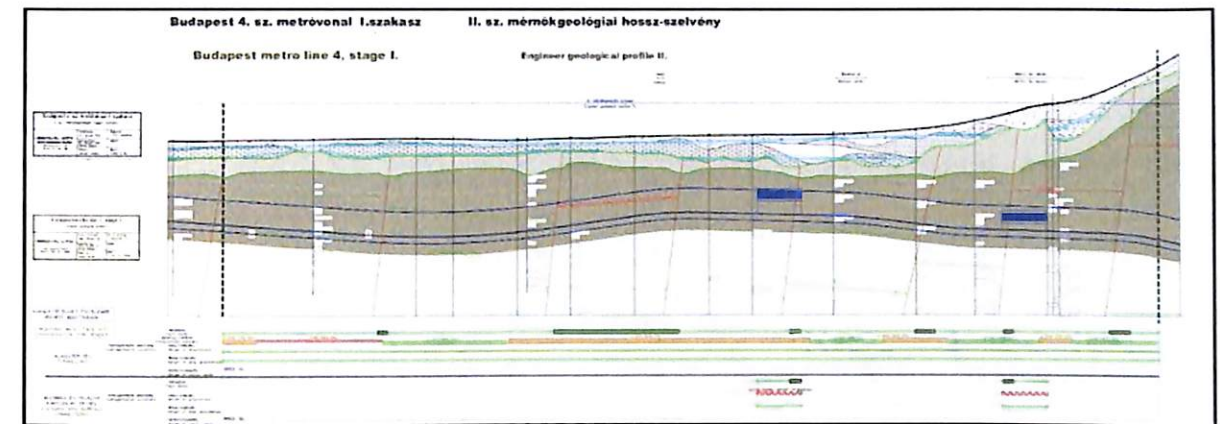
A nyomvonal által érintett terület három fő mérnökgeológiai egységre tagolható:

- "A" mérnökgeológiai egység, budai szakasz: Kelenföld vasútállomástól a Szent Gellért térig;
- "B" mérnökgeológiai egység, a Duna alatti átvezetési szakasz: Szent Gellért tértől a pesti rakpartig;
- "C" mérnökgeológiai egység, pesti szakasz: Fővám tértől a Keleti pályaudvarig.

"A" mérnökgeológiai egység:



2. ábra: I. mérnökgeológiai hossz-szelvény



3. ábra: II. mérnökgeológiai hossz-szelvény

A kelenföldi pályaudvartól a Szent Gellért térig pleisztocén korú, laza, hegylábi törmelékből álló üledékek alatt középső és alsó oligocén agyag, agyagmárga található több száz méter vastagságban.

Az 1997. és 1999. évi kutatófúrások során alkalmazott fúrástechnológia mutatott rá a harmadidőszaki képződmények alábbi geotechnikai tagozódására:

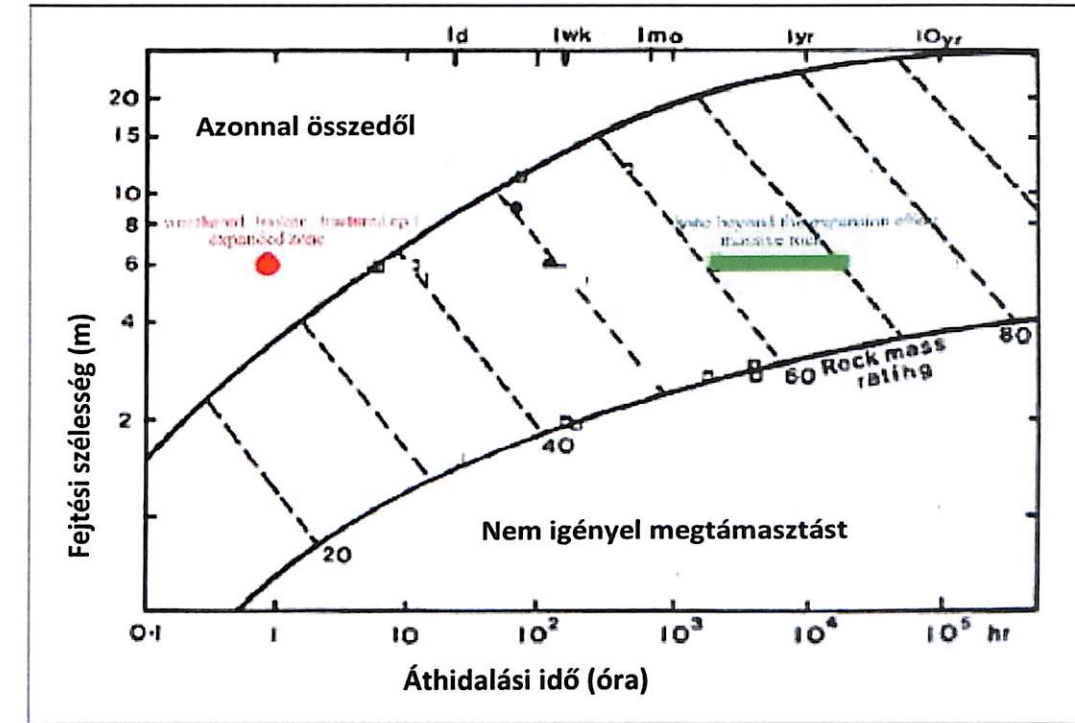
- Expandált zóna, amely felosztható egy mállott, töredezett felső, valamint repedezett alsóbb szakaszra;
- Expanziós hatáson túli szakasz, ép kőzettömeg.

A földtörténeti folyamatok során, amikor az oligocén felszín szárazföldre vált, több száz méteres lepusztulás következett be, amelynek során a kőzetfelszín expandált, összetöredezett és az expanzió hatásának mélységéig a szilárdsági tulajdonságai is csökkentek. Az összetöredezett kőzetfelszín elősegítette a mállási folyamatot, amely mind a mai napig folytatódik a holocén, pleisztocén rétegekben áramló és tározódó talajvíz hatására.

A kissé részletesnek tűnő tagolást az indokolta, hogy az alagútszerkezetet többnyire az expandált zónában tervezték megépíteni, mivel a feszültségek átrendeződése ott már lejátszódott.

A Bieniawski által 1989-ben kidolgozott alábbi kőzetállékonysági diagramban ábrázolták a zóna jellemző helyét. A diagram a megtámasztás nélküli időt és a fejtési

szélességet (alagútátmérőt) ábrázolja az RMR (Rock Mass Rating) függvényében. Az RMR egy több tényezőn alapuló kőzetosztályozási módszer, amely alapján az expandált zónában lévő vizsgált kőzet a 0-100-ig terjedő skálán 31 értékszámmal a IV. (gyenge) kőzetosztályba sorolható. Piros jel mutatja az ábrán, hogy az alagút, amelyik teljes szelvényben e zónában halad, aktív biztosítás nélkül nem állékony.



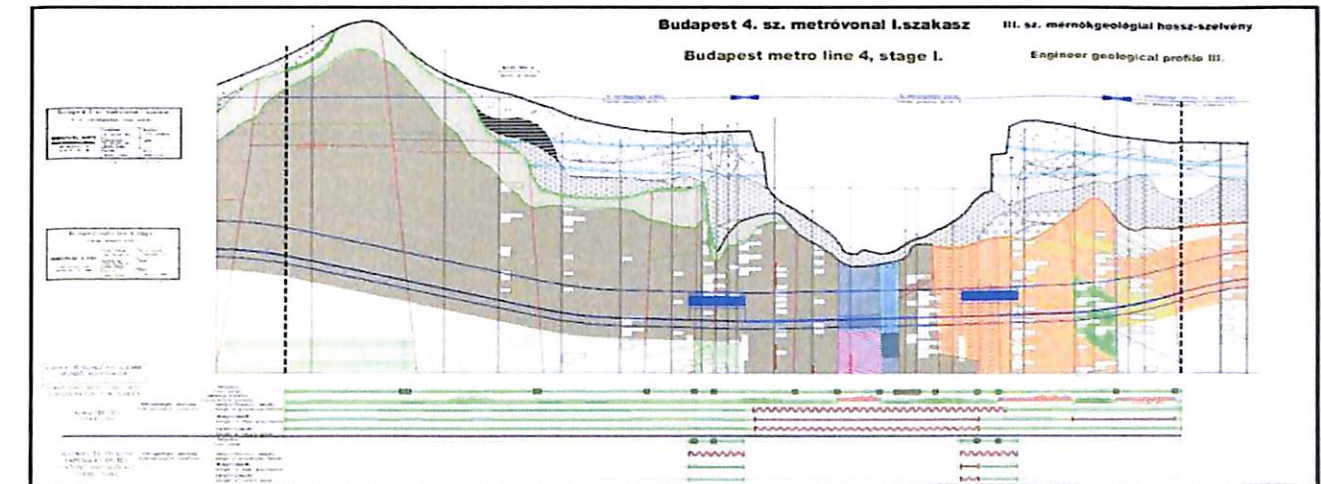
4. ábra: Kőzetállékonysági diagram, a budai szakaszon, az RMR és az alagútátmérő függvényében

A fentiekén túl problémát okozott az is, hogy a talajvíz helyenként erősen agresszív, az előforduló maximális szulfát-ion koncentráció 6000-7000 mg/liter.

"B" mérnökgeológiai egység:

A metróvonal építésének több szempontból is közérdeklődésre számot tartó szakasza a Duna-meder alatti átvezetés volt. Az egyik ok a hévízforrások megközelítése miatt feléledt környezetvédelmi aggodalom, másik maga a folyómeder, mint mesterséges elemekkel terhelt természeti képződmény, amely hidrológiai és hajózási szempontból kiemelten fontos. Így a Duna alatti átvezetés a metróvonal földtani, hidrogeológiai és geohidrológiai különlegessége lett, ahol az alagutak a triász korú, meleg karsztforrások

közelségébe kerülnek. Az egység mérnökgeológiai hossz-szelvénye az alábbi ábrán látható.



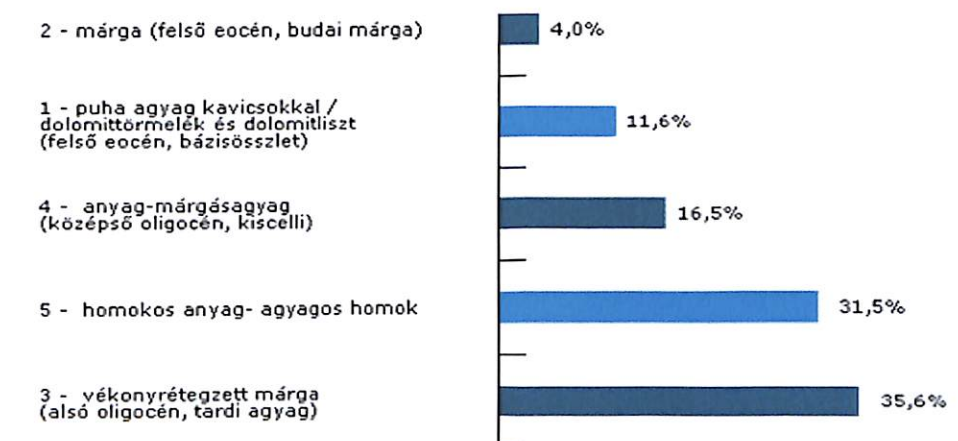
5. ábra: Duna alatti szakasz mérnökgeológiai hossz-szelvénye

A terület erősen töredezett. A Gellért-hegy nagy részét alkotó triász dolomit a felszíntől 800-900 m mélységre lépcsőzetesen vetődik le, mintegy 400-500 m-es vízszintes távolságon belül, kialakítva a jellegzetes aszimmetrikus és tektonikus sasbérce szerkezetet. Az alagutak környezetében a budai oldalról a pesti oldal felé haladva a középső-alsó oligocén agyagmárga a vetők mentén először eocén korú, laza agyag-dolomit törmelékbe vált át. Ezen a 40-50 m-es szakaszon az alagút alsó szelvényében, a feküben megjelenik a triász felszín, dolomitpor és átalakult (kataklázosodott*) triász dolomit kifejlődéssel, amely utóbbi akár csekély mechanikai hatásra is széttöredezik. Az alagutak vonala ezen a szakaszon közvetlenül érinti a Pannon medencében lévő meleg karsztvíz tározót, illetve annak a tektonikai vonalak mentén történő természetes, szabad és pozitív kifolyását. A karsztvíz rendszer nyomása a mindenkori Duna vízszinthez viszonyítva 1-1,5 m-rel magasabb, tehát természetes körülmények között a karsztvíz nem keveredhet a folyó vizével. A kifolyó karsztvíz gyógyvíz, hőmérséklete 40 °C körüli, minőségére jellemző a kalcium – magnézium – hidrogén-karbonát, továbbá a jelentős fluorid-ion és metakovasav tartalom. E környezetet elhagyva az alagutak erősen töredezett, de a felszálló meleg-karsztvizek hatására kovasavval átitatott eocén márgában haladnak. A pesti oldalhoz közelítve egy jól meghatározható nagyszerkezeti vonal mentén az eocén márgát alsó

* kataklázosodás: képlékeny-töréses átmeneti deformációs jelenség

oligocén agyagmárga váltja fel, amely fokozatosan középső oligocén márgás agyagba vált, majd a pesti Duna-part közelében felső oligocén, gyengén karbonátos kötésű finom homok, iszap, agyag rétegek jelennek meg.

A jobb oldali alagút függőleges tengelyében felülről lefelé megjelenő kőzetcsoporthoz százalékos eloszlását az alábbi ábra szemlélteti.



6. ábra: A "B" jelű mérnökgeológiai szakaszon a jobboldali alagút függőleges tengelyében felülről lefelé megjelenő kőzetcsoporthoz %-os megoszlása

Budai márga (4%): A budai márga világos barnásszürke, rétegzetlen, belső lemezesség nélküli kemény agyag, mely mésztartalma alapján márgának minősül. A repedésmentes kőzettömeg vízzáró, a repedezett kőzettömeg azonban alkalmas mind a fedő, mind a fekvő oldalon megjelenő folyó és meleg karsztvíz szállítására.

Eocén bázistörmelék (11,6%): A bázistörmelék – és alárendelten báziskavics – kevés agyagos kötőanyagot tartalmaz. Az anyag széteső volta miatt nem alkalmas kőzetmechanikai vizsgálatokra.

Kiscelli agyag (16,5%): Az előzetes fúrások azt vetítették előre, hogy kiscelli agyag a Duna-meder bal oldala és a pesti rakpart között fog jelentkezni egy rövid szakaszon.

Felső oligocén (31,5%): A felső oligocén kőzetek, melyek agyagos kifejlődésűek több-kevesebb homoktartalommal, a pesti rakpart közelében fordulnak elő.

Tardi agyag (35,6%): A jelenlegi nyomvonal a korábban részletesen megkutatott nyomvonal változattól északra fekszik. A korábban mélyített fúrások adatai azt mutatják, hogy azt a területet nem érte el – vagy csak kis mértékben – a hidrotermális hatás. Így a kőzetfizikai jellemzők összehasonlítása nem célszerű.

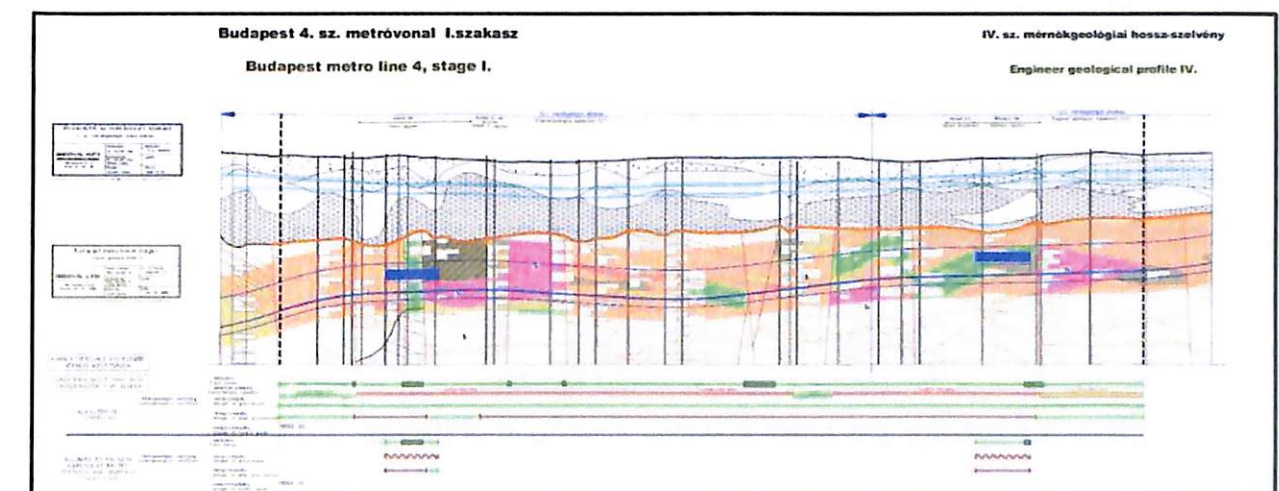
Az ábra a kőzetcsoporthoz eloszlása által a pajzs típusának kiválasztásához adott információt.

A laboratóriumi vizsgálatok eredményei szerint a kőzetek szilárdsági jellemzőit, jelleggörbéit, merevségét alapvetően nem a kőzetek keletkezési kora, sem a mélységi helyzete, hanem az elszennvedett tektonikai és hidrotermális hatások határozzák meg. Így az agyagok a nagy nyomások és a hidrotermális kovásodás következtében lényegesen, 2-5-ször nagyobb szilárdságúak és ugyanakkor nagyobb merevségűek is, mint a budai oldali előfordulásban.

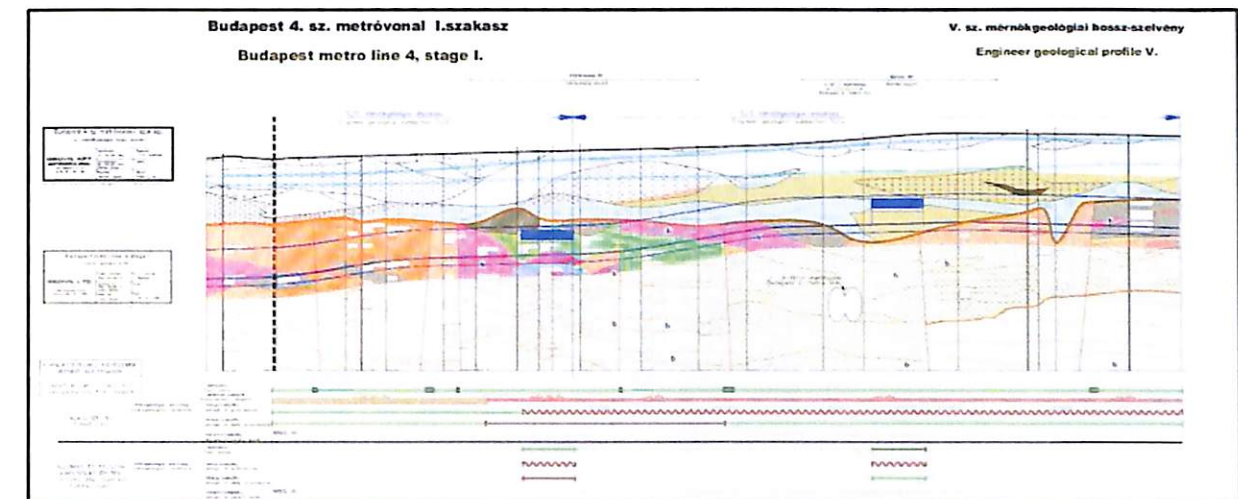
"C" mérnökgeológiai egység:

A néhány méteres feltöltés alatt az egykori Ős-Duna kanyarulatának szemcsés üledékei találhatóak, lefelé növekvő szemcsemérettel. E pleisztocén üledék vastagsága átlagosan 10-12 m, szélső esetekben a 15 m-t is elérheti. A talajvíz pleisztocén rétegekben áramlik és tározódik.

A pleisztocén rétegek alatt oligocén és miocén rétegek települnek. Az egység mérnökgeológiai hossz-szelvényét az alábbi ábrák mutatják be.



7. ábra: IV. mérnökgeológiai hossz-szelvény



8. ábra: V. mérnökgeológiai hossz-szelvény

Az alagút környezetében a Duna-parttól 100-150 m-re a felső oligocén kőzetekre folyamatos átmenet nélkül eróziós és szöglet bezáróan kereszttrétegzett alsó miocén rétegek települnek. Az alsó miocén rétegekre jellemző az alacsony karbonát kötésű homok, homokos kavics, kavicsos agyag és a 8-14 % karbonát tartalmú, kemény, finomhomok és iszap szemcseméretű márgás agyag rétegek.

