Szent István Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi Kar

SZAKDOLGOZAT

Németh Zsolt

Budapest
2009

Szent István Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi Kar

A pajzsos alagútépítési technológia kialakulása, fejlődése és gyakorlati alkalmazása

[redacted]

Belső konzulens: Keszeyné Say Emma
Külső konzulens: Dr. Greschik Gyula

Budapest
2009

YBL MIKLÓS
ÉPÍTÉS-
TUDOMÁNYI
KAR

KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK
1146 Budapest, Thököly út 74.
Telefon/Fax: (06-1) 252-1289 E-mail: kozmu.tanszek@ymmfk.szie.hu
Tanszékvezető: Prof. dr. *habil* Telekes Gábor PhD, CSc, Eur. Ing. főiskolai tanár

SZAKDOLGOZAT KIÍRÁS
2009

[redacted]

Nappali Építőmérnök szakos
hallgató részére

A feladat címe: A pajzsos alagútépítési technológia kialakulás, fejlődése és gyakorlati alkalmazása

Belső konzulens: Keszeyné Say Emma adjunktus

Külső konzulens: Dr. Greschik Gyula egyetemi tanár

A szakdolgozat beadási határideje: 2009. június 8. (hétfő) 12^{00}

Budapest, 2009. június 6.

Prof. dr. Telekes Gábor
tanszékvezető

SZENT ISTVÁN
EGYETEM

RÉSZLETES FELADATKIÍRÁS

A pajzsos alagútépítési technológia kialakulás, fejlődése és gyakorlati alkalmazása

[redacted]

szakdolgozatához

A hallgató tekintse át a pajzsos alagútépítés történetét: kialakulás, fejlődés, jövőkép.
Osztályozza a különböző pajzs típusokat, majd részletesen, képekkel, ábrákkal segítve, mutassa be azokat.
Adjon képet a pajzsos alagútépítés magyarországi helyzetéről, aktualizálva a jelen METRO építésre.
Állítson fel szempontrendszert (műszaki, kivitelezési, gazdasági, stb) az alagútépítő pajzsok kiválasztásához.
A felállított szempontok alapján elemezze a leendő 5-ös Metro vonalvezetését; tegyen javaslatot az általa legjobbnak ítélt megoldásra.
Dolgozatában térjen ki az alagútépítések során várható süllyedési horpák számításának módszereire. A különböző módszerek szolgáltatta eredményeket hasonlítsa össze, elemezze.

Budapest, 2009. június 6.

Keszeyné Say Emma

Keszeyné Say Emma
belső konzulens

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés 3
1.1. Megjegyzés 2.1.-től 4.4.4.-ig és a 7. fejezetekhez 4
1.2. Földalatti műtárgyak 5
1.3. Az alagútépítés általános alapelvei 6
1.3.1. Bányászati módszerek 7
1.3.2. Új osztrák módszer, lőttbetonos eljárás 10
1.3.3. A pajzs alkalmazásának alapelvei 12
1.3.4. Alagútfúró gépek 12
2. A pajzs általános működése 13
2.1. Pajzsos alagútépítés kialakulása 14
2.2. Kezdeti úttörő fejlesztések 20
3. Pajzsok fejlődése az 1950-es évekig 23
3.1. Homlokfejtés szikla talajokban 23
3.2. Homlokfejtés kemény agyagokban 24
3.3. Homlokfejtés laza és vizes talajokban 30
3.3.1. A főte felfogása 31
3.3.2. A homlok támasztása 33
3.3.3. Homlokfejtés 35
3.3.4. Védekezés hirtelen talaj- és vízbetörések ellen 36
3.3.4./a Védekezés vízbetörések ellen 37
3.3.4./b Védekezés talajbetörések ellen 38
3.4. Homlokfejtés iszap talajokban 41
4. Pajzstípusok fejlődése az 1950 évektől 1990 évekig 42
4. Pajzstípusok fejlődése az 1950 évektől 1990 évekig 43
4.1. Kemény kőzetekben alkalmazott pajzsok 43
4.2. Kemény agyagokban alkalmazott pajzsok 44
4.2.1. Kézifejtéses pajzsok 45
4.2.2. Marógömbös és markoló rendszerű fejtőgépes pajzsok 45
4.2.3. Marótárcsás fejtőberendezések 46
4.2.4. A külön mozgatható elemekből álló késes pajzs 47
4.3. Laza és vizes talajok 49
4.3.1. Légnyomás alkalmazása az alagútépítésnél 49
4.4. Omlásra hajlamos vízzel telített homokos, iszapos, agyagos talajréteg 50
4.4.1. Mechanikus aktív homloktámasztás 50
4.4.1./a Osztópados pajzsok 50
4.4.1./b Bade típusú pajzsok 51
4.4.2. Hidropajzsok 52
4.4.3. Jet pajzsok 54
4.4.4. A földnyomásos pajzsok 55
5. Napjaink pajzsa 58
5.1. Mikro pajzs 60
5.2. Nyitott homlokmegtámasztás 61
5.2.1. TBM (tunnel boring machine) - alagútfúró gépek 62
5.2.2. Mechanikus pajzsok 64
5.2.3. Double Shields TBM 64
5.3. Zárt homlokmegtámasztás 66
5.3.1. EPB – földmegtámasztású pajzsok 67

5.3.2. Hidropajzsok (mixshield) ... *70*
5.3.3. AVN pajzs ... *72*
5.3.4. Kombináltpajzsok ... *73*
5.4. A pajzs főbb részei ... 74
5.5. Különleges kialakítású pajzsok ... 75
6. Falazóelemek, tübbingek és szigetelésük ... **77**
7. Pajzsos alagútépítés Magyarországon ... **78**
7.1. 4-es metró fúrópajzsai ... 81
8. Az alagútépítő pajzs kiválasztásának szempontrendszere ... **84**
8.1. Vonalvezetés ... 84
8.1.1. A vonalvezetést meghatározó tényezők ... *84*
8.1.2. Javaslat az 5-ös metró vonalvezetésére ... *85*
8.2. Építéstechnológia kiválasztásának szempontjai a következők: ... 88
8.2.1. A kőzet környezet geológiai, mérnökgeológiai, geotechnikai adottságok és a hidrogeológiai viszonyok (talajvíz, rétegvíz, karsztvíz helyzete, tulajdonságai) ... *88*
8.2.2. Az alagút, a műtárgyak feletti takarás mértéke ... *90*
8.2.3. A magassági és vízszintes vonalvezetés ... *91*
8.2.4. Az alagút, a műtárgyak geometriája (kitörési szelvény, vonalszakaszok hossza) ... *92*
8.2.5. Az épített környezet adottságai (felszín beépítettsége, stb.) ... *92*
8.2.6. A természeti környezet szempontjai ... *95*
8.2.7. A humán környezet elvárásai (zaj, rezgések, por, közlekedés, stb.) ... *96*
8.2.8. A gazdaságossági szempontok ... *96*
8.2.9. Az építési idő ... *97*
8.3. Javaslat ... 98
9. Összegzés ... **99**
10. Számítási melléklet ... **101**
10.1. Számítások a 2-es és 3-as metró tapasztalatai alapján ... 102
10.1.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *103*
10.1.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *106*
10.1.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *108*
10.1.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *111*
10.2. Tapasztalati képletek ... 113
10.2.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *114*
10.2.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *117*
10.2.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *119*
10.2.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *121*
10.3. Plaxis programmal ... 123
10.3.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *124*
10.3.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *125*
10.3.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *126*
10.3.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *127*
10.3.5. Keleti pályaudvar, két 6,8 méter átmérőjű alagút ... *128*
10.3.6. Keleti pályaudvar, egy 9,4 méter átmérőjű alagút ... *129*
10.4. Eredmények kiértékelése ... 130
10.4.1. Süllyedések hatása az építményekre ... *132*
10.4.2. Eredmények összegzése ... *133*
11. Felhasznált irodalom ... **134**
12. Köszönetnyilvánítás ... **136**

1. Bevezetés

Hazánkban, földrajzi adottságaink és gazdasági lehetőségeink miatt nem sok nagyobb alagútépítés folyt. Egy, most mégis mindennapi jelenséggé vált és nagy figyelmet kapott. Nem csak szakmai körökben, de a budapesti lakosok és az egész ország figyelemmel kíséri az építkezést. A politika, a sajtó, és a közvélemény is kíváncsi és rögtön reagál, ha valami történik a 4-es metróval kapcsolatban. Nem volt ez másképp az előző metróépítkezések során sem. Úgy gondoltam, hogy a pajzsos alagútépítés igazán aktuális téma, nem csak a mostani, de talán a további metróépítések miatt is.

A pajzsos alagútépítés most a legmodernebb alagútépítési technológiák közé sorolható. Eszméje az 1800-as évek elejéről származik. Bár alapelvében a mai modern pajzsok megegyeznek őseikkel, mégis nagyban eltérnek azoktól. Óriási fejlődésen ment keresztül a technológia a kezdetektől napjainkig. Megnőttek a feladatok, mérettartományok, teljesítmények, az elvárások és a munkavégzés biztonsága, szélesedtek az alkalmazási területek.

A pajzsos alagútépítés kezdetén kézi fejtéssel működő megoldásait, ma a gépesített eljárások váltották fel. A talaj fejtése teljesen automatizált módszerekkel történik. A kőzet környezet geológiai, geotechnikai és hidrogeológiai viszonyai bármilyenek is legyenek, ma már nem okoznak problémát az alagútépítők számára. Minden körülmények között képesek alagutat építeni. Több fajta technológiát ismerünk. Különböző talajokban mindig a leggazdaságosabb és legmegfelelőbb technológiát kell választani az építésre. A pajzsot először víz alatti (folyó alatti) alagút építésére alakították ki. Ma úgy alakítják ki, speciálisan az adott feladatra, hogy az alagút tervezett nyomvonalán előforduló összes lehetséges helyzethez alkalmazkodni tudjon, így bármilyen útvonalat jelölnek ki számára, az nem okozhat problémát.

Az eltelt kétszáz év alatt kialakult pajzstípusok sokasága és folyamatos fejlődése során eljutottunk a napjainkban alkalmazott csúcstechnológiákhoz. A dolgozatom egy része a múlt homályába veszett pajzsokkal, a pajzsok fejlődésével, és a jelenkori pajzsok ismertetésével foglalkozik. A pajzsos alagútépítési módszerekről nagyon kevés aktuális könyv, vagy jegyzet található meg magyar nyelven. A mai külföldi szakirodalom gazdag a témában, míg itthon csak éppen aktuális metró építés során jelentek meg könyvek vagy cikkek. Pedig ez nem is olyan rég, még egész másképpen volt. 1951-ben megjelent *Széchy Károly* Alagútépítéstan című könyvét az egész világ ismerte „The Art of Tunnelling" címen. "*The Art of Tunnelling megjelenése hasonló megrázkódtatást és elismerést váltott ki a nyugati alagutas szakmai körökben, mint a Szputnyik váratlan fellövése a katonák között. Megértettük, hogy az Európa keleti, általunk alig ismert felén a miénkkel legalábbis összemérhető szakmai tudás létezik, amivel számolnunk kell.*" - kommentálta *Terry Hulme* a szakma egyik nagy öregje Széchy professzor hozzájárulását az alagútépítés 'művészetéhez'. A könyv máig megtalálható a fejlődő és fejlett országok műszaki könyvtárainak polcain az Egyesült Államoktól Kínáig. A könyv még ma is jól használható, én is felhasználom.

A dolgozatom célja tisztázni a pajzs szó fogalmát, illetve összegyűjteni és részletesebben bemutatni a modern pajzsokat. A magyar köztudatban helytelenül a TBM rövidítést használjuk a pajzsra, melynek jelentése alagútfúró gép. A másik ilyen helytelen szóhasználat, hogy sokszor pajzsnak nevezzük az alagútfúró gépet. A jelenkori modern pajzsok bemutatása mellett a velük szemben támasztott komoly kritériumokat, a beruházók által kialakított szempontrendszer bemutatásával szeretném érzékeltetni. Felhasználom a most épülő metró tapasztalatait, gyakorlati példán mutatom be a leendő 5-ös metróvonalra

alkalmazható pajzsos alagútépítési technológiákat és egy lehetséges alternatívára is javaslatot teszek. Kiemelt figyelmet kap a technológiából adódó süllyedések vizsgálata, melyre a 10. Számítási melléklet című fejezetben több módszerrel végeztem számításokat.

1.1. Megjegyzés 2.1.-től 4.4.4.-ig és a 7. fejezetekhez

Ezen fejezetek témája nem kapcsolódik szorosan a dolgozat eredményéhez. Mégis úgy, gondolom érdemes itt tárgyalni. Nem csak régi pajzstípusok bemutatásáról van itt szó. Véleményem szerint jól szemlélteti a technológia kialakulását, működési alapelvét, működését, a fejlődés egyes lépcsőfokait melyek fontosak voltak ahhoz, hogy kifejlődjenek a mai modern megbízható pajzstípusok. Érdekes nézőpontot nyújt a korabeli építkezés a mai építőmérnökök számára, a története, küzdelmekkel teli menete, és lassan megtérülő, de még ma is jól működő végeredménye. Továbbá, hogy magyar nyelvű szakirodalomban mindez nincs összefoglalva ilyen terjedelemben, ilyen részletesen.

1.2. Földalatti műtárgyak

A közlekedési igények, a városok belterületének felértékelődése, a beépítetlen területek csökkenése, a régi épületek és a természeti környezet megóvásának követelménye az elmúlt évtizedekben arra vezettek, hogy mind több létesítményt kell a felszín alá építeni. A mélyépítés fel is készült erre. Sok új szerkezetet, technológiát fejlesztettek ki, melyekkel a felszín alatt vasútvonalak és autópályák épültek. A nagyvárosokban az épületek alatt, egész föld alatti városok létesültek a felszín minimális zavarásával, a meglévő környezet és építmények biztonságos megőrzésével.

A földalatti műtárgyakat a létesítés célja alapján az 1.1. táblázatban megadott módon szokás csoportosítani. (Egyes létesítményeknek természetesen csak egy-egy szakasza halad a felszín alatt.)

1.1. táblázat: A földalatti műtárgyak funkciói

A földalatti műtárgyak funkciói		
közlekedés	közúti közlekedés	közúti aluljáró
		mélyvezetésű út
		közúti alagút
	kötöttpályás közlekedés	metró
		városi vasút, villamos
		vasúti v. villamos aluljáró
	gyalogos közlekedés	gyalogos aluljáró
	gépjárműtárolás	mélygarázs
közmű	vízellátás, csatornázás	egyedi vezeték
	gázellátás, távhőellátás	közműalagút
	villamos energia	vonali kisműtárgy
	posta és hírközlés	nagyműtárgy
egyéb	kereskedelem	üzlet
	ipar	raktár, tározó
	szolgáltatás	szállítóalagút
	polgári védelem	óvóhely

A sokféle szerkezet kétféle módszerrel építhető:

- nyílt módszerrel, vagyis a felszínről megnyitott munkagödörben
- zárt módszerrel, vagyis a felszín zavarása nélkül, bányászati, illetve más zárt építési eljárásokkal.

Kisebb mélységek esetén, ha a zárt eljárás veszélyes a talajadottságok miatt, akkor sokkal gazdaságosabb, egyszerűbb és kevésbé veszélyezteti a környezetet a felülről nyitott munkagödörrel való építés. Hátránya viszont a felszín megzavarása az építés során. A felszín alatti felső zóna használatát akadályozza, nem csak az építés idején. Emiatt plusz költséget jelenthet a közművek kiváltása. A városi környezetben főleg aluljárók, mélygarázsok,

metróállomások építésénél gyakran alkalmazott módszer. A 4-es metró építése során a vonal alagutat zárt pajzsos módszerrel építik, viszont az állomások, felszínről nyitott résfallal határolt munkagödörrel készülnek.

A zárt építési eljárás hosszabb vonalas, vagy mélyebben elhelyezkedő műtárgyaknál sokkal gazdaságosabb. De nem csak ez teheti indokolttá. A beépített területeken az építmények megtartása, védelme, vízfolyások keresztezésekor a víztelenítési problémák elkerülése, a felszínzavarás elkerülése és minimalizálása, és a környezetvédelmi okok is fontos szerepet játszanak.

A továbbiakban csak a zárt építési módszer, vagyis az alagútépítés témakörét részletezem. (Szepesházi 2008)

1.3. Az alagútépítés általános alapelvei

Az alagút építés során az alagút keresztmetszetében a talajt, illetve kőzetet eltávolítják, az üreget szükség szerint ideiglenesen biztosítják beomlás ellen, majd a biztosítás védelme alatt megépítik a végleges alagút falazatot. A biztosításra azért van szükség, mert a talajok, kőzetek kifejtést követően csak a fizikai jellemzőik alapján meghatározható ideig állnak meg biztosítás nélkül. Mind az ideiglenes biztosítás, mind pedig a végleges falazat szempontjából elsőrendű fontosságú annak ismerete, hogy milyen terhelő erőhatásokkal kell számolni. Ma már többféle módszer is ismert, amelyekkel pontosan számíthatók az alagútépítés közben és a végleges falazaton kialakuló terhelések, illetve a talaj, vagy kőzet környezetben kialakuló erő átrendeződések.

Az alagútépítési gyakorlatban jól ismert az a tény, hogy a földnyomások nagyságára nem csak a geometriai viszonyok, a talaj súlya, rétegződése, belső szilárdsági adatai és egyéb jellemzői vannak hatással, hanem igen nagy, sokszor az előbbieket felülmúló szerepe van a megépítés módjának és időbeli lefolyásának.

A talaj eredeti zavartalan állapotában a föld, illetve a kőzet és a víz nyomása uralkodik. Ha üreget képezünk ki, akkor az üreg kerületén, általában a legmagasabb pontján, a főtében, legkisebb elmozdulása után a talaj az üreg körül, illetve fölötte bizonyos mértékben átboltozódik és az eredeti feszültségállapot megváltozik. Az egyensúly azonban nem áll rögtön helyre, kivéve, ha szilárd, állékony talajjal, kőzettel állunk szemben. Az alá nem támasztott felső rétegek lassan süllyedni kezdenek, esetleg az oldalak is befelé nyomódnak (bizonyos esetekben a talpon jelentkezhetnek mozgások), a környező földtömegek meglazulnak, és a lazulás állandóan tovább terjed, míg végül az üreg feletti földtömeg beomlik, úgynevezett felszakadás jön létre, ami akár a felszínig is felérhet. Azonban, ha a megbontott felületeket azonnal kidúcolják, alátámasztják, felfogják, azaz röviden biztosítják, még pedig úgy, hogy a környező rétegek nem tudnak eredeti helyzetükből elmozdulni, akkor a környezetben csak kisebb mértékű lazulások lépnek fel, ezek továbbterjedését az üreg biztosítása meggátolja. Így a fellépő földnyomások lényegesen kisebb értékűek lesznek. Ebből az a következtetés vonható le, hogy a legkisebb földnyomásokra csak akkor lehet számítani, ha a talaj, vagy kőzet meglazulását megakadályozzuk, azaz, olyan módon hajtjuk végre a fejtést, hogy a talajt, vagy kőzetet a kivájt üreg felett azonnal, feszesen biztosítjuk. Ezáltal az alagút körül kialakuló lazulási mag lényegesen kisebb lesz és az alagutat terhelő földnyomás nagysága is lecsökken.

Az alagútépítés története során különböző építési módszerek alakultak ki. Az egyes építési módszereknél azonban mindig alapvető szempont, hogy a fellépő földnyomások minél kisebbek legyenek. Éppen ezért igen fontos:

- A fejtésnél nem szabad a fejtés területét nagy darabon megtámasztás nélkül hagyni, a kibontott üreget időben biztosítani kell.
- A biztosítást megfelelő teherbírásúra kell kiképezni, hogy az alagút keresztmetszet síkjában ható erőhatásokat minimális alakváltozások mellett legyen képes felvenni.
- A biztosításnak az alagút tengellyel párhuzamos hosszirányú erőhatásokat is káros deformációk nélkül kell elviselni.

Lényegében úgy kell biztosítani, hogy például a dúcolás minden eleme szorosan befeszüljön, ami által elérhető, hogy a támasztott felületek az érintetlen talajrétegekben elfoglalt eredeti helyükben maradjanak. Mindennemű mozgási lehetőség megengedése a kerületi földtömegek megmozdulásával, leválásával járhat. Ez magával hozza a földnyomások megnövekedését, ami az eredeti kisebb földnyomásokra tervezett és annak jól meg is felelő biztosítás tönkremenetelét okozhatja. Éppen ezért a biztosítással minden hézagot, és üreget is azonnal ki kell tölteni. (Illési 1954)

A zárt eljárások két nagy, s azokon belül további csoportokra oszthatók:

- a bányászati eljárásnak a klasszikus módszerei és új osztrák építési módszerként ismert változata használatosak,
- a pajzsos, illetve alagútfúró gépes módszerek.

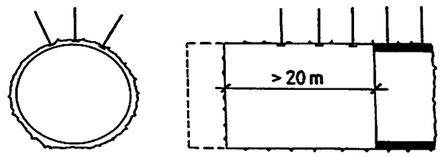
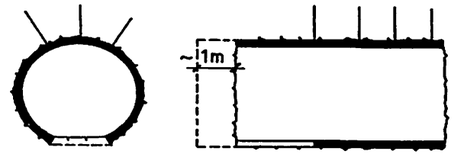
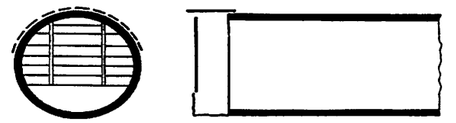
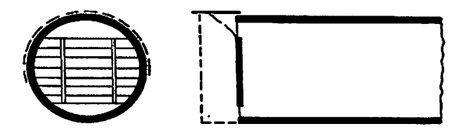
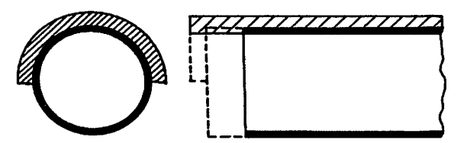
A bányászati módszerek általában olcsóbbak a pajzsos eljárásnál a viszonylag jól fejthető, de állékony kőzetek esetén, valamint kemény kötött és valamennyire összeálló szemcsés talajoknál. Nehezen fejthető, nagy szilárdságú kőzetekben viszont, elsősorban vonalas létesítményeknél, érdemesebb alagútfúró gépeket alkalmazni, míg kevéssé állékony talajokban és különösen a talajvíz alatt csak a pajzsos eljárások szolgáltatnak kellő biztonságot.

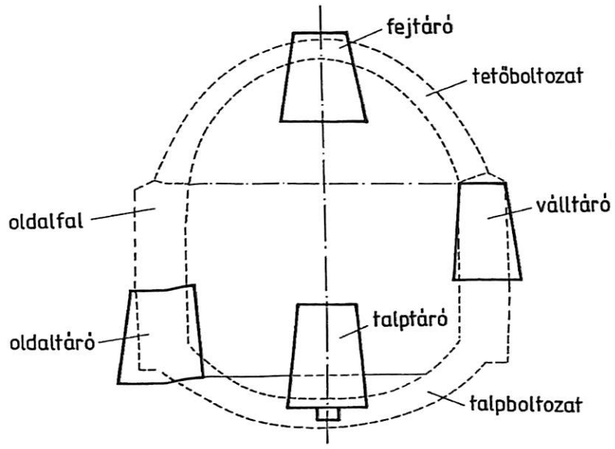
1.3.1. Bányászati módszerek

A bányászati eljárás konkrét módszerét a kőzettulajdonságok alapján kell megválasztani. A kőzetek osztályozását szilárdsági és kőzetmechanikai vizsgálatokkal, ill. szemrevételezéssel megállapítható jellemzői alapján határozzák meg. Ennek alapján választják ki a követendő építéstechnológia alapvető részleteit. Az egyik legismertebb *Biernatowski* módszere, ami a kőzet szilárdsági és tagoltsági jellemzőitől és a vízszivárgás mennyiségétől függően ad meg valamely vágatszélességre vonatkozóan állékonysági időt.

A klasszikus bányászati eljárások esetében az üreget a kőzet minőségétől függően teljes szelvényben vagy részletekben fejtik. A 1.2. táblázatban láthatók a szokványos méretű alagutak építési módszereinek lehetséges változatai. Állékony kőzetekben a fejtés a nehezebb, ezért robbantással, marógömbös fejtőgéppel végzik. Ideiglenes támasz nem szükséges, esetleg végleges sem, de legalább is annak beépítése nem sürgős. Amennyiben nem szükséges ideiglenes megtámasztás, úgy egyből a végleges falazat épül. Általában zsaluzókocsival épített monolit vasbetonfal.

1.2. táblázat: Szokványos építési módszerek állékony kőzetben

1		Biztosítás nem kell, csak helyenként kell a kilazult kőzeteket megfogni.
2		Rövid (~1 m) hosszban szabadon kibontható, de utána biztosítani kell.
3		A fejtés hézagos főtebiztosítással részletekben végezhető.
4		Azonnali főtebiztosítás és homloktámasztás szükséges.
5		A fejtés csak tűzőpallók védelmében homlokdúcolás mellett végezhető.
6		Különleges eljárás kell (talajszilárdítás, csőernyővédelem, levegőtúlnyomás).



1.1. ábra: Alagúttárók neve

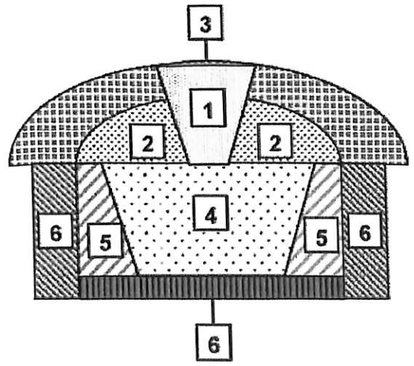
Gyenge kőzetben, talajokban általában részletekben alakítják ki a szelvényt. Először 2,0 - 2,5 m magas és 2,0 - 2,2 m alsó szélességű tárókat nyitnak. A tárókat a végleges alagút helyzetéhez képest másképpen nevezik, melyet a 1.1. ábra szemléltet. A tárókba ideiglenes tám kerül, melyet korábban fából ácsoltak, újabban inkább acélelemekkel, lövellt betonnal, kőzethorgonnyal dolgoznak, de alkalmaznak acél vagy vasbeton elemeket is. A kézi fejtést felváltotta a kisgépek alkalmazása. Az ideiglenes támok védelmében részletekben készül el a monolit vasbeton falazat, utoljára a talpboltozat.

A klasszikus eljárások közül kettő ma is használatos (1.2. ábra):

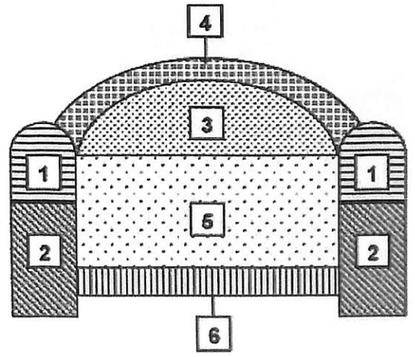
- az aláfogásos (belga) módszerben a fejtáróból indítva először a szelvény tetejét (a kalottot) alakítják ki, aztán következnek az oldalfalak és végül a talpboltozat,
- a magvahagyó (német) módszerben a váll és oldaltáróval előbb az oldalfalakat építik meg, majd a kalottot kihajtva a tetőboltozatot, végül ennek védelmében bontják ki a magot, s építik be a talpboltozatot.

A Belga módszert az állékonyabb kőzetben, kisebb átmérő esetén alkalmazzák. Nagyobb szelvények, vagy rosszabb talajviszonyok esetén a német módszer az előnyösebb.

Mindkettőt alkalmazták a budapesti 2-es és 3-as metró építésénél. Az elmúlt 20 évben Madridban, évi 10 km vonal épült olcsón és biztonságosan ezzel a technológiával.



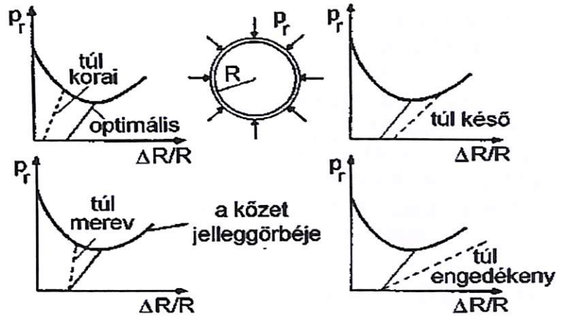
aláfogásos (belga) módszer



magvahagyó (német) módszer

1.2 ábra: Klasszikus bányászati módszerek modern változatainak kifejtési sorrendje

1.3.2. Új osztrák módszer, lőttbetonos eljárás



1.3. ábra: A NATM alapja. A nyomás [P_r] és alakváltozás [$\Delta R/R$] grafikonok alapján az optimális falazatépítés

Az új osztrák építési módszer közismert mozaikszavakkal NÖT (Neue Österreichisch Tunnelbauweise), vagy NATM (New Austrian Tunneling Method) módszer, azonban a világ nagy részében az előző fejezetben említett eljárásokat is kiszorította. Korábban csak szilárd kőzetekben és elsősorban hegyvidéki vasúti és közúti alagutak építésére alkalmazták, újabban azonban már kevésbé állékony talajban városi környezetben, a metróépítésnél is alkalmazzák. A módszer osztrák „származását" és műszaki eredetiségét ugyan sokan vitatják, és az elmúlt évtizedben elég sok baleset, köztük súlyos is történt városi alkalmazásakor. Ám világméretű áttörése vitathatatlan.

A NATM lényege (1.3. ábra) abban foglalható össze, hogy a célszerű elrendezésben kifejtett üregben megfelelő ütemben kiépítve a falazatot a kőzetet bevonják a teherviselésbe. Így kisebb szelvényt kell fejteni, nincs ideiglenes megtámasztás, és vékonyabb végső fal is elég. Üregnyitás után ugyanis a sugárirányú ΔR alakváltozással (azaz ha dolgozik, mozog a kőzet) a sugárirányú nyomás csökken, ezért gyengébb megtámasztás is elég. Ha viszont az alakváltozás túllép egy határt, a kőzet töredezik, fellazul, nyomása megnő. Ezt nem engedik meg, a kőzet jelleggörbéjét megismerve, kellő időben, kellő merevségű és szilárdságú falazatot készítenek.



1.4 ábra: Fejtés részletekben oldaltárókkal.

A falazat alapeleme a lövelléses technológiával felvitt 15-25 cm vastag vasbeton héj. Ez gyorsan elkészíthető, jól tapad a kőzethez, a helyi bomlásokat meggátolja, és rugalmasan illeszthető a fejtéshez. A fejtés és a falazás módját a 1.2. táblázat szerint a mérethez és kőzetfajtához igazítják. A NATM egyik szokásos fejtési módszere a 1.4. ábrán látható.

A lövellt beton száraz vagy nedves eljárással készül. Az előbbi esetében levegőnyomással száraz beton jut a szórópisztolyhoz, s ott keveredik a vízzel. A nedves eljárásnál a vízzel kevert betont nyomják a pisztolyhoz. Az utóbbi jobb minőséget ad, és kevésbé ártalmas, mégis inkább az előbbit használják, mert az alagútépítés során nem mindig biztosítható a folyamatos munka. A nedves eljárásban a beton beleköthet a vezetékekbe és a pisztolyba. Kötésgyorsító és tapadásjavító adalékszerekkel azonban a száraz eljárás is jó minőséget nyújt, ill. porelszívással kell biztosítani a pormentes munkaterületet.
A lőtt betonhéjat, ha kell, megerősítik:

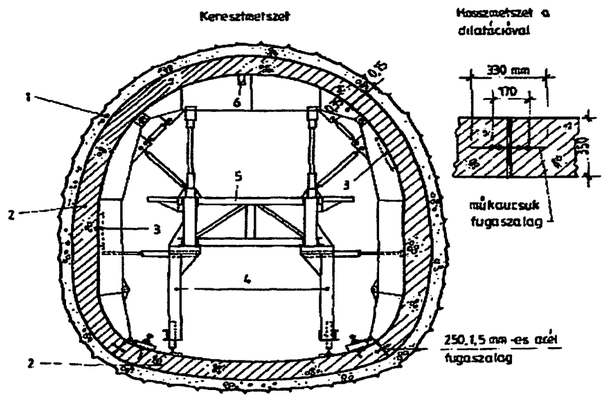
- repedezett kőzetben cementtel vagy műgyantával bekötött, vagy befeszülő kőzethorgonyokkal fogják össze a kőzetet (főleg a főtében),
- nagy nyomás esetén rácsos vagy zárt szelvényű acél íveket építenek be a héjba.

A lövellt héj zárásával egy időre megvan a szükséges megtámasztás, van idő a végleges belső falazat elkészítésére. Ha vízzárási igény van, akkor a lőtt betonhéjra szigetelést hordanak fel vagy a monolit vasbeton falazat készül vízzáró minőséggel. A belső falat általában zsaluzókocsival készítik (1.5. ábra).

A NATM gyengébb kőzetekben különböző segédtechnológiákkal alkalmazható. Ilyenek pl. a jethabarcsosítás, az itatásos injektálás, a talajfagyasztás, a levegőtúlnyomás, pallók előretűzése és a csőernyő védelem. Ezekkel a főte fölött a vállig erősítik meg a talajt.

A NATM fontos eleme a monitoring, hiszen éppen a kőzet viselkedésének felismerésén alapul. A szokásos geodéziai munkák mellett végeznek

- szintezéseket az alagútban és a felszínen a felszínmozgások ellenőrzéséhez,
- konvergencia méréseket (a héjon rögzített pontok távolságának mérése) a szerkezet- és a kőzet deformációk megállapításához,
- extenzo- és inklinométeres méréseket a kőzet fajlagos alakváltozásainak megállapítása céljából,
- feszültségméréseket a kőzetfalon és a szerkezeten nyomásmérő cellákkal és mérőbélyeges alakváltozás mérőkkel,
- horgonyerő méréseket elektromos vagy mechanikus eszközökkel a terv ellenőrzése céljából. (Szepesházi 2008)



1.5 ábra: NATM-es alagútfalazat és zsaluzókocsija

(1)- lőtt beton, (2)- monolit vb., (3)- betonozó nyílás, (4)- szállítókocsi, (5)- munkapad, (6)- betonszivattyú

1.3.3. A pajzs alkalmazásának alapelvei

A pajzsos építés régi módszer, de az elmúlt évtizedben óriási fejlődésen ment keresztül. Elsősorban víz alatti alagútépítéseknél alkalmazták szemcsés, agyag vagy iszap talajokban. A pajzs eredetileg tulajdonkeppen "csak" egy acélból készült, mozgó dúcolat volt, mely a henger alakban kifejtett üreg palástját támasztotta meg. Mára azonban a pajzsos építés teljes körű technológiát jelent, és nagymértékű gépesítettség jellemzi. A pajzsoknak meg kell támasztaniuk és egyben fejteniük is kell a homlokfalat.

Az ismert alagútfejtési módszerek a német, belga, és az új osztrák mind abból a törekvésből eredtek, hogy az építés folyamán jelentkező nehézségeket és az alagútépítés általános alapelveiben (1.2-es fejezett) körvonalazott általános hátrányokat lehetőleg minél jobban kiküszöböljék.

Ugyanebből a meggondolásból ered a pajzshajtásos alagútépítési módszer is, amely az építés hátrányai közül igen sokat meg tudott szüntetni, mindent azonban nem. Nem szabad azt hinni, hogy a pajzsos módszerrel a bányászati módon végzett alagútépítés nehézségeit meg lehet szüntetni. A pajzzsal egyes hátrányokat ki lehet küszöbölni, és amennyiben helyesen alkalmazzák, nagy teljesítményeket lehet elérni. Azonban az alagútépítésnek az általánosan ismertetett alapvető elvei éppen úgy érvényesek a pajzshajtásos munkamódszerre is, mint a bányászati módszerre. A pajzsnál éppen úgy kerülni kell a nagydarabban való előrefejtést, mint a bányászati módszer alkalmazása esetén, éppen úgy törekedni kell az azonnali aláfogásra. Itt is meg kell lennie a biztosítás teherbírásnak. Lágy kőzetek, vagy puha talajok esetén a földnyomásokat nem csak a keresztmetszet síkjában kell felvenni, hanem arra merőlegesen is, tehát a homlok megtámasztásáról is gondoskodni kell. A pajzs is csak ideiglenes dúcolást jelent, amelynek védelme alatt a végleges alagútfalazat megépíthető. A fejtés ideiglenes megtámasztásának hátrányát és a föld fejtésének szükségességét tehát a pajzzsal sem lehet kiküszöbölni. A pajzsnak, akárcsak a dúcolatnak, addig kell támasztania a talajt, míg a végleges teherviselő burkolat el nem készül. Ellenben a bányászati módszerrel való alagútépítés egyéb említett hátrányán úrrá lehet lenni:

- Pajzsos munkánál a fejtés és a bélés építése kisebb lépcsőkben történhet: a két művelet térbelileg egymáshoz közel hozható. Gyakorlatilag folyamatosan végezhető és a kivájt üreg csak igen rövid ideig áll ideiglenes biztosítás alatt.
- A pajzsot csak egyszer kell felszerelni és a végén részben, vagy egészben elbontani, mivel a helyhez kötött és álló dúcolattal szemben mozgó, előrehajtható aláfogásként működik. A pajzs tulajdonképpen mozgó biztosítás. (Illési 1954)

1.3.4. Alagútfúró gépek

A szilárd kőzetekben épülő alagutak esetében általában nincs szükség a homlokfal és az üreg megtámasztására. Ilyen esetekben alkalmaznak hosszabb alagutaknál alagútfúró gépet, melynek csak a fejtés a feladata. Részletesebben a jelenkori pajzsoknál az 5.2.1. TBM - alagútfúró gépek fejezetben fejtem ki.

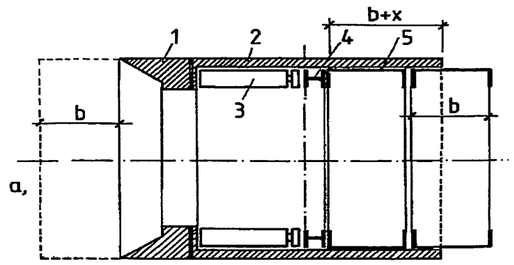
2. A pajzs általános működése

Bár az idők folyamán a pajzsokat igen sokféle szerkezettel és elrendezéssel készítették, mégis azok az alapelvek, melyek *Brunel* 1813-i szabadalmi leírásaiban is lényegileg felfedezhetők, mindezidáig megmaradtak. Ezek pedig a következők:

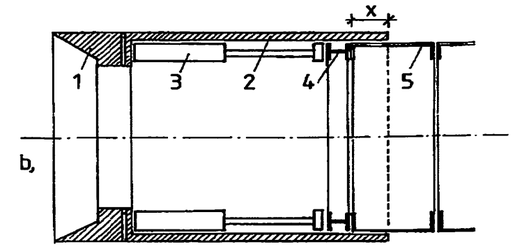
- A pajzs külső palástja biztosítja a talajt, és ennek védelme alatt végezhető el nem csak a fejtés, hanem a bélés megépítésének, szerelésének művelete is. A biztosításhoz semmiféle külön dúcolatra nincs szükség.
- A belső merevítő szerkezet gátolja meg a külső héj deformációit. Rendszerint a homlok dúcolására is szolgáló szerkezetet nagyobb pajzsoknál vízszintes és függőleges elemekből készítik, amelyek egyúttal kényelmes munkaállványokként is felhasználhatók.
- A héj hátsó része az un. farok mindig belső merevítések nélkül készül és átfedi a már elkészült alagútburkolat utolsó gyűrűjének egy részét, hogy védelme alatt az új bélésgyűrű könnyen összeépíthető legyen.
- A pajzs előrevitelére, hajtására a kerület mentén kiosztott hidraulikus sajtók szolgálnak, melyek a már elkészült és teherviselésére képes alagút falazatra támaszkodva nyomják előre a pajzsot.

Ezeknek megfelelően a pajzshajtásos alagútépítés két vagy három egymás után végzendő tevékenység állandó, folyamatos ismétléséből áll (2.1. ábra)

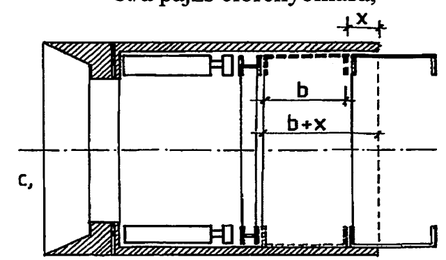
- a pajzs homlokánál a föld fejtését egy gyűrű szélességének megfelelő mélységben vagy egyszerre, vagy kisebb lépcsőkben végzik el;
- a pajzsot a kerület mentén levő és a már megépített teherviselő alagútfalazatra támaszkodó hidraulikus sajtókkal ugyancsak egy gyűrű szélességnek megfelelő hosszon előre hajtják, és utána a sajtókat



a./üregkibontás a vágóél előtt,



b./a pajzs előrenyomása,



c./az alagútgyűrű beépítése.

2.1. ábra: Pajzshajtásos alagútépítés munkafázisai
(1) vágóél, (2) pajzsköpeny,
(3) hidraulikus sajtó, (4) nyomógyűrű,
(5) alagútfalazat

visszahúzzák. A mai pajzsoknál az előretolás folyamatosan, a fejtéssel azonos ütemben történik;

- a pajzs-farok így felszabadult terében a következő gyűrűt a már elkészült béléshez csatlakoztatva megépítik. (Illési 1954)

2.1. Pajzsos alagútépítés kialakulása

Az alagútépítés kezdete mintegy négyezer-százhatvan évvel ezelőttre tehető, amikor *Semiramis* királynő, aki a világcsodaként számon tartott függőkertjeiről nevezetes, az Eufratesz folyó alatt építtetett 1 kilométer hosszú, 16 négyzetméter keresztmetszetű alagutat a palotája és a Jupiter templom között. Tudomásunk szerint az egyiptomiak is építettek már alagutat. A következő nevezetes alkotás Jeruzsálemben 2700 évvel ezelőtt. Egy forrás vizét szállította a városba. A közúti alagutak őse a 2000 évvel ezelőtt Nápoly és Pozzuoli közötti úton, egy domb alatt vezetett át. *Augustus* császár kora általában a római kultúra fénykora volt, ekkor készült a 900 méter hosszú, 7,5 méter széles alagút. A középkor századaiban a várak védművei, alagútrendszerei és a bányászathoz épített tárók jelentették a mélyépítés csúcsteljesítményeit. Az 1400-as években Európa leghosszabb, 5-6 km hosszú vízelvezető alagútja épült Selmecbányán, mely a Biber nevet kapta. Az alagútépítés jelentősen azonban csak a 17. századi Európában indult fejlődésnek, és elsősorban Franciaországban. 1666-ban *Francois Andreossy* mérnök a dél-francia Languedoc tartományban elsőként nem vájt, hanem robbantott sziklába alagutat, az Atlanti-óceánt és Földközi tengert összekötő 20 méter széles, 240 km hosszú Canal du Midi hajózható csatorna számára. A bányászatban a lőpor használata már egy fél évszázaddal előbb megtörtént, először Selmecbányán 1627-ben. 1707-ben készült az első Alpesi alagút Andermatt közelében, a Szent Gotthard alagút. A fejlődő kereskedelem, a keskeny utak és az év folyamán hosszú ideig járhatatlan hágók igényelte az úthálózat fejlesztését, így a Szent Gotthard alagút építését. Az 1800-as évekre a vasút és a nagyvárosok fejlődésével egyre nagyobb igény mutatkozott alagutak építése iránt. Az igények kielégítésére a pajzsos alagútépítési módszert már régóta alkalmazzák, legelőször Londonban. (metro 4)

Az 1800-as évek elején a Temzén körülbelül 10,5 km hosszúságban a világ egyik legnagyobb és legforgalmasabb kikötője terült el. A folyam két partján sűrűn egymás közelében épített dokkok a világ minden tájáról érkező és induló hajók százait fogadták. A vízi forgalom nagyságáról megközelítő képet nyújt az a számadat, hogy ezekben az években London kikötőjébe érkező és onnan induló hajók évenként átlag 14 millió tonna terhet szállítottak. A nyolcszáz férőhelyes kikötő Tower of London és a London Bridge közé eső részére egy hajónak akár 6 hétbe is beletelt a bejutás.

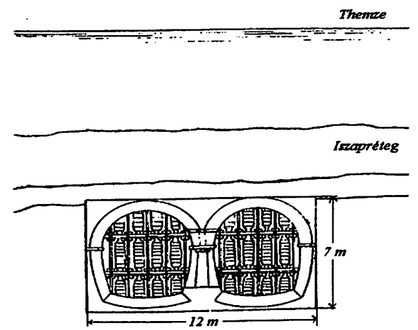
Nagy számban települtek raktárak a folyó déli partja mentén, Rotherhithe-ban, Bermondseyban és Greenwichben. Az új dokkok és raktárépületek mentén ipari épületek, kormos kémények emelkedtek a magasba. Mögöttük nagy és olcsó szállások épültek a dokkmunkások és tengerészek ezrei, illetve családjuk számára, akik a kikötőkben és a gyárakban dolgoztak, valamint a hajóipart támogató út- és vasútépítéseken. Halaszthatatlanná vált egy jobb és egyszerűbb közlekedési lehetőség kialakítása a folyón keresztül. Az északi parton fekvő Kelet-London dokkjai és a déli parton levő raktárak közötti legrövidebb út a folyón keresztül egyedül a jó öreg London Bridge-en vezetett át, ami túl szűk volt, hogy megbirkózzon az egyre növekvő forgalommal. Charles Rennie új London Bridge-ét 1831 -ben nyitották meg az országúti forgalom számára, de még ez sem volt elég ahhoz, hogy zavartalan legyen az átkelés.

A Temzének ezen a 10,5 km hosszú szakaszán csak olyan építmény képezhetett a két part között állandó összeköttetést, amelyik a hajók közlekedését a legkevésbé sem nehezíti és

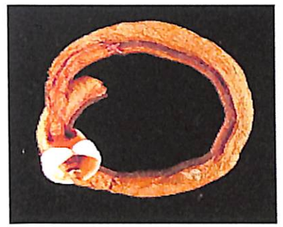
a vízi forgalomnak még rövid időre sem állja útját. Ez a követelmény szinte lehetetlenné tette azt, hogy a két partot híddal kössék össze. A híd szerkezetét 40-45 m-rel kellett volna a Temze legnagyobb vízállása fölé emelni, hogy alatta a legmagasabb árbocú tengeri hajók is akadály nélkül áthaladhassanak. Ilyen magas hídhoz a sűrűn beépített két parton megfelelő feljárót elhelyezni és felépíteni szinte lehetetlen. A London Bridge-hez közel, a kikötőnek aránylag már kisebb forgalmú helyén épült a Tower-híd közel egy évszázaddal később1894-ben. Úgy oldották meg a kérdést, hogy az lehetővé teszi a vízi és közúti forgalomnak felváltva való lebonyolítását. Ennek a hídnak a középső nyílását két egyedül a mederpilléren alátámasztott konzolszerű hídrészből szerkesztették, amelyek alátámasztó pontjuk, mint forgáspont körül függőleges síkban felemelhetők. A közúti járóművek forgalma azonban, míg a hídnyílást be nem zárják, teljesen szünetel, ezért a híd napközben rendszerint a közúti forgalmat biztosítja, a hajók forgalmát pedig éjjel bonyolították le. Ez az elrendezés a kikötő csekély forgalmú helyén megfelelt ugyan, de távolról sem jöhetett szóba hasonló megoldás a kikötő bármelyik más pontja fölött, ahol akár a vízi, akár pedig a közúti forgalomnak már rövid ideig tartó fennakadása a járművek feltorlódását vonta maga után. Egy másik körülmény, a folyamnak a London Bridge fölött fekvő szakaszain is, alagutak építésére kényszeríttette. Ugyanis London legrégebbi, egyszersmind legélénkebb városrészeiben az utcák szűkek voltak. A jóformán minden pontjukat betöltő nagy forgalom feltétlenül kizárta a vasutaknak az utcák szintjében való építését. Emiatt mind a fő- mind a városi vasutakat, vagy az utcák szintje fölött viaduktokon, vagy pedig ezek alatt alagútban kellett vezetni. Viadukt alkalmazása esetén a londoni utcák rendszertelensége miatt tetemes kisajátító költség lépett volna fel, melyek az alagút építésekor elmaradnak.

Dodd mérnök volt az első, aki az 1700-as évek végén a Temze alatt alagutat akart építeni. Hozzá is fogott a folyam partján egy függőleges akna lesüllyesztéséhez. Amint az akna fenekével a Temze vízszintjénél mélyebbre jutott, a vízátbocsátó rétegeken keresztül nagy tömegben átszivárgott víz olyan akadályt gördített az építés elé, melyet *Dodd* nem tudott leküzdeni, és az építést abbahagyta. 1805-ben *Vazie* újította fel az alagút tervét, és 1807-ben *Richard Trevithik* felügyelete alatt folytatta az akna építését s azzal le is jutott az alagút mélységéig, sőt egy 1,5 méter magas 0,9 méter széles próba tároló építéséhez is hozzáfogott. Amint ezzel a tároval a Temzéhez közelebb jutott, a vízátszivárgás mindinkább erősebbé vált, a szivattyúk nem győzték a víz kiemelését. A folyó középéhez közeledve futóhomokba értek és a folyam a laza talajban egészen a tároig könnyen utat tört magának. Ekkor többször egymás után elárasztotta a Temze vize a tárót. *Trevithik* belátta, hogy az építést ezen a helyen tovább nem folytathatja.

Hosszas szünet után 1819-ben lépett föl *Marc Isambard Brunel*, akinek nevéhez az első víz alatt vezetett alagút építésének sikere fűződik. Végig figyelemmel kísérte elődei próbálkozását. Hazatérve New York-ból, kiváló amerikai kapcsolatokkal és New York-i főmérnöki megbízólevéllel, egy régebbi tervét vette elő, melyet *I. Sándor* orosz cár kérésére a Szentpétervári Néva folyó híd tervének javaslatához készített. Nem híd tervét, hanem egy alagút tervezetét adta be, amely alagutat ott nem építettek meg. Részletes munkatervet dolgozott ki, amiben megtaláljuk mindazokat az alapelveket,



2.3. ábra: *Brunel* alagútjának keresztszelvénye a munkaszekrénnyel

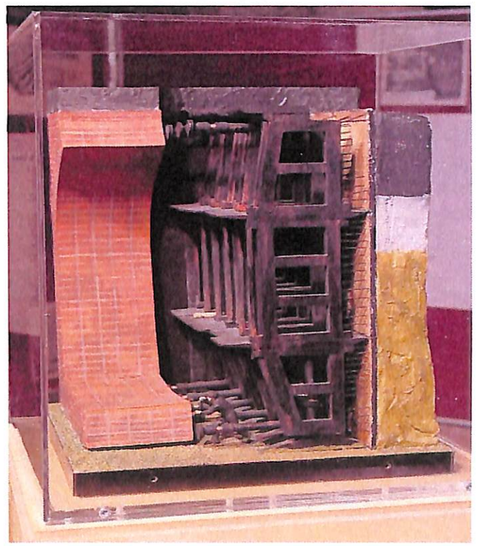


2.2. ábra: Hajóféreg

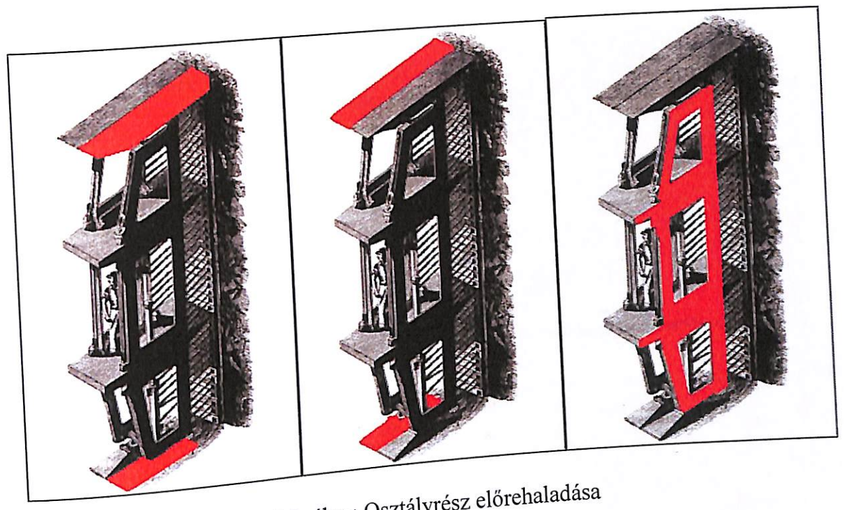
amelyekből a víz alatti alagutak építésének ma alkalmazott módjai kifejlődtek. Ezt 1818-ban szabadalmaztatta „Forming Drifts and Tunnels Under Ground" (Alagutak és vágatok építése a föld alatt) néven. *Brunel* tudta azt, hogy az alagutaknál rendesen alkalmazott fadúcolások védelme alatt, olyan helyen, ahol laza talajok is előfordulnak és így a víz erős átszivárgása ellen kell védekezni, alagút nem építhető. Ezért az alagút szelvényének megfelelően olyan szerkezetet tervezett, amely folytonosan a már kész alagútrész előtt haladva, azt a földtömeg beömlésétől védi, ezzel egy időben lehetővé teszi az alagút szelvényének megfelelő földtömeg kis részletekben való kiásását. *Brunel* szerkezete a már kiemelt föld helyét fokozatosan elfoglalja, eképpen folytonosan előre haladva utat nyit az alagút falazatának, a még ki nem ásott földtömeget pedig megtámasztja. (Szesztay 1897, Bennett 2005)

A példát a hajóféregtől vette, amely tulajdonképpen nem féreg, hanem kagyló. (2.2. ábra). Féregnek egyrészt megnyúlt alakja miatt nevezik, másrészt azért, mert járatokat fúr. Komoly problémát okozott az akkori kor tengeri hajóinak. A hajók fából készültek, és ez a kis állat feltapadva egy hajóra, lyukat váj bele. Ilyen lyukban éli le egész életét. A fejét körülvevő erős héjlemezekkel fúrja magát keresztül a fán. *Brunel* úgy gondolta, ahogy ez a kagyló fúrás közben a lemezekkel védi a száját, úgy kell a kőzetet is távol tartani, közvetlenül az alagútfalazat előtt egy pajzzsal, amely kétoldalt be van borítva, teteje és alja pedig mozgatható. (Posgay Gy. 2003)

Rothcnhill és Wapping városrészek közé tervezte közúti alagútját. Az ő alagútja, mint az a 2.3. ábrán látható, két egymástól oszlopsorral elválasztott részből áll, a falazat külső határvonalai pedig 12,1 m széles és 7 m magas négyszöget alkotnak. A szerkezet az alagút négyszögű szelvényével egyező alakú és méretű vasszekrény, amelyben 12 függőlegesen egymás mellé helyezett osztályrész van (2.4. ábra). A munkaszekrényt a 0,9 méter széles, 6,4 méter magas, 1,5 méter mély öntöttvas osztályrészek alkotják. Úgy helyezkednek el egymás mellett, mint 12 könyv. Hosszanti irányban bármelyiket, a szomszédostól függetlenül mozdíthatják el. Minden egyes szekrényrész elmozdítására, a szekrény felső és alsó részén elhelyezett csavarprés szolgál. A csavarprések tokjait a szekrénnyel szilárdan összekötötték, a csavarorsókat pedig egyik végükkel a már kész alagút falazatának homlokára támasztották. Így kicsavarásuk közben helyüket nem hagyhatják el, és az alagút hosszanti irányában a csavartokok és a velük szilárdan egybekötött szekrényrészek mozdulnak el. A 12 osztályrész mindegyikében 3 egymás felett lévő fülke van, minden fülkében egy, tehát az egész munkaszekrényben 36 munkás fér el.

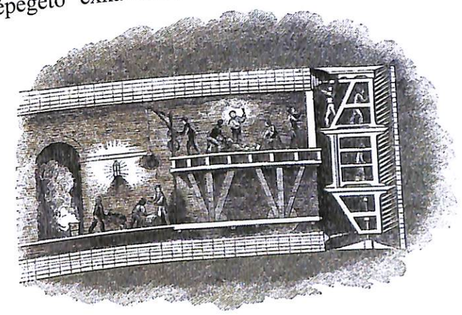


2.4. ábra: Munkaszekrény makettje



2.5. ábra: Osztályrész előrehaladása

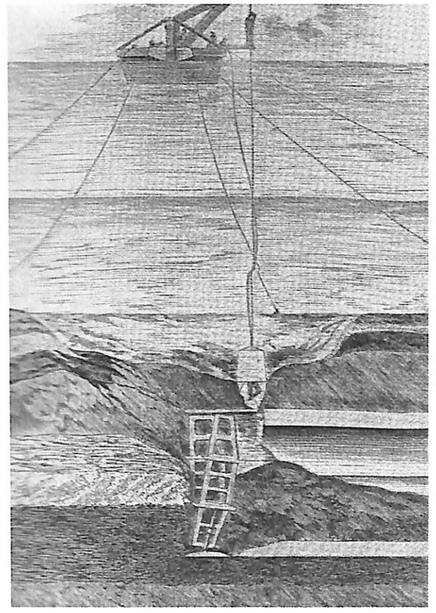
A szekrény az alagút felé nyitva van, a föld felé néző homlokát pedig, a földtömeget támasztó vízszintes deszkák határolják. Miután a deszkák hosszúsága megegyezik a szekrényrészek szélességével, az egyes szekrényrészek deszkázata a szomszédosétól teljesen független. A deszkákat végükön egy-egy vascsavarral támasztják meg, melyek hosszukat változtathatják és az illető deszkának megfelelő szekrényrész két oldalfalára támaszkodnak. A munkaszekrény 12 osztályrészét külön-külön és a szomszédostól függetlenül a következőképpen tolják előbbre . A munkás a saját fülkéjében a legfelső támasztódeszkát kiveszi és az így szabaddá tett földtömegből 16 cm vastag réteget kiás, azután a deszkát előbbi helyzetéhez képest 16 cm-el előbbre helyezve, az időközben meghosszabbított csavarokkal a szomszédos szekrényrészhez támasztja. Ugyanígy jár el a többi deszkával is. A többi munkás épp így dolgozik. Ezzel az eljárással egy szekrényrész minden deszkája 16 cm-rel előbbre jutott és a szomszédos osztályrész falára támaszkodik. A tehertől így megszabadított szekrényrészt most már a csavarsajtók segítségével előbbre tolják. A 2.5. ábra jól szemlélteti, hogy az osztályrészek lépegető exkavátorként haladtak előre (lépegető exkavátor őse). Először a köpeny egyik, majd a másik oldalát tolták előre, és csak ezek után a támasztószerkezetet. A deszkákat az időközben rövidebbé tett csavarokkal ismét hozzátámasztják. Miután így mind a 12 szekrényrészt előbbre tolták, a csavarsajtók orsóját a csavartokokhoz képest az előbbi állásba visszacsavarják. Ezek becsavarásuk közben az alagút falazatát, amelyre eddig támaszkodtak, elhagyják és az alagút új gyűrűjének építéséhez elegendő teret hagynak.