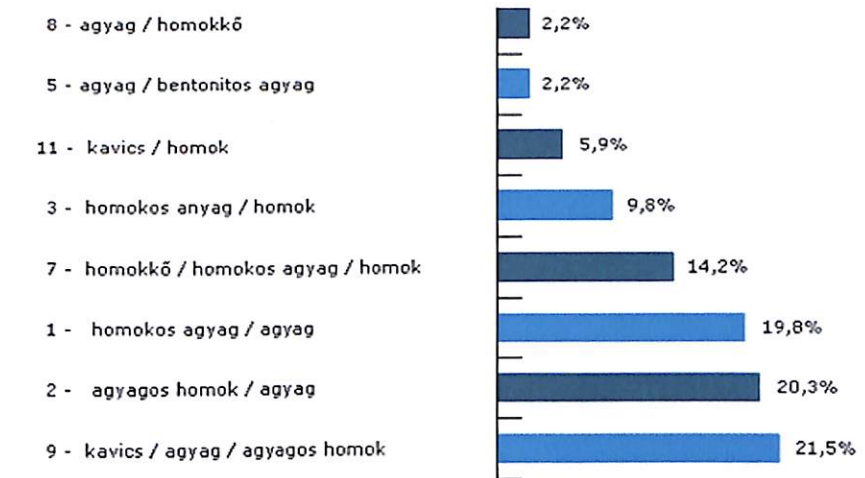
A miocén rétegek itteni megjelenésétől a Keleti pályaudvarig az alagút környezetében egyre fiatalabb, középső és felsőmiocén, kereszttrétegzett rétegek jelennek meg. Az alsó miocén rétegek a miocén tenger partszegélyi jellegeinek összessége, míg a fiatalabb miocén rétegek a váltakozóan transzgresszív és regresszív*, de folyamatában mélyülő tenger üledékei. Mérnökgeológiai szempontból ez azt is jelenti, hogy a Keleti pályaudvar felé haladva a homokos rétegek folyamatosan csökkennek és egyre jobban a konszolidálatlan agyag, bentonitos agyag jelenik meg, a néhány méterestől a 40 m-es tektonikai elvetődések mellett.

A miocén rétegekben tározódó rétegvíz néhol közvetlen kapcsolatban áll a pleisztocén talajvízzel, máshol nyomás alattivá válik. A rétegvíz nyomása néhány dm-rel nagyobb, mint a talajvíz nyomása.

A harmadidőszaki miocén korú rétegek keletkezéséből eredendően a laza, kohézió nélküli rétegektől a puha agyagokon át a tömör agyag és mészmárgáig terjedően

* transzgresszió: előrenyomulás; regresszió: visszahúzódás

találhatók a kőzetek. A jobb oldali alagút függőleges tengelyében felülről lefelé megjelenő kőzetcsoporthoz százalékos eloszlását a következő ábra szemlélteti.



9. ábra: A 'C' jelű mérnökgeológiai szakaszon a jobb oldali alagút függőleges tengelyében felülről lefelé megjelenő kőzetcsoporthoz %-os megoszlása

Az osztályozó vizsgálatok alapján a finomszemű homok illetve a kis szilárdságú homokkő rétegek iszapnak illetve iszapos homoklisztnek minősültek. Ehhez járult a viszonylag magas karbonát tartalom (16-36 %).

A karbonátos kötés következtében a kohézió igen tág határok között változik. A maximális kohézió finomszemű homokkőből származik. Ezen rétegek vastagsága azonban nem haladja meg a 0,5 métert.

Vízföldtani környezet:

A budai oldalon szoros értelemben vett talajvíz, nagyobb kiterjedésben és mennyiségben csak a holocén/korai pleisztocén árterén belüli területeken jelenik meg. A talajvíz általában a csapadékból kapja az utánpótlását, azonban a Duna II. teraszának vonalától (megközelítőleg a Fehérvári út vonala a II. és az I. magas ártéri terasz határa) a folyó irányába eső területeken a folyó mindenkori vízállása hatással van a talajvíz szintjére és áramlási irányára.

Az egyik fő áramlási irány a Duna, mint erózióbázis felé történő szivárgás (a Duna galériaként gyűjti magába a talajvizet). A talajvíz áramlásának másik fő iránya a Duna völgyére jellemzően É-D-i irányú.

A fenti áramlási képet némileg módosítja a dombokról lefutó kisebb patakmedreket követő áramlás. A patakok teraszvizének ezen völgyirányú mozgásai végül is a Dunában mint erózióbázisban végződnek, de helyileg attól eltérően, legtöbbször É-D-i szivárgási mezőt alkotnak.

A Duna alatti szakaszon nincs értelme talajvízről beszélni, azonban a Duna mindenkori vízszintjének hatását a környezet talajvízszintjére nem lehet figyelmen kívül hagyni. Átlagos talajvízszint esetén a talajvíz szintje a Duna felé esik, míg magas vízállás esetén a Duna vize visszatölti, illetve duzzasztja a talajvízszintet. A hatótávolság, ahol a visszaduzzasztás magassága meghaladja a normális vízszintingadozás értékét mintegy 400 m. Ezt támasztják alá az 1965. évi árvízi adatok, valamint a Miskolci Műszaki Egyetem tanulmánya, mely az É-D-i metróvonal részfalaszakaszának talajvízszintre gyakorolt hatását vizsgálta. Szintén erre a megállapításra jutott a Szent István Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Karának Közmű- és Mélyépítési Tanszéke, amikor az Erzsébet térre tervezett Nemzeti Színház munkagödör kialakításával kapcsolatban vizsgálta a Duna kihatását.

A pesti oldalon egy jellegzetes határvonal két különböző jellegű, származású és mozgású talajvízzel jellemzett területet választ el egymástól. A Duna pleisztocén kori mozgású talajvízzel jellemzett területet választ el egymástól. A Duna pleisztocén kori mozgású talajvízzel jellemzett területet választ el egymástól. A Duna teraszába bevágódott óholocén Duna keleti partjának feltételezett vonala ez. A Duna bevágódása a terasz nyugati peremét majdnem függőleges partfallá alakította. Ettől az ős parttól a mai Duna felé található az a terület, ahol a lecsiszolt térszínt az Ős-Duna holocénkori ártéri üledékei töltötték fel (alacsonyabb terasz szintek), míg e vonaltól keletre az úgynevezett magasabb terasz szinteket találjuk.

A talajvíz nagyobb része az infiltrációs csapadékvizekből, míg kisebb része a harmadkori fekvő konzekvens lejtésirányával egyező oldalirányú utánpótlódás és az élő vízfolyások (Szilas patak, Rákos patak) esetleges betáplálásából származik. A terület erózió bázisa a Duna, amely általában befogadó vízföldtani elem, másrészt a folyóparti területeken magas folyami vízállás esetén táplálja a talajvizet, míg a talajvíz szinthez képest alacsony vízállásnál apasztja.

A metróvonal vízminőségi szempontból két részre bontható: az első rész (Budaörs állomástól a Móricz Zsigmond körtérig) a lejtők talajvizének és a völgyi, lapályi talajvíz elterjedési területére jelölhető ki, míg a Móricz Zsigmond körtértől a pesti oldalon végig, ahol a Duna ártéri talajvíz jelenik meg.

I.3. Monitoring rendszerek az építés alatt és után

A környezet eredeti állapotába való beavatkozások miatt szükséges volt azok hatásainak megfigyelése az építést megelőző, az építés alatti és az azt követő időszakban. Ennek érdekében monitoring rendszereket kellett kialakítani és működtetni már az építés megkezdése előtt ("0" állapot mérés) a talaj-, réteg- és karsztvíz megfigyelésére.

Rendszeres észleléssel megállapították a talajvízszint-ingadozást, ami az esetleges változások alapidokumentumaként szolgált.

A felújított észlelő kutakban az addigi rendszertelen és ritka észlelések helyett be kellett vezetni a háromnaponkénti vízállásészlelést.

A talajvíz minőségének meghatározására havonta vízmintát vettek és elvégezték a szükséges vizsgálatokat.

A talajvízminőség ellenőrzésére a vonal 29-31 és 39-45 szelvények közötti szakaszán egy-egy megfigyelő kutat építettek a várhatóan legnagyobb SO_4 tartalmú helyre.

A beruházás keretében minden tervezett állomás környezetében 2-2 új talajvízfigyelő kutat létesítettek a talajvízszint-változások regisztrálására. Az állomások felszíni csatlakozásai és az egyes helyeken felszínről módosított állomásépítmények esetenként lokálisan átharántolják a talajvíztartó réteget. Lokális kiterjedésük befolyásolhatja a talajvíz áramlását. Kis körzetben ez tartós talajvízszint-emelkedést jelenthet, melyet szükség esetén műszaki beavatkozással semlegesíteni kell.

A felszín alatti vizek megfigyelésére vonatkozóan olyan (szabványos) figyelőkutak létesítése vált szükségessé, amelyek segítségével a vízszintek észlelése mellett (szivattyúzott) vízminták vételére is lehetőség volt. A figyelőkutak tervéhez hozzá

tartozik azok műszerezettségének terve, valamint a teljes észlelőkút-hálózat észlelési utasítása is.

A rétegvíz a metróvonal mentén csak a Gellért-hegy Duna alatti átvezetés szakaszán kerül olyan magasra, hogy hathatott volna rá a metró építése. Ezen a szakaszon az észlelési rendszer feladata a metró biztonságának megoldása mellett a Duna menti meleg karsztvíz-bázis változatlan megőrzése is volt. Erre a nagyrészt meglévő kutakat is a megfigyelési rendszerbe kellett állítani. Folyamatos vízszint- (nyomásszint-) észlelést biztosítottak a Gellért-, Rudas- és Rácz-fürdők térségében. A kutaknak alkalmasnak kellett lenniük a vízhőmérséklet és a vízminőség időszakos észlelésére is.

A Szent Gellért téri metróállomás körzetében a karsztvíz megfigyelésére új figyelőkutat telepítettek, melynek rendszeres vizsgálatát írták elő. Ezen karsztvíz-megfigyelő kútnak az alábbi feladatokra kellett megfelelnie:

- a) a főkarsztvíz-tároló közet elérésére és észlelésére;
- b) az úgynevezett fedett karsztvíz nyomásszintjének, vízminőségének és hőmérsékletének észlelésére;

A rétegvíz észlelése az építés alatt döntően a víz minőségére kellett, hogy vonatkozzon. Ennek érdekében a nyílt homlokú építés során 50 méterenként kellett vízmintát venni és elemezni a talajvíznél megadott összetevőkre.

Az összes észlelést az építés után egy évig az építés alatti előírásoknak megfelelően folytatták.

A vízmonitoring mellett szintén fontos szerepet játszik az építmények mozgását megfigyelő, geodéziai alappont hálózaton alapuló mozgás monitoring rendszer, amely részletesen a következő fejezetben kerül ismertetésre.

II. Alagútépítés

A föld alatti létesítmények építéstechnológiáját több tényező alapján választják meg. A geológiai, hidrogeológiai szempontok mellett fontos a létesítmény funkciójának leginkább megfelelő geometriája, magasságbeli elhelyezkedése (fenékmélység, a földem feletti földtakarás stb.). Meghatározó szempont az alkalmazott építéstechnológiának az épített és természeti környezetre gyakorolt hatása, valamint a sűrűn beépített városi környezetben nem elhanyagolható a humán környezetre gyakorolt hatása sem. Az építéstechnológia helyes megválasztása fontos az építéssel járó, kialakuló süllyedések és a mindig meglévő építési kockázatok mérséklése érdekében.

Az építéstechnológia kiválasztásánál a lehetséges legkisebb kockázatra törekedve, mérlegelni szükséges minden ismert befolyásoló tényezőt, a funkció és a gazdaságosság szempontjait figyelembe véve.

A föld alatti műtárgyak – ha függetlenítjük az építés környezetétől – megépíthetők nyitott és zárt építési módszerrel is. Az alagútépítés e két alapmódszere a XIX. század második felére alakult ki. Kezdetben elterjedtebb volt a nyitott építési mód, amellyel a Millenniumi Földalatti Vasútvonal is épült. Az építés többnyire kézi erővel, nyitott munkagödörben folyt, de már az akkor igen korszerűnek tekinthető építő géplánc használatával is segítették a munkát. Míg a nyitott módszer lényege, hogy a műtárgy helyét a felszínről kitermelik, majd miután elkészült, újra lefedik, a zárt módszer esetében a föld alatti munkaterületet csak néhány szállításra és szellőztetésre kialakított akna köti össze a felszínnel. A zárt építési mód esetében a robbantás, fúrógépek és egyéb gépesítés mellett is az alapvető technológiát sokáig a bányászati módszerek jelentették. Később az építőipari gépek fejlődésével kialakult a pajzsos alagútépítési módszer, amellyel a munkavégzés időtartama jelentősen lerövidíthető.

A megfelelő alagútépítési mód kiválasztásához több tényezőt kell figyelembe venni. Fontos szem előtt tartani, hogy a vonalvezetés teljes hosszát egészében kell vizsgálni. Olyan építési módot keresünk, ami az elvárt kritériumok legoptimálisabb megvalósításához közelít. A tenderidőszakban még nem áll rendelkezésre minden adat, csak néhány alapadat van, amiből ki lehet indulni és később ebből pontosítani a

terveket. Három fő rendező elvet szinte minden esetben le lehet fektetni. Ezek a következők: a feladat műszakilag megfelelő elvégzése, a legkedvezőbb áron, a legrövidebb idő alatt. A feladat az adott műszaki cél, amire a beruházó a forrásokat biztosítja.

Az alagútúró gépek alkalmazása és a pajzsos módszer csak hosszú alagutak esetén gazdaságos, míg rövidebb szakaszok esetén inkább bányászati módszert alkalmaznak. Az alagútúró gép beszerzési költsége igen magas, ezzel szemben viszonylag kedvező áron képes alagutat építeni. Éppen ezért lehetséges az, hogy a hosszabb alagúton a fajlagosan szétosztó beszerzési költség esetén olcsóbb lehet más technológiáknál, mint például az lőtt betonos. A bányászati módszerhez szükséges gépek beszerzése jóval alacsonyabb egy alagútúró gépnél. Így rövidebb alagutak esetén egyértelműen olcsóbb. Az építési mód kiválasztása tehát egyértelműen függ az alagút hosszától. A geológiai viszonyok határozzák meg az alagútúró gép megfelelő kialakítását, illetve a bányászati módszernél alkalmazandó esetleges ideiglenes biztosításokat a lőtt betonon felül, mint például horgonyzás stb. Ezért a technológiák megtérülését befolyásolják a geológiai viszonyok is. Általánosságban elmondható, hogy 1-3 km között változik az alagúthossz, amelytől a pajzs olcsóbb lehet a bányászati módszernél.

A gazdasági szempontokon felül mindkét technológiával kapcsolatban megemlíthetők műszaki érvek és ellenérvek egyaránt. Ezek alapján eldönthető, hogy kettős lehetőség esetén mikor melyik kedvezőbb.

A bányászati módszer előnyei

- ✓ Geometriai rugalmasság
- ✓ Geológiai rugalmasság

A pajzs és alagútúró gép előnyei

- ✓ Állandó minőség és biztonság
- ✓ Nagyobb fejtési sebesség

Azt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az alacsonyabb beszerzési költség miatt a bányászati módszer esetében akár több gép beszerzésével, egyszerre több helyen is el lehet kezdeni az alagút építését, akár egy alagutat két oldalról. A pajzs esetén nem lehet kezdeni az alagút építését, a magas ára miatt. Ráadásul technológiája miatt csak érdemes sok gépet beszerezni, a magas ára miatt. Ráadásul technológiája miatt csak előre tud haladni, így a két oldalról indított alagút építése csak speciális esetekben képzelhető el, mint például a Csalagútnál. Jelen esetben kettőnél több fúrógép

beszerzése nem lett volna kifizetődő, míg a bányászati módszerek esetén 4-6, de akár nyolc csapat is végezheti a munkát egyszerre. Bár a pajzs fúrási teljesítménye mellett a bányászati módszerek nem tudják felvenni a versenyt, még úgy se, hogy nagyjából 1 km-es szakaszon akár napi 5-6 m haladás feltételezhető teljes keresztmetszetben. Viszont ha azt is figyelembe vesszük, hogy amíg az alagútfúró gépet megtervezik, összeszerelik, darabokban leszállítják, majd újra összeszerelik és a kezdeti tesztüzemet is lebonyolítják, több mint 10 hónap telik el. Ez alatt az idő alatt a bányászati technológiával már lehet dolgozni, ekkor már fordul a kocka az előre haladási sebességet illetően.

A bányászati módszerrel való alagútépítés nagy előnye, hogy a tervezés után rögtön neki lehet állni az alagút építésének. A pajzsos technológiával szemben nem kell megvárni a géplánc megtervezését, megépítését. Az építést kevésbé akadályozza a várttól eltérő kőzet, mert könnyebben lehetséges a változásokhoz alkalmazkodni. Ezzel szemben a technológia sokkal nagyobb építési kockázatot rejt magában, illetve nagyobb felszíni süllyedésekre lehet számítani. A módszer másik nagy előnye, hogy erőforrások bevonásával, akár egyszerre nyolc helyen dolgozva fel lehet gyorsítani a munkát. A közepes keménységű kőzetekben, ahol marógömb alkalmazása javasolt, ott az átmérő miatt szükséges megvizsgálni, hogy lehetséges-e egyáltalán egyszerre teljes keresztmetszetben fejteni. Feltételezhető a minimum két lépcsőben való, kalot és ellenbolt fejtés. Napi 0,5 m-nél nagyobb előre haladás nem várható, illetve ha tovább szükséges a homlokot osztani, az tovább lassíthatja az előrehaladást. Az említett haladási sebességek csak a lőtt betonos ideiglenes megtámasztással értendők. A szigetelés és a végleges falazat készítése zsaluzó kocsival csak később, az alagút fejtése után lehetséges. A végleges falazat kivitelezése viszont a már teljes keresztmetszetben kifejtett, ideiglenesen biztosított alagútban valósítható meg.

A 4-es metró tervezése során több kérdés is felmerült, melyeket tisztázni kellett ahhoz, hogy pontosítani lehessen a beruházás ütemezését és az egyes kivitelezési feladatok lehatárolását a közbeszerzési eljárások lebonyolításához. A legfőbb kérdés az volt, hogyan lehet a vonalalagutat a lehető leggyorsabban, leggazdaságosabban, legbiztonságosabban és a főváros életét legkevésbé zavaró módon megépíteni. A

szakértői vélemények és hozzászólások alapján körvonalazódott a megvalósításra vonatkozó koncepció. Ennek főbb elvei a következők voltak:

- A vonalalagutakat Kelenföld pu. ideiglenes végállomás felől kell megépíteni.
- Mindkét alagutat egyszerre kell építeni. (Természetesen a felszíni süllyedések minimalizálása érdekében a két alagút időben és térben eltolva épült.).
- Az alagutakat korszerű, aktív megtámasztású, zárthomlokú pajzsokkal kell megépíteni, elsősorban a pesti oldalon legfeljebb 5-20 mm közötti felszíni süllyedéseket megengedve.
- A Szent Gellért teret elérve a pajzsok további működtetéséhez át lehet telepíteni a Műegyetem rakpartra a kiszolgáló telepet. (Ennek két előnye is van: egyrészt lerövidül a pajzskiszolgálás időszükséglete, másrészt az elkészült alagút és a budai oldali állomások belső beépítését zavartalanul lehet végezni.)

A pajzsindító műtárgy helye tehát a Kelenföldi pályaudvarnál lett kijelölve, amely nemcsak a pajzsok összeszereléséhez és az alagutak építésének kiszolgálásához adott helyet, hanem jelenleg a járműtelep felé is biztosítja a vágánykapcsolatot.

II.1. A pajzsos alagútépítés

A budapesti metróépítés történetében az első pajzsos alagútépítés a Rákóczi út alatt kezdődött 1952-ben. A vonalalagutak helyén előbb bányászati módszerrel betonszerkezetű pajzskamrákat építettek, ezekből indították a pajzsokat a Keleti pályaudvar felé.



10. ábra: Alagútépítő pajzs a kelet-nyugati metró vonalán 1952-ből

Az építés általában levegő túlnyomásos térben (keszonban) történt, mivel az agyagrétegekbe települt vékony homokerek, vetők bevezették volna a vizet a munkatérbe és ez volt a legmegfelelőbb megoldás a nem kívánatos víz távoltartására. A pajzsokba 22 előretoló hidraulikus sajtó volt beépítve, egyenként 1 MN tolóerővel. Az elért haladás átlagosan naponta 1,5-2 m volt a meglehetősen időigényes tűzés, kézi fejtés és rakodás miatt. A falazat anyagaként öntöttvas tübbingeket alkalmaztak. Az előbb leírt úgynevezett kézi pajzsok mellett a teljesítmény növelésére szovjet SCSN-1 típusú mechanikus pajzsokat is alkalmaztak. Ezek a pajzsok sokszor napi 5 m-t is haladtak. A beépített falazat részben vasbeton blokk, részben öntöttvas tübbing elemekből állt. A későbbiekben – az észak-déli vonal építésénél – a két mechanikus pajzsot átalakították. A vonal magasabb fekvése miatt ugyanis a marótárcsa aláfejtéséből származó esetleges szakadások elérhették volna a vízdús homokos kavics réteget is. Ezért a rotort kiszerezték és a pajzs szerkezetének átalakításával két munkaszintet alakítottak ki, a felső munkaszint alá két Schaeff típusú fejtő-rakodó gépet építettek be. Az előrehaladás sebessége így naponta 6-7 m-re gyorsult. A faroklemez tömítésére a Westfalia cég által gyártott gumiprofilt alkalmazták, a pajzsok irányításához pedig bevezették a lézeres kitűzést.

Napjainkban az alagutak a legváltozatosabb talajviszonyok között, a legkülönfélébb környezetben, esetenként kis takarással is épülhetnek, ezért a különböző igények kielégítése érdekében a legkülönbözőbb pajzstípusok és technológiák kialakítása vált szükségessé. Az építési tapasztalatok alapján egyre több újabb megoldás született. Ma már a legkülönösebb helyzetek megoldására is van bevált gyakorlati módszer.

A budapesti DBR metróvonal első, megépült szakaszának építésénél alkalmazott korszerű alagútépítő pajzsok lényegesen különböztek a korábbi két metróépítésen alkalmazott nyitott homlokú alagútépítő pajzsoktól. A nemzetközi gyakorlatban a különböző, esetenként extrémnek számító építési környezetekben is sikeresen hajtott alagútépítések igazolták, hogy a pajzsok gyakorlatilag minden, hajtás közben előforduló probléma kezelésére alkalmasak.

A pajzstípus kiválasztásának egyik legfontosabb szempontja az, hogy a pajzs az indulási és érkezési pont közötti szakaszon harántolandó összes talajtípus fejtésére alkalmas legyen. A budai oldalon az altalaj átlátában kemény márga, és az előzetes vizsgálatok szerint vízbetörés sem volt várható, ezen a szakaszon nyitott homlokú, keresztfejtős pajzs is számításba jöhetett volna. Ezzel szemben a Duna alatt a vízbetörés kockázata miatt és a pesti oldalon a kevésbé állékony kavicsos feltöltésben zárt homlokmegtámasztású pajzssal kellett tervezni.

Hasonló talajkülönbség egy alagúton belül máshol is előfordult már, emiatt fejlesztették ki a többcélú "mixshield" vagy "polyschild" elnevezésű alagútépítő pajzsokat. Ezeket úgy lehet átalakítani nyitott homlokúról zárt homlokmegtámasztásúra, hogy a pajzsot közben nem kell kiemelni. Ezt az átállítást a DBR metróvonal esetén a tervező a Szent Gellért tér állomásnál irányozta elő. Innen tehát a pajzsok zárt homlokmegtámasztással haladtak volna át a Duna alatt és végig a pesti szakaszon. A zárt homlokmegtámasztás biztosíték arra, hogy sem kőzetbetörés, sem nagy mennyiségű, bármilyen eredetű víz nem áraszthatja el a pajzsot.

A pajzs külső szerkezete egy zárt acélhengerből és egy fejtő-homlokmegtámasztó tárcsából áll. A forgó tárcsa fejtő a homlok előtti kőzetet, ami a tárcsán lévő nyílásokon át bejut a munkakamrába, amely a pajzs hátsó részétől vízzáró acélfallal van lezárva. A

munkakamrában a kifejtett kőzetet plasztifikáló anyaggal keverik, ami lehet víz, polimer habok (EPB pajzs) vagy bentonitos szuszpenzió (hidropajzs). Ez a keverék támasztja meg folyamatosan a pajzs fejtőtárcsája előtti kőzetfalat és gátolja meg az esetleges vízbetörést vagy omlást. A munkakamrából a kifejtett földet is tartalmazó pépes keverék zárt, szabályozható nyílású szállítócsövön át a pajzs vége felé távozik, majd vagy csillében, vagy az alagúton keresztül csövön, szállítószalagon vezetve a felszínre, vagy esetén a felszínen lévő szeparátorba jut. A zárt szállítócső tolózárrakkal bármikor lezárható. A hidropajzs esetén a friss szuszpenzió utánpótlás is zárt csövön érkezik a zárt homlokkamrába a felszínről az alagúton át. A zagy nyomása a munkakamrában sűrített levegővel szabályozható. A szabályozással érhető el a homlokon jelentkező föld- és víznyomás ellentartása a mindenkori hidrosztatikus nyomásnak megfelelően. A benyomott anyag, és az elszállított zagy mennyisége folyamatosan ellenőrzött, így a káros üregképződés kizárt. A rendszer azonnal reagál arra is, ha a homlokon hirtelen nagymennyiségű, nyomás alatt álló víz, karsztvíz jelentkezik. A zárt rendszerbe ilyen módon esetleg bekerülő víz hatására a kamrában megnövekszik a nyomás. Ez a körülmény azonban nem akadályozza a pajzs továbbhaladását, mellyel végül együtt jár a homlokon jelentkezett víz elzáródása is. Mivel nincs nagyobb kitámasztó nyomásra szükség, mint a homlokon jelentkező föld- és víznyomás, a rendszer gyakorlatilag folyamatosan egyensúlyban van.

Az előregyártott elemekből álló alagútfalazatot a pajzs hátsó részén elhelyezkedő erektorral a pajzs faroklemezen belül szerelik össze, gyűrűként. Egy gyűrű több elemből áll. Az elemek között ideiglenes csavarkapcsolat van és egyúttal olyan gumi, vagy műanyag tömítő rendszer, amely a falazatnak azonnali vízzáróságot biztosít. Az alagútfalazatot körülvevő hátúrt speciális cementhabarccsal töltik ki, párhuzamosan a pajzs előrehaladásával, ahogy az összeszerelt tübbing-gyűrű a pajzs előresajtolása révén a pajzs faroklemezéből kikerül. Víz tehát a falazaton keresztül sem juthat be az alagútba. A pajzsot mindig a legutolsó szerelt gyűrűre támaszkodva nyomják előre a pajzsba beépített hidraulikus sajtok. A pajzs faroklemeze és az alagútfalazat közötti hézagot csúszó vízzáró tömítés (több soros zsírral tömített rézkefe), és különleges helyzetben egy gyorsan felfújható második véstömítő gyűrű zárja le.

A 4-es metró fúrópajzsai

A budapesti 4-es metró építésére a korábbiakban részletezett változó kőzet- és talajvízviszonyok figyelembe vételével a Herrenknecht AG két azonos EPB (aktív földnyomás megtámasztású) pajzsot készített schwannai gyárában. Ezek az alagútépítő pajzsok alkalmasak voltak a tervezett nyomvonalon előforduló minden talajtípus fejtésére, biztosítva a napi átlag 12-15 méter előrehaladási sebességet és a maximum 5-20 mm felszíni süllyedést.



11. ábra: A 4-es metró egyik fúrópajzs a gyári átvételkor

Az első pajzs 2006. október elején készült el, az üzemi próbákat követően szétszerelték és Budapestre szállították. Az Etele térnél elkészült pajzsindító műtárgyban újból összeszerelték, majd a beüzemelés után, 2007. április elején indulhatott meg az alagútépítés.

Az EPB pajzsok hidraulikus meghajtású, monoblokkos marótárcsájú berendezések, ami azt jelenti, hogy a marótárcsa a gyárból a szerelés helyére egy darabban érkezik és kerül beépítésre, és gyakorlatilag csak roncsolásos módszerrel bontható. A gyártás során azonban több darabból állítják össze. A marótárcsa magja egy 3 méter átmérőjű acél öntvény, amelyhez hozzá hegesztették az acéllemezekből összeállított homlokot. Ezen a homlokon találhatók a beépített körmös és tárcsás fejtő szerszámok. A központi fejtő szerszám egy körmös szerszámsor, de ezt szükség esetén tárcsás szerszámmra lehet cserélni. A szerszámok elhelyezése olyan, hogy mindkét forgásirányban biztosítják a

teljes keresztmetszetű fejtést. A marótárcsa anyaga S355 minőségű acél, a szerszámok nagy keménységű, kopásálló acélból készültek. A tárcsa felületén nagy keménységű lapkák vannak felhegesztve, hogy ne a tárcsa kopjon. Négy szerszámban kopásérzékelő szenzor van beépítve, ami a pajzs központi vezérlő egységébe van bekötve, így csak jelzés esetén szükséges a munkatérbe bemenni szerszámot cserélni. A marótárcsát 8 darab hidraulikus motor hajtja, amelyek mindkét irányban tudják forgatni a marótárcsát. Erre az óriási forgatónyomaték okozta elfordulások korrigálhatósága miatt van szükség. A kifejtett kőzet a marótárcsa nyílásain keresztül a munkakamrába hull, ami egy nyomásálló zárt fallal van elválasztva a pajzs többi, munkavégzésre szolgáló területeitől. A fejtett talajt a homlokkamrából egy csavaros orsóval emelik szállítószalagra, melynek segítségével távozik a már megépült alagútszakaszon keresztül. A homlokkamra telítettsége az orsó üritőnyílásának változtatásával szabályozható. A pajzsköpeny belső kontúrja mentén 11 db hidraulikus sajtó támaszkodik az elkészült alagútfalazatra, így nyomva előre a gépet. A homlokon keresztül geológiai feltáró előfúrások végzésére a marótárcsán körbe több ilyen fúrásra alkalmas nyílás van, melyek átmérője 100 mm.

A pajzsokat alapvetően kétféle üzemmódban lehetett működtetni, nyitott és zárt üzemmódban. Nyitott üzemmód esetén gyakorlatilag úgy működnek, mint a mechanikus pajzsok. Ilyen üzemmódban tervezték a budai oldalon, a kemény és tömör kiscelli agyagban való haladást. Közvetlenül az indulást követően a talajpépesítő hab keverékének beállításához zárt üzemmódú EPB pajzsként alkalmazták. A hab buborékai a talaj pórusaiban rugalmas párnaként működtek, csökkentették annak térfogatsúlyát, belső súrlódását és vízáteresztő képességét, így módon ideális plaszticitású talajpép képződött. A habosító oldat vízből, habképző ágensekből és stabilizáló polimerekből állt. A pajzsláncban keverték, és sűrített levegővel, fúvókákon keresztül nyomták a vágótárcsa elé és a tárcsa mögötti térbe. A hab a kifejtett anyag 30-60%-a, környezetbarát és gyorsan lebomlik. A süllyedések kedvező alakulása miatt nem is álltak át a tervezett nyitott üzemmódra, és a budai szakaszt nagyobb részt zárt üzemmódban hajtották végig. A Duna alatt és a pesti oldalon már a puhább és lazább talajok és a talajvíz jelenléte miatt nem álltak át a nyitott módszerre.

A pajzsok átmérője 6,05 méter, a teljes géplánc együttes hossza pedig 116 méter. Az alagútfúró pajzs kiszolgálását hat kocsis vasúti szerelvény biztosította, melyből egy az egy gyűrűbe beépítendő tűbbingeket, egy az injektáló anyagot (kb. 7 m^3) vitte be a pajzshoz, a többi négy pedig szintén egy gyűrűnyi, a homlokon kifejtett földet szállította ki. A szerelvény mozgását két diesel mozdony végezte, önálló keskeny nyomtávú vasúti pályán, melyet folyamatosan építettek, ahogy haladt előre a pajzs. A szerelvény felszínről történő kiszolgálása a felszínen mozgó két bakdaruval és egy nagy kapacitású toronydaruval történt, a leadónyílásokon keresztül. A pajzshoz a felszínről egy 1,0 méter átmérőjű, a fötébe rögzített flexibilis csövön keresztül nyomták be a friss levegőt, így biztosítva a szerelőtér levegőellátását.



12. ábra: A teljes géplánc együttes hossza 116 m

Energia igény: egy pajzs működtetéséhez 4,1 megawatt, a kiszolgáláshoz további 1,7 megawatt teljesítményre volt szükség.

Az alagút falazata előregyártott vasbeton tűbbing elemekből épült, melyet a pajzs előrehaladásával párhuzamosan, gyűrűként szereltek össze. Egy tűbbinggyűrű öt szegmensből és egy ék alakú záróelemből áll, illetve maga a gyűrű is ékes kialakítású, a záróelemnél 145 cm, a gyűrű túloldalán 150 cm széles – az irányváltások kialakíthatósága érdekében. A gyűrűn belül az elemek sík felülettel csatlakoznak

egymáshoz, az egyes gyűrűk között pedig hornyos kapcsolat van. A gyűrűket egymáshoz képest elforgatva, kötésben helyezték el, a szerkezet statikai rugalmasságának és folytonosságának biztosítására, valamint így a tervezett hosszszelvénynek megfelelően lehetett az alagutat megépíteni. A tübbinggyártás megszervezése és a helyszínrre szállítás az alagútépítést kivitelező cég feladata volt. Így a kivitelező saját érdekeltségű betonelemgyártó üzeme, a szlovákiai Seréden működő ZIPP betonelemgyár végezte a tübbingelemek gyártását és azok helyszínrre szállítását.

A gyártáshoz nyolc sorozat sablont rendeltek, melyeket egy francia cég szállított. Egy sorozat sablonnal egyszerre egy komplett gyűrű elemei készültek el. A tervezett technológia szerint egy sablonban naponta két elemet lehetett legyártani. A tervek szerint – a pajzsok várható előrehaladásából számítva – naponta 16 gyűrű, azaz 96 darab tübbing gyártására volt szükség. A sablonok tervezett élettartama egyenként körülbelül 1500 elem legyártására adott lehetőséget, ez összesen 12 000 gyűrűt jelent, ami elegendő lehetett volna az I. és az akkor még tervezett II. szakasz megépítéséhez.

A tübbingek betonminősége C50/60 XA3, XV3 (H), CI 01, D_{max} 16.

A 4-es metró nyomvonala a budai oldalon olyan területeket is érint, ahol a talajvíznek jelentős a szulfáttartalma. A tervezők ezt a tényezőt figyelembe véve megvizsgálták, mely szakaszokon kell szulfátálló cementtel készített tübbingeket alkalmazni. A vizsgálat eredménye viszont arra mutatott, hogy célszerűbb az összes elemet szulfátálló cementtel készíteni, ezért a kivitelező úgy döntött, hogy a tübbingek gyártásához csak szulfátálló cementet használ.

A tübbingek tűzállóságának javítása érdekében speciális kiegészítő anyagot, Krampefibrin PM 6/42 műanyag szálát is adtak a keverékhez $1,0 \text{ kg/m}^3$ mennyiségben.

A tübbingeket közúton, teherautóval szállították a 176 kilométerre lévő Budapestre. Egy kamion egy komplett gyűrű elemeit szállította, szigorú menetrend szerint, mivel a munkahelyi tárolókapacitás a tervezett építési ütemhez képest alacsony volt.

A tűbbing elemeket a pajzs faroklemezénél lévő erektorral emelték a helyükre. Az erektor emelőkarja vákuum segítségével fogta meg az egyes, akár 3,5 tonnás előregyártott falazati elemeket és tette a helyére.



13. ábra: Az erektor működés közben

A marótárcsa által kifejtett keresztmetszet és a megépített alagútfalazat között képződött mintegy 15 centiméteres hátúrt megfelelő összetételű habarccsal kellett kitölteni, a felszíni süllyedések minimalizálása érdekében. A hátúr kitöltés további célja a talajjal való hatékony kapcsolat kialakításán és az omlás rövidtávon történő megakadályozásán felül a tűbbingek azonos ágyazási viszonyainak megteremtése és a többlétszigetelés biztosítása.

Az állomási dobozokba történő ki- és betörések biztosítása érdekében a budai oldalon a kedvezőbb talajviszonyok (a kemény kiscelli agyag) lehetővé tették az egyszerű injektáló ernyő alkalmazását. A Duna alatt és a pesti oldalon azonban a nagyobb veszélyt jelentő talajvíz betörésének megakadályozása, illetve elkerülése érdekében más módszert kellett alkalmazni. A kivitelező betondugó alkalmazása mellett döntött. A betondugó mintegy 10 méter hosszú, a pajzs átmérőjénél nagyobb keresztmetszetű, speciálisan vasalt betontömb, melyet közvetlenül a talajból, illetve talajba történő ki- és betörés helyén építettek meg. Az eljárás egyszerű, de a pajzs elhaladása után, a pajzskiszolgálás szüneteltetésével a betondugó megmaradt részeit el kellett bontani.

Az építés organizációjának legnehezebb eleme az állomásépítési és alagútépítési feladatok összehangolása volt. A problémát az jelentette, hogy a pajzsok beérkezése előtt legalább egy hónappal már biztosítani kellett az alagútépítő részére a

munkaterületet az alaplemezen, és amíg a pajzsok kiszolgálása az állomáson keresztül bonyolódott, addig az állomásépítő nem tudott dolgozni az alaplemez szintjén. Így például, ha az állomásépítő nem készült el a vasbeton bélésfallal a pajzsok érkezéséig, akkor úgy 9-10 hónap múlva tudott csak a bélésfal építéséhez hozzáférni.

A tervek szerint előreláthatóan 84 hétre becsülték az Etele tér és Keleti pályaudvar közötti 7,4 km hosszúságú alagút megépítését. A kivitelező konzorcium szerződésében akkor 107 hetet vállalt arra, hogy az új metró első szakaszának alagútjait megépíti, azaz 2009. nyár közepére kellett volna elérniük a Keleti pályaudvart. Az első néhány száz méteren akadtak műszaki nehézségek, de ez természetes minden pajzs tesztüzemében. A később felhalmozódott késedelmet azonban a telekszerzési problémák, az engedélyeztetési folyamatok elhúzódása, a megbízó és a kivitelező közötti műszaki és jogi viták, illetve a többletkövetelések elfogadásának kikényszerítésére bejelentett sorozatos leállások okozták. A pesti oldal problémamentesen épült meg. 2010 nyarára fejeződött be az alagútépítés, ekkorra érték el a pajzsok a Keleti pályaudvarnál lévő állomási műtárgyat. Viszont a pesti oldali alagutak az állomásokon a tervezettnél sokkal lassabb áthaladások miatt így is csak hozzávetőleg 56, illetve 52 hét alatt – azaz a tervezetthez képest fél évvel később – készültek el.

Érdekes adatok az alagútépítésről:

- Az alagútépítési rekord 31,5 méter/nap volt (a legtöbb, amit egy pajzs 1 nap alatt megépített).
- A pajzsok átlagsebessége a budai oldalon körülbelül 11, a pesti oldalon kb. 16 méter/nap volt.
- A kész alagút összesen 3.750 db alagútgyűrűből áll.
- Az alagútba beépített tübbingek száma kb. 22.500 db.
- Egy alagútgyűrű tömege összesen 18,5 tonna.
- A pajzsokon váltásban, folyamatosan mintegy 60 ember dolgozott és még nagyon sokan segítettek a pajzsok kiszolgálását, illetve a pajzsok működéséhez köthető felszíni munkákat.
- Egy alagút építésénél nagyjából 135.000 m³ földet termeltek ki.

II.2. Alagútépítés bányászati módszerrel

A pajzsos alagutakon kívül több olyan műtárgyat kellett kialakítani, amelyeket csak bányászati építési technológiával lehetett kivitelezni. Ilyenek az állomásokhoz kapcsolódó szellőző és vonatfordító műtárgyak, valamint a 300 m-enként kialakított vonali összekötő (menekítő) alagutak, de akadtak olyan állomások is, ahol a felszínen rendelkezésre álló terület nem volt elegendő az állomás kívánt hosszának kialakításához, ott peron- és csarnokalagutak is készültek bányászati módszerrel. A műtárgyak mérete – funkciójuktól és helyzetüktől függően – nagyban eltér egymástól. E föld alatti műtárgyak keresztmetszetei 12–113 négyzetméter között, a hosszuk pedig 6–101 méter között változik.