2.6. ábra: Munkaszekrény építés közben

Ez a szerkezet magában foglalja

azokat az alapelveket, melyekből később a víz alatt alagutat építő módszereknek egész sorozata fejlődött ki. Megváltoztatták az alagút szelvényt, a négyszögalakból kör, a munkaszekrényből munkahenger lett, tökéletesítették a szerkezet részleteit, a csavarsajtókat víznyomású sajtókkal helyettesítették, de *Brunel* alapgondolatát valamennyi szerkezetben megtaláljuk.1825-ben helyezte el *Brunel* munkaszekrényét a Temze partján, az alagút mélységéig leásott aknában. Azonnal hozzá is fogott az alagút feltárásához (2.6. ábra). Az építés mintegy két évig minden nagyobb akadály nélkül haladt előre, azonban az 1827-ik év január 2-án egy támasztó deszka kiemelésekor igen sok föld ömlött az alagútba és a bezuhanást nagyobb víztömeg követte. Ez a jelenség a következő napokban többször ismétlődött, az anyag mindinkább lazább, a vízbeömlés pedig erősebb lett. *Brunel*, hogy a jelenség okáról meggyőződjék, az építés helye fölött a saját fia (*Kingdom*) által tervezett búvárharangban leszállt a Temze-fenékre, ahol az elterült iszapban tölcsérszerű horpadásokat észlelt (2.7. ábra). A próbafúrások arra az aggasztó eredményre vezettek, hogy az alagút falazata fölött csak mintegy 2 m vastag, teljesen laza iszapréteg fekszik. *Brunel* úgy akart a dolgon segíteni, hogy az iszapréteget agyaggal telt zsákokkal borította be, és így a tölcséreket betömte. Ez azonban nem sokat segített, mert a víz máshol tört utat a talajban, amely olyan laza volt, hogy a zsákok lesüllyesztése közben a dereglyékről elveszett két kézi szerszámot rövid idő múlva az alagútban találták meg. Május 18-án olyan rohamosan ömlött be a víz, hogy a szivattyúk kevésnek bizonyultak és a munkások a munkateret elhagyni kényszerültek. A Temze vize az alagutat teljesen megtöltve a parti aknában a külső vízszint magasságáig emelkedett fel. *Brunel* ismét leszállt búvárharangban a folyam fenékre, ahol azt tapasztalta, hogy a víz ugyan az alagút falazatát teljesen szabadon mosta, de legalább a munkaszekrény sértetlenül maradt. A fenék e helyére utólag mintegy 3000 darab agyaggal telt zsákot süllyesztettek le, a vizet az alagútból kiszivattyúzták és az építést újra megkezdték. Igen nehéz időszak következett. Az a körülmény, hogy *Brunel* nem helyezte el eléggé mélyen alagútját a folyamfenék alá, nagyon szomorú következményekkel járt. A Temze első betörését rövid időközökben több is követte, még ugyanabban az évben nem kevesebbszer, mint ötször töltötte meg a víz az alagutat, de mind az öt esetben elég idő maradt a munkások menekülésére. Azonban az 1828. év januárjában bekövetkezett elárasztás már emberáldozatokat is követelt. Egy támasztódeszka kiemelésekor hatalmas sugárban ömlött be a víz és a nyílást betömni a legnagyobb erőfeszítés mellett sem sikerült. Az alagútban rohamosan emelkedő víz a munkásokat gyors menekülésre kényszeríttette. *Brunel* fia, aki mint munkavezető mérnök bent volt az alagútban, három munkással utolsónak hagyta el a munkaszekrényt, miközben olyan erővel ömlött be az iszap és a víztömeg, hogy a keletkezett légnyomás a lámpákat eloltotta. A sötétben egyedül



2.7. ábra: Alámerülés a búvárharanggal

Brunelnek sikerült úszással megmenekülni, míg a három munkás áldozatául esett ennek a hatodik és leghatalmasabb betörésnek. A katasztrófa következtében a közvélemény elfordult *Bruneltől* és az általános hangulat nyomása alatt a munkát hatóságilag beszüntették. *Brunel*, hogy legalább a már kész alagútrészt megóvja az elpusztulástól, még egyszer betömette a folyam fenekén keletkezett tölcséreket, a vizet kiszivattyúzták, a kész alagútrészt erős fallal elzárták, és a munkát abbahagyták (2.8. ábra). 8 évi szünet után 1835-ben sikerült *Brunelnek* az érdeklődést ismét az alagút sorsa felé fordítani. Új munkaszekrényt tervezett és miután a folyamfeneket az alagút irányában vastag agyagréteggel befedte, az építéshez ismét hozzáfogott.



2.8. ábra: Vízbetörés után az alagút

Küzdelmes évek következtek ezután, a legnagyobb óvatosság sem akadályozhatta meg a Temze betöréseit. 1837-ben hetedszer, még ez évben, valamint a következőben nyolcadszor és kilencedszer árasztotta el a víz az alagutat. De ezalatt mindinkább közeledtek a túlsó parthoz, az iszapréteget felváltó szilárdabb agyagrétegben az építéssel gyorsabban haladtak. (Szesztay 1897)

Az alagúthajtás közben számos műszaki nehézség, kénhidrogén-, iszap- és vízbetörések mellett, a pénzhiány is jelentkezett. Ez utóbbi pótlására megnyitották a munkahelyet a látogatók számára, fejenként egy shilling volt a belépő. 16 nehéz év után Brunel 1841 augusztus 13-án ment át először a Temze alatt az 1100m hosszú alagúton majd az elkövetkező 27 óra leforgása alatt ötvenezer személy tette meg a folyó alatti utat. (Posgay 2003)

A nehéz feladat óriási küzdelmek és pénzáldozatok árán végre sikerült. Igaz ugyan, hogy a vállalatnak anyagi sikere nem volt, mert az alagút, melynek folyómétere 614.000 fontba azaz 15.000 forintba (1897-es árfolyamon) került, a beépített tőkét kellőképpen sohasem kamatoztatta, de mint minden úttörő alkotás, úgy ez is a következményekben hozta meg gyümölcseit.



2.9. ábra: Temze alagút napjainkban

A közlekedés szempontjából igen fontos kocsi feljárókat, amelyeken le lehetett volna jutni az alagútba, nem tudták kialakítani pénzhiány miatt. Ez azt jelentette, hogy az alagutat kizárólag a gyalogosok tudták használni. Ráadásul a bűnözők kihasználták a helyzetet és tolvajok bújtak meg az árkádok árnyékában, hogy kirabolják a járókelőket. 1869-ben húsz évvel a megnyitása után az alagút a Kelet-Londoni Vasúttársaság tulajdonába került. Rajta keresztül Brightonba indítottak vonatokat. A századfordulón az alagutat átruházták a londoni metrót

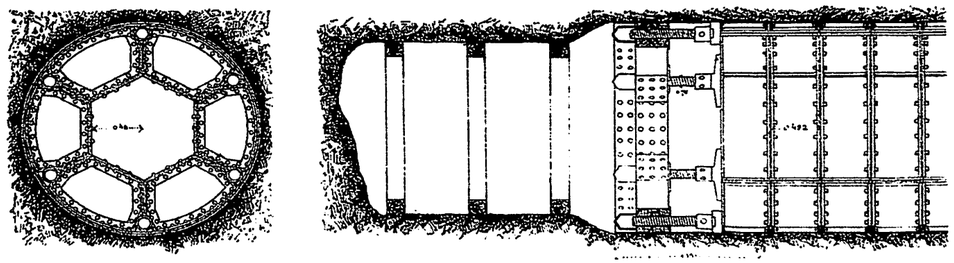
irányító társaságra. Ma is részét képezi a Metropolitan vonalnak. A metró az alagút egyik felében a Wapping megállóhely után halad át. A másik fele gyalogos aluljáróként működik, melyben emléktábla jelzi építésének jelentőségét (2.9. ábra). (Szesztay 1897, Bennett 2005)

2.2. Kezdeti úttörő fejlesztések

Az első próbálkozás után gyors fejlődésnek indult a pajzsos alagútépítés. London második alagútját *Peter Barlow* építette 1869-ben, mégpedig az előbbinél sokkal szerencsésebb körülmények között. Okulva az első alagútnál szerzett tapasztalatokon, ő, az alagútját mélyebben helyezte el. Úgy, hogy a szerkezet gerince 6,7 m mélyen feküdt a folyamfenék legalsó pontja alatt. Ennek következtében az alagút egész hosszában tömör agyagrétegbe jutott, mely a Temze vizét egyáltalában nem bocsátotta át, annyira, hogy az építéshez szükséges vizet is kívülről szállították be az alagútba.

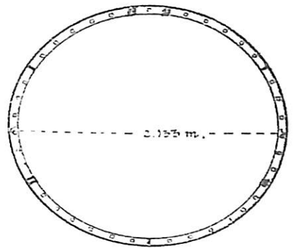
Barlow az építéskor igen nagy gondot fordított arra, hogy az alagutat környező agyagréteg egyensúlyát meg ne zavarja, nehogy a víz az esetleg keletkező repedéseken keresztül az alagutat elárasztha ssa. Törekvése sikerült is, az alagút építését víz hozzáfolyás nem zavarta és *Barlow* ezt a 403 m hosszú alagutat 16.000 fontért vállalta el (*Brunnel* alagútja 614.000 fontba került 1897-es árfolyamon) és aránylag igen csekély építőköltséggel 10 hónap alatt készíthette el. *Barlow* módosította *Brunel* módszerét és az alagútnak mind az alakját, mind az anyagát megváltoztatta. A tégla falazat helyett öntött vasgyűrűket, a négyszögű szelvény helyett pedig kör alakú keresztmetszetet alkalmazott, aminek megfelelően *Brunel* munkaszekrényéből munkahenger lett. Az ötletet akkor kapta, amikor 1863-ban a Lamberth Bridge mólónál egy öntöttvas hengert süllyesztettek a vízbe. A következő évben *Barlow* szabadalmaztatta az öntöttvas henger elvén alapuló alagút építését. Az alagutat 2,1 m átmérőjű öntött vasköpeny határolja, így az alagutat tulajdonképpen egy 403 m hosszú vascső alkotja, melyet a két parton függőlegesen épített lejáró aknák fejeznek be. A *Brunel* munkaszekrényét helyettesítő 1,35 m hosszú vashengert egy közepén hatszögletű nyílással ellátott vaslemez két részre osztja (2.10. ábra). Az alagút felé eső rész védelme alatt állítják össze az alagút vasköpenyét, a föld felé néző rész pedig a földtömeg kiásását teszi lehetővé. Az alagút építésénél alkalmazott eljárás a következő:

A munkahenger előtt 0,5-l,0 m hosszúságban a tárók építésénél rendesen alkalmazott fadúcolás védelme alatt kiássák a földet, ezután a munkahengert a vele szilárdan összekötött 6 csavarsajtóval előbbre tolják. A csavarsajtók tokját az elválasztó vaslemezre erősítették, a csavarorsóknak az alagút utolsó gyűrűjére támaszkodó végeit pedig vastuskókkal szerelték fel azért, hogy ezek a nyomást a gyűrű minél nagyobb részére osszák el. A csavarorsók egyenletes kicsavarása alatt az egész munkahenger előbbre halad, a becsavarás közben pedig



2.10. ábra: *Barlow* munkaszekrényének hosszanti és keresztmetszete

a henger többé nem mozdul, de a csavarorsók támaszkodó tuskói elhagyják az alagút végét és így az alagút újabb részének összeállításához elegendő teret hagynak.



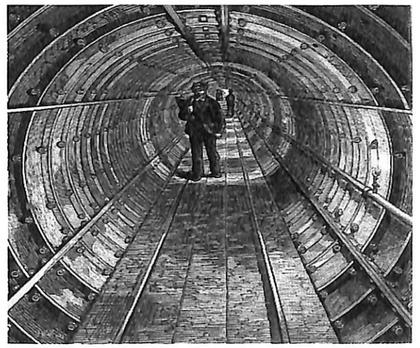
2.11. ábra: *Barlow* által alkalmazott alagút gyűrű

Az alagút vasköpenyét 0,452 m hosszú gyűrűkből állították össze. (2.11. ábra) Minden gyűrű 4 gyűrűszegmensből áll, amelyek közül három egyenlő nagy, a negyedik pedig, amelyet az alagút gerincén helyeztek el, ezeknél kisebb és a gyűrű záró darabjaként szerepel. Az egyes gyűrűszegmenseket és az egész gyűrűket összecsavarták. A csavarokat a gyűrűszegmensek szélén kiálló bordákon helyeztek el, és a bordák összecsavarása után az alagútban keletkezett hosszanti és keresztirányú hézagokat, hogy ezzel az alagutat a víz beszivárgásától megóvják, cementtel töltötték ki.

A munkahengernek az alagút felé eső része az előretolás után is körülfogja az alagút utolsó gyűrűjének egy részét, így az új gyűrűt még a henger védelme alatt állíthatják össze. Ezen a módon naponta 4-6 gyűrűt készítettek el, amihez képest az alagút naponként való előrehaladása 1,8-2,71 m között váltakozott.

Kezdetben furcsa csörlő húzta, kényelmetlen földalatti vasút közlekedett benne (2.12. ábra). A vonalat 1870-ben nyitották meg. A nyitott tetejű kocsi egy nyomvonalon haladt, és egyszerre tizenkét utas fért rá. Csak kevés embert tudtak egyszerre szállítani. Az átkelésért csupán egy pennyt kellett fizetni, ezért a vasút nem tudta magát fenntartani, hamarosan be kellett zárni. A 3 méter átmérőjű aknába csigalépcsőt építettek, és a földalatti alagúton ezután gyalogosan lehetett áthaladni. Az átkelésért fél penny vámot kellett fizetni mindaddig, míg 1894-ben el nem készült a Tower Bridge. Napjainkban az alagútban a Thames Water Authority vízfőnyomócsöve található. Ma is láthatók az egykori földalatti nehezen meghatározható, postaládaszerű bejáratai a Tower Hillen és a Vine Streeten.

Barlow alagútjának felépülte óta, a víz alatt épített alagutak legnagyobb részénél ezt az alagutat vették mintául. Szelvényül megtartották az igen jónak bizonyult kör alakú keresztmetszetet, az építés anyagának pedig az öntöttvasat. A munkahenger nagyjában mindenütt megegyezik *Barlowéval*, de ő volt az utolsó, aki a hengert csavar-sajtókkal tolta előre.

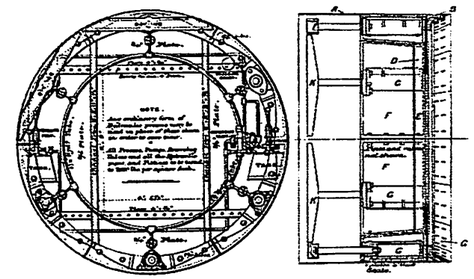


2.12, ábra: Tower alagút a bent maradt sínekkel

Az újabb szerkezetekben víznyomású sajtókat alkalmaztak. A sajtók vízvezető csöveit úgy rendezik el, hogy a sajtókat ne csak egyszerre, hanem egyenként vagy csoportonként is működésbe hozhatják, mert ezzel az elrendezéssel a munkahenger mozgását szabályozhatják, és az irányát változtathatják. Különösen fontos ez ott, ahol az alagút körívben halad, vagy ahol a földtömeg különböző keménysége miatt a szerkezet egyes pontjain erősebb nyomást kell kifejteni.

Jelentős fejlődést jelentett a sűrített levegő használata. *Davitt C. Haskin* amerikai mérnök alkalmazta először az alagútépítésben. A pajzsos alagútépítésben, Angliában *Greathead* honosította meg. Vele nagyjából egy időben alkalmazta Beach is a túlnyomásos

technológiát pajzshajtáshoz Amerikában. Greathead a City-Südlondon vasút építéséhez használta a túlnyomásos pajzsot először, egy 5 km hosszú szakasz építéséhez (2.13. ábra). Ez a vonal Angliának az első villamos üzemű vasútja. Teljes hosszában az utcák felszíne alatt átlag 15 m mélyen, alagútban haladva a London híd mellett vezet át a Temze alatt. Az eredeti terv szerint a vonatokat csörlővel húzták, és külön alagútban közlekedtek egymás fölött. *Greathead* és a metróvonal tulajdonosai szerencséjére a villany meghajtású vonatok gyors fejlődése lehetővé tette, hogy még az ásás megkezdése előtt áttérjenek az elektromos meghajtásra a csörlő használata helyett. A két irányban haladó kocsik részére két különálló 3,05 m átmérőjű öntött vascsövet helyeztek el párhuzamosan egymás mellett. Az építéskor előrehajtott munkahengerek csak részleteikben térnek el *Barlow* szerkezetétől. Az ő alagútjához hasonlóan öntöttvas gyűrűkből állították össze az alagút falazatát is. A három méter átmérőjű alagutat öntöttvas gyűrűkből építették, mindegyik gyűrű hat részből állt és egy záróelemből. A szegecslyukakat már az öntéskor kialakították, elkerülve minden, a lemezen végzendő helyszíni munkát. A lemezt és a peremet szürke vastömbből öntötték, majd kátrány és szurok forró keverékébe mártották, amely kihűlve sima és erős fekete bevonatot képezett. A gyűrűk vízszintes illesztését finom, 6 milliméter vastag fenyő-lécekkel töltötték ki. Összekapcsoláskor kátrányba mártott kenderrel biztosították a szegmensek szoros illeszkedését, illetve tömítését. *Greathead* a sűrített levegő használatán kívül még egy fontos újítást alkalmazott.



2.13. ábra: Greathaed pajzsa

Miután a munkahenger átmérője az alagúténál valamivel nagyobb, előretolása után az alagút és a környező földtömeg között ennek a különbségnek megfelelően hézag marad. Ezt a hézagot a föld betölteni igyekszik, az így bekövetkező mozgás közben a földtömeg könnyen reped és ülepedik, és ez, az alagút felett lévő építmények biztonságát nagymértékben veszélyezteti.

Greathead ennek megakadályozása céljából minden gyűrűszegmens közepén csavarmenetes nyílást alkalmazott, melyeken keresztül légnyomással cementhabarcsot sajtolt az alagút vasköpenye köré, és azután a nyílásokat becsavarta. A habarcs azonkívül, hogy a hézag betöltésével a földtömeg egyensúlyát biztosítja, az alagutat kemény réteggel fogja körül és vasanyagát a rozsdásodástól megóvja.

A City-Südlondon vasút alagútja nagyobbrészt víz át nem bocsátó agyagrétegben halad, de ezt helyenként kavicsréteg váltja föl, ahol kénytelenek voltak sűrített levegő nyomása alatt építeni. Az egy nap alatt épített alagútrész hosszúsága 3-5 m között váltakozott. A vasutat 4 évig építették és 1890 novemberében nyitották meg. (Szesztay L. 1897, D. Bennett 2005)

3. Pajzsok fejlődése az 1950-es évekig

Pajzshajtásos alagutak építésénél, a munkamódszer megválasztásának egyik legfontosabb eleme a földfejtés módja volt. A fejtés módját pedig elsősorban a talaj, vagy kőzet fizikai jellemzői, főleg kohéziója határozza meg. Minthogy alagutat a legkeményebb sziklától a puha iszapig mindenféle talajban építettek, ezért az alagútépítés történetében igen sokféle fejtési móddal találkozunk. Következőkben bemutatom, miként történt a fejtés különböző körülmények között: sziklában, kemény és puha agyagokban, talajvíz alatti omladékos rétegekben és puha, folyós iszap talajokban.

A fejtés módját lényegében az szabja meg, hogy a talaj milyen hosszú ideig képes megtámasztás nélkül megállni, vagy egyáltalában meg áll e.

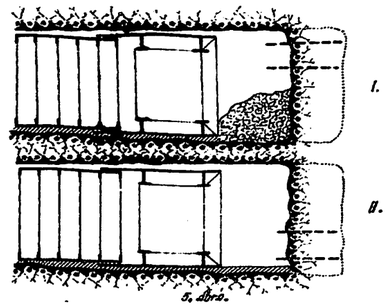
3.1. Homlokfejtés szikla talajokban

Minden olyan kemény talajban, kőzetben, melynek a szilárdsága megközelíti a pajzsszerkezet szilárdságát, a pajzs igen sok kárt szenvedhet. Ezért ilyen talajokban pajzsok alkalmazása nem célszerű. Sziklában pajzshajtásra rendszerint nincs is szükség, mivel a talajban kibontott üreg legtöbbször külön dúcolás nélkül is megáll. Azonban gyakran előfordul hogy egy keményebb réteg, vagy sziklatömb kerül a pajzs útjába, vagy pedig az indító kamrát célszerűbb a sziklában megépíteni. Így a pajzsot egy darabon sziklán át kell hajtani, míg el nem éri azt a talajt, amelyre tulajdonképpen tervezték. Ezekben az esetekben szorosabb értelemben vett pajzshajtásról nincs szó, a pajzsot egy előre elkészített és magában is megálló üregen hajtjuk keresztül, miközben a pajzs az alagútfalazat egyszerű beszerelését segíti elő. Sziklában a pajzs előtti betonágyat úgy építik, hogy vasidomot ágyaznak bele, amelyen a pajzsot csúsztatják.

A fejtés sziklában rendszerint robbantással történik, ami viszont a pajzs szerkezetére igen veszélyes. A szétrobbanó kőzetdarabok elsősorban a vágóélet és az esetleges homloktámaszokat érik, ezek vannak legnagyobb veszélynek kitéve. A vasszerkezet védelméül lazán, mintegy függönyként elhelyezett pallókat használtak. A robbantásokat csak kis töltetekkel végzik, melyek a sziklát inkább csak morzsolják, mint sem hogy nagy darabokban repesszék le. A robbantás során ügyelni kell arra, hogy a kifejtett üregben semmiféle olyan beálló sziklarész ne maradjon, amely a pajzsot megsérthetné, mert a statisztikai adatok szerint ilyen beálló szikladarabok több kárt okoztak pajzsokban, mint más akadályok együttvéve.

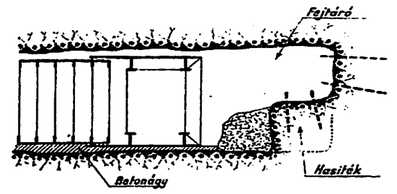
A szikla homlokfejtése történhet a teljes felületen egyszerre, vagy pedig előzetes tároláshajtással.

A teljes homlokon való fejtés főleg kisebb alagutaknál célszerű, ahol a törmeléket kézi rakodással távolítják el. Míg a rakodás tart, fent a homlok felső részén a fúrás magáról a törmelékről történhet s a törmelék fogyásával együtt halad lefelé. Mire az eltakarítás elkészül, a lyukak is ki vannak fúrva s a robbantás közvetlenül a rakodás befejeztével elvégezhetővé is válik. A fejtés sémáját az 3.1. ábra tünteti föl.

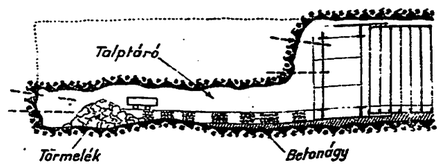


3.1. ábra: Kisszelvényű alagút hajtása sziklában

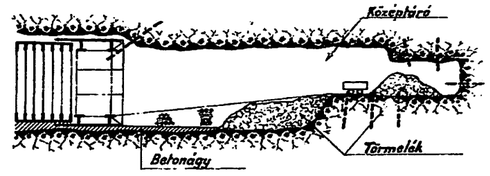
A tároháitással való fejtés nagyobb szelvények mellett elkerülhetetlenné válik. A táró lehet fejtárós, talptáró vagy középtáró. Fejtárós módot rendszerint hasítékkal együtt alkalmaznak (3.2. ábra). A tárónak a kalottba történő előrehajtását az alatta lévő szelvényrésznek hasítékként való fejtése követi. A táró robbantása pár másodperccel előbb történik, mint a hasítéké, így az összes törmelék a feneken gyűlik össze. A rakodás közben a fúrás már végezhető és ez ennek a módszernek a fő előnye. Talptárós mód a pajzs előtt készítendő betonágy szempontjából igen előnyös (3.3. ábra). Hátránya azonban az, hogy a teljes kalottot rá kell robbantani a táróra és a benne lévő esetleges vágányzatra. A két említett mód előnyeit egyesíti a középtárós alagúthajtás (3.4. ábra). A középtáró van legjobban elől, alatta a sziklát hasítékokkal fejtik. A kalott már csak kisebb tömeget jelent s az alul lévő vágányzatra nagyobb veszély nélkül rárobbantható és könnyen eltakarítható. (Illési J. 1954)



3.2. ábra: Pajzshajtás sziklában tároval és hasítékkal



3.3. ábra: Pajzshajtás sziklában talptáróval



3.4. ábra: Pajzshajtás sziklában középtáróval

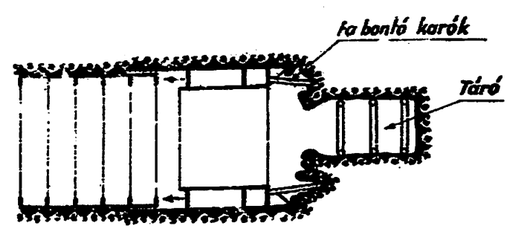
A mai alagútfúró pajzsok előtt már nem kell kifejteni előre az alagutat, mert képesek a sziklában is haladni. Léteznek kifejezetten ilyen talajra specializált gépek, melyeket a későbbiekben ismertetek. Az 50-es évekig erre még nem volt lehetőség.

3.2. Homlokfejtés kemény agyagokban

Kemény agyag talaj alatt olyan talajokat értünk, amelyek elég szilárdak ahhoz, hogy kisebb hosszakon végzett kifejtéseknél több-kevesebb ideig megtámasztás nélkül is megálljanak. Tehát a fejtés folyamán sem a főtét, sem pedig a homlokot a fejtés alatt nem kell aláfogni, illetve megtámasztani. Az agyag talajok azonban rendszerint egy nagy hátránnyal rendelkeznek, hogy expandálásra, és duzzadásra hajlamosak lehetnek. Ez abból adódik, hogy a mélyebb rétegek geosztatikus feszültség alatt vannak, és ha tehermentesítik, a nyomás megszűnik. A terhelés megszűnésével, a talaj „emlékező képességének" mértékével alakváltozással járhat, melyet expandációnak nevezzük. Sokkal nagyobb térfogat változást okoz azonban az a tény, hogy az eredeti száraz, vízre duzzadó agyag az alagútban levő állandóan párás, nedves, szabad, vagy nyomásalatti levegővel érintkezve vizet vesz fel és víz hatására erősen duzzad. Ezzel a fellépő földnyomások igen tetemesen megnőnek, és veszélyeztetik az ideiglenesen elhelyezett biztosítás állékonyságát. Az agyagtalaj duzzadásának hátránya csak egyféleképpen küzdhető le, nem szabad lehetővé tenni, hogy a megbontott felületek hosszú időn át szabad levegővel érintkezzenek és vizet vehessenek föl. A végleges burkolatot minél előbb el kell helyezni, hogy a talajfelületeket a szabad levegővel való érintkezéstől egyszer s mindenkorra véglegesen el lehessen zárni. A feladat viszont csak

úgy oldható meg, ha a fejtés munkáját a végleges alagút falazat elhelyezése hamar követi. A pajzshajtásos alagútépítés éppen ezt teszi lehetővé. Mivel a kemény agyag rövidebb ideig dúcolás nélkül is megáll, a fejtés igen egyszerűen, akadályozó dúcolatok nélkül történhet és a teljes homlok hamar kifejthető. A pajzs utánnyomása és a falazat szerelése rögtön követheti a fejtést, azaz a fejtés megkezdése és a bélés elhelyezése közötti idő a lehető legrövidebb. A pajzsos munkamódszer több mint 100 évvel ezelőtt elindult fejlődése éppen ilyen duzzadó agyagtalajban kezdődött.

Mint említettük, a homlok fejtési módjánál az a döntő, hogy a talaj megtámasztás nélkül is megáll. A fejtést eleinte kisebb szelvények mellett úgy végezték, hogy a homlokot egy teljes gyűrű szélességének megfelelően kivágták és csak annyit hagytak a széleken vágóélekkel való lefaragásra, hogy a pajzs vágja ki maga számára azt a pontos körszelvényt, amelybe szorosan beleillik és belefeszülve feszes ideiglenes dúcolatot képez. Az eljárás hátránya mindössze az volt, hogy az eltávolítandó földanyag teljes mennyiségét kézi fejtéssel: csákánnyal, bontórúddal, fejtőkalapáccsal kellett megbontani és feldarabolni. Ez a hátrány vezetett ahhoz a gondolathoz, hogy a fejtés nehéz munkájának elvégzésére magát a pajzsot is felhasználják. A hidraulikus sajtók igen nagy erőt képviselnek és a fejtésnél az emberi erőt jól kiegészítik. Ebből alakult ki kis szelvényű alagutaknál az az eljárás, amelynél kihegyezett fa rudakat, cövekeket alkalmaztak. A módszer lényege abban áll, hogy a pajzs előtt a homlokban kisméretű tárót hajtanak előre, csupán akkorát, amelyben egy ember kényelmesen tud dolgozni. A tárót a szokott dúcolattal biztosítják. Mikor a pajzs nyomásra készen áll, a vágóél kerülete mentén a fa bontó rudakat úgy helyezik el, hogy kihegyezett végük a talajba vágott kis mélyedésekbe nyúljék, másik végük pedig a pajzsnak támaszkodjék. Miközben a tároló utolsó kereteit eltávolították, a pajzsot előre nyomják. A tároló körüli rétegeket a talajba bekényszerített bontó rudak hasítják le és darabolják fel egyben, míg a megmaradó legkülső homlokgyűrűt maga a vágóél fejti le az előbbihez hasonló módon (3.5. ábra). Ezzel a módszerrel a hajtás sebessége lényegesen növelhető volt.



3.5. ábra: Kisméretű pajzs hajtása kemény agyagban

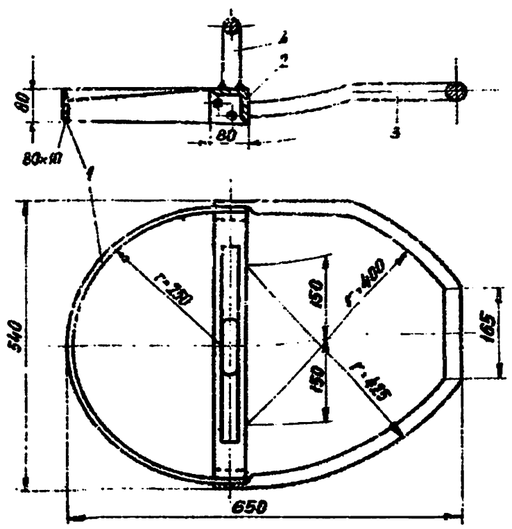
Nagy átmérőjű alagutak építésénél a vázolt módszer ebben az egyszerű formában már nem volt alkalmazható. Nagy átmérőjű pajzsnál ugyanis mindig fennáll annak a veszélye, hogy a homlokfelület magában már nem áll meg. Viszont a kemény agyagban kis mértékben előre lehet vágni a vágóél elé anélkül, hogy a fej feletti rétegeket, a főtét külön alá kellene fogni. Ilyenkor a homlok fejtése csak úgy végezhető, ha a homlokot vízszintes értelemben megtámasztjuk. Rövid pajzsoknál vízszintes dúcokat dugtak a pajzson keresztül és végüket a már elhelyezett tübbing gyűrűk peremei közé helyezett keresztgerendákra támasztották. Sokkal jobb megoldás azonban homloktámasztó sajtók alkalmazása volt. Ezek a sajtók a pajzs merevítő szerkezetére (válaszfalaira és munkapadozataira) felszerelt vízszintes sajtók, melyek a homlokot közvetlenül, vagy borító dúcolat közvetítésével támasztják. A homlokot sohasem szabad teljesen megtámasztás nélkül hagyni, ezért a sajtókat csak megfelelő kiváltás esetén lehetet felszabadítani. A homlokfejtés ilyen esetben a következőképpen történik:

A homloktámasztó sajtók melletti talajt megfelelő mélységben minden egyes rekeszben előrefejtik s utána ezeket a mélyített homlokrészeket a pajzshoz ideiglenesen kidúcolják. Ennek védelme alatt a homloksajtók fokozatosan felszabadíthatók, a támasztott föld fejthető

és a sajtók rögtön újra homloknak nyomva működtethetők. Az ideiglenes dúcolás ezáltal már feleslegessé válik és eltávolítható. A pajzs hajtásánál a sajtók állandó nyomással támasztják a homlokot, miközben a homloktámasztó sajtók kinyomott dugattyúrúdjai a pajzsot hajtó sajtók nagyobb nyomása következtében visszakényszerülnek hüvelyükbe. A fejtésnél itt is használtak fejtő fa rudakat, azonban a nagy szelvényméret miatt nem olyan hatásosak.

Nagyátmérőjű alagút fejtés módját, a fejtett homlokon kialakuló talajnyomás befolyásolja. Amennyiben a homlokon fejtés közben a talaj állékonysága következtében csökkenteni lehet a homloknyomást, úgy a fejtés is egyszerűbbé válik. A homloknyomások csökkentésének igen hatásos módja a homlokban a fejtés előtt haladó táró hajtása volt. Földalatti vasutaknál könnyen mód nyílt erre. Nagyméretű állomáscsövek építésénél a vonalcsövet a létesítendő állomás helyén is gyakran végighajtották, s ebből kiindulva készült el a végleges nagyméretű állomáscső. A kisebb átmérőjű vonalcsőnek megfelelő homlok felületen nyomás már nem lépett föl, így homloktámasztást csak kisebb felületen kell alkalmazni. Ideiglenes biztosítású homloktárók alkalmazása azonban veszéllyel járhat. Míg az előbbiekben említett esetben a vezértáró pajzzsal épül és a táró biztosítása végleges jellegű, tehát az agyagtalaj egyrészt jól aláfogható, másrészt, ami fontosabb, kiinjektálva a víztől, párától jól elzárható. Így sem vízfelvételből eredő duzzadások, sem pedig lazulásból eredő roskadások nem fordulhatnak elő. Ideiglenes dúcolással épülő táróval a homlokfejtésnek, mindig meg van az a veszélye, hogy az ideiglenességre való tekintettel nem készül kellő gondossággal és minthogy az agyag hosszabb időn át szabad levegővel érintkezik, vizet vesz fel és duzzad. A duzzadás, lazulással jár és a pajzshajtás homlokfejtésénél a főte már nem áll meg magában, hanem leválik. Ilyenkor a főte biztosításáról is külön kell gondoskodni. Ezzel azonban elveszítik azt az előnyt, hogy kemény talajban a főtét a homlokfejtésnél nem kell biztosítani.

A pajzsos alagútépítés történelme folyamán igen sokat kísérleteztek azzal, hogy a talaj fejtését és ugyanakkor a rakodást is gépesítsék. Ilyen törekvések csak egyszerű, homogénnek tekinthető és kis fejtési mélység mellett, önmagában is megálló talajokban vezettek sikerre eleinte. Puha, képlékeny, de rövid ideig önmagában is megálló agyagtalajokban sokszor igen jó szolgálatot tehetnek a csörlővel működtetett gépi kaparókések. Ezek a kaparókések ívesre meghajtott és kiélezett laposvasból állnak, amely kést kézi fogóval irányítják (3.6. ábra). A fogón levő fülbe kapcsolódik az elektromos meghajtású csörlőbe kötött húzókötél. Nagyobb pajzsokat több ilyen berendezéssel kell ellátni úgy, hogy minden munkarekeszbe egy kaparókés berendezés jusson.

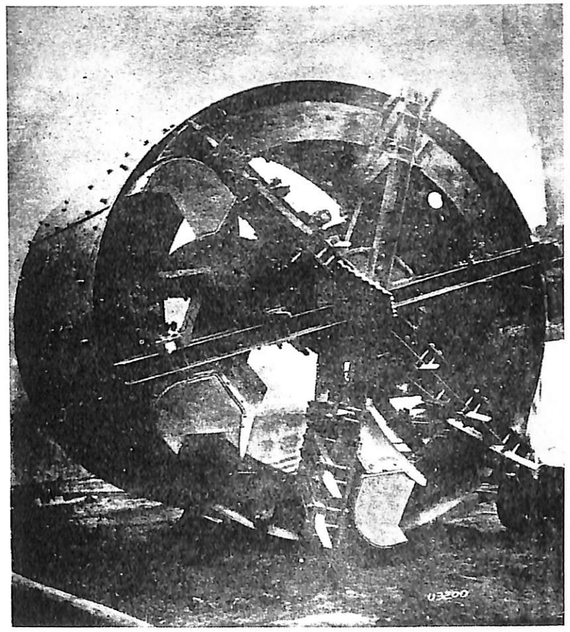


3.6. ábra: Csörlővel működtetett gépi kaparókés

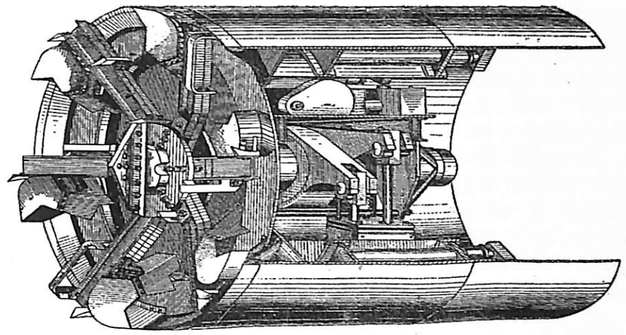
A kések akkor válnak könnyen kezelhetőkké, ha a kapcsoló gombokat a kés fogantyújára szerelik, s a csörlőt magát a kaparót irányító munkás vezérli.

Az egyik első, 1897-ben alkalmazott fejtőgép a *Thomson*-féle exkavátor, lényegében vederláncos kotró volt. A kotró karját kocsira szerelték, s a kar függőlegesen emelhetőnek és süllyeszthetőnek készült. A fejtés az exkavátorral úgy történt, hogy a kocsira szerelt vederláncot a homlokhoz vitték, s a legmélyebb ponton a kotrót a talajhoz nyomták. A kar fokozatos emelésével a kotróval hasítékot vágtak ki. A kart ezután újra lebocsátva és egy vederszélességgel oldalt fordítva lefejtették az elsővel határos második hasítékot. A műveleteket addig ismételték, míg a teljes homlokot egy gyűrű szélességének mélységében ki nem fejtették. Ezután a kocsit az exkavátorral együtt visszahúzták, a pajzsot előrenyomták, s a bélésgyűrűt felszerelték. A *Thomson*-féle fejtőgép hátránya az, hogy az alagútszelvény jelentős részét elfoglalja, s a szállítási és egyéb munkákat hátráltatja. Nagyobb szelvényeknél azért nem lehet alkalmazni, mert csak teljesen nyitott pajzs mellett működtethető. Használatának alapfeltétele az, hogy fejtés közben mind a homlok, mind pedig a főte megtámasztás nélkül is megálljon. Nagy szelvénynél viszont a homlok megfogásáról mindig gondoskodni kell és a pajzs is csak belső merevítéssel tehető megfelelően teherviselővé. Ez azonban a *Thomson*-féle exkavátor használatát lehetetlenné teszi.

1897-ben *Price* a pajzsba beépített forgó exkavátort alkalmazott, amely fúrásszerűen fejtette a talajt. Mint a 3.7. ábrán látható, a *Price*-féle exkavátor a pajzs közepében elhelyezett és a pajzsba beépített tengely körül forgó hatkaros fejtőberendezés. A karokra különböző sugártávolságra vágó késeket erősítenek, amelyek forgatás közben koncentrikus hornyokat vágnak ki a homlokból. A tengelyben fogazott háromszög alakú késlemez morzsolja el a talajt forgás közben. A karokon levő éllel ellátott puttonyok a hornyok közötti vékony talajréteget lehasítják, s összegyűjtik. Forgás közben, ha a kar felülre kerül, a vödrök tartalmukat önműködően csúszdába ürítik, ahonnan a talaj a rakodó csillékbe kerül. A gép elektromotoros meghajtású. A vázolt módszerrel nem csak a fejtés, hanem a rakodás teljes gépesítése is megoldható, akárcsak a *Thomson*-féle exkavátornál. Ezzel a géppel földalatti vasutak építésénél igen jó eredményeket értek el. Ennek is az a hátránya, hogy csak a rövid ideig dúcolás nélkül is önmagában megálló talajban alkalmazható.



3.7. ábra: *Price*-féle exkavátor 1897



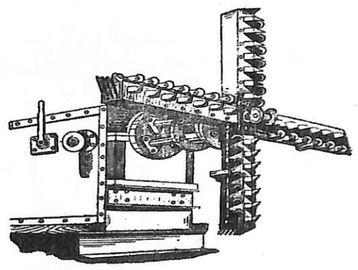
3.8. ábra: *Volkov*-féle fejtőgép

Egy csatornarendszer építésénél 1914-ben spirálisan fejtő gépet alkalmaztak. Ez az un. *Carpenter*-féle exkavátor szintén kocsira volt szerelve és a pajzstól függetlenül volt mozgatható. Lényegében egy, az alagút tengelyében vízszintesen elhelyezett tengely körül forgatott átlós karból áll. A kar szerelt ekeszerű vágókés forgatás közben automatikusan halad kifele. A gép indításakor először egy, a vízszintes tengelyre erősített kés a homlokból mintegy 35 cm mély kúpos lyukat vág ki. Ezután kapcsolják be az eke alakú fejtőkést, ami forgása alatt, miközben a karon automatikusan kifelé vándorol, a homlokot mintegy 15 cm mélyen spirálisan lefejti. A lefejtett talaj alul gyűlt össze, ahonnan kézzel rakták szállítószalagra. A műveletet addig ismételték, amíg a homlokot egy gyűrű szélességnek megfelelő mélységig le nem fejtették.

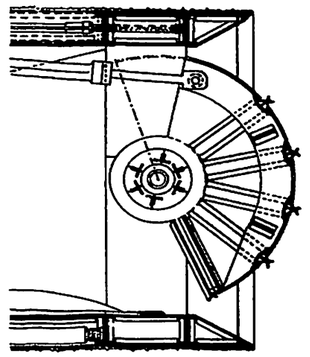
Földalatti vasút építésnél alkalmazásra került az un. *Anderson*-féle exkavátor. Ez is lényegében vízszintes tengely körül forgó karokból áll, amelyeken - az előbbi típusoktól eltérően - végigmenő vágóél volt. Ez a vágóél az exkavátor állandó előrehajtása közben a homlokszelvényt, akárcsak egy fúró, vékony rétegekben lehasította. A törmeléket radiális vedrek fogták föl és szállító csigába adagolták. Az anyagot azután szállítószalag továbbította a csillékbe.

A Szovjetunióban az alagútépítésénél szintén alkalmazásra kerültek olyan fejtőgépek, amelyek a fejtés és rakodás nehéz műveletét gépesítették. Egyik ilyen ismert exkavátor a *Volkov*-féle fejtőgép, mely a *Price*-féle rendszerhez hasonlóan működött. Küllőszerű karokból állt, amelyen radiális irányú kapaszerű kések fejtették a talajt a puttonyokba. Bár a készülék a pajzsba van beszerelve, attól függetlenül működött. Először a maróelem fokozatos előrehajtásával a homlok egy részét fejtették le, majd a pajzsot utánnyomták. A szerkezet hidraulikus meghajtású volt. (3.8. ábra)

Ugyancsak a fejtés gépesítését kívánta megoldani *Varganov* is az általa szerkesztett fejtőgéppel (3.9. ábra). Az alagúttengelyben vízszintesen elhelyezett tengely körül forgó karokból állt, amelyeken különböző távolságra elhelyezett kések koncentrikus gyűrűkben lazították a talajt. A lefejtett homlok anyagát alul kaparószalag távolította el a megépült alagút irányában.



3.9. ábra: *Varganov* által szerkesztett fejtőgép

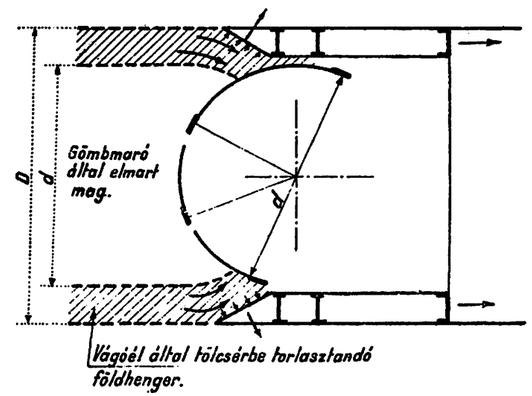


3.10. ábra: *Hallinger*-féle exkavátor fecskefarok alakú kettős késekkel

Az előbb említett rendszertől merően eltérő fejtőelemet dolgozott ki a Hallinger cég, amelyet először a budapesti vízhálózat céljait szolgáló káposztásmegyeri Duna alatti alagutaknál, majd pedig Dortmundban, csatornaalagút építésénél használtak fel. A *Hallinger*-féle exkavátor lényegében vízszintes, az alagút tengelyére merőleges tengelyre szerelt és a homlok felé kialakított félgömb, amelyben a pajzs tengelyére merőleges elhelyezésű hasítékok vannak. Ezekbe szerelik be a földet maró késeket. A különböző késsorokat növekvő gömbsugár mellett kell felerősíteni, ezáltal elérhető, hogy a gömbmaró forgatásakor mindegyik késsor a homlokból újabb és újabb talajréteget mar le. Egyforma sugáron elhelyezett késeknél az tapasztalható, hogy csak a legelső késsor vágja a talajt, a többi nem. Kísérleteztek a gömbhasítékok közepében elhelyezett és kifelé álló fecskefarok alakú kettős késekkel is, azonban ezek kemény talajnál nem váltak be (3.10. ábra). A gömbmaró mozgatása hidraulikus úton történik. Állandó forgatónyomaték elérése érdekében a félgömb felső végét körívben kell meghosszabbítani. Az erre rávetett galláncon keresztül a pajzs diafragmájára függőlegesen elhelyezett sajtók kétirányú mozgásának megfelelően a gömbmaró le és fel mozgatható.

Az ilyen megoldáshoz jelentős súlyú vasszerkezet szükséges. Egyszerűbben végezhető a maró mozgatása kettős működésű dugattyús sajtóval (3.10. ábra). A sajtó egyik vége a pajzs tetejére erősített és a gömbmaró vízszintes tengelyével párhuzamos csap körül foroghat, másik vége pedig a gömbmaró felső végéhez kapcsolódik. A sajtó kettős működésének megfelelően a marógömb le és fel mozgatható. Az elrendezésnek azonban az a hátránya, hogy az állandó sajtónyomás mellett kifejtett forgatónyomaték nem állandó, mert a sajtó-erő hatásvonala a forgástengelyhez képest változik.

A gömbmaró alkalmazása alapjában véve igen szellemes. Előnyének tudható be, hogy nem csak a fejtés gépesítését, hanem egyúttal a homlok megtámasztását is megoldani kívánja, amit pedig az előzőkben leirt fejtőgépek közül egy sem tudott biztosítani. Míg azok csak olyan talajban alkalmazhatók, melyek a pajzs előrehajtásáig önmagukban is megállnak, addig a gömbmaró felülete helyettesíti a homloktámasztást. Bár a gömbmaró egyes esetekben igen jól bevált, például Dortmundban 10 méter feletti napi teljesítmények voltak elérhetők, mégis olyan hátrányai vannak, melyek alkalmazhatóságát kérdésessé tehetik. Vizsgáljuk meg ezért részletesebben a gömbmarós pajzs működését. (3.11. ábra).



3.11. ábra: *Hallinger* pajzzsal való fejtés

A *Hallinger* pajzzsal való fejtés abból áll, hogy a gömbmaró felső állása mellett a pajzsot a homloknak nyomják. A marót lefelé mozgatva a homlokból, a gömb sugarának megfelelő magban lefejtünk egy réteget. A marógömb "d" átmérője azonban mindig kisebb, mint a pajzs "D" külső átmérője, mert merevség okokból a pajzs héját erősítő gyűrűkkel kell ellátni és így a homlokfelületből a gömb a merevítő gyűrűnek megfelelő sávot nem tudja elmarni. A szelvény "D" átmérőnek megfelelő kifejtése érdekében a pajzsot úgy kell kialakítani, hogy a vágóél a pontos szelvényt vágja ki és a gömbbel el nem marható gyűrű sáv anyagát hasítsa le és vezesse a maró felé. Azonban a talaj ékszerű lehasítása mellett az anyagot tölcséresen szűkülő nyílásba kell bekényszeríteni. Ez a művelet igen nagy erőszükséglettel jár és ez az oka annak, hogy a *Hallinger*-rendszerű pajzsokban, a megszokottnál jóval erősebb hidraulikus berendezést kell alkalmazni. Az erőszükséglet a d/D viszony csökkenésével nő. Minél nagyobb az a földréteg, amelyet a vágóélnek kell lehasítani, annál nagyobb erő kell a pajzs előretolásához.

Nagyobb átmérőjű pajzsoknál lényegesen erősebb merevítő gyűrűk szükségesek, ezért lényegesen nagyobb a vágóélek által lefejtendő földréteg. Emiatt keményebb talajban a vágóélek már ilyen vastag földréteget nem képesek hasítani és a marógömb mögé betorlasztani. Ezzel magyarázható, hogy a kisebb átmérőnél kemény agyagtalajban jól bevált marógömbös pajzs ugyanilyen talajban nagy átmérőnél már nem működik a kívánalmaknak megfelelően. Marógömbös pajzs nagy átmérőnél szilárdsági szempontból is hátrányos. A gömb miatt átlós irányú belső merevítéseket, oszlopokat, vonórudakat nem lehet alkalmazni s a pajzsot csak gyűrű irányban merevítik. A pajzs gyűrű irányban túl rugalmas és csak nagy vastöbblettel tehető kellően szilárddá. Gyűrűs merevítésű, un. nyitott pajzsok, mint amilyen a *Hallinger* pajzs is, hajlamosak az eltorzulásra, nagyobb pajzsoknál nyitott rendszert nem is alkalmaznak.

Az említetteken kívül még egy nagy hátránya van a gömbmarós pajzshajtásnak. Míg a többi fejtőgépnél a vágóél és a fejtőgép is rendszerint szabadon van, vagy bármikor könnyen szabaddá tehető, addig a *Hallinger*-féle rendszernél a pajzs elejét, a vágóéleket mindig föld takarja, és a pajzs hajtása anélkül történik, hogy tudnánk, a vágóél milyen talajba nyomul be és minek ütközik neki. Ilyen un. vak hajtás mellett a vágóélek teljesen ellenőrzés nélkül vannak és esetleges sérüléseket, vagy rongálódásokat csak későn lehet észrevenni. A javítás módja is igen körülményes, mert teljesen felemelt gömbmaró mellett tárószerű előrefejtéssel kell a vágóélig előremenni. Az említett okok miatt a gömbmarós pajzsot csak olyan talajban célszerű alkalmazni, amelyről biztosan tudható, hogy teljesen homogén és a vágóélek semmiféle akadályba nem ütközhetnek. (Illési 1954)

3.3. Homlokfejtés laza és vizes talajokban

Mint azt az előzőkben láttuk, a szikla és agyagtalajokban való alagúthajtás legfőbb előnye az volt, hogy a kivájt üreg a fejtés ideje alatt önmagában is megállt. A vágóél előtti főtét egyáltalában nem, a homlokot pedig csak nagyobb szelvények esetében kell megtámasztani.

Azonban igen sokszor olyan talajokban is kell alagutakat építeni, amelyeknél ez a feltétel nem áll fenn. Az áthatolandó talajrétegek laza struktúrájúak, sokszor magas víztartalmúak, vagy teljesen talajvízben állnak.

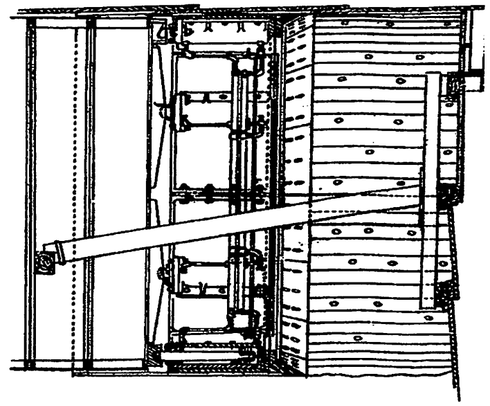
Gyakran a jelenlevő víz okozza azt, hogy a talaj omladékony. A homoktalajok például nagy víztartalom mellett egészen folyóssá válhatnak. Viszont ugyanez az összetételű talaj kiszárítva úgy viselkedik, mint a tömör száraz agyagok. Laza talajban való fejtés megkönnyítésének egyik lehetősége, légnyomás alkalmazása. Agyagtalajoknál a sűrített

levegő csupán felületi nyomásként jelentkezik és tulajdonképpen a homloknak és a főtének a megtámasztását segíti elő. Egyes esetekben légnyomás nélkül, az omlékony agyagtalajok légnyomás alkalmazásával állékonnyá válnak, és azok a fejtési módok, amelyeket előzőkben vázoltuk, itt is alkalmazhatóvá váltak. Lazább szemcséjű, vízzel telített homok és iszaptalajoknál viszont a légnyomás nem csak támasztásként működik, hanem behatolva a vízzel telt pórusokba, a vizet kiszorítja. A homlokon a levegő túlnyomás és a környező talajvíz egyensúlyba jut, a homlokfejtés körül és fölötte száraz talajboltozat alakul ki. A talaj kohéziója és súrlódása megnő és ez a fejtésnél alkalmazandó biztosítás szempontjából igen előnyös. Ha azonban a levegő valahol utat talál felfelé, a légnyomás hirtelen lecsökken. A nyomás alatti talajvíz újra elfoglalja helyét a pórusokban, a talaj állapota hirtelen megváltozik, ami biztosítás hiányában nagy veszéllyel járhat. Éppen ezért, ezekben a talajokban különösen nagy gondot kell fordítani a levegő szökések megelőzésére és meggátlására.

A légnyomás alkalmazása, tisztán a biztosítás megkönnyítésére igen drága és gazdaságtalan megoldásnak számított. Légnyomást csak ott alkalmaztak, ahol ez a víz távoltartása miatt okvetlenül szükségessé vált. Laza talajban a kifejtett felületeket tűző és borító pallózattal biztosították. Külön gondoskodtak a vágóél előtti főte felfogásáról, és külön a homlok megtámasztásáról. (Illési J. 1954)

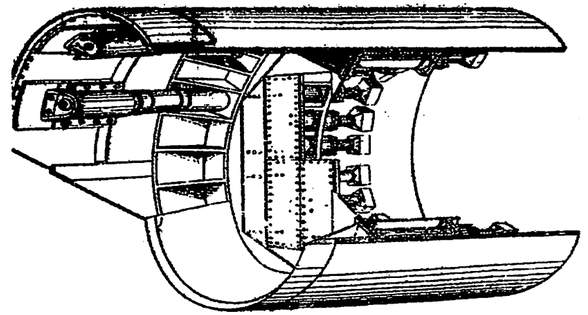
3.3.1. A főte felfogása

Az első fa tűzőpallós kisegítést *Greathead* alkalmazta (3.12. ábra). A pajzs laza homokos kavics rétegben haladt, a homlokot is, és a főtét is, meg kellett támasztani. A fejtést a főtében hajtott kis táróval kezdték. A tűzőpallók egyik végét a talajba hajtották előre, másik vége pedig magára a pajzsra támaszkodott. A külső tűzőpallózást a kerület háromnegyed része mentén végezték el és utólag kiinjektálták. A homlok támasztása a pajzson keresztüldugott dúcgerendákkal történt, amelyek a homlokborító pallózatot voltak hivatva megtámasztani. A fejtés és a pajzs előrenyomása tulajdonképpen a vágóélen kívül elhelyezett tűzőpallók védelme alatt történt, a pallók a talajban bennmaradtak. Az eljárás egyik hátránya az, hogy a tűzőpallók java része elvész, mert nem nyerhető vissza. A bennmaradó pallók pedig elkorhadnak és süllyedések bekövetkezését vonhatják maguk után. Nagyobbik hátrány azonban az, hogy az átdugott dúcolás miatt hirtelen víz-, vagy talajbetörés esetén lehetetlen a pajzs homlokát elzárni.



3.12. ábra: Fa tűzőpallós kisegítés

A bennmaradó tűzőpallók hátrányán úgy próbáltak segíteni, hogy helyettük a pajzzsal együtt haladó acél szádpallókhoz hasonló tűzőpallókat alkalmaztak. Ezeket a pallókat rendszerint segédberendezésekkel tűzték előre. Bár a pallók nem maradtak benn a talajban, mégis meg volt az a hátrányuk, hogy roskadási veszélyt okoznak, mivel a pajzs külső felületére támaszkodó tűzőpallók nagyobb szelvényt vágnak ki a talajból, mint amekkora külső átmérője magának a pajzsnak van.



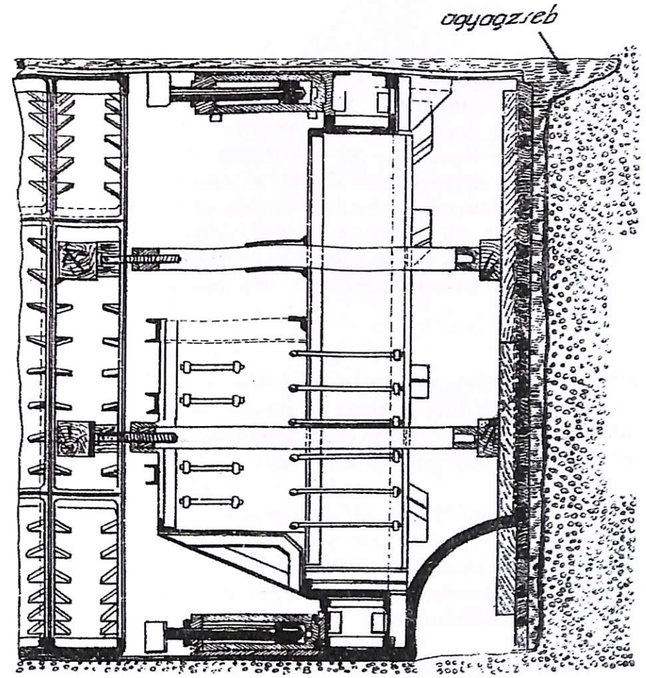
3.13. ábra: Szovjet hidraulikus sajtórendszerrel működtetett kitolható ernyős pajzs

A tűzőpallózás hátrányán kívántak segíteni 1894-ben, mikor először alkalmazták a vágóél felső részének előreugrását, az un. ernyőt. A vágóélernyő kiugrása igen hatásos eszköz a főte biztosítására. Különösen a Szovjetunióban használták a pajzsokon. Az ernyő és a tűzőpallózás előnyeinek egyesítésére irányuló törekvés hozta létre a különböző kitolható ernyőket. A 3.13. ábra egy hidraulikus sajtórendszerrel működtetett kitolható ernyő szovjet tervét tünteti föl. Az ernyő egy darabban mozgatható előre. Különböző kísérleteket végeztek több részből álló szádpallózás-szerű ernyőkkel is, azonban ilyen szerkezetek hátránya abban rejlik, hogy a pajzs ritkán követi pontosan a kitolt ernyőt. A vasszerkezet erős mellékfeszültségeket kap, kihajlik, meggörbül, és gyakran szorul javításra. Használhatóságuk éppen ezért a legtöbb esetben kérdésessé vált.

A vágóélernyő behatolásának elősegítése érdekében érdekes megoldást választottak a már említett munkánál. Az ernyő előtt a talajt kis szakaszokban előre kifejtették és az üreget plasztikus agyaggal töltötték ki ("agyagzsebes eljárás") (3.14. ábra). Ezzel kettős célt értek el. A benyomódó vágóél könnyen hatol a talajba, miközben az agyagot a héj külseje felé is préseli. A pajzs sokkal jobban alátámasztja a megbontott szelvényt. Az agyagzsebek másrészt a jobb levegőtartás előnyét is biztosítják. Az eljárás hátránya azonban a munka aprólékosságában keresendő.

A vágóél előtti főte biztosítására egyes esetekben a vágóélen belül elhelyezett tűzőpallókat is alkalmaztak. Ezek a pallók hegyükkel a talajba voltak beverve, végük pedig a pajzsra csúsztathatóan úgy volt támasztva, hogy a pajzs előrehajtásánál ellenállást nem jelentettek. Ilyen megoldás esetén a vágóélen kívül semmiféle fejtés nem történik, a vágóél maga vágja ki azt a szelvényt, amelybe a pajzs feszesen beleillik. Ennél az eljárásnál a tűzőpallókat vissza lehet nyerni.

Egy folyó alatti alagútnál a főtét az alagúttengelyre merőleges belső borítópallókkal biztosították. A vágóél belsejében alkotóirányú hüvelyeket alakítottak ki, amelyekbe kisebb átmérőjű, mozgatható csöveket helyeztek. A főte egy részének aláfejtése után a borító pallót elhelyezték és a kihúzható csővel támasztották alá. A konzolvéget szükség esetén az alsó mozgatható padozatról közvetlen dúcolással és aláfogták. A pajzs előre nyomásánál a borító pallózat a csövekkel és esetleges dúcolattal együtt visszanyomódik a pajzsba. (Illési 1954)



3.14. ábra: Agyagzsebes eljárás, vízcsapdával

3.3.2. A homlok támasztása

A pajzsos alagútépítésnél, különösen laza, omlékony talajban való építésnél döntő szerepe volt annak, hogy a magában nem állékony homlokot a fejtés, de különösen a pajzs hajtása alatt miként tudták biztosítani. A homlok szabad felületén aktív földnyomások mindig jelentkeznek, kivételt csak a szikla és a kemény agyagtalajok jelentenek. Utóbbiak is csak a kis szelvényméretek mellett. Az aktív földnyomásokat olyan dúcolatokkal kellett felvenni, amelyek a homlokhoz képest egy helyben maradnak függetlenül attól, hogy a pajzs áll-e, vagy mozog. Más megfogalmazásban a homlokfelületet állandóan a földnyomást egyensúlyozó erővel kell megfogni és a fejtés folyamán kiváltásokkal előrevinni.