A bányászati módszerek lényege, hogy az egyszerre kifejtendő üreg keresztmetszetét, illetve az ideiglenes megtámasztását a kőzet átboltozódási képességének megfelelően határozzák meg. A két régebbi metróvonal csatlakozó üzemi technológiai műtárgyait, illetve a kelet-nyugati metróvonal vonalalagútjainak 1/3 részét is hagyományos zárt bányászati módszerrel építették. A talajviszonyoktól függően a bányászati építési mód különböző változatait alkalmazták, leggyakrabban a belga módszert, nagyobb szelvénynél vagy kedvezőtlen talajban a német (fa megtámasztásos) módszert. Jelentős hosszban végeztek teljes szelvényű alagútépítést is, elsősorban a budai márgában.

A 4-es metró esetében csak az új osztrák építési módszert (NÖT) alkalmazták. Ez egy viszonylag új eljárás, nagyobb, szabadabb munkatér, gépesített fejtés, acél dúcolatok, a löttbeton nagy mértékű alkalmazása és kőzethorgonyzás jellemzik. Eredetileg hegyi alagutaknál, szilárd kőzetben alakult ki ez a módszer Ausztriában, de idővel kiterjesztették kohézióval rendelkező iszap és agyag talajokra is. Mivel az eljárás lényege, hogy a műtárgyat körülvevő kőzetet bevonják a teherviselésbe, így csekélyebb megtámasztás is elegendő lehet, vékony löttbeton réteg formájában, acél ívtartók és hegesztett hálók segítségével, a kőzettel szorosan együttműködve. Ennek előnye, hogy az építésnél az alagútszelvény dúcolás nélkül szabadon marad, lehetőséget adva ezzel nagyobb munkagépek alkalmazására. További előny, hogy ezzel a módszerrel különféle, rendkívül változatos és bonyolult keresztmetszetek, illetve összetett

szelvények is kivitelezhetők. Rövidebb alagúthossz esetén gazdaságos. A szigetelésre szórt műanyag membránt alkalmaztak vagy alagúti PVC fóliát hegesztett kivitelben. A hegesztett alagúti fólia szigetelés alá a lőttbetonos héj felületi kiegyenlítése után geotextíliát rögzítettek. Ezután következett a szigetelést védő bevonat lövése a belső héj vasszerelése előtti védelem céljára. A végleges falazat szerelt vasalással készült, zsalukocsi alkalmazásával vagy egyedi zsaluzással, illetve acélszál erősítésű lőttbetonnal. A szerkezet előírt tűzállóságát (TH=120 perc) 5 cm vastagságú, égésgátló polipropilén szál adalékkal kevert lőttbeton réteg felhordásával biztosították. Az alagútépítést folyamatos monitoring rendszer követte, mely felszíni és helyi geodéziai ellenőrző méréseket, inklinométeres, extenzométeres és piezométeres méréseket is magában foglalt.

Fontos megjegyezni, hogy ez az építési mód csak olyan körülmények esetén alkalmazható, ahol nincs számottevő vízbefolyás, vízáramlás a kibontott üregbe. Amennyiben jelentős vízbefolyás veszélye áll fenn, úgy külön gondoskodni kell a munkaterület víztelenítéséről. (A Rákóczi téri állomás így épült meg.) Az üreg kibontásakor az üreg közvetlen környezetében jelentős változások lépnek fel a kőzet feszültségállapotában. Az üreg körüli kőzetgyűrű terhelést vesz fel és ennek következtében fokozatosan elmozdulásokat végez. Kezdetben ezek az elmozdulások jelentős növekedést mutatnak, a lőttbeton beépítésére azonban a mozgások sebessége lecsökken. Az építés a felső boltív beépítésével kezdődik. Ennek hatására azonban még legtöbbször nem csökken le jelentősen a mozgások növekedése. Csak az alsó talprész elkészítése után, a teljes zárt gyűrű ad olyan hatásos megtámasztást, hogy a mozgások lecsillapodnak és kialakul a kőzettel együttműködő teherviselő szerkezet. Az építésnél rendkívül fontos a hozzáértő mérnöki építésvezetés. A kőzet, a talaj változásait, a mért alakváltozásokat, elmozdulásokat állandóan figyelemmel kell kísérni, és ezekhez igazodva menetközben kell módosítani a gyűrűzárás idejét, a lőttbeton vastagságát, vasalását, a horgonyzásokat, esetleg az acéltartók beépítését és az építés keresztmetszeti felosztását.

II.3. Alagutak vízszigetelése

A tübbinges alagútszakaszok vízszigetelését részben biztosítja az építés közben keletkezett hátúrt kitöltő speciális habarcs. A teljes vízzáróságot pedig a vízzáró betonból és szulfátálló cementből gyártott falazó elemek homloklapjain lévő hornyokban elhelyezett neoprén anyagú szigetelés adja. A tübbingek kialakítása biztosítja szükség esetén az utólagos vízzáró injektálás lehetőségét. A hátúr kitöltő injektáló habarcs összetételét úgy választották meg, hogy az csak nagyobb üregeket tudjon kitölteni, és az injektálás után a megfelelő időben szabályozottan kössön meg. Adalékként kimosásgátló anyagot is adtak a habarcsba. Az injektálási idő alatt a habarcs legfeljebb az alagút közvetlen közelében lévő kisebb-nagyobb repedéseket tudja kitölteni, távolabbra nem juthat el.

A löttbetonos bányászati módszerrel épült alagútszakaszok és műtárgyak vízszigetelése a már korábban részletezett módon készült, szórt műanyag membrán vagy hegesztett alagúti PVC fólia alkalmazásával.

Mivel az alagúti műtárgyakban nem előírás a teljes vízhatlanság és a porszáraz környezet, ezért kisebb nedvesedések megengedhetők, viszont a koncentrált vízfolyások előfordulása esetén utólagos injektálás szükséges.

II.4. Az alagútépítés meglévő épületekre, közművekre gyakorolt hatásainak vizsgálata

A metró vonalvezetését, az alagutak átmérőjét, falazatának vastagságát és az egész vonalvezetés mélységét úgy határozták meg, hogy az a lehető legrosszabb állapotú felszín esetében is maximális biztonságot jelentsen. Az alagútépítésnek a környező elemekre gyakorolt hatásait különböző monitoring rendszerek segítségével kísérték figyelemmel.

Az egyik legjelentősebb ilyen rendszer az építmények mozgását ellenőrző, geodéziai alappont hálózaton alapuló mozgás monitoring, amely nagyrészt automatizált volt és csak ott alkalmazták a hagyományos manuális módszert, ahol az automata módszerek kiépítése sem műszakilag, sem gazdaságilag nem volt indokolt (pl. kis beépítettségű, családi házas környezetben). Az épületek szerkezetileg illetve mozgástanilag

legjellemzőbb pontjaira tárgypontokat (csapokat) helyeztek el. Az épületek vízszintes és függőleges elmozdulásainak alpméréseihez az épület közelében lévő mozgásmentes területen lévő, megfelelő pontosságú vízszintes és függőleges alappontokat használták fel. A függőleges mozgásvizsgálati rendszert úgy alakították ki, hogy a vizsgált épületen elhelyezett tárgypontok önálló hálózatot alkossanak, ennek alapján következtettek az esetleges torzulás mértékére. Az épület süllyedésének megállapítására ezt az önálló hálózatot viszonyították a mozdulatlanak tekintett szintezési alappontokhoz.

Az automata geodéziai monitoring rendszer mérési elve rögzített pontok távolságának és irányának bemérésén alapul. Minden mérési pont koordinátája online került kiszámításra csakúgy, mint minden elmozdulás. Egy számítógép által vezérelt másodperc pontosságú mérőállomás az építményeken, épületeken elhelyezett prizmák segítségével pontosan követte a megfigyelt pontok X, Y és Z koordinátáinak változásait a metróvonal határzónáján kívül telepített fixpontokhoz képest. A talaj és az építmény mozgásait, alakváltozásait napi 24 órán át folyamatosan nyomon követte, így biztosítva szükség esetén a gyors beavatkozás lehetőségét. Ilyen automata rendszereket elsősorban az állomások fokozott kockázatú, állandó megfigyelést igénylő környezetében telepítettek, de ilyen berendezés figyelte az üzemelő M3-as metróvonal szerkezeteinek mozgását is a Kálvin téren.

A pajzshajtás hatásának nyomon követéséhez az alagút nyomvonala mentén inklinométerek és extenzométerek is elhelyezésre kerültek. A berendezéseket rövid idővel a pajzsok problémásnak ítélt épületekhez vagy műtárgyhoz érkezése előtt telepítették. A berendezéseket sűrű kiosztással helyezték el, hogy részletes adatokat lehessen beszerezni a pajzsok beérkezése és áthaladása közben a pajzs feletti talajok viselkedéséről.

Az előbb felsoroltakon kívül alkalmaztak elektromos dőlésmérő szintező berendezéseket is aluljárókban és épületek alagsoraiban az esetleges elmozdulások megfigyelésére, illetve DSP (Deep Survey Point) közműmegfigyelő berendezéseket víz- és gázvezetékek felszín alatti elmozdulásának illetve süllyedésének mérésére. A két alagút egymásra és a felszínre gyakorolt hatásáról szintén inklinométerek segítségével

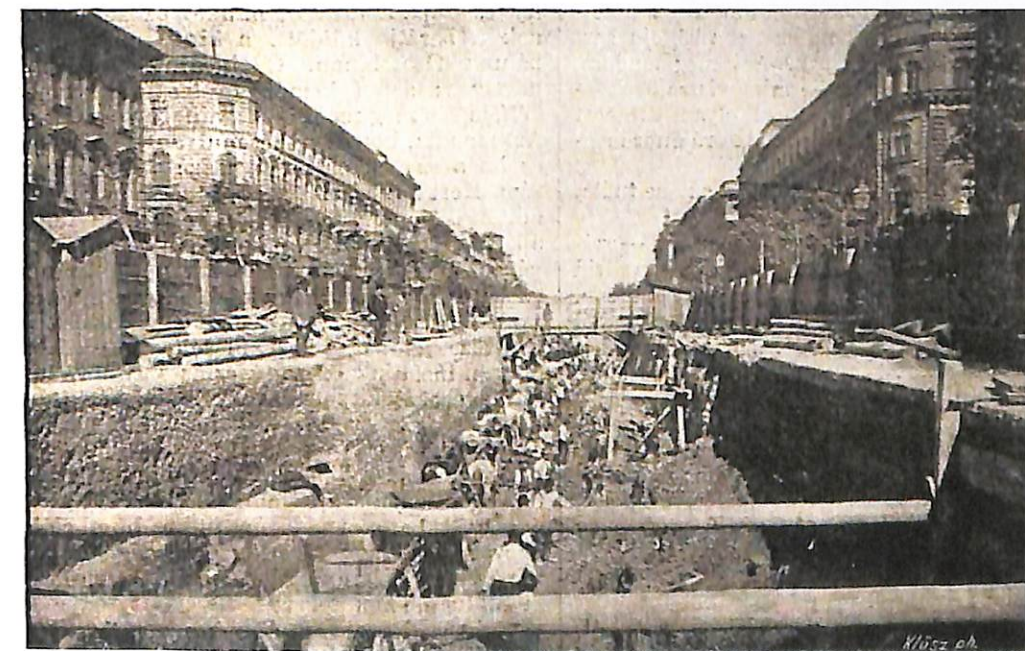
tájékoztak. Az alagútépítés egyéb környezetre gyakorolt hatásairól rezgés- és zajmérési monitoring rendszer adott információt. Az építéshez szükséges további adatok megszerzése és kiértékelése céljából meteorológiai megfigyelő állomásokat is alkalmaztak.

III. Állomásszerkezetek

A budapesti metróvonalak állomásainak túlnyomó része felszín alatti vagy mélyállomás. Az állomások szerkezetei azonos irányelvek szerint, de egymástól eltérő formában épültek. Az állomásszerkezetekkel szemben támasztott követelmény, hogy maradandó alakváltozás vagy károsodás nélkül elviseljék az üzemszerűen rájuk ható statikus illetve dinamikus igénybevételeket, továbbá alkalmasak legyenek a közlekedés által támasztott forgalmi és műszaki követelmények tartós kielégítésére. Az állomások különböző szerkezeti kialakítását több tényező is indokolta, így az eltérő utasforgalom, az állomásokba beépítendő üzemi-technológiai berendezések helyigénye, az eltérő építésföldtani viszonyok és a városszerkezetbe való beillesztési lehetőségek, valamint nem utolsósorban az adott időszakban alkalmazott építéstechnológiai módszerek.

III.1. A budapesti metróknál alkalmazott állomástípusok történeti áttekintése

A földalatti vasútépítés gondolata és megvalósítása Magyarországon egyidős a Millenniumi Földalatti Vasút születésével, melynek építéséhez 1894-ben kezdtek hozzá és 1896-ban helyezték üzembe. A kontinens első földalatti vasútjának állomásai az alagútszakaszokhoz hasonlóan a vonal egészén nyitott módszerrel, felülről leásva készültek.



14. ábra: Földkiásás és elhordás az Andrássy úton

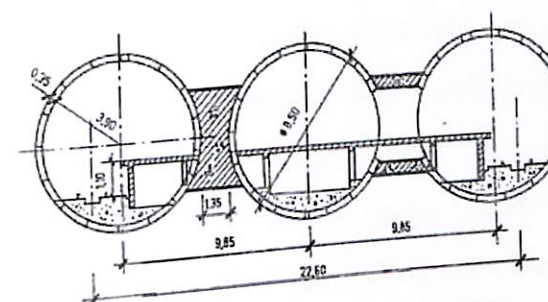
Az alaplemez és az oldalfalak betonból épültek. A földém elkészítésénél alkalmaztak először a világon öszvérszerkezetet. A 4 méterenként elhelyezett földémtartó oszlopokra hengerelt acél „I” tartókat fektettek, amelyeket hevederekkel kötöttek össze, szegecsek segítségével. Az oldalfalon nyugvó keresztartókat egymástól 1 m távolságban helyezték el. A keresztartók közeit betonnal töltötték ki, zsaluzással alakítva ki a „poroszsüveg” boltozatot. A földém aszfalt-nemez szigetelést kapott.



15. ábra: A Millenniumi Földalatti Vasút állomási keresztmetszévénye

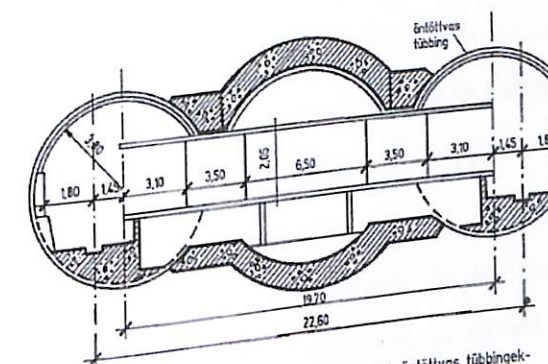
Az 1950-es években kezdődött meg a K-Ny-i, azaz a 2-es metró építése. A vonal első építési időszakának mélyállomásai (szovjet példák nyomán) háromalagutas elrendezéssel készültek. Teherhordó falazatuk öntöttvasból vagy betonból készült. Az öntöttvas tübbing szerkezettel épült állomásokat három, 8,5 m külső átmérőjű, kör keresztmetszetű, egymástól 9,85 m tengelytávolságban fekvő 122 m hosszú állomási alagutak alkotják. A vágányok az utasperonokkal együtt a szélső alagutakban helyezkednek el, melyekből 3-6 áttörésen keresztül lehet a középen lévő alagútban kialakított utaselosztó csarnokot megközelíteni. Ehhez csatlakozik a mozgólépcsőt magában foglaló lejtakna, melyen keresztül a legtöbb esetben az állomás feletti gyalogos aluljáróba jutunk. A Keleti pályaudvari, a Blaha Lujza téri és részben a Deák téri állomás épült ilyen szerkezettel. A Deák téri azért csak részben, mert ott a középső állomási alagút szerkezetét monolit vasbetonból alakították ki, acéllemez szigeteléssel.

A Blaha Lujza téri és Keleti pu. állomások



Háromlagutas mélyállomás öntöttvas tűbírből, vb. szerkezeti
átjárókkal

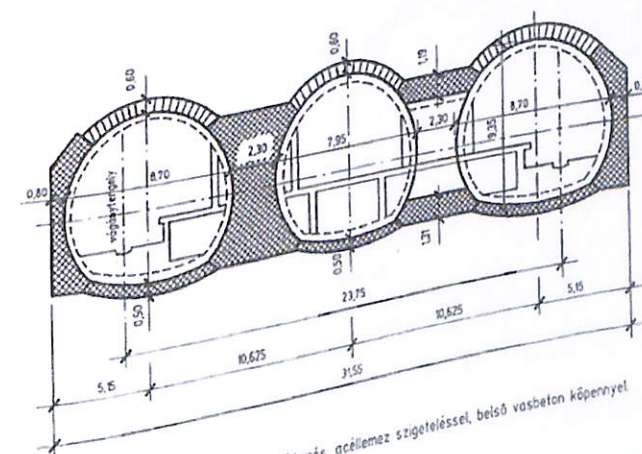
Deák tér állomás



Háromlagutas mélyállomás. A szélső alagutak öntöttvas tűbírből, a középső alagút és az átjárók vasbetonból, acéllemez szigeteléssel készültek.

16. ábra: Háromlagutas állomásszerkezetek

Hasonlóképpen háromlagutas kialakításban, de betonszerkezettel épült a Széll Kálmán tér és a Déli pályaudvar állomás. A Széll Kálmán téri laposabb boltozatokkal, sík oldalfalakkal, belső vasbeton köpennyel megtámasztott acéllemez vízszigeteléssel készült. A Déli pályaudvar állomás íves oldalfalazata monolit betonszerkezetű, felső boltozata beton idomkövekből áll. A külső falazat belső felére elhelyezett acéllemez-szigetelést vasbeton köpeny támasztja meg.

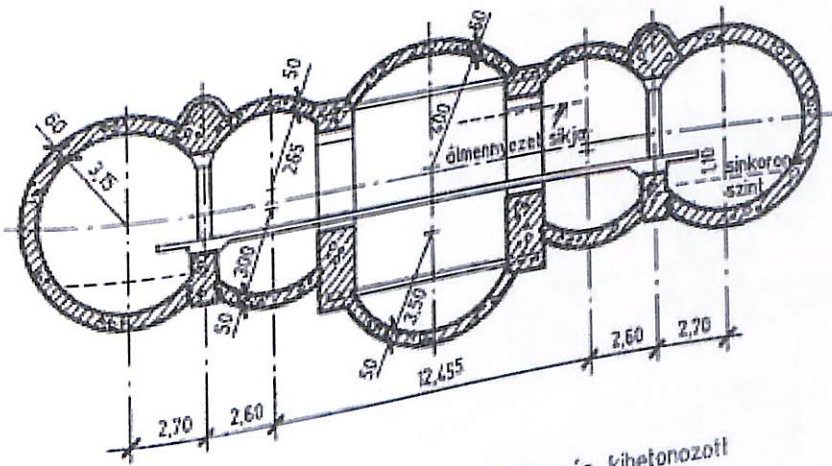


Háromlagutas betonszerkezetű mélyállomás. A felső boltozatok beton idomkövekkel épültek. A külső falazat belső felére elhelyezett acéllemez szigeteléssel, belső vasbeton köpennyel.

17. ábra: A Déli pályaudvar háromlagutas állomásszerkezete

Az ötalagutas állomásszerkezetet úgy szolgáltató a kényyszerűség születte, amikor az Astoria állomást utólag kellett beillesztetni a vonalba, a már elkészült vonali alagutak közé. A vonalalagutak egymás felé néző oldalán a kész alagútfalazatot megbontották és vasbeton hosszgerendákra helyezték, fejtartókat tartó acélcső oszlopsorokkal iker-alagutat építettek, ahol az állomásperonok kaptak helyet. Az így létrehozott négy iker-alagutat építettek, ahol az állomásperonok kaptak helyet. Az így létrehozott négy iker-alagutat építettek, ahol az állomásperonok kaptak helyet. Az így létrehozott négy iker-alagutat építettek, ahol az állomásperonok kaptak helyet.

kiszolgáló helyiségek számára. Mivel ezt a megoldást először itt alkalmazták, Budapesten, ezért az ilyen ötalagutas állomásszerkezetet „Budapest” típusú mélyállomásnak keresztelték és nevezik ma is. Az alaptípusa öt egymás mellé épített, egymásba metsző kör keresztmetszvényű, minimum 5,1 m belső átmérőjű alagútból áll, amelyek közül a két szélső a forgalmi vágányokat foglalja magában. Az egymásba metsző alagutak boltozatait, azok metszéspontjaiban hosszgerendából és acélcső oszlopokból készült tartószerkezetek támasztják alá. Az oszlopok 25 mm falvastagságú, 560-600 mm átmérőjű, varrat nélküli acélcsőből készültek és B400-as minőségű betonral vannak kitöltve. Az oszlopok távolsága hosszirányban 4 m, keresztirányban 5,1 m. A peronok a két szélső iker-alagútban, az utaselosztó csarnok és az üzemi helyiségek a középső alagútban helyezkednek el.