A homlokdúcolás megtámasztását a pajzshoz lehet kitámasztani legegyszerűbben. A fejtés befejezése után azonban a pajzsot előre kell hajtani és emiatt a homlok állandó támasztása nem oldható meg.

Rövidebb pajzsoknál

A homlokbiztosítás kitámasztását régebben a pajzson keresztüldugott dúcoszlopokkal végezték, amelyek a már meglévő alagútszakaszban beépített keresztgerendákra támaszkodtak. Ennek az eljárásnak egyik hátránya az, hogy csak rövid pajzsoknál alkalmazható, másik és egyben sokkal nagyobb hátránya pedig - mint már említettem - abban jelentkezik, hogy a dúcok a pajzsokban nem csak, a munkát akadályozzák és nehezítik meg, hanem megakadályozták azt is, hogy hirtelen levegőszökéseknél a beáramló víz és talaj elől a pajzsot el lehessen zárni. Amennyiben későbbiekben ismertetendő un. vízcsapdával épült pajzsban (3.14. ábra) alkalmaznak ilyen hosszirányú dúcolatot, úgy a zárt diafragmákon való átvezetésnél külön tömítésekről kell gondoskodni, ami pajzs hajtás közben eléggé kényes.

Hosszabb pajzsoknál

A homloknak a már elkészült falazatra való támasztása nem volt megvalósítható. Ilyenkor a dúcolást magára a pajzsra kellett támasztani, és gondoskodni kellett arról, hogy a pajzs hajtása közben a dúcoszlopok hossza a homlok állandó erővel való támasztása közben változtatható legyen. Ezt kétcsöves homlok dúcokkal érték el, un. támasztó "ágyúkkal", homloksajtóval, vagy mozgatható munkapadokkal.

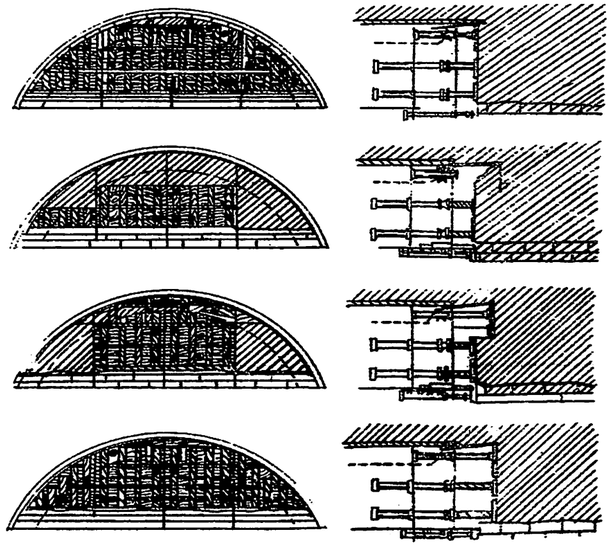
A homloktámasztás legprimitívebb módja a támasztó "ágyúkkal" való támasztás. Ezek két különböző méretű egymásba helyezett teleszkópos csőből állnak, hosszukat rögzítő csavarral lehet beállítani. A pajzs hajtásakor a csövek egymásba tolódnak, miközben a sajtók legyőzik a rögzítő csavaroknál keletkező súrlódási ellenállásokat. A berendezés egyszerűsége előnyös lenne, azonban a csavarkapcsolat bizonytalansága miatt működésük nem eléggé megbízható.

A homloktámasztó sajtók az előbbi szerkezet tökéletesítésének tekinthetők. Ezeket a sajtókat magára a pajzsra, a válaszfalakra, a munkapadokra vízszintes helyzetben szerelték fel. A pajzshoz rögzített sajtók támasztják meg a homlokot közvetlenül, vagy borító pallózatón és dúcolaton keresztül. A sajtók - kiváltásuktól eltekintve - állandó nyomás mellett működnek. A pajzs előrehajtásához a sajtók dugattyúi állandó feszültség tartása mellett visszakényszerülnek hüvelyükbe, miközben a sajtótérben levő vizet visszanyomják a sajtókat tápláló csőhálózatba. A homlok állandó erővel való támasztása, függetlenül attól, hogy a pajzs áll-e, vagy pedig mozog, homloktámasztó sajtókkal tökéletesen biztosítható.

A homloktámasztó sajtókat egyben mozgatható munkapadok működtetésére is felhasználták. Nagyobb pajzsoknál ugyanis a rekesz és válaszfalrendszerre nem csak azért volt szükség, hogy a pajzs merevítő gyűrűjét közbenső kitámasztásokkal tegyük erősebbé, hanem arra is, hogy a homlokfejtéshez szükséges munkaállvánnyal is rendelkezzünk. Tekintve, hogy a fejtés alatt a homlok síkja eltávolodik a pajzstól, célszerű a munkapadokat úgy kialakítani, hogy a fejtést követhessék. Erre a célra szolgáltak a mozgatható munkapadok, melyek a rekeszfalakon elhelyezett vízszintes hornyokban csúsztathatók. Könnyű kezelésük érdekében ezeket a padokat, valamilyen mozgató berendezéssel látták el. Erre a hidraulikus sajtók kiválóan alkalmasak voltak. Ha a munkapad elejét úgy képezik ki, hogy az a homloknak közvetlenül neki támasztható, akkor a munkapadot mozgató sajtó a homlok támasztására is felhasználhatóvá válik. (Illési 1954)

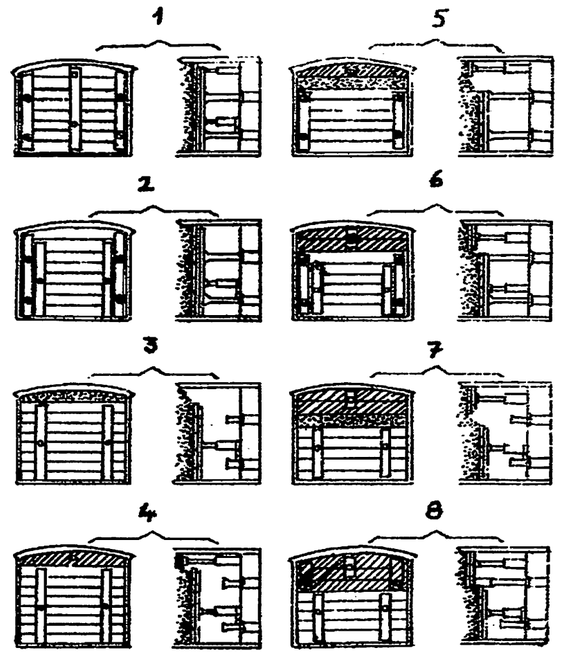
3.3.3. Homlokfejtés

A homlok fejtése laza omlékony talajokban sokkal nehezebben végezhető, mint a támasztás nélkül is megálló talajoknál. A fejtést mindig dúcolni kellett és csak helyi, egymásután végzett kiváltásokkal lehetett előremenni. A következőkben bemutatom, miként végezhették el a fejtést abban az esetben, ha a homlokkal a vágóél elé kívántak menni. Továbbá milyen módszert alkalmaztak akkor, ha a vágóéllel a talajba be tudtak hatolni és a vágóél védelme alatt dolgoztak. A pajzs előtt való fejtés módját a 3.15. ábra tünteti föl. A pajzshajtás befejezésekor a vágóél elérte a teljesen beborított és támasztó sajtókkal biztosított homlok síkját. Minthogy ennél a módnál a vágóél előtti főte biztosításáról gondoskodni kell, a munkát a felső vágóélnél tűzőpallók előrehajtásával kell kezdeni. Ezek védelme alatt a vágóél körüli felső támasztó sajtók felszabadíthatók. A fejtés elvégzésével az új homlokfelületet újra el kell látni borító pallóval és a feloldott sajtókat újra működtetni kell. Majd a következő támasztó sajtók oldandók meg és a fejtés újra vékony sávban végzendő el. Az új helyzetben a támasztó sajtók újra működtetendők. A fejtéssel így kell lefelé haladni mindaddig, míg a homlokot teljes szelvény mellett a megfelelő mélységig ki nem bontottuk. Ebben a végleges állapotban az összes sajtó teljesen kinyomott állapotba kerül és a pajzs előrehajtása lehetővé válik.



3.15. ábra: Tűzőpallók előrehajtásával végzett homlokfejtés

Ha a talaj annyira laza, hogy a vágóélnek a talajba való benyomása előre fejtés nélkül lehetővé vált, akkor a fejtésnél a főte biztosítására nem kellett külön tűzőpallókat használni, mert ezt a szerepet a pajzs maga látta el. A 3.16. ábra a pajzs egyik munkakamrájában végzendő fejtési műveleteket tünteti föl. Miután a pajzsnyomatás után a pajzs vágóéle beleszúródott a talajba, a támasztó sajtókkal megfogott homlokfaldúcolat is a pajzs belsejébe került (l.). A munka azzal kezdődik, hogy a dúcolást a pajzshoz ideiglenesen úgy váltják ki, hogy a legfelső palló eltávolítható legyen. Így a felső rész fejthetővé válik (2. és 3.). Ennek elvégzése után a felületet újra borítópallóval kell felfogni és ezt ideiglenesen a pajzshoz támasztani (4.). A homloktámasztó sajtók újabb kiváltásával a következő palló szabadítható fel és a fejtés itt is elvégezhető (5.). Az új homlok itt is újra kidúcolandó és újabb palló váltandó ki (6.). A homlokfejtés (7.) és a kiváltás (8.) állandó ismétlésével a homlok teljes felülete fokozatosan lefejthető s a pajzs újra előre tolható. (Illési 1954)



3.16. ábra: Vágóélnek a talajba való benyomása előre fejtés nélkül

3.3.4. Védekezés hirtelen talaj- és vízbetörések ellen

A pajzsos alagútépítésnél ideiglenes dúcolást csupán a homloknál használtak, veszélyes omlások csak itt következhettek be. A talajrétegződésben bármikor változások állhatnak elő, ami könnyen azzal járhat, hogy az eddig alkalmazott homlokmegfogás elégtelennek bizonyult és a talaj benyomódott a pajzsba. Az is előfordulhat, hogy vízáteresztőbb talajrétegekre bukkannak, amelyből vízbetörés is várható. Bár próbafúrásokkal a talajviszonyokat mindig előre feltárták, bizonyos óvóintézkedéseket mégis meg kellet tenni. Különösen akkor, ha annak a legkisebb lehetősége is fennállhat, hogy akár a talaj betörhet, akár víz áraszthatja el az alagutat. A régebbi pajzsoknál ennek veszélye fen ált és nem is egyszer be is következett, mely emberáldozatokkal is járhatott. Éppen ezért próbáltak törekedni arra hogy a munkásokat ki tudják menteni. A mai pajzsoknál ez a veszély szinte teljesen megszűnt.

3.3.4./a Védekezés vízbetörések ellen

A talajvíz visszatartását rendszerint légnyomás alkalmazásával próbálták megoldani. A víznyomás (hidrosztatikus nyomás) a mélységgel lineárisan nő; a szelvény tetején és alján más és más hidrosztatikus nyomás érvényesül. Az alagútban alkalmazott túlnyomás viszont csak egy értékre lehet beállítani és rendszerint az alagúttengely magasságának megfelelően állapították meg. Ez alá csak kisebb vízhozamú talajoknál lehet menni. A ki nem egyenlített nyomáskülönbségek okozták azt, hogy a pajzs alja légnyomással nem volt kiszárítható teljesen és sokszor vízben állt.

A talajvíz erősebb beáramlása esetén a légnyomás emelésével sokszor eredményt lehetett elérni. Bizonyos határokat csak az szab meg, hogy nagyobb nyomások mellett a levegő szökése erősen megnőhet. Ezt viszont sűrűbb dúcoló deszkázattal, a hézagok agyaggal, vagy más anyagokkal való eltömésével próbálták csökkenteni, miközben a fejtéshez a homlokfelületet csak a legszükségesebb mértékig lehetett szabaddá tenni.

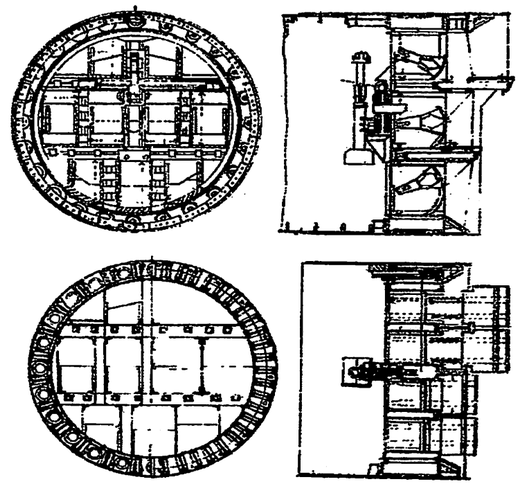
A talajvíz teljes kizárását csak abban az esetben lehet elérni, ha a víz az elzárandó térségbe csupán alulról tud behatolni. A pajzsban a teljes vízzárást csak un. vízcsapdával tudták biztosítani. Ez a vízcsapda lényegében olyan berendezés, amely mellett a víz csak alulról felfelé tud a pajzsba behatolni. Kis pajzsoknál a vízcsapda lényegében két részre bontott és egymáshoz képest eltolt diafragmalemezből áll. A felülről mintegy középig lelógó félkörös diafragma, a tulajdonképpen függöny, előrébb van, mint az alsó fél diafragma. Ezáltal érhető el, hogy a víz csak alulról felfelé tud a pajzsba jutni. A felső lemez alsó éle az alsó lemez tetejétől valamivel lejjebb van, hogy a vízcsapda a pajzs esetleges elcsavarodása esetén se veszítse el hatásosságát (3.14. ábra).

Ilyen vízcsapdával felszerelt pajzsokban a homlokfejtésnél dolgozó munkások vannak a legnagyobb veszélynek kitéve, az alagút védett munkaterébe való visszajutásuk érdekében menekülésük útját a legnagyobb előrelátással kellett biztosítani.

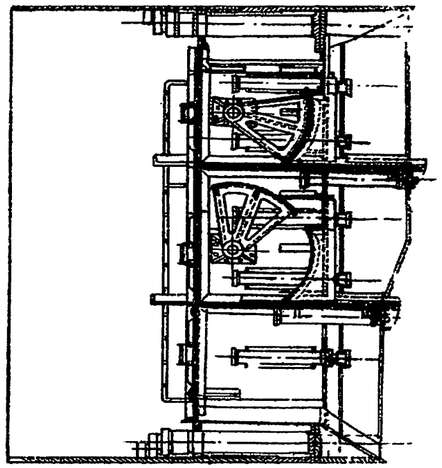
Nagy pajzsoknál egyetlen vízcsapda alkalmazása a munkálatokat nagyon gátolná. A Rotherhithe-alagút építésénél, különböző magasságokban több vízcsapdát alkalmaztak. Természetesen ezek nem működtek hatásosan, mert a levegő a legfelső diafragma alatt mindaddig el tudott szökni, míg a víz ennek magasságát az alagúton belül is el nem éri. Nagyobb alagutakat a betörő víz azonban lassabban önt el, mint a kisebbeket és ezért ezekben tulajdonképpen vízcsapdákra nincs is szükség. A munkások menekülési lehetősége nagyobb alagutaknál sokkal jobban biztosítható, mint a kis szelvényűeknél, melyeket a hirtelen betörő víz igen hamar teljesen elönthet. Ha azonban nagy alagutaknál mégis vízbetöréstől kell félni, célszerű a már megépült alagút részbeni védelmét un. vízfüggönyökkel megvédeni. A vízfüggöny lényegében az alagút felső fél szelvényét lefedő félkör alakú zárt diafragmalemez, amelyet a pajzs mögött a már elkészült alagútban szerelnek fel, hogy vízbetörés esetén az elkészült alagútszakasznak legalább felső felét védjük meg az elárasztástól. A vízfüggöny mögött a levegő mindig megszorul és végszükség esetén is menekülést biztosít a bent lévő munkásoknak. Azonban akár alkalmaztak vízfüggönyt, akár nem, a munkások menekülését vízbetörés esetre mindenképpen biztosítani kellett. Az alagút koronája közelében magasan elhelyezett vészjáratot kellett állandóan fenntartani.

3.3.4./b Védekezés talajbetörések ellen

Pajzsos építésnél a talaj behatolása a pajzs belsejébe ritkábban fordult elő és főleg lassabban folyt le, mint a víz és ennélfogva a védekezés is könnyebb. Kétségtelen, hogy a légnyomás emelése a talaj számára is erősebb megtámasztást jelent, azonban nem eléggé eredményes. Sokkal hatásosabb mód a dúcolat megerősítése. Ha azonban a szelvény rétegződésében hirtelen változások, vagy a talaj konzisztenciájában olyan ugrások voltak várhatók, amelyek a homlok állékonyságára igen erős hatással lehettek, a pajzsot úgy szerkesztették meg, hogy szükség esetén a homlok részleges vagy teljes lezárására lehetőség nyíljon. Ezt legegyszerűbben úgy valósították meg, hogy a rekeszfalak és munkapadok által határolt fülkék oldalait olyan hornyokkal látták el, amelyekbe szükség esetén előre elkészített és állandóan a pajzs mellett tárolt gerendák helyezhetők. Ezekkel a keresztgerendákkal a pajzs nyílásai a homlok felé részben vagy egészben elzárhatók. Az ilyen keresztgerendák alkalmazásának hátránya az volt, hogy a hornyok az eltömődés veszélynek vannak kitéve, sőt hirtelen bekövetkező beomláskor maga az omlás teszi lehetetlenné a keresztgerendák horonyba való elhelyezését. A Pennsylvániai Vasút Hudson folyó alatti alagútjánál különleges záró kapuk alkalmazását próbálták ki (3.17. ábra). A szegmensalakú kapuk vízszintes csapok körül forgathatóan voltak a rekeszfalak oldalaira szerelve. A súlyos kapuk rendes üzem alatt felemelt állapotban álltak. Szükség esetén egy kar meghúzásával voltak



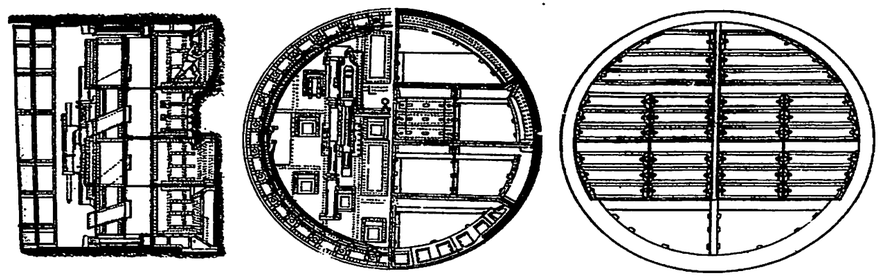
3.17. ábra: Pennsylvániai Vasút Hudson folyó alatti alagútjánál használt pajzs



3.18. ábra: Szovjet záró kapus pajzs

kioldhatók. Ezzel tették lehetővé, hogy a pajzs nyílásait a beáramló talajtömegek ellen súlyuknál fogva automatikusan zárják el. Ilyen kapukkal felszerelt pajzs szovjet típusát a 3.18. ábra tünteti föl. (Illési 1954)

A Blackwall-alagút építésénél (3.19. ábra) alkalmazott pajzsban a homlokmegtámasztás ideiglenes fadúcolata helyett pajzsra szerelt vaspallózatot, un. redőket alkalmaztak. A henger-



3.19. ábra: *Blackwall* alagút építésénél használt pajzs

előrehajtása alatt, ezek a függőleges és vízszintes szerkezetek éleikkel bevágnak a földtömegbe, melynek egy része a munkahengerbe hull; a többi részt pedig, mely minden rekeszben az anyag összetartásának megfelelő rézsűvel állva marad, a munkások távolítják el. Vízáteresztő rétegekben megtartják a homloknak rekeszekre való feloszlását. Azonkívül még két vasfalat alkalmaznak, melyekkel a rekeszeket mind az alagút, mind a föld felől elzárják úgy, hogy ekként a munkahenger homlokát egymás mellett és fölött sorakozó és minden oldalról zárt fülkék alkotják. A munkások részére a fülkéket az alagúttól elválasztó vaslapon minden egyes fülkének megfelelően egy ajtót helyeznek el. A földtömeggel érintkező elzárás pedig lehetővé teszi, hogy a munkások tetszés szerint kisebb vagy nagyobb területen tegyék a földet hozzáférhetővé. Ez a homloklap nagyon emlékeztet *Brunnel* munkaszekrényének homlokára, csakhogy az ott alkalmazott vízszintes támasztódeszkákat itt U szelvényű vasgerendák helyettesítik. Míg ott a deszkákat teljesen ki kellett emelni, ebben a szerkezetben a vasgerendák, melyeknek hossza egy fülke szélességének felel meg, mint az asztal fiókjai, vízszintes vezetékben ki és betolhatók (3.19. ábra).

Az egyes fülkék berendezése teljesen azonos, mindegyikben egy munkás dolgozik, aki a föld szilárdságához képest egyszerre egy, vagy több ilyen fiókot húz ki. Miután az így hozzáférhetővé tett földrétegből bizonyos vastagságot kiemelt, azokat előbbi helyzetükhöz képest előbbre helyezve visszatolja. Ekképpen fokozatosan minden vasgerenda előbbre halad és a munka bizonyos állásában az egész homlokfal előbbre jutott. Most tolják előre az egész munkahengert, melynek mozgása közben a vasfiókok vezetékükön csúszva visszamaradnak. Így a földtámasztó homlokfal mozdulatlan marad. Ha az anyag lazasága még egy vasgerenda kihúzását sem engedné meg, ekkor a homlokot ennél is kisebb részletekben nyitják föl. Ugyanis minden gerendának két vagy három hosszúkás nyílása van, melyek kis tolóajtóval zárhatók el. Ezeken a nyílásokon át rövidnyelű ásóval szedik be a laza anyagot, helyet készítve ekképpen a vasgerenda előretolására.

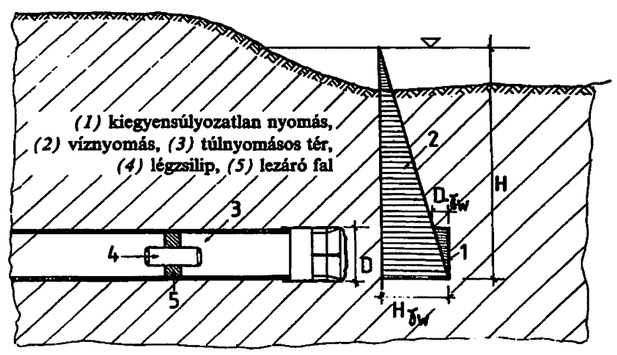
Ezt a szerkezetet sikerrel használják a *Blackwall* alagút építésénél, ahol a gyakran váltakozó homok, kavics és agyagrétegekben különösen előnyös az, ha a homlokot különböző nagyságú területen nyithatják föl aszerint, amint lazább vagy szilárdabb rétegekben haladnak.

Sűrített levegő alkalmazásával a zárthomlokú szerkezeteknek az az előnyük, hogy az egész munkatér légmentesen zárható el. Továbbá, ha szükségessé válik, az egyes fülkékben a többieknél nagyobb légnyomást is kifejthetnek.

Az alagútnak a már kész részében, a munkahengerhez lehetőleg közel, 1,5-2,0 m vastag elválasztó falat építenek. Benne egy vagy több légzsilipet helyeznek el. Ez a fal az alagútnak sűrített levegővel telt részét a külső léggel érintkező résztől elzárja és a két rész között a közlekedést csak a légzsilipeken át engedi meg. Így a fal előtt állandóan sűrített, a fal mögött állandóan normális levegő van. A légzsilip pedig rendeltetéséhez képest szellentyű útján felváltva, mindkettővel érintkezik.

A legalsó légzsilip nemcsak a munkások, hanem a kiásott föld átzsilipelésére is szolgál. Ezért méreteit úgy állapítják meg, hogy benne egyszerre két megrakott kocsi elférjen. Ezeket azután ugyanúgy zsilipelik át az alagút egyik részéből a másikba, mint a munkásokat. A munkatér az építés előre haladtával mindinkább távolodik a légzsilipektől és mindig nagyobb lesz a tér, amely sűrített levegővel töltendő meg. Bizonyos idő múlva aztán új választófal és új légzsilipek elhelyezése válik szükségessé, amikor is az előbbi elrendezést lebontják. Ez a munkálat a többi építő munkák rendszeres végrehajtását, különösen a helyszűke miatt egy időre megnehezíti és hátráltatja, ezért az átzsilipelés pontját amennyire csak lehetséges kevésszer helyezik át.

A sűrített levegő az alagútban a folytonosan előrehaladó munkateret kitölti, a talaj felőli határolását a függőleges homloksík alkotja. A homlokon azonban csak egyetlen vízszintes vonalban lehet egyensúly a légnyomás és a víz nyomása között. Képzeljük ezt az egyensúlyt a homloksík középső vízszintesében. Ekkor az e fölött levő pontokon a sűrített levegőnek, alatta pedig a víznek van túlnyomása. Ennek megfelelően felül a levegő kiillanni, alul pedig a víz az alagútba bejutni igyekszik (3.20.ábra).



3.20. ábra: Kiegyensúlyozatlan víznyomás légnyomásos alagútépítésnél

A Temze Londonnál tulajdonképpen tengeröbölként viselkedik. Éppen úgy, mint a tengernek, rendes árapálya van. A vízszint naponta kétszer éri el legmagasabb és legalacsonyabb állását. Ez az ingadozás, melynek szélső értékei között a magasság különbség átlag 4 m-t tesz ki, szükségessé teszi, hogy a légnyomást az alagútban a vízállás szerint szabályozzák. A légsűrítő gépek személyzete a munkatéren tartózkodó építésvezetővel állandó telefonösszeköttetésben áll, s így értesül arról, hogy a légnyomást a szükséghez képest fokozni, vagy mérsékelni kell. Óvatosságot követel még a munkahenger előre tolása is. A legszigorúbban figyelni kell arra, hogy a henger középvonala mindig az alagút tengelyében haladjon előre. Az előretolás irányát azzal szabályozhatják, hogy a víznyomású sajtók nem csak egyszerre, de csoportonként, sőt egyenként is működésbe hozhatók. Az alagút irányának pontos megtartása rendszerint sikerül, de a legnagyobb gondossággal sem tudják megakadályozni a munkahengernek saját hosszanti

tengelye körül való elfordulását. Ez az elfordulás, melyet már *Barlow* és *Greathcad* is tapasztalt, a Blackwall alagútban 12°-nál is többet tett ki. Kör alakú szelvénynél a mérsékelt elfordulás nem jár semmi hátránnyal, azonban minden más alakú szelvénynél nagy nehézségeket okozna.

A munkahenger külső átmérője 8,45 m, hosszúsága pedig 5,95 m. Az egész, körülbelül 250 t súlyú szerkezet. A hengerben körben elosztott 28 víznyomású sajtó tolja előre. A szelvény külső átmérője 8,24 m, a belső pedig 7,62 m. Ez a méret, miután az alagút öntöttvas köpenyét az eddig ismertetett alagutakétól eltérően betonnal bélelték, a betont pedig fehérmázú téglával burkolták 7,40 m-re csökken. A kocsi pálya 4,88 m, a két oldalt elhelyezett járdák pedig 0,95 m szélesek. A szelvénynek a kocsipálya alatt maradó részében falazott csatornát építenek, mely összegyűjti az alagútba bejutott vizet. Ezen kívül a vízvezetékek, gázcsövek és kábeleknek a Temzén való átvezetésére is szolgál.

A tervezés érdekessége volt még, hogy az alagút két végén kialakított aknában liftek jutatták volna a felszínről az alagútba a közúti járóműveket. Helyette 28-29 ezrelék esésű bevágásokon közelíthetik meg az alagút bejáratát. A gyalogosokról jobban gondoskodtak, mert a bevágásokon kívül még az alagút három pontján elhelyezett lejáró aknák lépcsőin is lejuthatnak az alagútba.

A Blackwall alagút munkálatait az 1892-ik évben kezdték meg és 1897-ik évben fejezték be.

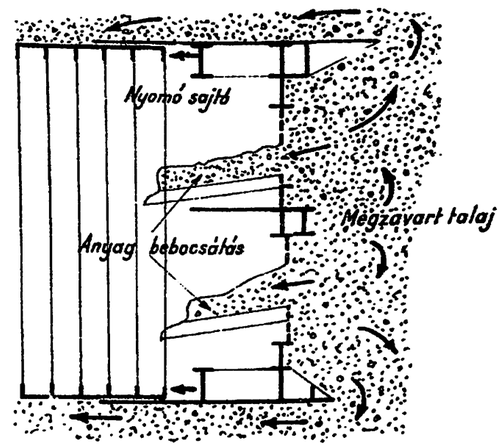
(Szesztay 1897)

3.4. Homlokfejtés iszap talajokban

A bányászati módszerrel épülő alagutak szempontjából a plasztikus, fél folyékony iszapok azok a talajok, amelyekben az építés a legnehezebb körülmények között végezhető el, egyes esetekben az építés egyenesen a lehetetlenséggel határos. Ezekben a talajokban rövid idő alatt igen nagy földnyomások fejlődnek ki és az iszap a legkisebb résen is áthatol. A pajzsos alagútépítés szempontjából viszont éppen ezek a talajok váltak kezelhetővé a legkönnyebben, ezekben érhették el a legnagyobb építési sebességet, de csak akkor, ha a talaj viselkedését pontosan ismerték.

Iszaptalajoknál tulajdonképpen fejtésre, - legalább is az addig ismert általános fejtési mód szerint – nem volt szükség. A pajzsot úgy építették meg, hogy zárt homlokfelülete, diafragmája legyen, amelyen szabályozható nyílásokat alakítottak ki. A pajzsot a homloknak nekinyomták és az iszap természeténél fogva a nyílásokon beáramlik. (3.21. ábra).

A tapasztalat azt mutatta, hogy a pajzsban alkalmazott légnyomás, igen nagy hatással van az iszap konzisztenciájára, főleg folyósságát illetően. Normális légnyomás mellett az iszap viszkózus folyadékként viselkedik, a légnyomás növelésével viszont a konzisztenciája csökkent és



3.21. ábra: Lamellás pajzs

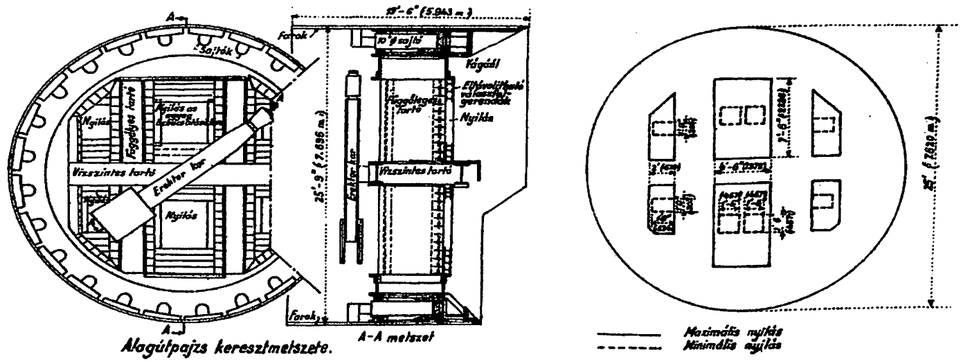
ha a légnyomás eléri a talajréteg és a felette levő nyílt víz együttes hidrosztatikus nyomását, akkor az iszap teljesen kemény homogén agyagként viselkedik.

Míg az iszaptól eltérő talajoknál a pajzs vágóéle által határolt szelvényből a talajt teljes egészében ki kell fejteni, addig iszapban a pajzsot teljesen zárt homlok mellett is előre lehet hajtani. A helyéből elmozgatott talaj a pajzs körül elfolyva tér ki a nyomás elől. Az ilyen zárt pajzzsal való építést vakhajtásnak nevezik. A vakhajtásos alagútépítésnél azonban az volt tapasztalható, hogy a pajzs irányítását pusztán különböző sajtócsoportok megfelelő működtetésével már nem lehet kézben tartani. Ellenben a pajzsdiafragma lezárt nyilásainak kellő kinyitásával a pajzs kormányzását tökéletesen meg lehet oldani. A bebocsátandó anyag mennyiségére az alagút átmérője igen nagy befolyással van. Vakhajtás csak kisebb alagutaknál valósították meg. Az alábbi táblázat megadja, hogy a bebocsátandó anyag mennyiség hogyan nő az átmérő növelésével (3.1. táblázat).

3.1. táblázat: a bebocsátandó anyag mennyiségének növekedése az átmérő arányában

Alagút külső átmérője (méterben)	5	6	7,5	9	10,7	11,3
Bebocsátandó anyag /az alagút térfogat (%-ában)	0	19	42	65	90	100

Az iszaptalajhoz hasonlóan viselkednek egyes puha agyagtalajok is. A Chicago-i földalatti vasút építésénél ilyen talajban is sikerült zárt pajzzsal alagutat építeni. Az ajtók megfelelő kinyitásával a süllyedések nagysága is szabályozható volt. Az alkalmazott pajzs vázlatrajzát a 3.22. ábra tünteti föl. A vakhajtás legnagyobb hátránya az akadályokba való ütközéskor jelentkezik. Ilyenkor bányászati módszerrel kellett a pajzs elé menni, az akadályt teljesen elhárítani és a pajzsot az így előre elkészített üregbe betolva lehetett csak a munkát folytatni. Folyó és tengerfenék alatti hajtásnál előfordulhat, hogy kőhányáson át kell haladni. Ilyenkor a fejtésnél a lehető legnagyobb óvatosságra volt szükség, mert a levegő kifújásának lehetősége bármikor fennállt. A köveket csak egyenként lehetett eltávolítani és a hézagokat agyaggal gondosan be kellet tömni. (Illési 1954)



3.22. ábra: A Chicago-i földalatti vasút építésénél alkalmazott pajzs

4. Pajzstípusok fejlődése az 1950 évektől 1990 évekig

Az 50-es évek után kezdett igazán elterjedni a pajzsos alagútépítés. Ennek legfőbb oka, a folyamatos fejlődés, melynek következtében egyre előnyösebbé vált az alkalmazása. A nagy élő munkát igénylő fejtést, rakodást, és az alagút falazatának építését egyre több helyen automatizálták, gépesítettek. A gépek eleinte csak segítették az élőmunkát, majd lassan teljesen átvették ezt a szerepet. A 80-as évekre a pajzs kifejezés alatt nem csak a mozgó dúcolatot, hanem a hozzá tartozó teljes gépláncot érthetjük. Ezt a gépláncot a pajzs maga után vontatja, melynek feladata a pajzs kiszolgálása. Innen kapják a gépek az áramellátást, innen történik a hidraulikus rendszerek ellátása, ezen keresztül szállítják a friss levegőt a pajzshoz, a kitermelt talajt csillékbe, vagy az anyagszállító rendszerre, az alagút falazatát és mindent, amire a pajzsnak szüksége lehet az alagút építéséhez.

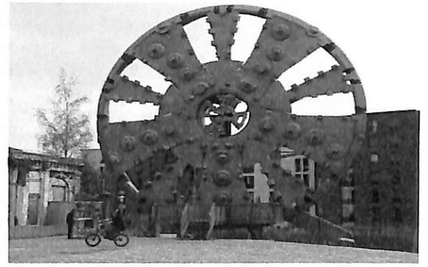
Az alagút építő gépláncoknak újabb és újabb változatai jelentek meg. A pajzsos alagútépítés szinte minden műveletét gépesítették. Egyre speciálisabb gépeket építettek, egyre jobban az adott alagutat körülevő kőzet, illetve talaj tulajdonságaira kínáltak megoldást a pajzsgyártók. Az ily módon megépített specializált gépláncok a hosszabb-rövidebb alagutak biztonságos, gyors, a környezetvédelmi feltételeket kielégítő, kis élőmunka-ráfordítást igénylő, így a nehéz fizikai munkát nagymértékben kiküszöbölő, gazdaságos építést tettek lehetővé.

A pajzsok a fejlesztések és a különböző igényeknek megfelelő kialakítás miatt mindinkább egyedivé váltak. Mégis különböző osztályozási szempontok szerint besorolhatók. Csoportosításukat az eddigiekhez hasonlón a különböző talajtípusokban való alkalmazás alapján célszerű megtenni.

4.1. Kemény kőzetekben alkalmazott pajzsok

A kemény kőzetekben továbbra is alkalmazták a robbantásos módszert, de ezek rovására mindinkább teret hódít az alagútépítő pajzsok alkalmazása.

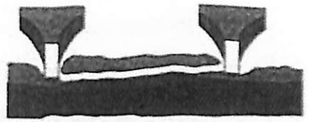
A szilárd kőzetek fejtésére úgynevezett marótárcsás fúrópajzsokat alkalmaznak (4.1. ábra). A marótárcsa, a pajzs homlokfelületének teljes keresztmetszetét lefedi, de a pajzsköpenytől függetlenül működik. A fejtőberendezés fordulatszáma és a hozzá tartozó teljesítmény a kőzet minőségének megfelelően folytonosan vagy legalább lépcsősen változtatható. A marótárcsát több tengelyre szimmetrikusan beépített hidro- vagy villamos motor hajtja. Célszerű, ha a marótárcsa hajtása reverzibilis, azaz tetszőleges irányú fejtést tesz lehetővé. Így a pajzs hossztengely körüli elfordulása a marótárcsa forgási irányának időnkénti változtatásával kiküszöbölhető anélkül, hogy a köpenyen külön elfordulásgátló lapokat kellene alkalmazni. A marótárcsát a különböző keménységű kőzetekhez más és más fejtőszerszámokkal lehet felszerelni. A puha talajokban nyesőkésekkel, ridegebb, keményebb talajokban réselőtüskékkel a szilárd kőzetekben pedig fejtő-görgőkkel. A kopások miatt fontos az élek cserélhetősége. Lényeges, hogy a fejtőtárcsa menet közbeni kisebb átalakítással többféle



4.1. ábra: Marótárcsa

kőzetminőség fejtésére legyen alkalmas, az estlegesen változó talajviszonyok miatt. A lefejtett kőzet a marótárcsa nyílásain keresztül jut a pajzsba.

Szilárd kőzetekben a marótárcsára szerelt nagy szilárdságú acéltárcsás görgőkkel fejtenek. A görgők élénél a nyomófeszültség túllépi a kőzet törőszilárdságát és így kipattannak a kőzetdarabok a homlokfelületből (4.2. ábra). Növelhető a fejthető kőzetszilárdság vagy a fejtési teljesítmény, ha a tárcsás görgőkkel együtt nagynyomású vízsugárral egészítik ki a fejtést.



4.2. ábra: Nagy szilárdságú acéltárcsás görgők szilárd kőzet fejtésére

4.2. Kemény agyagokban alkalmazott pajzsok

A kemény agyagtalajokban szabad, megtámasztás nélküli és a részleges felületű homloktámasztást alkalmazzák. Szabad, megtámasztás nélküli homlok esetén a pajzs homlokfelületén a kezdetben uralkodó nyugalmi földnyomást, - amely a kőzetnek a pajzs belső tere felé való elmozdulása következtében általában csökken, - a kőzet megtámasztás nélkül is el tudja viselni. Ez általában akkor alakul így, ha a pajzs haladási sebessége olyan nagy és a kőzet szilárdsága akkora, hogy az építés ideje alatt a kőzetelmozdulások a rugalmas határon belül maradnak.

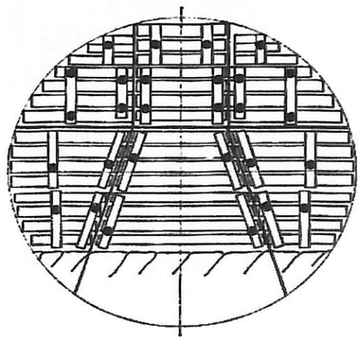
Az ilyen esetben használható nyitotthomlokú pajzsokat is célszerű ellátni olyan berendezésekkel, amelyek lehetővé teszik a homlok ideiglenes biztosítását. így kedvezőtlen kőzetviszonyok esetén sem lesz lehetetlen a pajzsos építés.

Ha a homlok előtti feszültségátrendeződés során a törési határállapot kialakulása, egy meghatározott kőzettömeg fellazulása és a pajzsba való omlása várható, akkor a homlokot legalább a fellazuló kőzettömeg terhelésére méretezett homlokbiztosítással kell megtámasztani.

Ennek típusai:

Hidraulikus sajtókkal támasztott táblás, hézagos vagy zártpallózatú dúcolás. A táblás pallózat a kőzet vízszintes nyomását közvetlenül, vagy kiváltó gerendák közvetítésével adja át a hidraulikus támasztásnak (4.3. ábra). A hidraulikus sajtókban az olajnyomást és így a támasztóerőket biztonsági szelep segítségével a megtámasztás egész ideje alatt és a pajzs előmozdulásakor is állandó értéken tartják. Ezekkel a támasztórendszerekkel kombinálható a kézi földfejtés, valamint a marófejes és a markoló rendszerű gépi földfejtés. Amikor a homlok egy részén fejtés folyik, ott a támasztást megszüntetik.

Homloktámasztásra kiképzett fejtőkeresztes vagy összefüggő felületként kialakított marótárcsás pajzsok, ezeknek a pajzsoknak a fejtőtárcsája a talajt meg is tudja támasztani. A támasztás itt is csak időlegesen működik.



4.3. ábra: Hidraulikus sajtókkal támasztott zártpallózatú dúcolás

4.2.1. Kézifejtéses pajzsok

A kézi fejtés egyre ritkábban fordul elő. Ezt a fejtési módszert nyitotthomlokú, hagyományos vagy késes pajzsoknál használják, különösen akkor, ha a pajzzsal olyan kőzetrétegeket harántolnak, amelyek kéziszerszámokkal könnyen fejthetők, és amelyeknek állékonysága olyan gyenge, hogy a homloktámasztást egyidejűleg csak kisebb részletekben lehet megbontani. Szemcsés talajok kézi fejtését kéziszerszámokkal, kötött, kemény, repedezett kőzetekben fejtőkalapáccsal végzik.

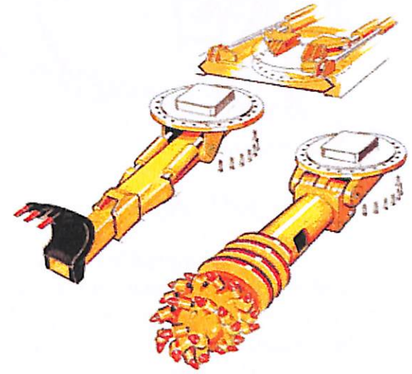
4.2.2. Marógömbös és markoló rendszerű fejtőgépes pajzsok

A föld fejtésének ezt a módját a teljesen vagy részlegesen nyitott homlokú, hagyományos vagy késes köpenyű pajzsoknál alkalmazzák. Késes pajzsoknál a teljesen gépesített kőzetfejtés és rakodás csak ezekkel a géptípusokkal oldható meg. A köpeny szakaszos előremozgatása miatt ugyanis ezekben a pajzsokban nagy fejtőtárcsa nem alkalmazható. A teljesen nyitott homlokú pajzsokban mind a rögzített, mind az önálló alvázra épített fejtőgépes megoldás is előfordul.

Szemcsés talajokban, repedezett szilárd kőzetekben, vetőkkel átjárt, kötött talajokban markoló rendszerű géppel, míg repedésektől mentes kőzettömeg harántolása esetén a kőzet szilárdságának és tapadósságának megfelelően megválasztott marógömbös fejtőrakodó géppel célszerű dolgozni (4.4. ábra).

A markolók hidraulikus működtetésűek. A markolókanalakat a kőzet minőségének (szilárdság, repedezettség, stb.) megfelelő fejtőtüskékkel látják el, és a szükséges nyomó- vagy húzóerőt alkalmazva működtetik. A kanalas fejtés hatékonyságát - különösen repedezett kőzetben - nagyban segítik a kanálra szerelt vibráltatható fejtőtüskék. A rakodást mindig a fejtőkanalak végzik. Rögzített markoló rendszerű gép látható a 4.5. ábrán. A budapesti metróépítésnél alkalmazták kézi fejtéssel kombinálva heterogén és repedezett, kötött és szemcsés talajban.

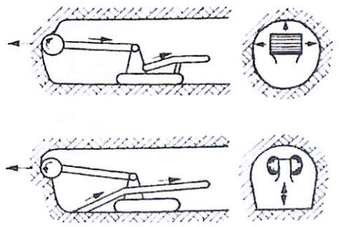
Pajzsos alagútépítésre általában a 4.6. ábrán látható marófejes fejtő-rakodó gépek két típusát építik be. Velük lehet ugyanis aránylag nagy teljesítménnyel a legkönnyebben szabályos alagútszelvényt fejteni.



4.4. ábra: Marógömbös és markoló rendszerű fejtőgép



4.5. ábra: Markoló rendszerű fejtőgép beépítve



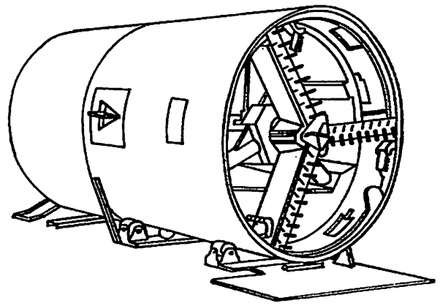
4.6. ábra: Marófejes fejtő-rakodó keskeny munkahengeres és marógömbös típusa

4.2.3. Marótárcsás fejtőberendezések

Kialakítása szerint megkülönböztethető:

- a nyitott-fejtőkeresztes pajzs;
- szinte teljesen zárt, marótárcsás pajzs;

A nyitott fejtőkeresztes pajzsok annyiban különböznek a már ismertetett marótárcsás rendszertől, hogy míg a marótárcsa majdnem az egész felületen összefüggő addig a fejtőkereszt egy 4-6 ágú rúdcsillag. Ezeket ma már nem alkalmazzák, önmagában, a rossz homlokmegtámasztási lehetőségek miatt csak olyan technológiákkal együtt melyeknél a homlokmegtámasztás folyós anyaggal biztosítják. Ilyen például a későbbiekben ismertetett hidropajzs.

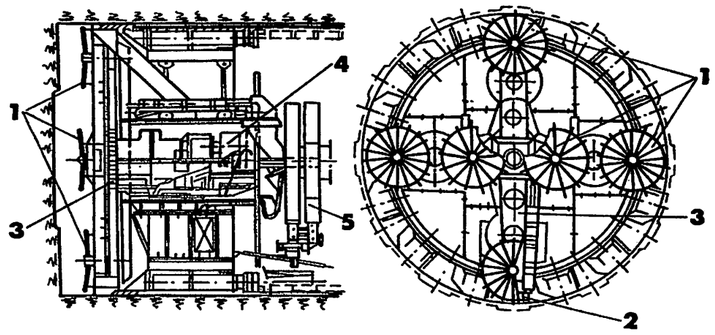


4.7. ábra *Caweld* pajzs

Ilyen a *Calweld* pajzs, (4.7. ábra) amelynél egy függőleges síkban forgó kereszt bontja a talajt. A fejtőkeresztnek 8 ága van. Ezeken vídiával erősített fogak vannak elhelyezve. A fejtőkereszt forgatását az ábrán látható pajzsnál 6 db hidraulikus csillagmotorral hajtott berendezés végzi 7 fordulat/min max. sebességgel. Egy fordulattal kb. 5 mm vastag kőzetréteget távolíthatnak el. A fejtőkeresztet kis hidraulikus sajtókkal a pajzs tengelyére merőleges irányokban el is lehet mozgatni, úgyhogy ívben való haladásnál, vagy irányeltérések esetében a fejtés a megfelelő helyes irányban végezhető.

Az ábrán látható pajzsnál tengelyirányban 1,0 m-rel tolható előre a fejtőkereszt a pajzshoz képest. A pajzs tömege 120 t. Külső átmérője 6,72 m, hossza 5,4 m. Az előremozgatást 24 db 1000 kN erőt kifejtő hidraulikus sajtó végzi.

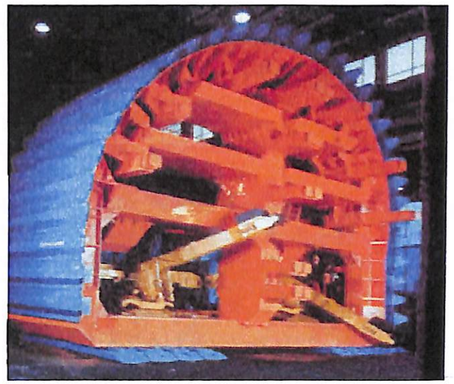
E pajzsoknál mindig úgy kell a fejtőkeresztet kiképezni, hogy előremozgatása külön hidraulikus sajtókkal, a pajzstól függetlenül legyen elvégezhető megfelelő határok között. Így a fejtés a pajzs álló helyzetében végezhető. A fejtés ideje alatt be lehet szerelni a pajzs hátsó részében az újabb falazati gyűrűt. Ide sorolható a Moszkvai és Leningrádi pajzs is. (4.8. ábra) (Ábrahám 1982, Mostkov 1978, epito.bmeeok.hu)



4.8. ábra: Leningrádi gépesített pajzs
(1) bolygókerekek, (2) kopírkés, (3) főfogaskerék, (4) hajtómotor, (5) erektor

4.2.4. A külön mozgatható elemekből álló késes pajzs

A késes pajzs egy különleges pajzsköpeny kialakítású pajzs, mely 1970-es évek találmánya. A 70-es - 90-es évek között alkalmazták széles körben, ma már nem. A monolit beton és monolit vasbeton egy bejáratú alagutak építésére használták (4.9. ábra). A pajzsot a késes építési mód berendezéseiből fejlesztették ki, egyesítve a késes építés és a pajzsos alagútépítés előnyös tulajdonságait. A késes pajzsok köpenye az egymáshoz alkotóirányban elcsúsztathatóan kapcsolt külön-külön hidraulikus sajtókkal előre sajtolható késekből és a késköpenynek a tervezett geometriájú, igénybevételek és alakváltozások szempontjából megfelelő merevségű megtámasztását, ill. előre sajtoláskor a vezetését és a hidraulikus sajtó ellenfalát alkotó keretszerkezetekből áll. A késes pajzsok működése a hagyományosokétól három vonatkozásban tér el:



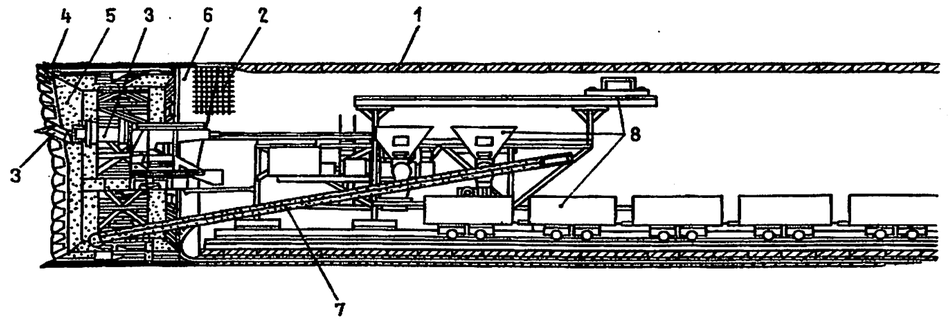
4.9. ábra: Késes pajzs

- 1. A pajzsköpeny késenként sajtolható előre, szemben a hagyományos pajzsokkal, amelyek az egész pajzsköpenyt egyszerre sajtolják előre. Az egyes pajzs-kések vagy késcsoportok a felületein jelentkező, az átlagosnál nagyobb vagy kisebb ellenállások ellenére egyforma előretolódását egy automatika teszi lehetővé. Ez teszi lehetővé az egyszerre sajtolt késekazonos lökethosszú előrehaladását, függetlenül a késenként jelentkező ellenállások értékétől. A késekill. késcsoportok egyidejű előresajtolása 100...800 mm-ig terjed. Minden késen két hidraulikus sajtó van. Az egyik az egyenesben való előrehaladáshoz szükséges sajtolóerőre, a másik az íves hajtás miatti többlet-sajtolóerőre van méretezve.
- 2. A pajzsköpenyt alkotó késeket (eltérően a hagyományos pajzsoktól) nem a már megépült alagút-falazatról, hanem a pajzsot alkotó tartókeretről egyenként vagy csoportosan sajtolják előre. A tartókeret sajtolás közben a talajról a pajzsköpenyre átadódó kőzetnyomás és az éppen mozdulatlan kések felületén keletkező súrlódási ellenállás következtében mozdulatlan marad. Ebből következik, hogy egyidejűleg a köpenyt alkotó késeknek csak legfeljebb 40%-át szabad előre sajtolni, hogy a tartókeret cl ne mozduljon. A pajzskések tehát legalább három köpenyrészletben sajtolhatok előre egy építési hosszal.
- 3. A pajzsköpenyt alkotó késeket és az azt támasztó tartószerkezetet lépésenként egymás után mozgatják előre a kések és a tartószerkezet közé beépített reverzibilis hidraulikus sajtókkal. Ha már minden pajzsköpenykést egy szerelési lépéssel előre sajtoltak, akkor az összes késtoló sajtó egyidejű működtetésével a mozdulatlan késeken előrecsúsztatható a tartókeret. Ezt a mozgást az teszi lehetővé, hogy a kések és a talaj között egy nagyságrenddel nagyobb a súrlódási tényező, mint a kések és a tartókeretek között. A köpenyt alkotó kések a hagyományos pajzshoz hasonlóan vágóélből, törzsrészből és a szerelőteret körülölelő faroklemezből állnak. A vágóél és a törzsrész vastag, erőteljes kiképzésű, kettősfalú szerkezet. A késeknek a szerelőteret biztosító része az utánfutólemez egyben a pajzs farokrésze. Ezek a lemezek a késekhez sok esetben csuklósan

csatlakoznak, és kéttámaszú tartóként egyik végükkel a pajzs tartószerkezetére, másik végükkel a már megépült alagútfalazatra támaszkodnak. E kedvező támaszkodási viszonyok lehetővé teszik, hogy a késeknek ez a része 8...15 mm-es szádpallóhoz hasonló hornyú acéllemezből készüljön. A szerelőteret biztosító lemezek hosszát monolitbeton falazat esetében az egy ütemben betonozandó alagút hossza határozza meg, ez 2...4 m. Lövelltbeton falazat építése esetén a késeknek nincsen szerelőtérbe nyúló részük, csupán a tartókeret köpenylemezének a szerelőtér fölé nyúló lemezére fekszenek fel. A vasszerelést e köpenylemez védelmében végzik, míg a beton lövellése ennek előremozgatása után történik. A lövelltbetont tehát közvetlenül a kőzetre hordják fel.

A késes pajzs lényeges jellemzői (4.10. ábra):

- A pajzs előrenyomatáskor nem támaszkodik a megépült falazatra, így a pajzs mögött helyszíni vízzáró monolitbeton, vasbeton, valamint lövelltbeton falazat építhető.
- A pajzs keresztmetszeti alakja tetszőleges, a köralaktól eltérő is lehet. A köpeny szakaszos előre sajtolása kizárja a hagyományos pajzsok szokásos tengely körüli elfordulását, így a köralaktól eltérő pajzsok befeszülését.
- A vágóél előtt jelentkező esetleges akadályok könnyen felismerhetők, a késekkel körbesajtolva könnyebben - a vágóél sérülési veszélye nélkül - eltávolíthatók.
- Jó a pajzs irányíthatósága.
- A kések egyenként vagy kis csoportokban való előre sajtolása a pajzs előtti talajban nem hoz létre nagy, alkotóirányú nyomófeszültség növekedést, és így nem idézi elő a talaj függőleges irányú emelkedését. Ez a módszer lehetővé teszi kis mélységekben, az épületek alapjaihoz közeli pajzsos építést anélkül, hogy az alapok emelkedése miatt épület- vagy közműkárok keletkeznének. (Ábrahám 1982)



4.10. ábra: Lövellt betonos falazat építése késes pajzzsal
(1) lövellt vasbeton alagútfalazat; (2) acélívvel megtámasztott hegesztett acélháló; (3) rögzített beépítésű fejtőmarkoló, (4) késes pajzs köpeny; (5) késeket támasztó és a fejtőgépet tartó hegesztett acél tartószerkezet; (6) tartószerkezethez hegesztett rögzített pajzsköpeny; (7) földszállító szalag; (8) fejtést és építést kiszolgáló gépek

4.3. Laza és vizes talajok

A 80-es évek végéig gyakorlatilag majdnem ugyan azokat a technológiákat alkalmazták melyeket a kemény agyagokban csak a munkatérben levegőtúlnyomást hoztak létre.

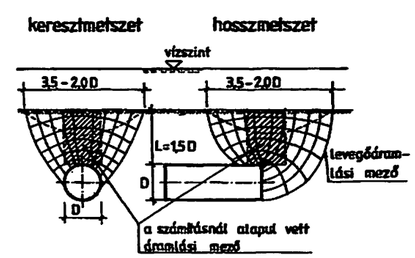
4.3.1. Légnyomás alkalmazása az alagútépítésnél

A levegő túlnyomás csak megfelelő talaj- és talajvízviszonyok esetén alkalmazható. Elsősorban a talajvíz-, illetve a talaj légáteresztő-képessége, az alagút feletti fedőrétegek vastagsága, az alagút méretei, a talajvíz, folyóvíz helyzete, határozza meg a levegő túlnyomás alkalmazásának szükségességét.

Vízáteresztő talajban általában csak akkor lehet alkalmazni, ha a talaj vízáteresztő-képességi tényezője kisebb k < 10-4 m/s-nál. Ennél nagyobb áteresztőképesség esetén, általában csak talajszilárdítás, vagy fagyasztás védelmében lehet levegő túlnyomást használni. Minél kisebb az áteresztő-képesség, annál jobban biztosítani lehet a levegő túlnyomás megtartását a munkatérben.

Az alagútban a levegő túlnyomás általában nincs egyensúlyban a víznyomással. Ennek az az oka, hogy az alagútban, a talp magasságában uralkodó, vagy ahhoz közel fekvő víznyomásnak megfelelő levegő túlnyomást kell bevezetni, hogy a víz beáramlását a munkatérbe meg lehessen akadályozni. Az alagút tetőpontjában emiatt az alagút átmérőjének megfelelő vízmagassággal megegyező kiegyensúlyozatlan nyomás jelentkezik (3.20. ábra).

A talajba bejutó levegő felfelé szorítja a vizet a talajkapillárisokban, így a levegő-víz fázisfelület mozgásba kerül, és egy bizonyos idő után a felszínre ér. A levegőáramlás egyszerű esetben homogén talajban: 4.11. ábra. Az áramlási mező a felszínen 2-3,5 D átmérőjű területen alakul ki. Az áramlás az alagút homlok felett a legerősebb, az áramlási tér széleinél kisebb mértékű.



4.11. ábra: Áramlási mezők

Ha a talaj áteresztőképessége nem túl nagy és a talajfedés elég vastag, stabil áramlás alakul ki. Általában előnyös, ha felül egy durvább szemcsés anyag fekszik, amely az alatta fekvő finomabb szemcsék megbontását megakadályozz. Áramló folyóvízben a víz kiüregelő hatása a talaj megbontását jelentősen megkönnyíti. Ilyen esetben nagyobb biztonságra kell törekedni a fedőrétegnél. A tapasztalatok azt mutatták, hogy a folyófenéken elhelyezett, megfelelően lépcsőzött talaj-szűrőréteggel eredményesen lehet védekezni a nagyobb arányú levegőszökések és tölcsérképződések ellen.

A légnyomásos munkákhoz jól felszerelt kompresszorgépházat kell a felszínen létesíteni. A levegő túlnyomást alacsony nyomású kompresszorokkal (0,5-3,5 bar) biztosítják. A szükséges levegőmennyiséget két követelmény határozza meg:

- egyrészről a légnyomásos térben tartózkodó személyek levegő szükséglete a vonatkozó egészségügyi előírások szerint,
- másrészt a talajon keresztül, továbbá a zsilipeléseknél, csővezetékeknél előálló levegőveszteségek.