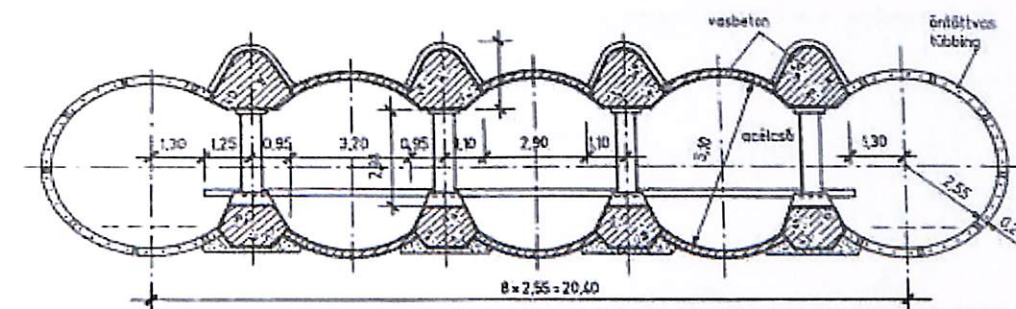
Öttagutas vasbeton szerkezetű mélyátlomás, kibetonozott acélszöszlopokkal, a középső boltozatnál acél vonóvasakkal, acéllemez szigeteléssel.

18. ábra: Astoria - az első ötlagutas állomástípus

További előnye ennek az állomástípusnak az, hogy a legkisebb térfogatú, ezért építési költsége is kedvező. Az állomásperonok tágabbak, mint a háromlagutas állomásoké. Hátránya, hogy építése bonyolult és munkaigényes, továbbá az, hogy az üzemi terek nagyon szűkek.

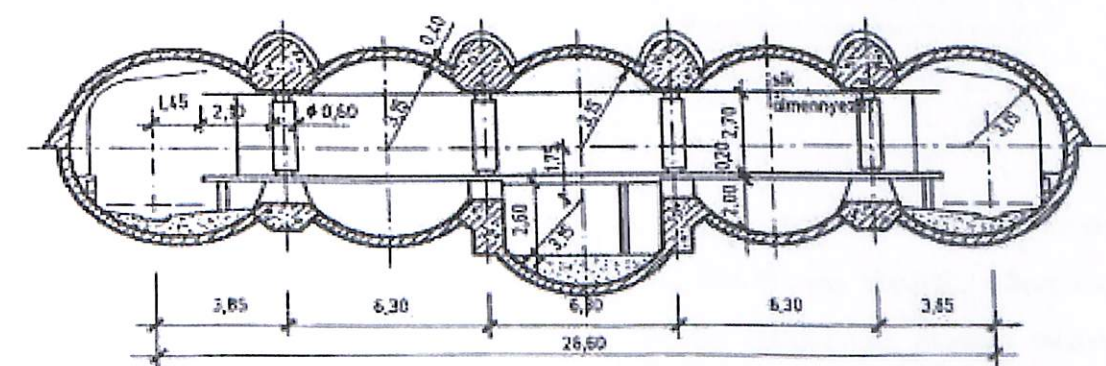
A 2-es vonalon az Astoria után a Kossuth Lajos téri és a Batthyány téri állomások is az imént vázolt ötlagutas kivitelben épültek. A 3-as vonalon a fenti alapelvet megtartva, a következő továbbfejlesztett változatok épültek:

Klinikák és Arany János utca állomások



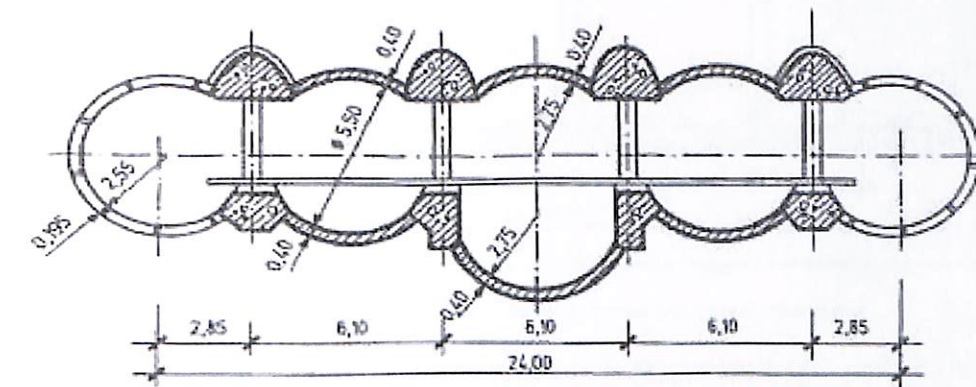
19. ábra: Öt boltozatos, 5,1 m átmérőjű

Ferenc körút, Ferenciek tere, Deák tér állomások



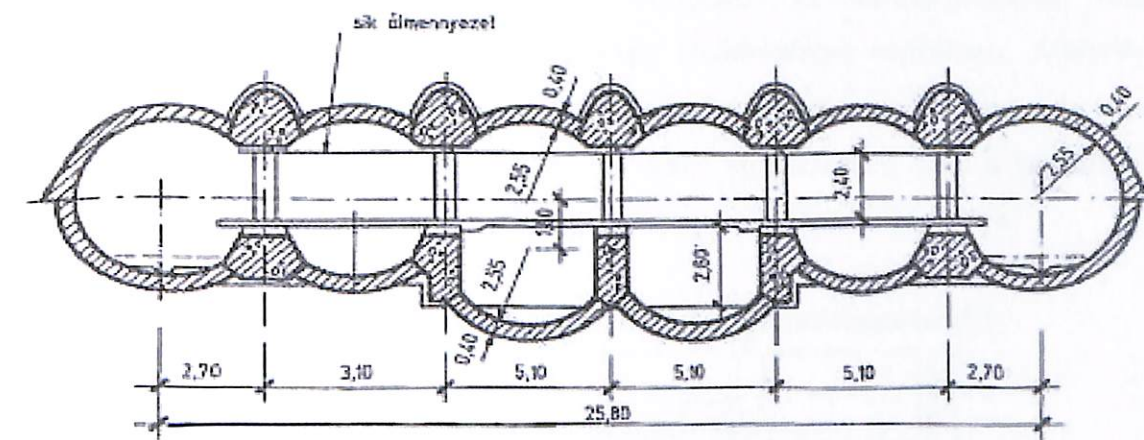
20. ábra: Öt boltozatos, 6,3 m átmérőjű

Nyugati pu.-i állomás



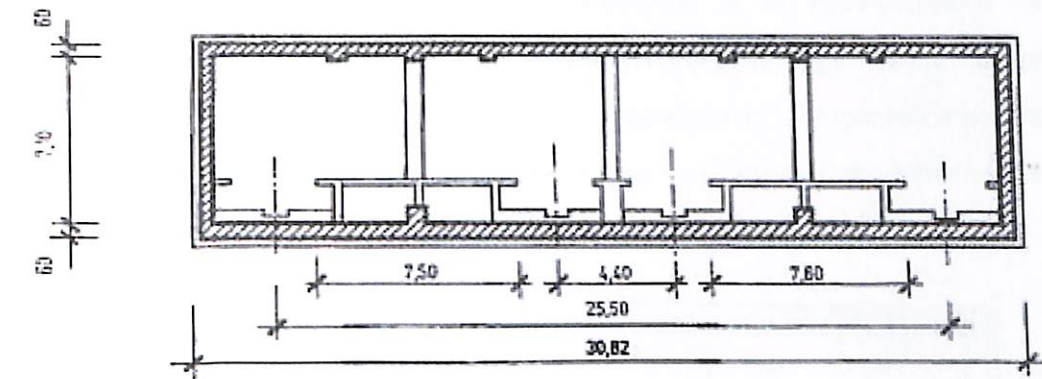
21. ábra: Öt boltozatos, két szélén 5,1 m-es, közepén 3 x 5,5 m-es nyílású

Kálvin tér állomás



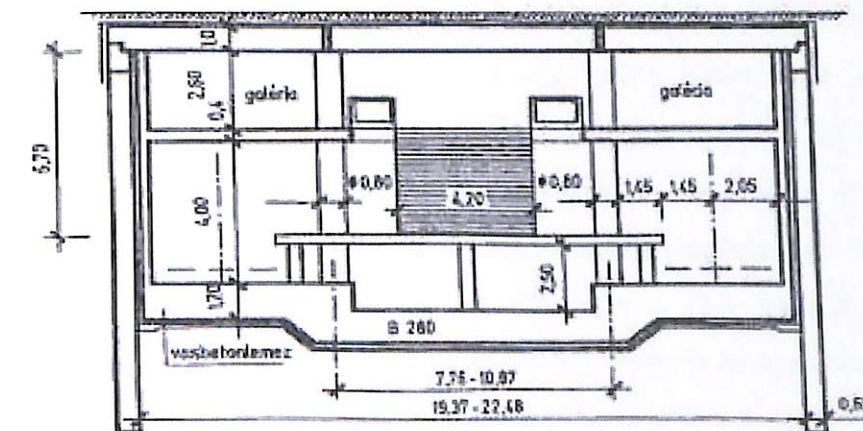
22. ábra: Hat boltozatos, 5,1 m-es nyílású

A felszín alatti állomások nagyrészt résfalas és kisebb részben egyéb építési módszerrel épültek. Elsőként a 2-es vonal Népstadion (ma Puskás Ferenc Stadion) állomása épült meg. Az állomás függőleges falú munkagödörben, helyszínen készült négynyílású vasbeton szerkezet. A födémeket az alaplemezzel egybeépült vasbetongerendákon álló három oszlopsor támasztja alá. A műtárgy keresztmetszetének mérete 30 x 7,5 m. Szigetelése hagyományos külső bitumenes szigetelés.



23. ábra: A Puskás Ferenc Stadion állomás szerkezeti felépítése

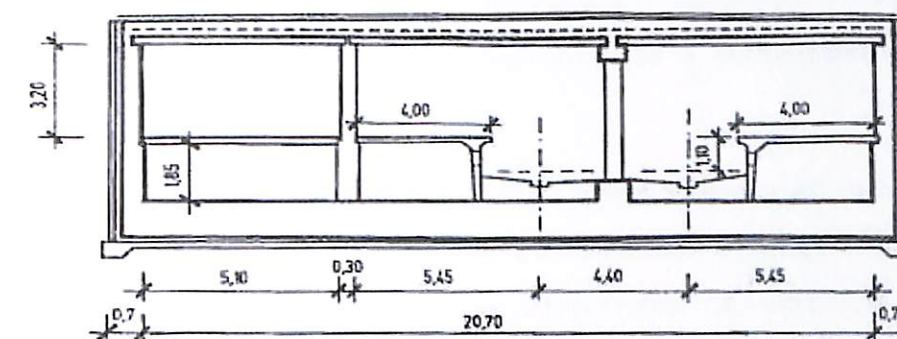
Az időrendben következő felszín alatti állomás a Nagyváradi téri volt. Az építés 1970-ben kezdődött és 1976-ban fejeződött be. Az állomás, illetve ennek szerkezete már egy új, a budapesti metróépítésnél elsőként alkalmazott, részfalas építési technológiával készült. A módszert a mélyépítő ipar hazánkban az 1960-as évek közepe óta alkalmazza. A részfalas műtárgyak talajviszonyoktól és rendeltetésüktől függően készülhetnek úgynevezett mélyrészfalas vagy rövidrészfalas kivitelben. Mélyrészfalas műtárgyak készültek a 3-as metró másfeles mélységű állomásain (Nagyváradi tér, Lehel tér), rövidrészfalasak pedig azokon a felszín alatti szakaszokon, ahol a talajvíz alagút alatti átáramlását a műtárgy és a talajviszonyok egyaránt lehetővé tették.



24. ábra: Nagyváradi tér állomás

A 3-as vonal északi szakaszán egy új, Budapesten még addig nem alkalmazott építési módot is bevezettek. Az új technológia kéregpakett néven vált ismertté. A kéregpakett olyan előregyártott, 65 mm vastag oldallapokkal ellátott vasbeton zsaluzó elem, amely a végleges alagútfalazat vasalásának nagy részét is magában hordja. A kéregelemek

egymás mellé vagy fölé helyezve falat alkotnak. A kéregpakettek a készülő fal kontúrsíkjait alkotják. A kéreg-zsalus alagútszerkezet úgy épült, hogy a nyílt munkagödörben elkészült monolit vasbeton alaplemezre ráhelyezték a paketteket és a még hiányzó vasszerelés behelyezése után az elemeket kibetonozták. Ilyen állomásszerkezet a 3-as metró Váci úti szakaszán épült.



Felhasználatti, kéregzsalus technológiával épült kétkijáratos állomás. Födéme UH jelű gerendák-ból, szigetelése hungisol és dehydrol lemezszerkezetéből áll.

25. ábra: Forgách utcai állomás

III.2. Nyitott építési módszerrel épített állomások szerkezeti felépítése

A 4-es metróvonal állomásainak többsége felülről, nyitott építési módszerrel épült. A hagyományosnak mondható rézsús lehatárolás a városi környezetben a sűrű beépítettség miatt nem volt lehetséges, ezért ahol a nyitott építési mód mellett döntöttek, ott kizárólag függőleges falú munkagödör kialakítása jöhetett szóba. Legtöbb esetben a résfalas megtámasztást részesítették előnyben, de esetenként fúrt cölöpös, illetve szádfalas biztosítást is alkalmaztak. A vert vagy vibrált szádfalas munkagödör megtámasztásnak az a hátránya, hogy a kivitelezése jelentős zaj- és rezgésterheléssel jár a környezetre nézve. Ellenben a fúrt cölöpös és a résfalas technológia nem csak környezetkímélőbb megoldás, hanem az így készült szerkezetek megfelelő méretezés és vízzárás esetén statikai teherviselő szerepet is betölthetnek a kész műtárgy részeként. A cölöpfalból vagy résfalból kialakított körítő falszerkezetre kerül a zárófödém, alul pedig a tervezett mélységben megépül az alaplemez. Így jön létre az állomás nyers vasbeton doboz szerkezete, amelybe a belső szerkezeti elemek – a közbelső födémeket is beleértve – utólag kerülnek beépítésre. A műtárgyat az építési ütemeknek megfelelően munkahézagok és vízzáró szigeteléssel áthidalt

dilatációk tagolják. Az így keletkezett egyterű állomások középperonos kialakításúak, a vonalalagutak a dobozszerkezet két oldalán futnak végig. A peronok hossza 80 m, az üzemi terek pedig az állomások végeiben helyezkednek el. Minden állomáshoz tartozik egy szellőző műtárgy is, amely általában zárt bányászati technológiával kialakított szellőzőalagúttal csatlakozik az állomási műtárgyhoz. A kivitelezés során lehetőség szerint olyan építési sorrendet és organizációt kell meghatározni, hogy az építésre egyszerre igénybevett terület a lehető legkisebb, és a környezetet zavaró felszíni munkák ideje a legrövidebb legyen.

Az új metróállomások esetében az utólag beépítésre kerülő belső kitámasztó szerkezetek körébe tartoznak a hosszirányú mellgerendák, a mellgerendákat és ez által a résfalakat kitámasztó vasbeton keresztgerendák, a vasbeton zárófödém alátámasztó ferde vasbeton pillérek, a pillérekől származó terhek átadására szolgáló vasbeton konzolok, végül a zárófödém és kitámasztó szerkezetek terhelését felvevő bélésfalak, melyek minden terhelést a vasbeton alaplemezsre továbbítanak. A belső kitámasztó szerkezetek, valamint a bélésfalak és egyéb szerkezeti falak utastérből látszó felületei a látszóbeton követelményeinek megfelelően kerültek kivitelezésre.

Az állomási műtárgyak szerkezetének szárazsági követelménye a tenderkiírás szerint általánosságban legfeljebb $0,2 \text{ l/m}^2/24$ óra vízáteresztő képesség volt. De például a Keleti pályaudvar állomási és kihúzó műtárgy oldalfalán és fenékszintjén az eredetileg tervezett fóliaszigetelés helyett módosított, max. $0,1 \text{ l/m}^2/24$ óra követelménynek megfelelő vízzáró beton készült. A szigetelés végleges szerkezete a belső vízzáró bélésfal, amelynek minimum 60 cm-es vastagsága minden esetben betartható volt. A résfalak függőlegességi eltéréseiből származó tartalék vastagsági méretek a vízzárás biztonságát növelték. A résfal és a bélésfal közé helyezett felületválasztó-szivárgó réteg biztosította, hogy a rés panelek csatlakozásain keresztül fellépő talajvíznyomás csak a bélésfalakat terhelje. Végleges állapotban a résfal kizárólag a földnyomásból adódó terheket viseli. A bélésfalak zsaluzása egyoldali falzsaluval történt, amely nagy teherbírású támrendszerrel, fatartós műanyag héjazatú táblákkal biztosította a látszóbeton követelményeinek megfelelő felület létrehozását. Az egyes szakaszokon belüli bélésfalelemek betonozási sorrendjének megválasztásakor figyelembe kellett

venni a beépített beton kezdeti zsugorodásának lejátszódását, így jellemzően előbb a páratlan sorszámú elemeket, a zsugorodás nagy részének lejátszódása után pedig a köztes elemeket építették. A vízzáró bélésfalak építésénél a vízszintes és függőleges munkahézagoknál hézagzáró szalagokat építettek be, melyek az adott esetekben kizárólagosan önmaguk alkotják a szigetelést. Később, a szerkezet zsugorodási repedései, vagy a betontömörödési hiányosságok környezetében a műtárgyak körüli talajvízszint nyugalmi állapotának visszaállítása után jelentkeztek további nedvesedések, melyekre azonban az üzemeltető és a kivitelezők egyaránt felkészültek.

A pajzsbetörések helyén a résfal GFK (GlasFaserverstärkter Kunststoff), azaz üvegszál erősítésű műanyag armatúrával készült, mely anyagjellemzőinek (nagy húzószilárdság, kis nyírószilárdság) köszönhetően a pajzs homloknyomásának egészen a betörés pillanatáig ellentartott, így a homlokmeztámasztás a résfal áttörésének idején végig fenntartható volt.

Az alaplemez trapéz keresztmetszettel, a megfelelő vízzárás érdekében 1,5–2,5 m vastagságban készült (tömegbeton). A keresztirányú dilatációk vízzárósága érdekében a lemezvastagság alsó és felső 15-20 cm-ébe két-két dilatációs szalag került beépítésre.

Mivel a metróállomások feletti területeken többségében földfeltöltés, parkosítás és díszburkolat épült, a zárófödém szigetelése a lejtést adó betonréteg kivitelezését követően gyökérzetálló, modifikált bitumenes lemezszigeteléssel készült.

III.3. Víztelenítési technológiák, talajvízszint süllyesztés

A nagy mélységű munkagödrök víztelenítésére több módszer is létezik. Elsődleges feladat a beszivárgó talajvíz távoltartása a munkaterülettől. Ennek legegyszerűbb módja a nyíltvíztartás, amelynél a függőleges falú munkagödört szád falakkal veszik körül, amik viszont nem érnek le az alsó vízzáró rétegig. Így a talajvíz a szádlemezeket alulról megkerülve, a fenékszínt jut be a munkagödörbe, ahonnan zsompba gyűjtve szivattyúzással eltávolítható. Ez a módszer azonban nem alkalmazható olyan talajokban, amelyek szemcséi a talajból feltörő víz hatására képesek kimosódni. A metróállomások környezetében előforduló talajok adottságai és a talajvíz helyzete miatt a legmegfelelőbb víztelenítési technológiának a folyamatos talajvízszint

süllyesztés bizonyult. A műtárgyak építése és az építést megelőző, szükséges közműkiváltások is indokolták, az emiatt bekövetkező építménymozgások pedig fokozott gondosságot igényeltek, például a facölöp alapozású MÁV Keleti pályaudvari, valamint a Baross téri téglalapozású, alapincézett épületek állagvédelmével kapcsolatos intézkedések előkészítésénél.

Ahol a résfalak ideiglenes állapotának méretezése során talajvízzel mindössze a felső mállott közepes és kövér agyagrétegben számoltak, mint például az Etele térnél, a mélyebben fekvő ép közepes és kövér agyagot vízzárónak tételezték fel, építési állapotban e rétegben víznyomást nem vettek figyelembe. Ennek a feltételnek a tényleges teljesülését biztosítandó, a vízzárónak tekintett rétegben az 1 m vastag résfal mögötti esetleges víznyomás időleges megszüntetésére acél átvezető csövek kerültek beépítésre (armatúránként 2-2 db).