Az egészségügyi előírások szerint pl. 0,5 bar túlnyomásnál fejenként és óránként 26,6 m³ friss

levegőt kell a munkatérbe benyomni. Ez a mennyiség 1,0 bar túlnyomásnál 20 m³ /fő/h, 2,0 bar-nál 13,3 m³ /fő/h-ra csökken.

A levegőt tisztítani kell olajleválasztó berendezéssel és porszűrőkkel. Megfelelő nyomáskiegyenlítő légtartályok is szükségesek. A vezetéket két külön vezeték fektetésével kell kiépíteni, hogy az egyik meghibásodása esetén se legyen fennakadás a levegőellátásban. A szükséges személy és anyagzsilipeken kívül, fent, külön gyógyzsilip létesítése is szükséges.

Csak orvosi vizsgálattal ellenőrzött dolgozók mehetnek be a túlnyomásos térbe. A munkaidő különböző országokban eltérően van szabályozva. Általában 1,0 bar túlnyomás felett már csökken a munkaidő 8 óráról 6 órára, 1,8 bar felett 4 órára. A túlnyomás 3,0-3,5 bar-nál nagyobb nem lehet. (epito.bmeeok.hu)

4.4. Omlásra hajlamos vízzel telített homokos, iszapos, agyagos talajréteg

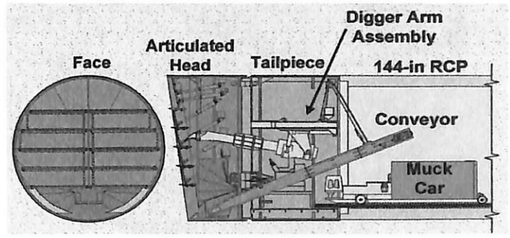
Az aktív homlokmegtámasztást a felszíni süllyedések csökkentése, a szakadások kizárása érdekében alkalmazzák. Ekkor a pajzs minden építési helyzetében teljesül az a feltétel, hogy a támasztásnak a homlokra kifejtett vízszintes irányú nyomása nagyobb vagy egyenlő az ott működő vízszintes földnyomással. Ennek legnagyobb értéke elérheti a nyugalmi nyomást is. Az aktív homloktámasztás lehet mechanikus működésű vagy folyadékkal, bentonitzaggyal talajjal megoldott támasztás, amit a hidropajzsoknál vagy a földmegtámasztásos pajzsoknál alkalmaznak.

4.4.1. Mechanikus aktív homloktámasztás

A homloknak a lejtési felülethez simuló aktív megtámasztását a csoportonként külön-külön működtethető hidraulikus sajtókkal a talajhoz sajtolt homlok részei, és a közöttük levő előretolható támasztólapok adják. E megtámasztás lényege, hogy úgy fejtik a kőzetet, hogy homlok teljes fejtési felületen a kőzethez simul és azt megfelelő erővel megtámasztja. (Ábrahám 1982)

4.4.1./a Osztópados pajzsok

Laza homokos talaj esetén a vágófejbe osztópadot építenek be, a nagyobb méretű talajbehatolás megakadályozására, valamint a homok megtámasztására. A osztópadok távolságát és szélességét a talaj súrlódási szöge határozza meg.



4.12. ábra: Osztópados pajzs

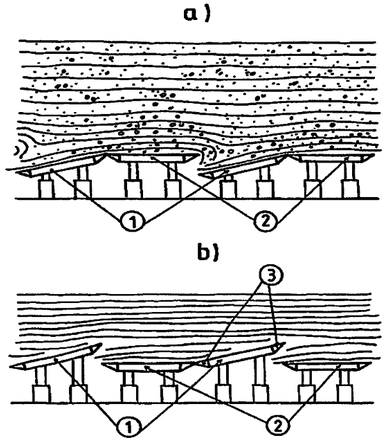
A kitermelt homokot általában elektromos szállítókocsi szállítja el az indítóaknába, s onnan a talajjal telt kocsit kiemelik a felszínre ürítés céljából. A megtelt kocsi emelése közben, azzal párhuzamosan már tudnak indítani egy másik üres kocsit az osztópadokhoz, a folyamatos munkavégzés biztosítása érdekében (4.12. ábra). (www.vbt.bme.hu)

4.4.1./b Bade típusú pajzsok

Ezek a pajzsok állékonynak nem nevezhető, omlásra hajlamos, homogén vagy vegyes rétegeződésű homokos, iszapos, agyagos talajrétegben való alagútépítés-re alkalmasak, különösen kis takarású, sűrűn beépített városi területek alatt. A fejtőtárcsa felülete a talaj minőségétől függően laponként egymástól függetlenül hidraulikus sajtókkal a homloknak feszíthető, és a reverzibilis fejtés érdekében billenthető fejtőlapokból és ki-tolhatóan a homlokhoz feszíthető támasztólapokból van felépítve (4.13. ábra).

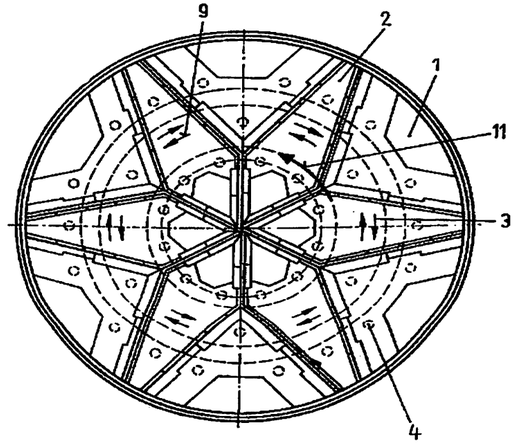
A talajminőségtől függően a fejtő- és támasztólapoknak kétféle beállítása lehetséges. Puha, nem állékony talaj, azaz a teljes felületű aktív támasztás szükségessége esetén, a támasztólapok a fejtési felülettel párhuzamos helyzetűek, a fejtőlapok a forgás irányában süllyedők. Tehát felületeik a forgással egyidejűleg nekifeszülnek a talajnak. A talaj a fejtési felülettel párhuzamos támasztó és az emelkedő fejtőlapok alsó végeinél kialakuló nyílásokon keresztül nyomul a fejtőtárcsa mögé, ahonnan a szállítószalag-rendszerre jut.

Állékony talajban a fejtőlapokat úgy állítják át, hogy a fejtés síkja elé álló késekkel ellátott éleivel tudja fejteni a talajt. A forgás irányába emelkedő lapok alsó éleihez csatlakoznak a fejtés síkjával párhuzamos támasztólapok. Ebben az esetben aktív támasztás nincs. A támasztás mértéke a rögzített borítású fejtőtárcsás pajzsokéhoz hasonló (4.14. ábra). A mechanikus homloktámasztású fejtőtárcsás pajzsoknak a támasztólapokon fellépő nagy súrlódó erők miatt nagy a tárcsa forgatónyomaték-igénye. A forgatónyomaték nagysága nagymértékben függ a talaj minőségétől. Értéke a fordulatszám egyidejű változtatásával 1,2-2,5 MNm értékek között



4.14. ábra: A Bade pajzs marótárcsája különféle helyzetekben

a) laza b) állékony talajban
(1) állítható vágólemezek,
(2) mozgatható támasztólemezek,
(3) vágóél



4.13. ábra: *Bade* pajzs

(1) támasztólapok, (2) fejtőlapok, (3) a fejtőlapok ferde helyzete aktív homloktámasztással, (4) sajtók a fejtő- és a támasztólapok mozgatására, talajhoz feszítésére, (9) a fejtőlapok ferde helyzete állékony talajban (a lejtés irány), (11) a fejtőtárcsa forgási iránya

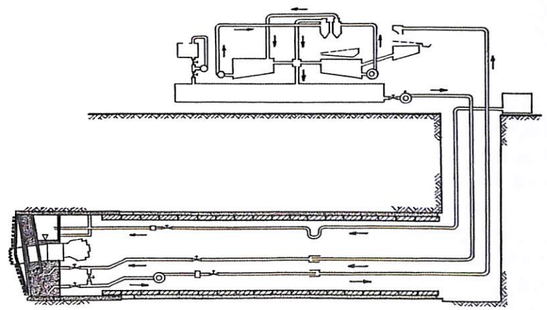
szabályozható. A fordulatszám értéke percenként 5 és 2 közötti. A talajminőséggel összhangban változtatható a fejtőtárcsa előtolási sebessége is. E nagy hajtónyomatékot a dobtengelyre egy kilincsmű közbeiktatásával általában érintőirányban elhelyezett nagy tolóerejű hidraulikus sajtó párok fejtik ki.

4.4.2. Hidropajzsok

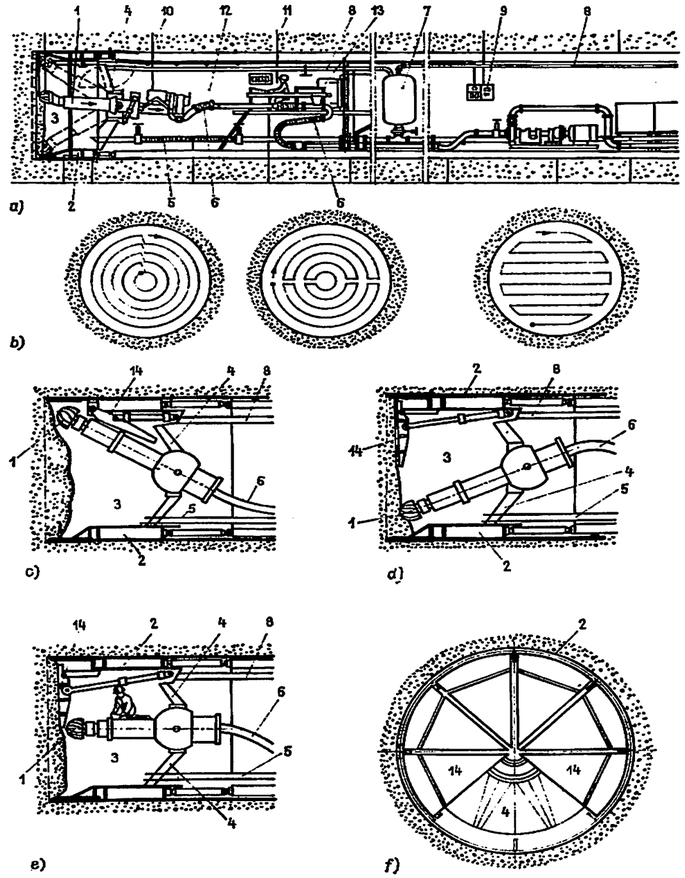
A bentonitnak mint folyékony dúcolóanyagnak a használata már régóta ismert (résfalak, bentonitos aknasüllyesztés). A hidropajzs elvét már 1874-ben ismerték, Jhon Bartlett szabadalmaztatta Mott Hay és Andersen segítségével. A pajzshomlok bentonitos megtámasztásának az üzemi követelményeket kellő biztonsággal kielégítő megoldása sok elméleti és kísérleti kutatómunka után a Robert Price 1971-ben építette meg (4.15. ábra). A pajzshomlokon kialakított zárt térben olyan összetételű, tixotróp tulajdonságú bentonitzagyot helyeznek el, amelynek statikus és dinamikus nyírószilárdsága meg tudja akadályozni a talajszemcsék kipergését. Másrészt olyan nyomása van, amely a pajzsos építés minden fázisában - fejtés, nyomatás, anyagkiszállítás, falazatépítés, fejtés közbeni akadályok eltávolítása, a fejtőberendezés esetleges javítása - a homlokon működő föld- és víznyomásnál, tehát a vízszintes teljes nyomásnál (a semleges és a hatékony feszültség összegénél) nagyobb, vagy azzal egyenértékű. A bentonitzagyos homloktámasztással működő hidropajzsok a kőzetet a teljes homlokfelületet egyszerre fejtő fejtőkereszttel vagy rögzített beépítésű marógömbös fejtőgéppel fejtik. (4.17. ábra) E kőzetfejtési módokat részletesen a fejtőtárcsás pajzsoknál, ill. a marógömbös pajzsoknál ismertem. A zagy két alapvető tulajdonságának a dinamikus nyírószilárdságnak és a zagynyomásnak a meglétét egy teljes regeneráló és nyomásszabályozó berendezés segíti elő. Ez látható a 4.16. ábrán. A bentonitzagy dinamikus és statikus nyírószilárdságát és így szemcsemegtámasztó képességét a homlokról lefejtett és vízzel telített talaj csökkenti.



4.15. ábra: 1985-ben alkalmazott hidropajzs Hamburgban



4.16. ábra: Hidropajzs egy teljes regeneráló és nyomásszabályzó berendezéssel



4.17 .ábra. Marógömbös bentonitpajzs az elemelhelyező és injektálóegyseg feltüntetése nélkül a) távvezérelt mozgásában a fejtési vázlatok szerint programozható marógömbös fejtőkar, tengelyében talajjal keveredett bentonitzagy elszívó vezetékkel; b) programozható homlokfejtési változatok; c) üzemszerű talajtámasztás, fejtés és szállítás; d) mechanikus homloktámasztó elhelyezése a bentonitzagyban; e) részleges zagyeltávolítás a fejtőkar karbantartásához ;f) a megközelítésre teljesen szabaddá tett zagytér homloktámasztása; (1) távvezérelt mozgásában a fejtési vázlatok szerint programozható marógömbös fejtőkar tengelyében talajjal keveredett bentonitzagy elszívó vezetékkel; (2) pajzsköpeny; (3) bentonit zagytér; (4) a zagytér támasztóelemei; (5) zagybevezető cső; (6) talajjal kevert zagyot elszállító rendszer; (7) nyomáskiegyenlítő légpárna; (8) sűrítettlevegő-vezeték a bentonitzagy kiszorítására és nyomáskiegyenlítésre; (9) a bentonitzagy nyomását szabályozó berendezés; (10) fejtőgép hajtása; (11) központi vezérlőegység; (12) szükség esetén túlnyomás alá helyezhető tér; (13) személyzsilip és szakaszolófal az esetlegesen túlnyomás alá helyezett tér megközelítésére; (14) mechanikus homloktámasztó lapok.

A zagyot regeneráló berendezést a felszínen helyezik el. A felszínre érkező, talajjal kevert zagy vibrorostára kerül, amely leválasztja a durva szemcséket. A már csak finomabb szemcséket tartalmazó zagyból a talajrészeket egy- vagy kétlépcsős, megfelelően méretezett hidrociklonnal választják le. A leválasztó képesség 0,025...0,06 mm szemcseátmérő körüli, azaz a D S0,02...0,06 mm-es talajszemcséket választja le a berendezés. A már megtisztított zagy homogenizáló tartályba kerül, ahol a bentonitkeverőből érkező, megfelelő összetételű és mennyiségű bentonitzaggyal kiegészítik és felfrissítik. A zagyveszteség így 2%-nál kisebb, és a leválasztott talajban bentonitszennyeződés szemmel nem látható.

A pajzs fejtőterében levő zagy nyomását állandó szinten tartani csak a zárt térbe be- és onnan kilépő zagy mennyiségének szabályozásával, ill. a zagy nyomásának stabilizálásával, automatával szabályozott túlnyomásos légpárna segítségével lehet. A szállítóvezetékbe automatikus nyomásjelző és reteszelő berendezéseket építenek a dugulásokból származó nyomásnövekedések jelzésére és az ebből származó csőtörések megakadályozására. Ha a talajjal kevert zagyot szállító csőrendszer átmérője nagyobb, mint 300 mm és ha a szállított talajszemcsék átmérője kisebb, mint 80 mm, akkor a tapasztalat szerint dugulás már nem következik be, és így a villamos nyomásjelző berendezés és a reteszelő automatika elhagyható. Ennél nagyobb kőzetdarabokat a zagytérben a kivezető vezeték elé elhelyezett rögzített rosta választja le. A rosta előtt kialakított térben összegyűlő kőzetet a kőzet minőségétől függően 4-8 m-es alagútszakasz megépítése után a zagytérből kézzel távolították el. A fejtőtérben összegyűlt kőzet eltávolításához vagy a fejtőtérben szükséges javítás, karbantartás idejére a fejtőtérből a bentonitot a légpárna segítségével fokozatosan kiszorítják, és ekkor a homlokot a bentonittal átitatott és így vízzáróvá tett kőzetrétegre ható levegőtúlnyomás támasztja meg. Durvaszemcsés kőzetekben a bentonitfilmet a levegőtúlnyomás megszakíthatja, és ilyenkor a talaj megtámasztás nélkül marad. Az ezekből származó esetleges omlások elkerülésére a marógömbös fejtéssel kombinált pajzsoknál, ahol erre megvan a lehetőség, a bentonitzagy levegővel való lecserélése előtt a homlokot mechanikusan megtámasztják, így a sűrített levegő kiszorítja a vizet, a mechanikus támasztás pedig a kőzetet támasztja meg. (Ábrahám 1982)

4.4.3. Jet pajzsok

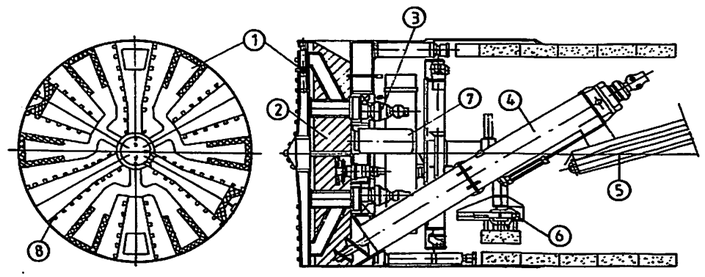
A zárt pajzsoknál alkalmazott iszap-bebocsátással végzett földfejtés gazdaságosságát igyekezett mesterséges eszközökkel biztosítani *Makovszkij*, aki zárt homlokfalon átvezetett vízágyúkkal tette mesterségesen folyóssá a homlokfal előtti iszap és homoktalajokat. A zagynak alsó bebocsátó nyílásokon való beengedése mellett végezte a pajzs előretolását. A vízágyúval végzett és a zárt homlokfalon kívül nem is ellenőrizhető földfejtés azonban olyan váratlan roskadás szerű főteomlásokat idézhetett elő, és annyira megnövelhette az alagútgyűrűre ható nyomásokat, valamint a felszíni süllyedéseket, hogy ez az eljárás nem tudott a gyakorlatban meghonosodni (4.18. ábra). (Széchy 1961)



4.18. ábra: Jet pajzs

4.4.4. A földnyomásos pajzsok

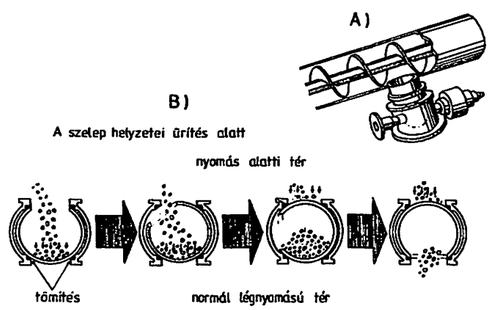
1974-ben Japánban fejlesztették ki ezt a technológiát. Az aktív homlok-megtámasztású pajzsok közé sorolható. Ezeknél a pajzsoknál a fejtett talaj biztosítja a homlok megtámasztását. Az alapelve abban áll, hogy a teljes szelvényben mechanikusan fejtő tárcsa mögött egy acél válaszfallal lezárt munkateret, munkakamrát alakítanak ki, amely állandóan meg van töltve a kitermelt talajjal. Az itt összegyűlt talajt egy archimedesi csavarorsós emelő-berendezéssel szállítják el úgy, hogy a kamrából mindig csak annyi anyagot távolítanak el, amennyi a fejtés előrehaladásának megfelel. Így a munkakamra állandóan tele van kitermelt talajjal és ez biztosítja a homlok megtámasztását. A pajzs előrenyomását úgy szabályozzák be, hogy azzal összhangban történjék a csavarorsós szállítóberendezéssel az anyag elszállítása (4.19. ábra). Agyagos, iszapos, kötött homoktalajokban használják.



4.19. ábra: Földnyomásos pajzs.
(1) fejtőtárcsa, (2) zárt munkakamra, (3) meghajtó berendezés, (4) csavarorsós talaj szállító, (5) szállítószalag, (6) erektor, (7) légzsilip, (8) bontótüskék

A homloknyomást a kitermelt talajjal egyensúlyozó pajzsoknak több típusa is kialakult. Ha a munkakamrában fellépő súrlódási erők túl nagyok, ami pl. homoktalajoknál a nagy belső súrlódás miatt állhat elő, úgy agyag- vagy bentonit szuszpenziót besajtolva teszik plasztikusabbá a kitermelt talajt. Olyan megoldás is van, ahol vizet adagolnak a munkakamrába, és ezzel teszik folyósabbá a talajt.

A csavarorsós szállító kiürítő nyílásánál elsősorban jelentős talajvíznyomás esetén, egy gömbszelepes forgó záró berendezést alkalmaznak, amelyet egy automatikus szerkezet működtet. A 4.20. ábrán látható működési elvének sematikus rajza. A munkakamrában lévő nagyobb nyomású térből kiömlő anyag egy gömbszelep 180°-os elfordulása után jut ki a normál légnyomású térbe. Ez a szelep biztosítja, hogy a nagy nyomású tér ne kerüljön közvetlen összeköttetésbe a szabad levegővel.



4.20. ábra: A) Gömbszelepes kiürítő nyílás, B) a forgó ürítőnyílás működési elve

A csavarorsó szállító sebességét és az ürítés mértékét úgy kell beszabályozni, hogy összhangban legyen a fejtéssel. Munka közben mérik a munkakamrában a földnyomás nagyságát és a marótárcsa forgatónyomatékát. Ha a nyomás nagyobb a próbaszakaszon kikísérletezett optimális értéknél, akkor növelni kell a szállító sebességét, ha a nyomás kisebb, akkor

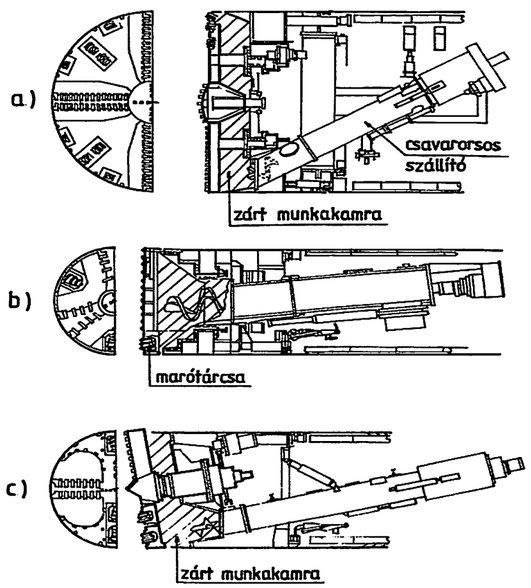
csökkenteni.

A marótárcsa megtámasztása történhet (4.21. ábra):

- a kerületen, illetve annak közelében,
- a pajzs központjában,
- a dob rendszerű tárcsa kerületén.

Nagyobb pajzsoknál a kerületen elhelyezett, illetve a központ és a kerület közbenső részén fekvő támasztás az előnyösebb, mert könnyebb a tárcsa forgatása. E megoldásnál alul helyezik el a csavarorsós szállítót. A központos támasztást kis átmérők esetében használják. A dob alakú marótárcsák esetében középen helyezik el a szállítóberendezést. E megoldásnál nagy átmérőjű csavarorsós berendezés alkalmazható.

A fejtőtárcsát, ennél a típusnál lényegesen nagyobb forgatónyomatékkal kell működtetni, mint a bentonitzaggyal dolgozó pajzsoknál. Olyan esetekben, amikor a kibontott talaj nem elég plasztikus, agyag- és bentonitzagyot nyomnak a munkakamrába, és ezt egyes esetekben lapátos keverővel erőteljesen összekeverik a kitermelt talajjal, így egy plasztikusabb anyagot kapnak, ami kisebb ellenállást okoz a marótárcsának.



4.21. ábra. Különböző maró tárcsa megtámasztások.
a) a kerülethez közeli, b) dobrendszerű, c) központi támasztású marótárcsa

A keverő-berendezés gyakran a fejtőtárcsa tengelyére van felszerelve, így annak forgatása egyben a keverést is végzi. Nagy átmérők esetében külön meghajtott keverő szükséges. Esetenként akár 16 db keverőlapát van beépítve.

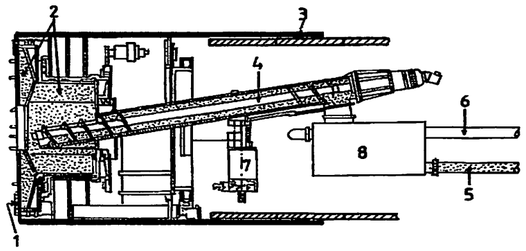
Ha a túl nagy ellenállást adó kitermelt anyag megfelelő összetételű, elegendő csak vizet adagolni a munkakamrába. A vizet a csavarorsós szállító nyílásához kapcsolt tartályba vezetik. A megfelelő víznyomás segítségével a víz bekerül a munkakamrába is, és így a bent lévő talajjal együtt stabilizálja a homloknál a víz- és földnyomást. Növeli az anyag plasztikusságát és könnyebbé teszi a talaj szállítását. Az anyag elszállítását ebben az esetben zárt csővezetéken végzik, további vizet adagolva a munkakamrából kiszállított anyaghoz (4.22. ábra).

A zárt földnyomásos pajzsoknál, a talaj folyósabbá tételére alkalmazott bentonit-, vagy agyag szuszpenzió adagolásánál, különösen változó talajrétegek esetén a következő kedvezőtlen jelenségek léphetnek fel:

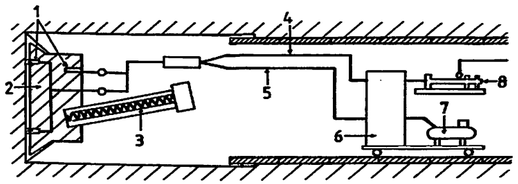
- az agyag hozzátapad a pajzs vágóéléhez, a fejtőberendezésekhez és ezzel megnehezíti a pajzs előrenyomását és a fejtést
- a folyós bentonitzaggyal kevert talaj elszállítása, kezelése nehézkes és költséges

- a szuszpenzió összetételét változó talajrétegek esetén nem lehet megfelelően beállítani.

Ezeket a hátrányokat küszöböli ki a habinjektálásos eljárás. Lényege az, hogy nyomás alatt egy hab képző oldatot sajtolnak be sűrített levegővel keverve a munkakamrába. A hab megakadályozza az agyag tapadását a gépi berendezésekhez, csökkenti a vízáteresztő képességet, növeli a viszkozitást és egyenletes plasztikusságot ad a kitermelt talajnak. A haboldatot a talaj minőségéhez igazodva állítják össze. Általában 3% habreagenst kevernek a vízbe és ezt az oldatot sűrített levegővel keverve nyomják be a talajjal telített munkakamrába. A csavaros szállítóberendezésből kikerülő talajban a hab rövid időn, pár napon belül szétesik és a talaj visszaáll eredeti állapotába. Egyes esetekben azonban szükség lehet külön habtalanító reagens alkalmazására is, hogy a talaj visszanyerje eredeti állapotát. A megfelelő berendezésekkel felszerelt pajzs vázlata a 4.22. ábrán látható. A japánok, ezt a módszert szívesebben használják a bentonittal dolgozó hidropajzs helyett. Elsősorban azért, mert itt nem kell a bentonitzagy kezelésével foglalkozni. Az ehhez szükséges vibrorosták, hidrociklonok, stb. elmaradnak, így a munkahely berendezése egyszerűbb.



a)



4.22. ábra: anyag elszállítását csővezetéken
a) Vízadagolású pajzs, (1) fejtőkereszt, (2) a fejtőkereszt bordái, (3) faroktömítés, (4) csavarorsós szállító, (5) iszapszállító cső, (6) vízbetáplálás, (7) erektor, (8) keverőtartály;
b) Habinjektálásos pajzs, (1) habinjektáló cső, (2) talajjal töltött kamra, (3) csavarorsós szállító, (4) haboldat vezeték, (5) levegő vezeték, (6) légtartály, (7) kompresszor, (8) haboldat injektáló

A pajzs, illetve a marótárcsa mozgatása azonban lényegesen nehezebb, és a pajzs berendezései bonyolultabbak. Olyan megoldást is alkalmaztak, ahol sűrített levegőt nyomtak be a talajjal töltött munkakamrába, légzáróan kiképezve a szállítóberendezés csatlakozásait, így levegőtúlnyomással érik el a vízkiszorítást. (Petrasovics, Fazakas, Kovácsházy 1992)

5. Napjaink pajzsa

A jelenkori pajzsok óriási fejlődésen mentek keresztül. A 10 cm átmérőtől a 15,4 méteres átmérőig gyártanak pajzsokat (5.1. és 5.2. ábra). Napjaink pajzsának fejlődését a hidropajzs megjelenésétől számítjuk. Hamar rájöttek, hogy az ehhez hasonló pajzsok könnyen tehetők teljesen automatizálttá, illetve a gépesítés következtében a munkateret és ezáltal a túlnyomást a homlokra lehet korlátozni.



5.1. ábra: Az eddig épített legnagyobb pajzs, átmérője: 15,42 méter

Az 15-20 évvel ez előtti időszakokban, a kedvezőtlen talajviszonyok miatt, az alagútépítés teljes folyamata túlnyomás alatt zajlott. Így nem csak a kifejtett anyagot, hanem a beépítendő falazati elemeket és minden más anyagot is a zsilipen keresztül kellett beszállítani. Az alagútépítők is csak zsilipen keresztül tudták a munkaterületet megközelíteni és elhagyni. Ez időigényes volt, és a munkatérben is csak meghatározott ideig tartózkodhattak. Ilyen körülmények között a napi átlagos teljesítmény eléggé alacsony volt, a mai pajzsokhoz képest. Mivel nagy volt a túlnyomás alatti terület, nehezebben tudtak alkalmazkodni a talaj fizikai jellemzőinek, és a beáramló talajvíz mennyiségének hirtelen változása esetén. A nyomás alatti tér méretének lecsökkenésével a földnyomás és a víznyomás változására nagyon gyorsan reagálnak az új rendszerek. Nagyon fontos szempont, hogy a keszon egészségre ártalmas és veszélyes hatásait is megszüntették.