A Bikás parknál a vasbeton alaplemez alatti szerelőbeton alá a talajvíz áramlását biztosító szivárgópaplan és geotextília került beépítésre, ehhez csatlakozott a 60 cm vastag vasbeton résfalra szerelt, függőleges szivárgóréteg. Építési állapotban a szivárgó talajvíz befogadására az állomási műtárgy mindhárom dilatációs szakaszában egy-egy víztelenítő-gyűjtőkút szolgált, amelyekből szivattyúzással emelték át a talajvizet a városi közműcsatornába.

A Rákóczi téren a földmunka befejeztével az alaplemez alatt egy kb. 35 cm vastag szivárgóréteget kellett kialakítani, mely az alaplemezen átvezetett ideiglenes víztelenítő kutakkal lehetővé tette az építés közbeni víztelenítést, illetve az alaplemezre ható, felfelé irányuló víznyomás kialakulásának megakadályozását építés közbeni állapotban.

III.4. Résfalas technológiával készült műtárgyak

A résfalas építési mód egyik előnye, hogy viszonylag kis helyigényű, a résfalak akár a forgalom megtartása mellett, minimális forgalomkorlátozással is megépíthetők. Az e technológiával kialakított munkagödrök környezetében megfelelő kitámasztás vagy kihorgonyzás esetén számottevő felszíni süllyedésre nem kell számítani. A résfalak vastagsága általában 0,6–0,8 m, de a 4-es metró állomásaiban esetenként az

1,2 métert is eléri, mélységük 22 és 40 m között változik. Az egyes réstáblák tetszőleges számban, szakaszolócső közbeiktatásával, vízzáróan egymás mellé építhetők, így alakítva ki a tervezett geometriájú műtárgy oldalfalait. A vízzárás fokozására a réstáblák csatlakozásánál lévő munkahézagokba speciális fugaszalagot helyeznek el.

A Keleti pályaudvar állomási műtárgyrészen is a résfalazást összekapcsolt gyűrűs, toldható szakaszoló elemekkel végezték, ami a résfalcsatlakozás felületi növekedését eredményezte, a vízzáró képességet pedig fokozta. A kihúzó műtárgy kivitelezése során trapéz keresztmetszetű szakaszoló pallókkal határolták le a réstáblákat, amelyek segítségével munkahézag-záró szalagokat is beépítettek a vízzárás hatékonyságának növelése céljából. A réstáblák építési sorrendje a két külső rés lemélyítését követő középső, támasztó földmag átharapásával történt. Minden esetben a kezdő réstábla mellett már előrehaladott szilárdságú réstábla volt. A réstáblák csatlakozási felületének tisztaságát biztosította a szakaszoló csőgyűrű vagy palló. A legfontosabb résfalbetonozási szakasz volt, amikor a vállalkozó, a mérnök és a minőségi teljesítésért felelős technológus folyamatos együttműködése volt a minőségi teljesítés előfeltétele. A résfalazáshoz elfogadott technológiai utasításban réstáblánként 24 óra kivitelezési időtartam volt előírva, ennek teljes kihasználása azonban a legtöbb esetben elmaradt. A réselés és betonozás folyamatos technológiája zavarta a környéken élő lakosság mindennapjait, ezért a 22:00 óránál tovább tartó betonozási munkákra hatósági hozzájárulást kellett beszerezni.

A résfal építése után a résfalon belüli földet folyamatos víztelenítés mellett, kitámasztó acél dúcsorok védelmében emelték ki. A résfalra ható föld- és víznyomás felvételére beépített acélszerkezetű támaszrendszer szintjeihez igazodva organizálták a földmunka ütemeit. Az alaplemez megszilárdulása után az alsó három sor csőtámaszt el lehetett bontani, ezzel biztosítva a pajzs áthúzásához szükséges magasságot.

Az állomásban a földem alatti munkák jelentős részét a földkiemelés tette ki, amelyet össze kellett hangolni a résfallal körbezárt földtömeg pórusvizeinek kiemelésével és az ideiglenes kitámasztások beépítésével. Az állomási műtárgy északi részfa ezen munkák végzése közben 20-25 mm-re bemozdult egy szakaszon az állomás tengelye irányába,

melyet a 2008. november 8-án rögzített nullméréshez viszonyítva regisztrált a réselés során telepített inklinométer 2009. július 26-án. A mért részfalmozgás arra készítette a vállalkozót, hogy a talajvízszint-süllyesztés, földkiemelés, ideiglenes kitámasztás további munkáinál a folyamatok összehangoltabbak legyenek, ezek eredményeként a részfalmozgás lelassult, jelentéktelenné vált.

A Bikás parknál a kedvező helykiválasztás és a közműviszonyok miatt lehetőség nyílt bordás részfal építésére, melynek vastagsága mindössze 60 cm, az ehhez kapcsolódó részfalbordák miatt azonban a fal hajlítómerevsége jóval meghaladja a többi állomáson alkalmazott, 1,0-1,2 m vastagságú részfalakét. A speciális részfal és a hozzá nyomatékíróan kapcsolódó bordás földem keretszerkezete adja az állomás fő teherviselő rendszerét. A „Tervezz és építs” típusú szerződéses konstrukció lehetőséget adott a kivitelezőnek a tendertervben lévő 2,5 m fogáshosszakat 3,6 m-re változtatni, ami építéstechnológiai okokból lényegesen kedvezőbb volt. A panelkiosztás változtatását a részfalak esetében egyszerűen meg lehetett valósítani, a részfalhoz szervesen kapcsolódó bordás földem raszterkiosztását azonban építészeti okokból nem lehetett változtatni. Ezért a két szerkezetet összekapcsoló fejgerendának a két raszter eltolódásából fakadó csavaró igénybevételekre is meg kellett felelnie. A bordás földem a részfalak földmegtámasztó hatása miatt hajlítást és nyomást visel. A bordás záróföldem íves, a felülvilágító geometriájához igazodó áttörése a fent említett keretrendszert azonban megbontja. Ezen a szakaszon a földem nem képes tárcsaként viselkedni, valamint az áttörés szakaszán a részfal nem tud nyomatékíróan kapcsolódni a felső támaszához. Ezeknek a kedvezőtlen statikai hatásoknak a csökkentése miatt a szerkezet szerves részét képezi a nyílás menti peremgerenda, mely térbeli merevséget ad az állomásnak. Ezután elvégezték a földkiemelést a részfalakat összefogó fejgerenda és az ehhez csatlakozó földemgerendák építéséhez. A látszóbeton szerkezetek földzsalun, a szerelőbetonra helyezett vékony műanyag zsaluhéjjal és kétoldali falzsaluzattal épültek. A földemgerendák és a vele együttdolgozó fejgerenda megépítését követően alakították ki a mozgólépcsőket fogadó ellipszis alakú áttörés falzatát, amely összeköti a záróföldemet és a közbenső földemet, felső éle pedig az üvegezett térbeli acél rácsszerkezetet fogadja az előre elhelyezett acélsarukhoz

kapcsolódva. A födémgerendák közé előre gyártott vasbeton kéregpanelek kerültek, így alakult ki az állomás közbenső födém szintje.

A szigetelési rendszer az állomás szerkezeti rendszerét is befolyásolta. A több mint 100 m hosszú állomást három dilatációs egységre kellett osztani a Weisse Wanne (fehér kád) elnevezésű, tömegbeton szigetelési technológia előírásának megfelelően, így több szigetelési csomópont és részlet megoldása várt a tervezőkre (pl. a zárófödém egy része műgumi sarura támaszkodik, a dilatációs mozgásokat figyelembe véve). Tovább nehezítette a tervezési feladatot a korábban már említett felülvilágító dilatációkhoz alkalmazkodó szerkezeti kialakítása is. A műtárgy alaplemezében, a bélésfalakban, fejgerendákban, az aluljárószinti födémekben, alátámasztó falakban és a zárófödémekben kiképezett dilatációs csatlakozások azonos függőleges síkban kerültek elhelyezésre, megközelítőleg a nyomatéki nullpontok helyén, ahol a födém Gerber-csuklószerűen van kialakítva, azaz a hosszabb lemezmező fekszik fel a rövid lemezmezőben kialakított konzolra. E megoldásnak köszönhetően szükségtelenné vált a dilatációs szerkezeteknél nehezen megvalósítható nyomatékátadó kapcsolat kialakítása.

III.4.1. Milánói módszer

A modern mélyépítési technológiák egyre inkább lehetővé teszik a felszíni zavarok csökkentését. A milánói módszer lényege, hogy a résfalakkal körülhatárolt munkagödörre előbb a vasbeton zárófödémeket helyezik el, amelyre vissza lehet helyezni a végleges közműveket, és elkészíteni a végleges felszíni rendezést, visszaadni részben vagy teljesen a közúti vagy gyalogos forgalomnak a felszínt. Ez az a minimális építési idő, amikor a minden építéssel együtt járó kellemetlenségeket a környezetnek és a lakosságnak közvetlenül el kell viselnie. Ezután a felső födém alól a földkiemelés bányászati módszerrel történik, a helyi adottságoknak megfelelően, a födémekben kihagyott földkiadó nyíláson keresztül, vagy távolabbra épített szállító alagúton keresztül, vagy az állomások mellé épített ún. "zseben" keresztül. Az állomások építési munkáinak kiszolgálása is ezeken a nyílásokon, vagy a már elkészült alagúton keresztül történik. A leadó nyílások éjszakára zajvédő tetővel lezárhatók. Így a munka éjszaka is

folytatható, ami a kivitelezést gyorsítja. A lezárt állomási térből a szellőztetés ventilátorokkal történik, szellőző csövekkel és porleválasztóval.

A földém alatti földkiemelésnek vannak azonban hátrányai is: fajlagosan lassabb a földkiemelés, valamint világítást és szellőzést is kell kiépíteni. Előnyt jelent viszont, hogy bár az éjszakai, többműszakos munkavégzés ugyan többlet költségekkel jár, de a teljes építési idő lerövidíthető. Az építési módszerből fakadóan elmaradhatnak a drága és időigényes segédszerkezetek, horgonyok építésének egy része.

A milánói módszer másik el nem hanyagolható hátránya, hogy a záróföldém elkészítésének elsődlegessége mellett a felülről lefelé való belső támasztó- és vízzáró szerkezetek építését vonja maga után. Ez a technológiai sorrend kizárja a résfalazat vízzáró képességének korrekt vizsgálati lehetőségét, ezért a vízzárással kapcsolatos intézkedések csak a látható, koncentrált vizek megfogására korlátozódnak, mérési lehetőségek nélkül.

IV. Csatlakozás tervezése meglévő földalatti műtárgyhoz

A 4-es metró vonalán több esetben is előfordul, hogy az állomások kijáratai valamilyen már meglévő aluljáró szerkezethez csatlakoznak. Erre egy speciális példa a Keleti pályaudvar, ahol a 2-es metróvonalhoz biztosított közvetlen átszállási kapcsolaton felül a kiterjedt aluljáró számos lehetőséget biztosít. Lényegében egy minden irányba szerteágazó intermodális csomópont, amely autóbusz-, trolibusz-, villamos-, metró- és vasútvonalak viszonylatai közt biztosítja az átszállást. Az aluljáró szerkezete több ütemben épült. Utoljára a 4-es metró állomási műtárgyával szorosan összefüggő részek, azt megelőzően pedig – szintén a 4-es metró projekthez kapcsolódva – a 2-es metró 2. számú kijárat műtárgya, melyre elsődlegesen azért volt szükség, mert az eredeti (ma 1. számú) kijáratot a 4-es metró kivitelezés idejére és az átszálló kapcsolat kialakítása miatt le kellett zárni. A második kijárat műtárgy közvetlenül a Keleti pályaudvar épületének főhomlokzata mellett helyezkedik el, a Kerepesi út felőli oldalon és két mozgólépcső segítségével, egy közbenő födém beiktatásával juttatja fel a 2-es metró utasait az aluljáró szintjére. Az építés tervezésekor készült koncepciók tervek (ld. 1. sz. melléklet) tanúsága szerint a távlati célok közt szerepel egy, a pályaudvar hátulsó vágányaihoz vezető aluljáró folyosó, melyen keresztül közvetlenül, fedett helyen biztosítható a vonatok és a metró közötti átszállás. Az új folyosó a metró kijárat műtárgy keleti nyúlványához csatlakozna a közbenő födém szintjén, ahogy az az 1. számú mellékleten is látható. A távlati fejlesztési tervek szerint a Keleti pályaudvar ezen (10-13.) vágányai szolgálnak majd az elővárosi vasútvonalak forgalmának lebonyolítására, ezért célszerű lenne egy védett, közvetlen átszállási kapcsolat kialakítása az utasforgalom hatékonyabb elosztása érdekében.

A tervezett műtárgy szerkezeti felépítését tekintve a korábban már ismertetett réselt doboz kialakítású, egyenes vonalvezetésű, a Kerepesi úttal párhuzamos. A pályaudvar felé (kelet felé) néző kijárat három mozgólépcsőt magában foglaló lejtaknában végződik. A kialakítandó műtárgy teljes szerkezeti felépítésének megtervezése a jelen tervezési feladat részét nem képezi, kizárólag a résfalas munkagödör megtámasztás tervrészletét tartalmazza. Továbbá le kell még szögezni, hogy jelen tervek szerinti kialakítás kizárólag tanulmányi célból, elméleti síkon értelmezhető, mivel a távlati fejlesztési terveket, azok változatait nem ismerjük teljes körűen.

V. Mellékletek

- 1. számú melléklet: M2 második kijárat diszpozíciós terv, 2001. /UVATERV/
 - 2. számú melléklet: Tervdokumentáció
- Résfalas munkatér határolás részletterv az M2 metróvonal 2. kijáratí műtárgyához kapcsolódó, MÁV Keleti pályaudvar 10-13. vágányokhoz vezető aluljáró folyosó kivitelezésének munkagödör megtámasztásához

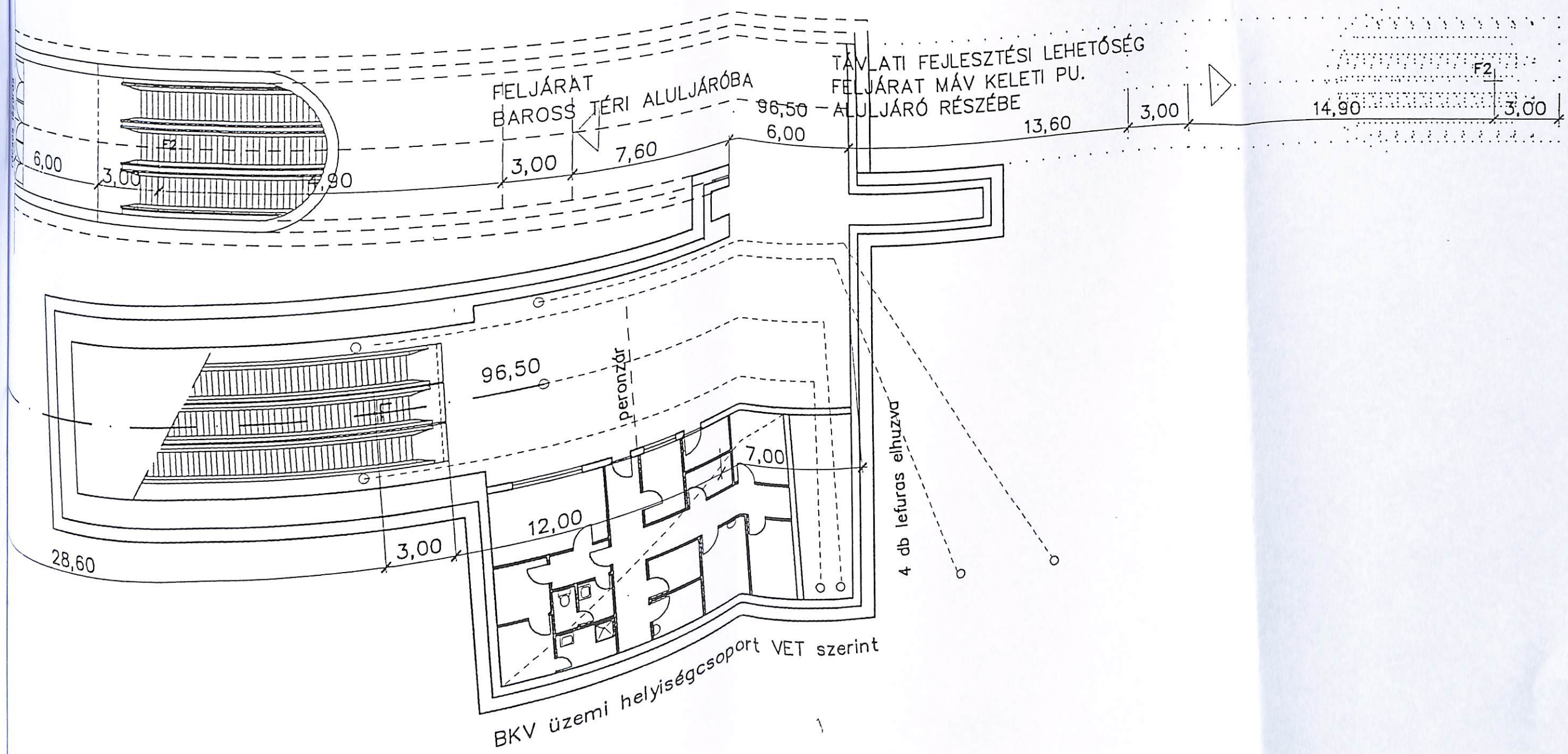
VI. Felhasznált irodalom

- Bata István: A budapesti metróközlekedés három évtizede (Budapest, 2000.)
- www.metro4.hu
- A budapesti 4. sz. metróvonal I. szakasz Összefoglaló geotechnikai-, mérnökgeológiai és hidrogeológiai jelentésben közölt Mérnökgeológiai hossz-szelvények (talajmechanikai adatok nélkül) Copyright: DBR Metró - Geovil Kft. BUDAPEST Dél-Buda-Rákospalota (4.) metróvonal, I. szakasz Előzetes környezeti hatástanulmány (III. kötet, Összefoglalás, 2002. június)
- Dr. Görög Péter: Kőzettest-osztályozási módszerek (Kőzetmechanika előadás)
- Németh M. Tibor: A Dél-Buda – Rákospalota 4-es metró (Innotéka, 2012. augusztus-szeptemberi szám)
- Alagútépítés - segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére (HEFOP/2004/3.3.1/0001.01)
- Közlekedésépítési szemle, 60. évfolyam 1. és 5. szám (2010.)
- Baross tér, 2. sz. metróvonal Keleti pályaudvar állomás második kijáratának mély- és szerkezetépítési valamint felszínrendezési munkái kiviteli terv (UVATERV, 2004. július)

1. számú melléklet

**M2 második kijárat diszpozíciós terv részlet
(UVATERV, 2001.)**

RÉSZLET 1 M2 MÁSODIK KIJÁRAT ÁTJÁRÓSZINT ALAPRAJZ DISZPOZÍCIÓ



2. számú melléklet

Résfalas munkatér határolás részletterv
az M2 metróvonal 2. kijáratí műtárgyához kapcsolódó,
MÁV Keleti pályaudvar 10-13. vágányokhoz vezető
aluljáró folyosó kivitelezésének
munkagödör megtámasztásához

Budapest, 2015.

Résfalas munkatér határolás részletterv
az M2 metróvonal 2. kijáratí mőűtárgyához kapcsolódó, MÁV Keleti
pályaudvar 10-13. vágányokhoz vezető aluljáró folyosó mőűtárgy
munkagödör megtámasztásához

A dokumentáció tartalma:

- | | | |
|--------|-----------------------------------|---------------------|
| - I-01 | Mőűszaki leírás | M=1:500 |
| - I-02 | Számítási melléklet | M=1:500 |
| - R-01 | Átnézeti helyszínrajz | M=1:100 |
| - R-02 | Helyszínrajz | M=1:100, 1:50, 1:25 |
| - R-03 | Résfalkiosztási terv | M=1:50 |
| - R-04 | Metszetek, részletek | |
| - R-05 | 1A jelőű armatőűra vasalási terve | |

Budapest, 2015. január

Műszaki leírás

az

M2 metróvonal 2. kijáratí műtárgyához kapcsolódó,
MÁV Keleti pályaudvar 10-13. vágányokhoz vezető
aluljáró folyosó műtárgy

Munkatér határolás részletterv
dokumentációjához

Tartalomjegyzék

1. Előzmények.....	2
2. Geotechnikai és helyszíni viszonyok.....	2
3. Anyagminőségek.....	3
4. A kivitelezés során betartandó főbb szabványok.....	3
5. Munkatér határolás szerkezeti kialakítása.....	4
6. Réseles kivitelezése.....	5
7. Munkagödör megtámasztás.....	6
8. Minőségellenőrzés, kontrolling rendszer.....	6
9. Munkavédelem.....	6

1. Előzmények

A közelmúlt fővárosi közlekedésfejlesztési nagyberuházásainak köszönhetően a Keleti pályaudvar környéke az utóbbi években jelentős változáson ment keresztül. Intermodális csomópont, melyben a különböző közlekedési viszonylatokat egyetlen összefüggő aluljáró rendszer köti össze. A további távlati fejlesztési tervekben szerepel, hogy a Keleti pályaudvar 10-13. vágányaira érkező elővárosi vasúti szerelvényekről a metróvonalak közvetlen fedett átszállási lehetőséggel megközelíthetőek legyenek. Ezen elgondolásból adódóan megtervezendő egy új aluljáró folyosó egyenes műtárgya, amely az M2-es metró 2. kijáratához kapcsolódik a közbenső szinten és a pályaudvar hátsó kapuja előtt a felszínen végződik. A műtárgy felszínre vezető (keleti) végében három karos mozgólépcsővel ellátott lejtakna helyezkedik el. Jelen dokumentáció csak a műtárgy részfalas munkatér határolásának tartószerkezeti kialakítását taglalja.

2. Geotechnikai és helyszíni viszonyok

A tervezési terület közvetlenül a Kerepesi út és a Keleti pályaudvar fejépülete között fekszik. A felszínen jelenleg autóbusz-trolibusz végállomás, illetve parkoló található. A terepszint 108,77 mBf magasságban fekszik. A terület talajmechanikai viszonyainak feltárására a korábbi tervekhez 2003 júliusában a Geovil Kft. készített talajmechanikai szakvéleményt, melynek adatai a helyszín jelentős közelsége miatt a tervezett műtárgy esetében is felhasználhatók. A területen 2 db 45 m mélységű nagyátmérőjű gépi fúrászt mélyítették. A szakvéleményhez felhasználták korábbi kutatófúrások rétegsorát is.

A területet 1,5-2,0 m vastag, helyenként épülettörmelékes feltöltés borítja. A fedőréteg alatt fokozatosan durvuló szemcseösszetételű talajok települtek. 3-4 m vastag iszapos homok, kavicsos homok, homokos kavicsrétegek húzódnak. A szemcsés talajok alatt a kötött talajok felszínét a szakvélemény körülbelül 94,0 mBf szinten adja meg, amelynek felső 2,5 m vastag sávja sovány iszap, alatta sovány agyag települt. A kemény kövér agyag a felszín alatt átlagosan 20,0 m mélyen jelentkezett.

A szakvélemény alapján a kelet felé emelkedő vízszint maximális szintje a műtárgy környezetében 107,0 mBf. A talajvíz betonra nem agresszív.

3. Anyagminőségek

A résfal szerkezet építéséhez felhasználandó fontosabb anyagok minősége az alábbi:

- | | |
|--------------------------------|----------------------|
| – résvezető gerenda beton: | C12/15-XC0-32-F3 |
| – résbeton: | C20/25-XC2-XA2-24-F5 |
| – fejgerenda beton: | C20/25-XC2-XA2-32-F3 |
| – betonacél: | B500 |
| – szerkezeti acél (csőtámasz): | S235 |

4. A kivitelezés során betartandó főbb szabványok

- | | |
|------------------------|---|
| – MSZ EN 1990:2005 | Eurocode: A tartószerkezetek tervezésének alapjai |
| – MSZ EN 1992-1-1:2010 | Betonszerkezetek tervezése |
| – MSZ EN 1997-1:2006 | Geotechnikai tervezés – Általános szabályok |
| – MSZ 4798-1:2004 | Beton |
| – MSZ EN 10080:2005 | Betonacél. Hegeszthető betonacél. Általános követelmények |
| – MSZ ENV 13670 | Betonszerkezetek kivitelezése |
| – MSZ EN 1538:2012 | Speciális geotechnikai munkák kivitelezése. Résfalak |

5. Munkatér határolás szerkezeti kialakítása

A tervezett aluljáró műtárgy munkagödrének partfalát vízzáró résfal határolja. Az egymáshoz vízzáróan kapcsolt réstáblákat felül összefogó monolit vasbeton fejgerenda felső síkja -0,60 m. A fejgerenda keresztmetszeti méretei 65x50 cm.

A résfal kétféle hosszúsággal készül:

- a műtárgy keleti végén a mozgólépcső lejtakna alatti szakaszon 10,0 m hosszú konzolos kalakítású fal (R2 típus)
- 19,0 m hosszúságú a műtárgy többi oldalán (R1 típus)

A munkatér határoló résfalak megtámasztására három szintű acélcső dúcolat kerül ideiglenesen beépítésre, a földkiemeléssel összehangoltan.

6. Réselés kivitelezése

Az építés megkezdése előtt el kell végezni az eddig esetleg meg fel nem tárt közművek felderítését, esetleg kiváltását, felkötését.

A résfal lavírsíkja: 108,17 mBf. A csatlakozó terepszint felszíne és a lavírsík között lőttbetonos megtámasztású részű készül.

A résvezető gerendapárt 2x20x120 cm keresztmetszettel az R-04 tervnek megfelelően kell megépíteni. A résvezetők kitűzését az R-03 számú rajzon megadott, 65 cm vastagnak tekintett résfal belső sarokpontjaival kell elvégezni. A betonozás és kizsaluzás után a résvezetők közét földdel vissza kell tölteni, vagy kétsoros összedúcolást kell alkalmazni.

A réselést a kotró alapgépekre szerelt 60 cm-es méretű réselő kanállal kell végezni. Az indítótáblák megépítése után a váltakozó irányban, ill. sorrendben készülő táblák elkészítése következik. A résfal függőlegestől való eltérésének szabványos értéke $\pm 1,0\%$, de törekedni kell ennél kedvezőbb érték elérésére. A felhasználandó bentonit szuszpenzió fajsúlya legalább $10,3 \text{ kN/m}^3$ legyen, a résiszap szintet a munkálatok idején (markolás, armatúra elhelyezés, betonozás) folyamatosan a résvezető felső éle alatti kb. 0,50 m-es magasságon kell tartani. A megfelelő zagynyomás biztosítása érdekében a résiszap szintjét a réselés alatt folyamatosan ellenőrizni kell, az elszívárgás miatti veszteséget folyamatosan pótolni kell.

Az agyagba való bekötés a felúszás elleni biztonság és a végleges állapotban történő állandó víztelenítés miatt szükséges. Ezért mintegy 1,5 m-es befogást mindenképpen biztosítani kell. Az agyaghatárt táblánként kell meghatározni és a réselésről naplót kell vezetni. Amennyiben a kiemelt talaj nem felel meg a talajmechanikai szakvéleményben előre jelzett állapotnak, a tervezőket haladéktalanul értesíteni szükséges.

A réstáblák kiharapását követően be kell emelni a tervek szerinti betonacél armatúrákat. Az armatúrákra előzőleg ponthegeztéssel fel kell helyezni a szükséges szerelvényeket.

A résnyitást követően a rést a lehető legrövidebb időn belül be kell betonozni. A réstáblák betonozását kontraktorcsővel kell végezni a vízalatti betonozás szabályai szerint. A betonozást a résharapás befejezése után maximum 4 órán belül meg kell kezdeni, ellenkező esetben tisztító harapást kell végezni. A megnyitott rést legkésőbb 6 órán belül be kell betonozni. A betonozást a fejgerenda alsó síkja feletti 50 cm magasságig kell végezni, majd a zaggal szennyezett betont (a felső kb. 50 cm-t) a fejgerenda alsó síkjáig vissza kell vésni.

A réselés teljes műveletsorát a lehető leggyorsabban kell végezni, lehetőleg minimális dinamikus hatásokkal a környezetre.

A réstáblák közötti hézagok tömítésébe fugaszalagot kell beépíteni. A résfal vízzárósága feleljen meg a $0,2 \text{ l/m}^2/24 \text{ óra}$ vízzárósági követelménynek. A résfalon koncentrált vízfolyás nem lehet.

A visszavésett résfal tetején meg kell építeni a terv szerinti monolit vasbeton fejgerendát. A fejgerenda építésénél munkahézagot egyszerű merőleges elrekesztéssel bárhol szabad képezni, de az nem eshet bele a vasak toldásába.

A résfalak közti földmunka, földkiemelés a résfalak megszilárdulása után azonnal megkezdhető a terveken jelzett, az alaplemez zsaluzási tervén rögzített tükörszintig.

A munkatér határoló szerkezetek vízszintes mozgásait folyamatosan, a földmunkával érintett szakaszon a fejtéskor és azután 5 napig legalább naponta, azután - a mozgás leállta esetén - legalább 3 naponta mérni kell. A résfal dőlésmérést minden oldalon kb. 15 m-enkénti függélyekben, a fejgerenda tetejénél kell végezni, 1,0 mm-es pontossággal. Ha a mozgások tendenciája, sebessége vagy mértéke rendellenességre utal, a tervezők azonnal értesítendő, és a földfejtés leállítandó. A méréseket folyamatosan dokumentálni kell.

7. Munkagödör megtámasztás

A réstáblák ideiglenes megtámasztására csőtámaszok kerülnek beépítésre. A dúcolat három szinten készül, az alaplemez beépítése után az alsó támaszsorot feljebb kell helyezni.

A földkiemelést követően a résfal felületét magasnyomású vízzel le kell tisztítani, majd a szigetelés igényeinek megfelelő kellősítéssel kell ellátni.

A tervezett résfal szerkezet csak munkatér-határolás funkciót lát el. Végleges állapotban a résfalak megtámasztását az alaplemez és a födémek biztosítják.

8. Minőségellenőrzés, kontrolling rendszer

A munkára külön minőségellenőrzési terv készül, ami a megrendelő előzetes jóváhagyása után a minőségbiztosítás alapjául szolgál, és tényszerűen illetve számszerűen meghatározza a teendőket.

9. Munkavédelem

A munkavégzés során a legszigorúbban be kell tartani és tartatni a vonatkozó országos és ágazati szabványokban és előírásokban foglaltakat, valamint a kivitelezést végző cégek munka- és tűzvédelemmel kapcsolatos utasításaiban előírtakat. A munkálatok alatt a korábban végzett hasonló jellegű mélyépítési munkáknál tapasztalt veszélyforrásokon túli kockázattal számolni nem kell.

A munkákat csak állandó művezetői jelenlét mellett, napi építésvezetői ellenőrzéssel, szakképzett mélyépítő szakmunkásokkal szabad végezni.

Az egyes munkafolyamatoknál a kivitelezők vonatkozó technológiai leírásának munkavédelmi fejezetei az irányadóak.

Számítási melléklet

az

M2 metróvonal 2. kijáratí műtárgyához kapcsolódó,
MÁV Keleti pályaudvar 10-13. vágányokhoz vezető
aluljáró folyosó műtárgy

Munkatér határolás részletterv
dokumentációjához

Tartalomjegyzék

1. R1 résfal geotechnikai méretezése
2. 1A jelű armatúra vasalásának méretezése

Sheeting structure verification

Input data

Project

Task : M2 metró 2. kijáráshoz csatlakozó aluljárószakasz részal munkagödör megtámasztása
Part : R1 részal méretezése
Date : 2015.01.12.

Geometry of structure

Structure length = 19.00 m

Type of structure: Reinforced concrete rectangular wall
Cross-section name : R1 részal
Standard : EN 1992 1-1 (EC2)
Material: C 20/25
Cross-section thickness $h = 0.60$ m
Coeff. of press. reduc. in front of wall = 1.00

Area of cross-section $A = 6.000E-01$ m²/m
Moment of inertia $I = 1.800E-02$ m⁴/m
Elastic modulus $E = 29000.00$ MPa
Shear modulus $G = 11340.00$ MPa

Modulus of subsoil reaction input as soil parameter.

Basic soil parameters			φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m ³]	γ_{su} [kN/m ³]	δ_a [°]	δ_p [°]
No.	Name	Pattern						
1	homok FELTÖLTÉS		24.00	0.00	17.50	7.50	16.00	16.00
2	aprókavicsos finom HOMOK		26.00	0.00	19.00	9.00	17.00	17.00
3	aprókavicsos durva HOMOK		30.00	0.00	19.00	9.00	20.00	20.00
4	homokos ISZAP		20.00	20.00	19.00	9.00	14.00	14.00
5	sovány AGYAG		18.00	80.00	21.00	11.00	12.00	12.00

All soils are considered as cohesionless for at rest pressure analysis.

Parameters of soils to compute modulus of subsoil reaction			Pattern	Type input	K_h [MN/m ³]	K_{h1} [MN/m ³]	K_{h2} [MN/m ³]	K_{h3} [MN/m ³]	A_1 [%]	A_2 [%]
No.	Name									
1	homok FELTÖLTÉS		linear		20.00	-	-	-	-	-
2	aprókavicsos finom HOMOK		linear		25.00	-	-	-	-	-
3	aprókavicsos durva HOMOK		linear		30.00	-	-	-	-	-

No.	Name	Pattern	Type input	K_h [MN/m ³]	K_{h1} [MN/m ³]	K_{h2} [MN/m ³]	K_{h3} [MN/m ³]	A_1 [%]	A_2 [%]
4	homokos ISZAP		linear	20.00	-	-	-	-	-
5	sovány AGYAG		linear	15.00	-	-	-	-	-

Excavation

Soil in front of wall is excavated to a depth of 13.50 m.

Terrain profile

No.	Coordinate X [m]	Depth Z [m]
1	0.00	0.00
2	0.20	0.00
3	0.40	-0.60
4	1.40	-0.60

Origin [0,0] is located in upper right edge of construction.
Positive coordinate +z has downward direction.

Water influence

GWT behind the structure lies at a depth of 2.60 m
GWT in front of the structure lies at a depth of 14.00 m
Subgrade at the heel is not permeable.

No.	Surcharge new change	Type	Name	Mag.1 [kN/m ²]	Mag.2 [kN/m ²]	Ord.x x [m]	Length l [m]	Depth z [m]
1	YES	Surface	talaj	10.50				on terrain
2	YES	Surface	Felszíni hasznos teher (építési)	10.00				on terrain

No.	New prop	Depth z [m]	Length l [m]	Spacing b [m]	Modif. stiffnesses	Modulus E [MPa]	Area A [mm ²]
1	YES	2.40	6.50	2.00	NO	206000.00	9.050E+03
2	YES	6.40	6.50	2.00	NO	206000.00	2.595E+04
3	YES	9.90	6.50	2.00	NO	206000.00	2.595E+04

Analysis settings

Active earth pressure calculation - Coulomb (CSN 730037)
Passive earth pressure calculation - Caquot-Kerisel (CSN 730037)
Number of FEs to discretise wall = 20
Analysis carried out without reduction of input data.
Minimum dimensioning pressure is considered as $\sigma_{z,min} = 0.20\sigma_z$.

Analysis results

Maximum shear force = 528.32 kN/m
Maximum moment = 649.36 kNm/m
Maximum displacement = 11.5 mm

Reactions in props

No.	Depth [m]	Reaction [kN]
1	2.40	233.93
2	6.40	308.11
3	9.90	1737.21

Envelope of internal forces No. 1

Maximum values = -11.5 mm
Maximum displacement = -0.4 mm
Minimum displacement = 649.36 kNm/m
Maximum bending moment = -421.67 kNm/m
Minimum bending moment = 528.32 kN/m
Maximum shear force

SZIE-VMET
Gerthner Tűzvédelmi és Biztonsági Intézet

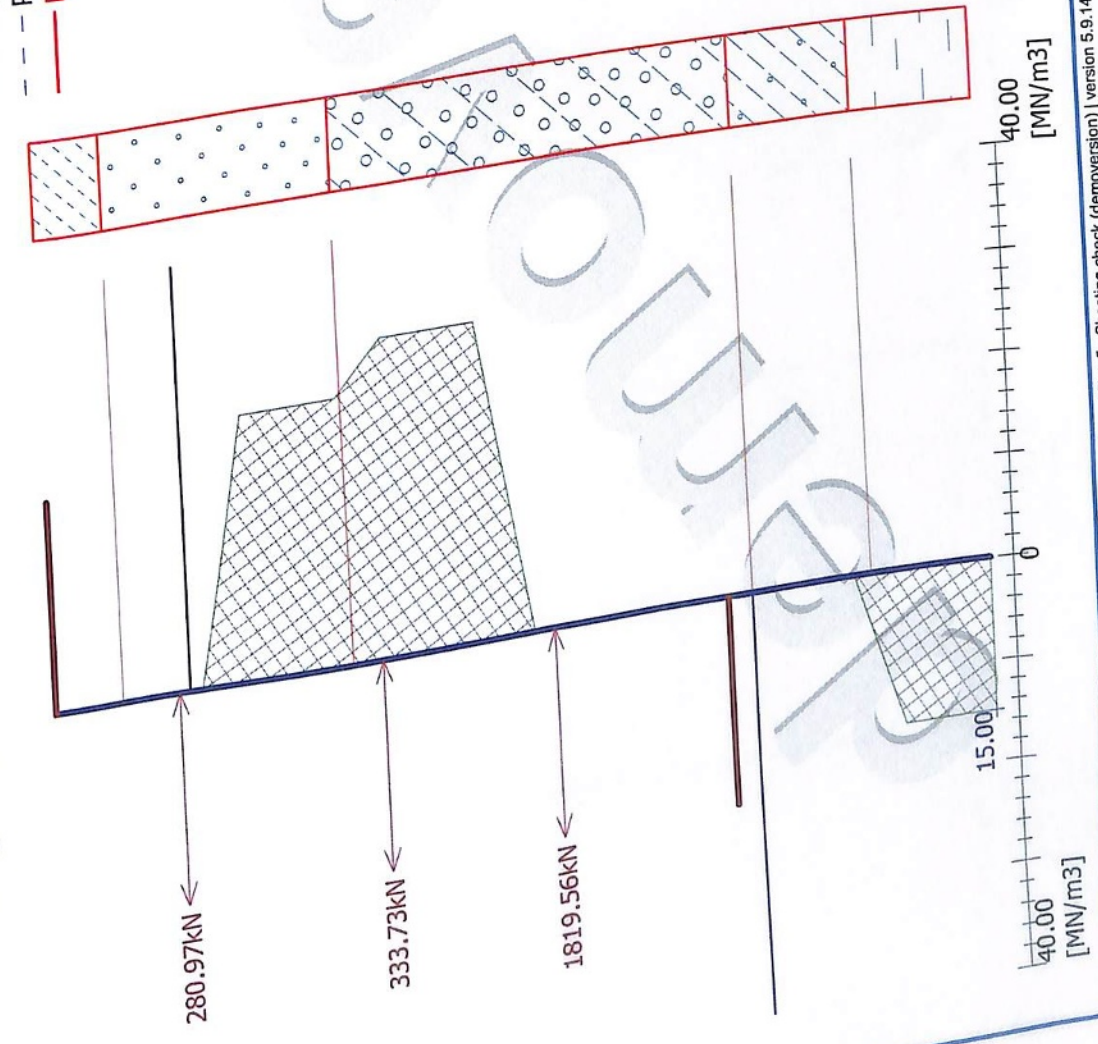
Stage : 2; Analysis: 1

Name : Analysis

Modulus of subgrade reaction
Length of structure = 19.00m

Earth pressures + displacement

T_a
 T_k
 T_p
 Pressure
 Disp.



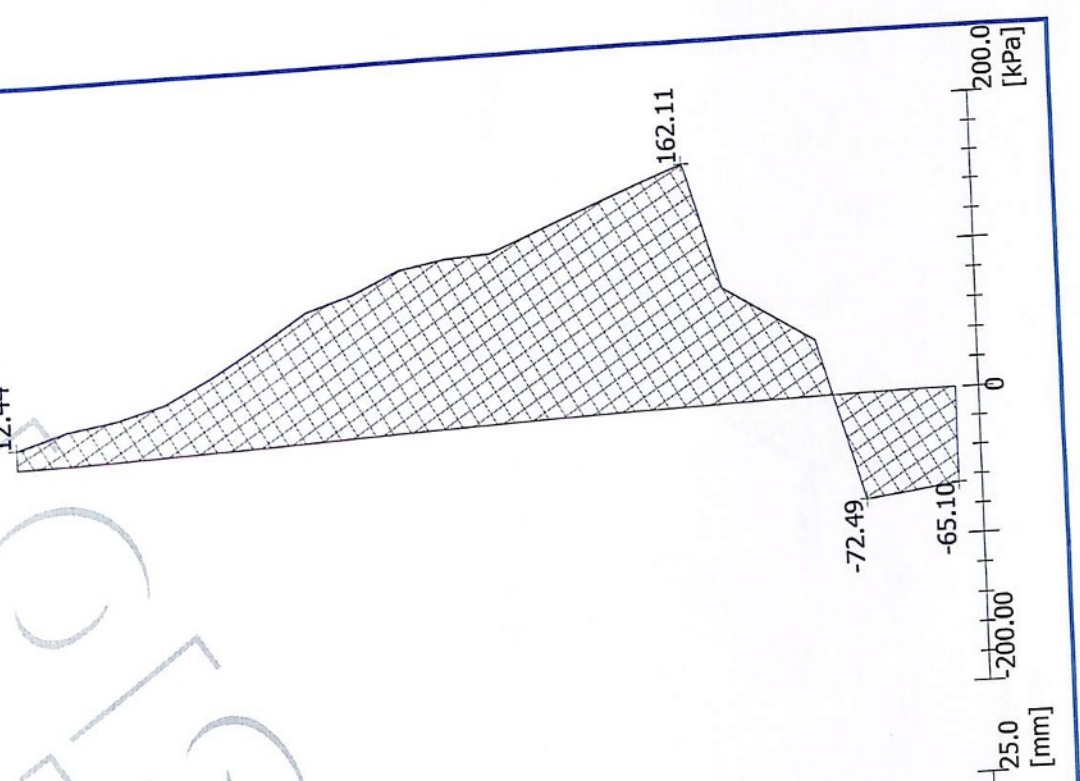
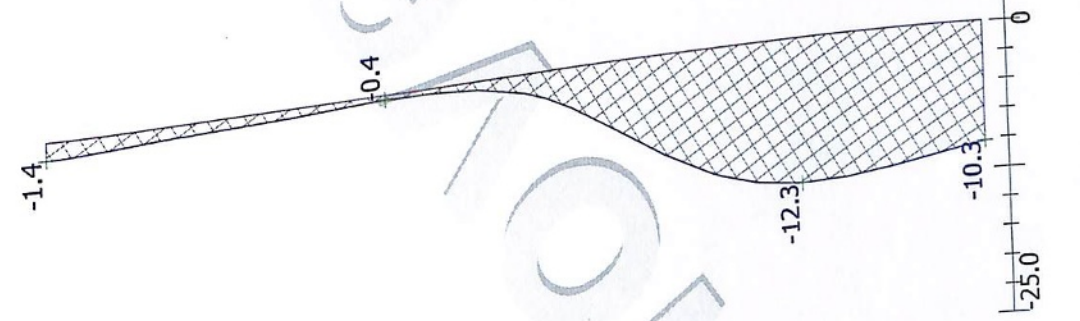
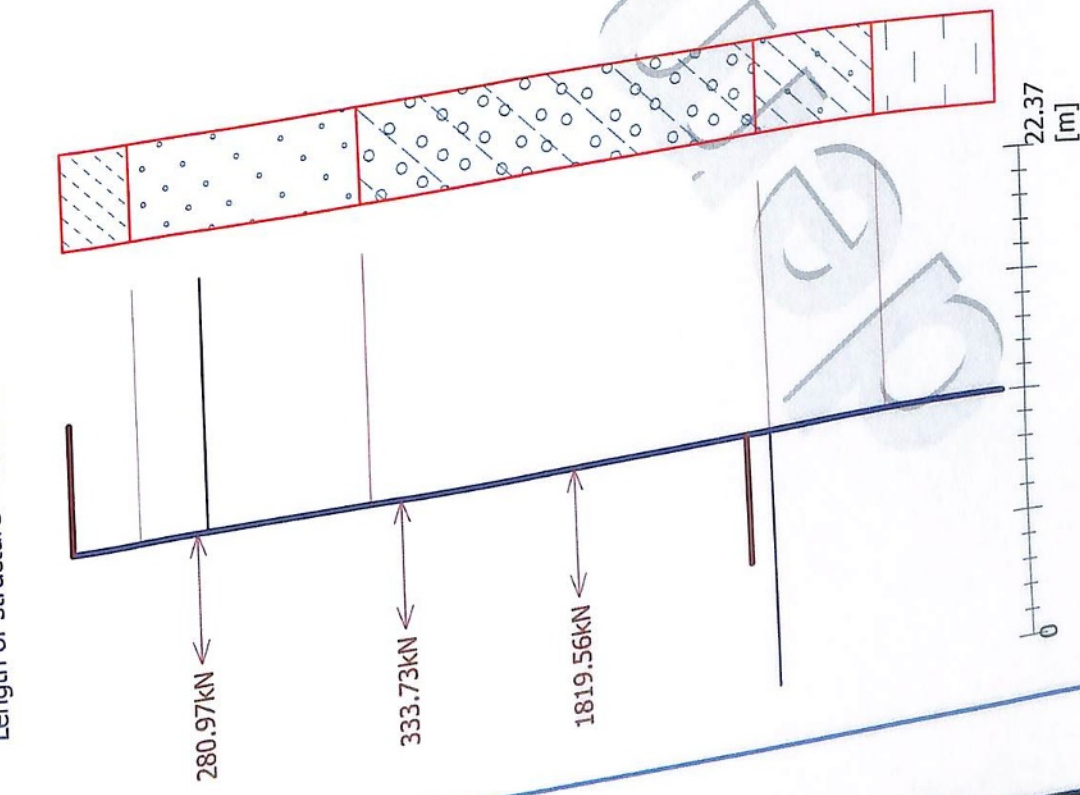
Stage : 2; Analysis: 1

Name : Analysis

Geometry of structure
Length of structure = 19.00m

Displacement of structure
Max. disp. = 12.3mm

Pressure acting on structure
Max. pressure = 162.11kPa



R1 részfal méretezése
Belső erők

SZIE-YMETT
Gerher Tünd

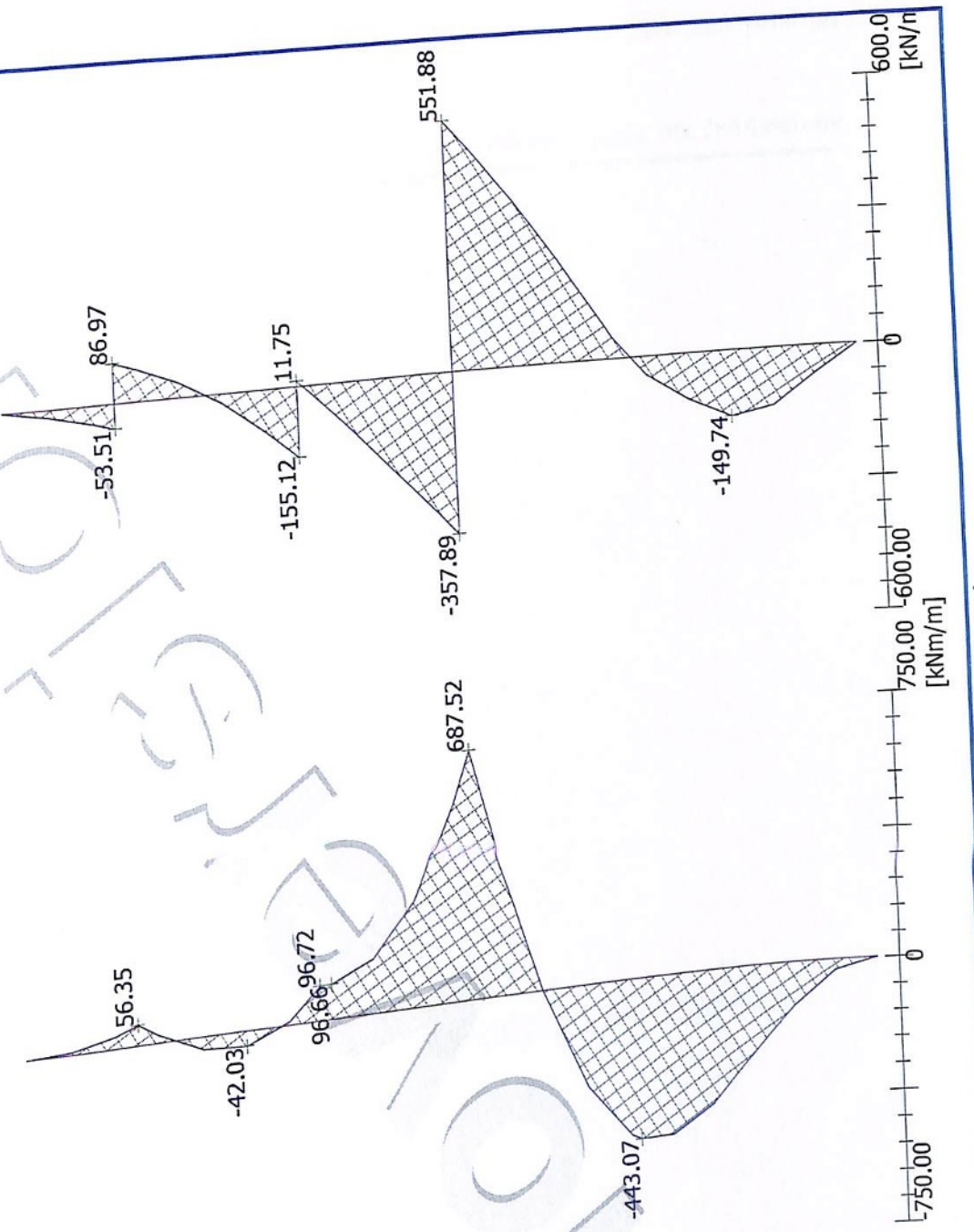
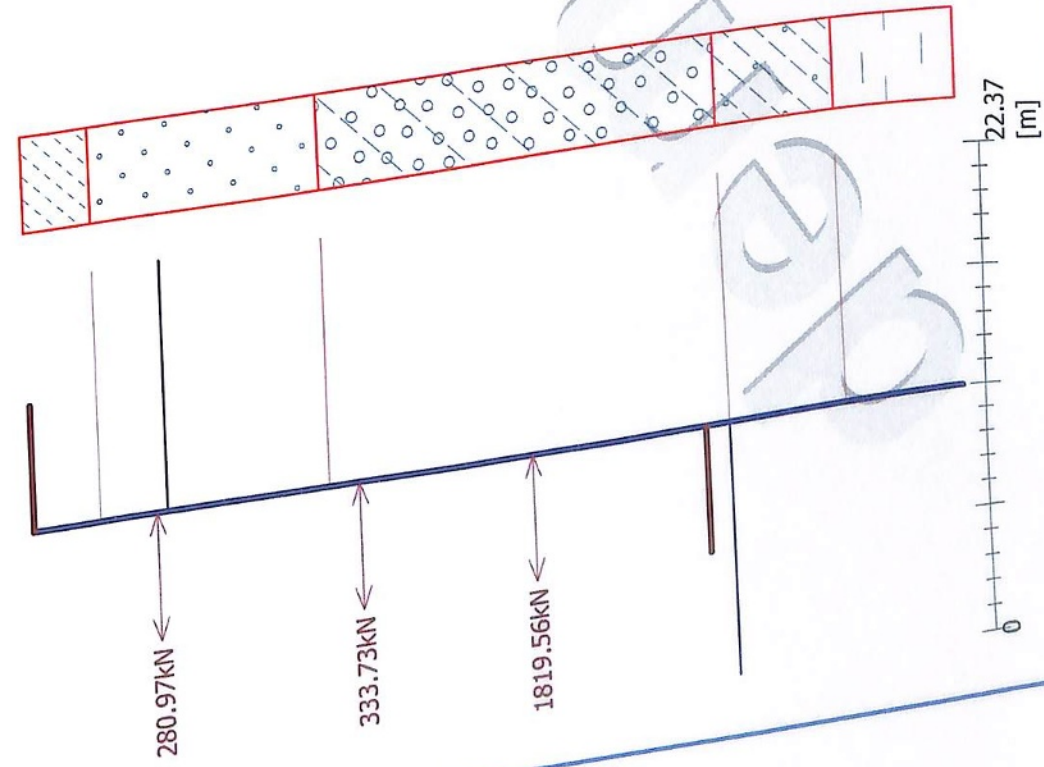
Stage : 2; Analysis: 1

Name : Analysis

Geometry of structure
Length of structure = 19.00m

Bending moment
Max. M = 687.52kNm/m

Shear force
Max. Q = 551.88kN/m



„1A” jelű armatúra vasalásának méretezése

R1 résfal „1A” jelű armatúra vasalásának méretezése

Anyagminőségek:

Beton:	C20/25	→	$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$ $f_{cd} = 13,3 \text{ N/mm}^2$
Acél:	B500	→	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$ $\xi_{c0} = 0,49$

Belső oldali végigmenő vasalás

$\emptyset = 22 \text{ mm}$

$$M_{Ed\max} = 1,35 \cdot 39,63 = 53,5 \text{ kNm}$$

$$c_{nom} = 10 + \max \begin{cases} 22 \\ 25 \\ 10 \end{cases} = 35 \text{ mm}$$

$$d = h - c - \frac{\emptyset}{2} = 600 - 35 - \frac{22}{2} = 554 \text{ mm}$$

$$x_{c0} = \xi_{c0} \cdot d = 0,49 \cdot 554 = 271,46 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = M_{Ed} = b \cdot x_c \cdot f_{cd} \left(d - \frac{x_c}{2} \right)$$

$$x_c = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot f_{cd}}} = 554 - \sqrt{554^2 - \frac{2 \cdot 53,5 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 13,3}} = 7,3 \text{ mm}$$

$$\Sigma N = 0 = N_c - N_s = b \cdot x_c \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{yd}$$

$$A_s = \frac{b \cdot x_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{10^3 \cdot 7,3 \cdot 13,3}{435} = 222 \text{ mm}^2$$

$$A_{s\min} = 0,0015 \cdot b \cdot d = 0,0015 \cdot 10^3 \cdot 554 = 831 \text{ mm}^2$$

$$A_{s\text{prov}} = 1267 \text{ mm}^2 \quad (\emptyset 22/300)$$

Ell.:

$$\Sigma N = 0 = N'_c - N_s = b \cdot x'_c \cdot f_{cd} - A_{s\text{prov}} \cdot f_{yd}$$

$$x'_c = \frac{1267 \cdot 435}{10^3 \cdot 13,3} = 41,44 \text{ mm}$$

$$M'_{Rd} = b \cdot x'_c \cdot f_{cd} \left(d - \frac{x'_c}{2} \right) = 10^3 \cdot 41,44 \cdot 13,3 \left(554 - \frac{41,44}{2} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$M'_{Rd} = 293,9 \text{ kNm} > M_{Ed\max} = 53,5 \text{ kNm} \Rightarrow \text{Megfelel.}$$

Belső oldali hajlítási vasalás

$$\varnothing = 22 \text{ mm}$$

$$M_{Edmax} = 1,35 \cdot 407,84 = 550,6 \text{ kNm}$$

$$c_{nom} = 10 + \max \begin{cases} 22 \\ 25 \\ 10 \end{cases} = 35 \text{ mm}$$

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 600 - 35 - \frac{22}{2} = 554 \text{ mm}$$

$$x_{c0} = \xi_{c0} \cdot d = 0,49 \cdot 554 = 271,46 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = M_{Ed} = b \cdot x_c \cdot f_{cd} \left(d - \frac{x_c}{2} \right)$$

$$x_c = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot f_{cd}}} = 554 - \sqrt{554^2 - \frac{2 \cdot 550,6 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 13,3}} = 80,59 \text{ mm}$$

$$\Sigma N = 0 = N_c - N_s = b \cdot x_c \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{yd}$$

$$A_s = \frac{b \cdot x_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{10^3 \cdot 80,59 \cdot 13,3}{435} = 2464 \text{ mm}^2$$

$$2464 - 1267$$

$$A_{s \text{ prov}} = 2534 \text{ mm}^2 \quad (\varnothing 22/150)$$

Ell.: $\Sigma N = 0 = N'_c - N_s = b \cdot x'_c \cdot f_{cd} - A_{s \text{ prov}} \cdot f_{yd}$

$$x'_c = \frac{2534 \cdot 435}{10^3 \cdot 13,3} = 82,88 \text{ mm}$$

$$M'_{Rd} = b \cdot x'_c \cdot f_{cd} \left(d - \frac{x'_c}{2} \right) = 10^3 \cdot 82,88 \cdot 13,3 \left(554 - \frac{82,88}{2} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$M'_{Rd} = 565 \text{ kNm} > M_{Ed \text{ max}} = 550,6 \text{ kNm} \Rightarrow \text{Megfelel.}$$

Külső oldali alapvasalás (megegyezik a belső oldalival)

$$A_{s \text{ prov}} = 1267 \text{ mm}^2 \quad (\varnothing 22/300)$$

$$M'_{Rd} = 293,9 \text{ kNm}$$

Külső oldali hajlítási vasalás

 $\varnothing = 25 \text{ mm}$

$$M_{Edmax} = 1,35 \cdot 628,42 = 848,4 \text{ kNm}$$

$$c_{nom} = 10 + \max \begin{cases} 25 \\ 10 \end{cases} = 35 \text{ mm}$$

$$d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 600 - 35 - \frac{25}{2} = 552,5 \text{ mm}$$

$$x_{c0} = \xi_{c0} \cdot d = 0,49 \cdot 552,5 = 270,7 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = M_{Ed} = b \cdot x_c \cdot f_{cd} \left(d - \frac{x_c}{2} \right)$$

$$x_c = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot f_{cd}}} = 552,5 - \sqrt{552,5^2 - \frac{2 \cdot 848,4 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 13,3}} = 131 \text{ mm}$$

$$\Sigma N = 0 = N_c - N_s = b \cdot x_c \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{yd}$$

$$A_s = \frac{b \cdot x_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{10^3 \cdot 131 \cdot 13,3}{435} = 4004 \text{ mm}^2$$

$$4004 - 1267 = 2737 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ prov}} = 1267 + 2945 = 4212 \text{ mm}^2 \quad (\varnothing 22/300 + 6\varnothing 25)$$

Ell.: $\Sigma N = 0 = N'_c - N_s = b \cdot x'_c \cdot f_{cd} - A_{s \text{ prov}} \cdot f_{yd}$

$$x'_c = \frac{4212 \cdot 435}{10^3 \cdot 13,3} = 137,76 \text{ mm}$$

$$M'_{Rd} = b \cdot x'_c \cdot f_{cd} \left(d - \frac{x'_c}{2} \right) = 10^3 \cdot 137,76 \cdot 13,3 \left(552,5 - \frac{137,76}{2} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$M'_{Rd} = 886 \text{ kNm} > M_{Ed \text{ max}} = 628,42 \text{ kNm} \Rightarrow \text{Megfelel.}$$

Lehorgonyzási hossz:

$$l_b = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = \frac{25}{4} \cdot \frac{435}{2,3} = 1182 \text{ mm}$$

$$l_b = \frac{c}{0,7} \cdot \varnothing = \frac{47}{0,7} \cdot 25 = 1679 \text{ mm}$$

$$l_{b \text{ eq}} = \alpha_a \cdot l_b = 1,0 \cdot 1679 = 1679 \text{ mm}$$

$$l_{bd} = \max \begin{cases} l_{b \text{ eq}} \cdot \frac{A_{s \text{ req}}}{A_{s \text{ prov}}} = 1679 \cdot \frac{4004}{4212} = 1596 \text{ mm} \\ l_{b \text{ min}} = 10 \cdot \varnothing = 250 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\rightarrow l_{bd} = 1,6 \text{ m}$$

Nyírási vasalás

$$V_{Ed} = 1,35 \cdot 513,4 = 693 \text{ kN}$$

$$\emptyset 14 \rightarrow A_{sw} = 308 \text{ mm}^2$$

$$V_{Rd s} = \frac{z}{s_s} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd}$$

$$s_1 = z \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} = 0,9 \cdot 552,5 \frac{308 \cdot 435}{693 \cdot 10^3} = 96 \text{ mm} \rightarrow s_1 = 90 \text{ mm}$$

$$V_{Rd s} = \frac{z}{s_1} \cdot A_w \cdot f_{ywd} = \frac{497,25}{90} \cdot 308 \cdot 435 \cdot 10^{-3} = 740 \text{ kN} > V_{Ed}$$

$$s_{\max} = 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 552,5 = 414 \text{ mm} \rightarrow s_2 = 400 \text{ mm}$$

$$V_{Rd s} = \frac{z}{s_2} \cdot A_w \cdot f_{ywd} = \frac{497,25}{400} \cdot 308 \cdot 435 \cdot 10^{-3} = 166,55 \text{ kN}$$

Fentieknek megfelelően az egész armatúrán végigmenő kengyelezés: $\emptyset 14/400$
a nyíróerő maximumánál: $\emptyset 14/90$