A másik nagy előnye a mai gépláncoknak a teljes automatizáltság. Ezzel nem csak a nehéz fizikai munkát szüntették meg, hanem a lent tartózkodó munkások számát csökkentették minimálisra. Ez azért fontos, mert, ugyan a fejlődés során egyre kevésbé, de még mindig veszélyes üzemnek számít az alagútépítés.



5.2. ábra: Kis átmérőjű mikro pajzs

Az utóbbi években számtalan pajzsgépészeti és vezérlés-elektronikai újdonság, és geofizikai megfigyelő rendszer került beépítésre és felhasználásra a laza kőzetekben, talajokban épülő alagutaknál alkalmazott pajzsokba. A technika legújabb állása szerint készített pajzsok megfelelnek a mai szigorú biztonsági,

környezetvédelmi, gazdasági követelményeknek, amit az utóbbi évek sikeres, különleges körülmények között végzett nagy alagútépítései a gyakorlatban igazoltak.

A ma gyártott korszerű pajzsoknak, gyakorlatilag minden hajtás közben előforduló probléma kezelésére alkalmasnak kell lenni. Ez lehetséges, mint ahogy azt a nemzetközi gyakorlatban a tengerek alatt nagy mélységben, folyók alatt, víztároló kőzetekben és az Alpok alatti nagynyomású karsztvizeken keresztül, sűrűn lakott területeken minden kőzetfajtában és a legkülönbözőbb átmérővel hajtott alagútépítések igazolják.

A pajzsoknak speciális, különleges helyi követelményeknek kell megfelelni minden egyes munkánál. A vállalkozón keresztül kerülnek érvényesítésre a geológiai és hidrogeológiai adottságoknak megfelelő, szigorúan megfogalmazott, műszaki specifikációk. Ennek következtében mára oda jutottunk, hogy a megadott feltételek teljesítéséhez minden egyes feladatra külön megtervezett, speciálisan kialakított pajzsokat építenek. Az alagút megépítése után kivételes esetekben tudják újra felhasználni a pajzsokat egy másik alagút építéséhez. Ha mégis, akkor olyan komoly átalakításokat kell végezni, hogy gyakorlatilag egy másik pajzsot építenek belőle, amely már csak nyomokban hasonlít az eredetire.

Az alagutakat általában különböző fizikai tulajdonságú talajokban kell építeni. Emiatt fejlesztették ki a különböző pajzsgyártók a pajzs felhasználó kivitelező vállalatokkal közösen a többcélú pajzsokat. A fejlesztés nem állt meg. Minden egyes esetben felmerülő új probléma megoldására kifejlesztett technológia a következő pajzsba beépül, illetve figyelembe veszik a megszerzett tapasztalatokat.

Ezeket a többcélú pajzsokat átalakítás nélkül pl.: nyitott homlokúról zárt homlokmegtámasztású üzemmódra úgy lehet átállítani, hogy a pajzsot közben nem kell kiemelni az alagútból. A zárt homlokmegtámasztás, és a speciális pajzskonstrukció biztosíték arra, hogy sem kőzetbetörés, sem nagymennyiségű, bármilyen eredetű víz nem áraszthatja el a pajzsot, illetve a megépült alagutat.

Ezek a pajzsok mára nehezen csoportosíthatók az eddig használt módszerrel. Ennek az az oka, hogy a pajzsot a tervezett alagút teljes hosszán előforduló összes talajtípus leküzdésére alakítják ki. Az esetek többségében a vonalvezetés teljes hosszán váltózó talajviszonyok állnak elő, akár szélsőséges különbségekkel. Ennek eredményeképpen olyan gépeket építenek, amelyek alkalmazkodni tudnak a talaj fizikai jellemzőinek változásaihoz és egyszerre több fejtési móddal is képesek üzemelni. Az 50-es és 90-es évek között használt pajzsrendszerek közül már keveset alkalmaznak. Ha mégis, akkor kombinálva az újabb technológiákkal, vagy teljesen modernizálva. Mára két fő típus teljesen felváltotta a régi változatokat és csak ritkán alkalmaznak egyéb technológiát. Az EPB (földmegtámasztásos), illetve az újgenerációs hidropajzsok. Ezen típusok azokban a típusú talajokban alkalmazhatóak, melyeknél a legelőnyösebb a pajzsos alagútépítési technológia. A pajzsok többfunkciósak, könnyen alkalmazhatók különböző fajta talajokhoz is. A legújabb technológia, mely a két fő pajzstípust egybeolvasztja, a kombinált pajzs, melyet részletesen bemutatok. A különböző típusokat többféle szempont alapján érdemes osztályozni.

Méretük alapján két részre oszthatjuk:

- Mikro 0,1 – 4,2 m átmérő között (5.1. ábra)
- Normál, vagy nagyszelvényű alagút 4,2 m átmérő felett (5.2.ábra)

Az alagút méretét leginkább az alagút funkciója befolyásolja. A kis pajzsok is ugyanazon az elven működnek, mint nagyobb társaik. A méretükön kívül az előrehaladásukban van főbb különbség. A normál méretű pajzsoknál a pajzsköpeny védelmében építik az alagutat és erről tolja előre magát a pajzs. A mikro pajzsokat az indítóaknából sajtolják előre a falazattal együtt.

A másik osztályozási lehetőség a homlok megtámasztás módja. Ez az alkalmazott technológiától függ, amelyet legfőképpen a talaj és a talajvíz viszonyok befolyásolnak.

Megtámasztás alapján a pajzsok lehetnek:

- Nyitott homlokúak, (megtámasztás nélküliek)
- Zárt homlokmegtámasztásúak:
  - Passzív homlokmegtámasztásúak
  - Aktív homlokmegtámasztásúak

5.1. Mikro pajzs

Elsősorban közművek, azon belül is főként csatornaépítésnél és közmű alagutak építésére használják. A mikro-pajzsokat 10 cm-től 400-420 cm átmérőig alkalmazzák. Olyan helyen alkalmazzák, ahol sűrű közműhálózat van, valamint nagy a felszíni forgalom és egyéb felszíni kötöttséggel is számolni kell. A földalatti műtárgyak építése a felszín kismértékű zavarásával megoldható. A technológiai berendezések egy nagyobb járdaszigeten is elférnek (5.3. ábra).



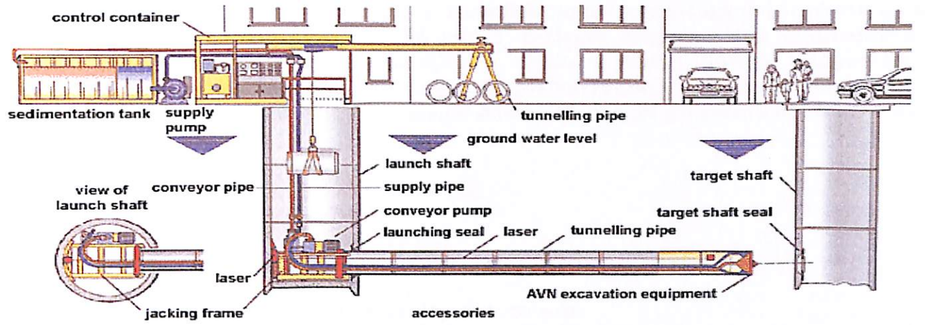
5.3. ábra: Forgalom az építkezés mellett

A mikro pajzs működése hasonló nagy testvéreihez. A legnagyobb különbség, hogy a sajtoló (előretoló) szerkezet minden esetben az indító aknában helyezkedik el, és nem a pajzsban (5.4. ábra).

Előnyei:

- A hagyományos építési módokkal szemben, nem kell felbontani az útpályát teljes hosszban. Kiegészítő létesítményei kis helyen elférnek, nem akadályozzák a forgalmat.
- Nagyfokú az automatizáltságuk, így kis létszámú kiszolgáló személyzettel működnek.
- A környezetvédelmi és biztonsági előírásoknak megfelel.
- Gyorsabban el lehet végezni vele a feladatot a felszíni bontásos módszerhez képest.
- Nem kell külön dúcolatot építeni.
- Nem kell foglalkozni a víztelenítéssel.

Az építési hossz pajzstól függően átlagosan 150 méter körül van. Egyes típusok és a talaj függvényében ez a hossz változik. Léteznek persze már olyan típusok, melyekkel akár több kilométert is képesek elkészíteni egy indító aknából. Ez úgy lehetséges, hogy nem csak az indító aknából sajtolják előre a szerkezetet. Külön sajtoló szerkezeteket helyeznek be az elemek közé, melyek később az építkezés befejeztével bent maradnak és a csatorna részeként szolgálnak. Például Rio de Janeiro-ban a tenger alatt 1,4 kilométert, de Szegeden is több száz méter hosszú csatornát építettek mikro pajzzsal egy indító aknából.



5.4. ábra: Pajzsos építés keresztmetszete

Ezek a berendezések, természetesen, nem kizárólag csatornák építésére alkalmasak. Az igények nem csak az új csatornák létesítésére, hanem a régi elavult csatornák felújítására is nagyon jelentősek. Erre a feladatra is fejlesztettek pajzsokat. Ennek működése nem tér el az előzőekben bemutatottaktól. Különbség az irányításában van. Míg az előzőek a lézer által meghatározott irányt követték, addig ezek, az előttük lévő létező csatornához igazítják magukat. A maró tárcsa a meglévő vezetékben, az érzékelő egységet maga előtt tolja (5.5. ábra). Az érzékelő csak a cső tengely irányában tud haladni, a vezérlés ezt az irányt követi. A pajzs a régi vezetéket szétzúzza, és a helyére egy teljesen újat készít.

Egyre többször jutnak szerephez városi környezetben épített új, nagy átmérőjű gyűjtőcsatornák építésénél, valamint régi csatornák kapacitás bővítésénél. A pajzsos építési módnak nagy hátránya, hogy a berendezés drága, ugyan többször is felhasználható, de egy pajzzsal csak egy adott átmérőt lehet készíteni és azt sem bármilyen talajban. Így egy adott pajzsnak korlátozott az alkalmazhatósága. Gyakran a fúróberendezések megtérülése nehezen kimutatható, illetve hosszú ideig tarthat. Nagyberuházás esetén kisebb probléma, de kis beruházások esetén ez komoly gondot okoz. Ezen a problémán nagyban segít a pajzsok bérbeadása a gyártók részéről. Így az egyes munkák után a bérbeadó elvégzi a szükséges karbantartási és felújítási munkákat a pajzson.

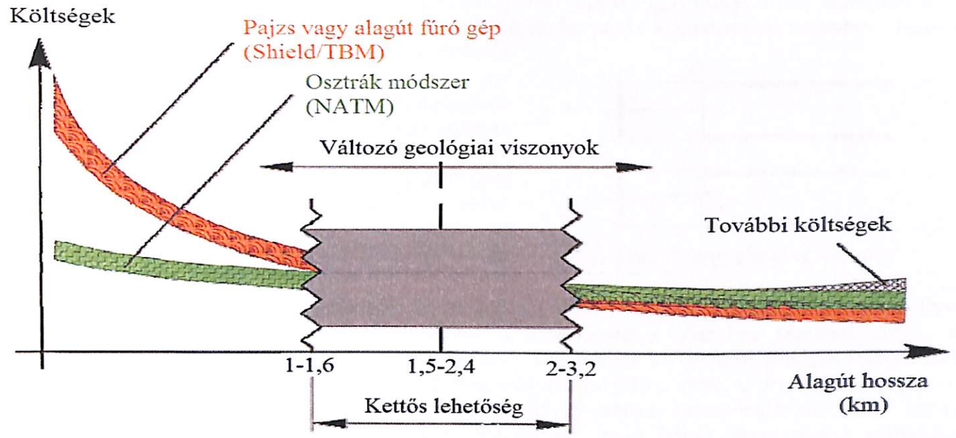


5.5. ábra: Érzékelő egység

5.2. Nyitott homlokmegtámasztás

Nyitott homlokmegtámasztásról akkor beszélünk, ha a fejtés közben nincs, vagy csak részletekben van megtámasztva a talaj. Kemény kőzetek esetén előfordul, hogy nincs szükség megtámasztásra a fejtés után közvetlen, csak egy bizonyos idő múlva. Ha olyan szilárd a kőzet, hogy nincs szükség ideiglenes, vagy végleges megtámasztásra, akkor ritkán alkalmazzák az alagútfúró gépeket. Az alagútfúró gépek alkalmazása és a pajzsos módszer csak hosszú alagutak esetén gazdaságos ilyen kőzetekben, így inkább NATM módszert alkalmaznak. A múlt században nagyrészt más módszerekkel épült az ilyen alagutak többsége. Ezekből fejlődött ki az NATM (1.2.2 Új osztrák módszer). Ma már a kevésbé

állékony kőzetekben is alkalmazzák ezt a technikát segéd eljárásokkal kiegészítve. Így általában nem teljes keresztmetszetben fejtenek és részleges megtámasztást is alkalmaztak, vagy egy táró nyitásával előre stabilizálják a főtét. Gyakran levegő túlnyomást is alkalmaznak a talajvíz távoltartására és bizonyos talajokban részleges homlokstabilizálásra is. Az építési mód kiválasztása itt is függ az alagút hosszától, melyet jól szemléltet a következő 5.1. grafikon.



5.1. grafikon: Technológiák megtérülése az alagút hosszának függvényében

Mindkét technológiával kapcsolatban lehet felhozni érveket és ellenérveket egyaránt. Mérlegelve ezeket lehet eldönteni mikor melyik előnyösebb kettős lehetőség esetén. Az NATM mellett szól:

- Geometriai rugalmasság
- Geológiai rugalmasság
- Alacsonyabb laborköltség

A Pajzs és alagútfúró gép mellet szól:

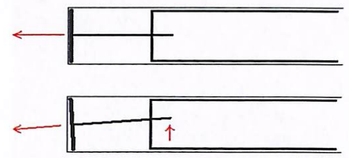
- Állandó jó minőség
- Biztonság
- Csökkenti az élőmunka igényt

5.2.1. TBM (tunnel boring machine) - alagútfúró gépek

A szilárd kőzetekben épülő alagutak esetében általában nincs szükség a homlokfal és az üreg megtámasztására, az alagútfúró gép feladata a fejtés. A klasszikus értelmezés a TBM-et, az elsősorban a fejtéshez konstruált alagútfúró gépet megkülönbözteti a pajzstól, melyet inkább a megtámasztás céljából találtak ki. A gyakorlatban viszont elmosódóban van a „pajzs" és a „TBM" közötti különbség. Az alagútfúró gépek nagyban hasonlítanak a pajzshoz még kinézetre is. Mindkettőre általában igaz, hogy keresztmetszetük kör alakú és a fejtésre marótárcsát alkalmaznak. Óriási, teljesen automatizált géplánc, melynek elhaladtával az alagút már kész falazattal rendelkezik, de nem minden esetben. A legfőbb különbség, hogy az alagútfúró gépeken hiányzik a pajzsköpeny, mivel nincs szükség biztosításra. Ezeknél a

gépeknél inkább egy teljes keresztmetszetben fejtő gépről beszélünk, amely több fajta falazatot is képes építeni. Míg a pajzsnál az előregyártott elemekből tübbingekből építik az alagút falazatát, itt akár a NATM-hez hasonlóan lőtt betonos falazatot is építhetnek. De előfordul olyan is, hogy nem is készül falazat pl. a sziklában. Ma a legismertebb ilyen típusú gépek az 51 km hosszú Gotthard alagutaknál is alkalmazott Gripperek.

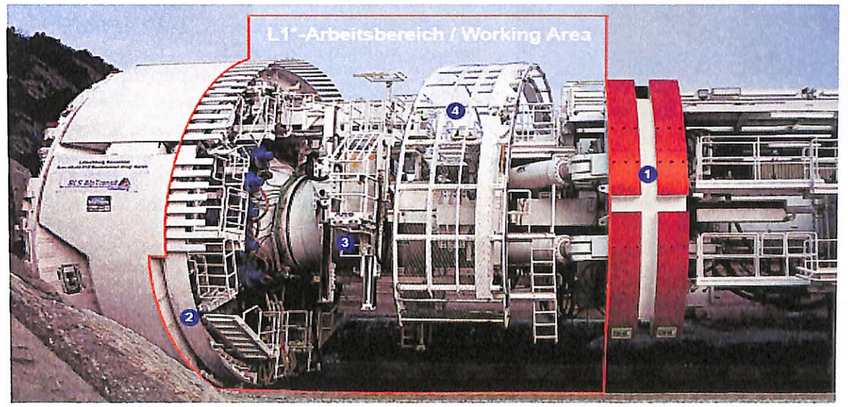
A módszer egészen új, de csak nagy szilárdságú, biztosítás nélkül önmagában is megálló kőzetekben lehet alkalmazni. A fejtést marótárcsával végzik ugyanúgy, mint társainál és a kiszolgáló géplánc is hasonló. A típus legfőbb különbsége a fix köpenyessel szemben, hogy a pajzsnak gyakorlatilag nincs a teljes hosszban és keresztmetszetben pajzsköpenye, és az előrehaladását nem az elkészült alagút falazatáról biztosítja, hanem oldalfalra kitámasztó hidraulikus tappancsal.



5.6. ábra: Irányítás elvi vázlata

A gép minimum két részből áll. Az első rész végzi a homlokfejtést, ha szükséges az előre injektálást. Itt végzik az ideiglenes biztosítást, és innen biztosítják a pajzs előrehaladását és irányban tartását is.

Ez a rész ékszerűen támaszkodik a homloknak úgy, hogy hátra nyúló hossztengellyel párhuzamos kitámasztó talpak nyomják előre. A kitámasztó a kőzethez támaszkodnak. A sajtók keresztmetszetének síkjában ki lehet téríteni, így tudják biztosítani a pajzs irányítását. Ha a tengelyt kitérítik egy irányba, azzal megváltozik a fejtés iránya. Pl.: Ha a tengelyt elmozdítják az alagút tengelyétől jobbra, akkor fejtés iránya balra változik (5.6. ábra). Ugyanezek a tappancsok lépegető mozgás végzésével, és a hátsó részt fixáló talpakkal szinkronban biztosítják az előrehaladást. Amikor az első rész talpai kitámasztanak, akkor folyamatosan szabályozható erővel előre tolják a pajzsot a fejtésnek megfelelő ütemben. Amikor teljesen kinyíltak a sajtók, a hátsó rész talpai támasztanak ki, és az első talpak kiengednek. Az első talpak egy lépést tesznek előre, és újra kitámasztanak. Ekkor kiengednek a hátsók, és újra kezdődik a folyamat elölről.

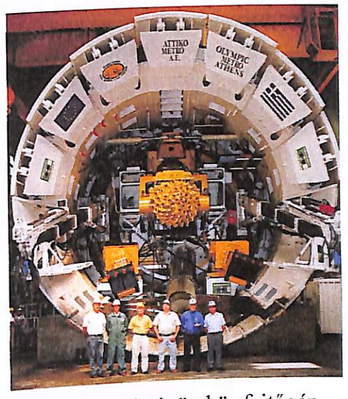


5.7. ábra: Gripper TBM
(1) kőzetnek feszíthető fixáló talpak, (2) fejtőberendezések, (3) előre injektáló kar,
(4) fémhálót elhelyező erektor az ideiglenes biztosításhoz

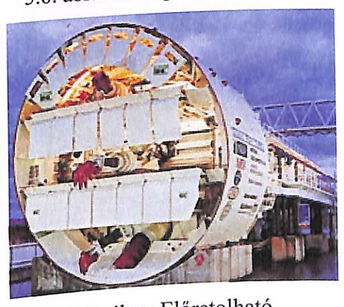
Lehetőség nyílik arra, hogy ne előre gyártott elemekből építsék az alagút falazatát, mivel a pajzs nem az alagút elkészült falazatára támaszkodva tolja előre magát. Ha lőttbetonos módszerrel biztosítják a falazatot, akkor a fejtés mögött pár méterrel kőzettől függően ideiglenes biztosítást lehet készíteni. Egy erektor segítségével az alagút falán fémhálót helyeznek el, amit kőzethorgonyokkal rögzítenek, majd lőttbetonnal ideiglenesen biztosítják. A hátsó rész már az első rész által elkészített ideiglenes biztosítása alatt működik. Itt készítik el a végleges monolit vasbeton burkolatot. (5.7. ábra)

5.2.2. Mechanikus pajzsok

Kevésbé állékony kőzetekben ahol az alagút falazatát ideiglenesen biztosítani kell a pajzsköpennyel, ott már nem jöhet szóba az alagútfúró gép. Ilyen esetekben használhatóak a mechanikus, teljesen, vagy részleges homlokmegtámasztású nyitott pajzsok. A megtámasztások különböző mértékben elmozdíthatóak. Az NATM elterjedésével ritkán gazdaságos ilyen talajokban a pajzs alkalmazása. A gépek egyszerűek, sokban hasonlítanak régebbi társaikhoz. A fejtés módjában térnek el. Keményebb kőzetek esetén marótárcsával fejtenek, mint az alagútfúró gépek. A marótárcsa görgőkkel van felszerelve, melynek segítségével aprítja fel a kőzetet. Repedezett szilárd kőzetekben, vetőkkel átjárt, kötött talajokban markoló rendszerű géppel fejtenek. Repedésektől mentes kőzettömeg harántolása esetén a kőzet szilárdságának és kohéziójának megfelelően megválasztott marógömbös fejtőgéppel célszerű dolgozni (5.8. ábra). Részletesebben a 4.2.2. Marógömbös és markoló rendszerű fejtőgépes pajzsok című fejezetben már tárgyaltam. Az 5.9. ábrán látható gépen jól látszanak az előretolt homlokmegtámasztó szerkezetek és a munkakamra mögötti nyomásálló fal. Itt lehetőség van a túlnyomást is alkalmazni talajvíz távoltartására és bizonyos talajokban részleges homlok stabilizálásra a fejtésnél.



5.8. ábra: Marógömbös fejtőgép

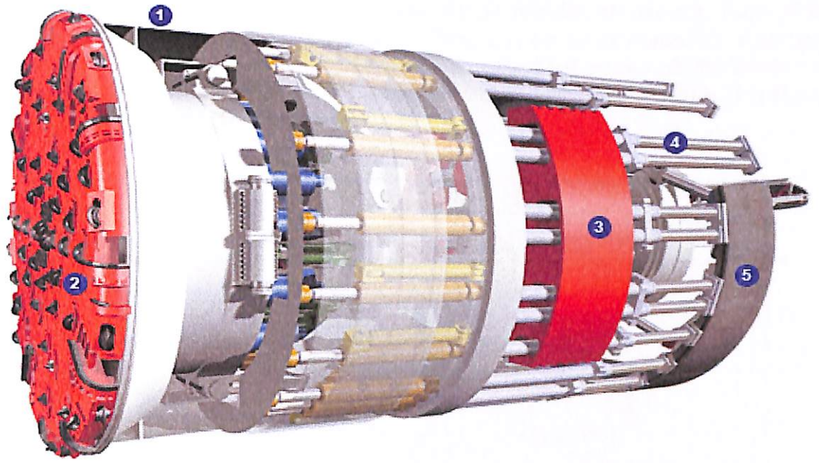


5.9. ábra: Előretolható homlokmegtámasztó szerkezetek

5.2.3. Double Shields TBM

A talajtípustól függően kétféle üzemmódban alkalmazható kombinált pajzs. Egyesíti az alagútfúró gépet és a nyitott homlokmegtámasztású pajzsot. Képes mind a két üzemmódban előrehaladni. A fejtést görgőkkel felszerelt marótárcsával végzi. A végleges falazatot előregyártott tübbing elemekből építi és rendelkezik pajzsköpennyel. Így ez egy pajzs, amely rendelkezik az alagútfúró gép néhány előnyével. Ezek a tulajdonságok főleg az előrehaladást segítik.

Az egyik esetben, ha a talaj szilárdsága nem elég nagy, akkor ugyanúgy halad előre, mint a normál pajzsok. Az alagút falazatának támaszkodó hidraulikus sajtók tolják előre pajzsot a fejtésnek megfelelő sebességgel, míg kifejtenek egy gyűrű hosszúságú szakaszt. Ezután a sajtókat visszahúzzák, és megépítenek egy alagútgyűrűt. Amint befejezték, a folyamatot újra kezdik. Ha viszont a kőzetviszonyok lehetővé teszik, akkor a kőzetnek feszíthető pajzsként üzemel. A pajzs két részből áll. Hátsó részben az alagút falazatára támaszkodó hidraulikák mintájára az első részben is elhelyeztek sajtókat úgy, hogy azok a hátsó részre támaszkodnak fel. A hátsó részen kitámasztó talpakat alakítottak ki. Ennek köszönhetően két munkafolyamatot egyszerre lehet végezni. A fejtéssel nem kell leállni, amíg az alagút falazatát építik. Mikor fejtenek, a hátsó részben elhelyezett kitámasztó talpak rögzítik a hátsó részt, és az első részben elhelyezett sajtók biztosítják a fejtéshez szükséges nyomást, előrehaladást. Mivel a hátsó rész nem mozog, a hátsó sajtókat vissza lehet húzni és lehet építeni az alagút falazatát. Mire kifejtenek egy alagútgyűrű hosszúságú szakaszt, addigra hátul megépítenek egy alagútgyűrűt. Így csak annyi időre kell megszakítani a fejtést és falazatépítést, hogy a hátsó részt utána tolják az első résznek. Ilyenkor a feszítő talpak kiengednek és a hátsó sajtók működésbe lépnek. Úgy tolják előre a hátsó részt, hogy az első rész sajtói állandó nyomáson tartva a homlokot, húzódnak vissza. Ekkor újra fixálnak a feszítőtalpak és kezdődnek elölről a munkafolyamatok. Ezzel jelentősen le lehet csökkenteni az építési időt. (5.10. ábra)

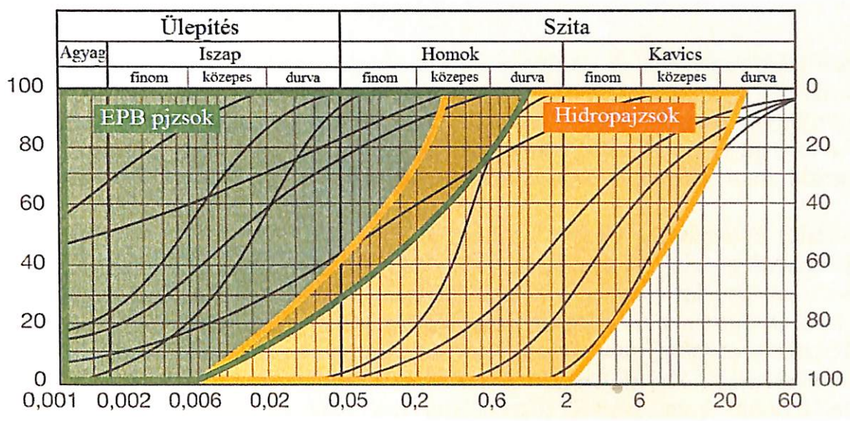


5.10. ábra: Double Shields TBM
(1) pajzsköpeny, (2) marótárcsa, (3) kőzetnek feszíthető fixáló talpak, (4) sajtoló hidraulikák, (5) tübbing elemek

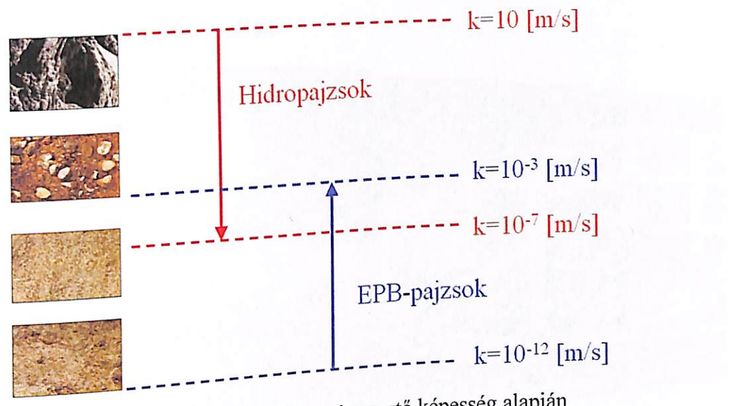
5.3. Zárt homlokmegtámasztás

Zárt homlokmegtámasztásról akkor beszélünk, amikor a homlokot teljes keresztmetszetében megtámasztjuk fejtés közben. Főleg olyan talajoknál fontos ez, melyek nem képesek megállni önmagukban (nem állékonyak), még rövid időre sem. Ezt kétféleképpen tehetjük meg. Aktív és passzív megtámasztással. A passzív megtámasztás esetén a homlok teljes felülete egy dúcolatként működő szerkezettel történik. Puha talajokban alkalmazzák, melyekben fejtés nélkül a homlok zárható nyílásain keresztül engedik be a talajt a pajzs előrehaladásának mértékében. Nagy hátránya a rendszernek, hogy nem lehet elég pontosan szabályozni a beáramló talaj mennyiségét, így süllyedések, vagy a túlzott előre nyomatás miatt felpúposodások alakulhatnak ki a felszínen.

Az aktív homlokmegtámasztás estén valamilyen anyag segítségével a talaj nyomásának megfelelő mértékű ellennyomást fejtenek ki a homlokon. Mivel a megtámasztás jól szabályozható, ezzel a módszerrel könnyen lehet alkalmazkodni a különböző talajtípusokhoz. Előnye, hogy többféle, akár kevésbé állékony talajokban is eredményesebb lehet bármely más alagútépítési módszernél. A mai pajzsok majdnem mindegyike zárt aktív homlokmegtámasztású, melynek két fő típusát különböztetjük meg, illetve az ezek kombinációjából született típusokat. Az egyik a földmegtámasztásos, mely a kitermelt talajpép segítségével támasztja meg a homlokot, a másik a hidropajzs, amely a réseléshez hasonlóan zaggyal támasztja meg a talajt. A problémát mindig az okozza, hogy a két típus közül, melyiket jobb alkalmazni az adott helyzetben. Ezt be lehet határolni a szemeloszlási görbe és a vízáteresztő képesség alapján, de általában ez sokkal bonyolultabb kérdés ennél. A későbbiekben jól érzékelhető lesz ez a probléma a 8.2. Építéstechnológia kiválasztásának szempontja című fejezetben (5.1. grafikon; 5.11. ábra)



5.1. grafikon: Pajzskiválasztás szemeloszlás alapján



5.11. ábra: Pajzskiválasztás vízáteresztő képesség alapján

A kötött, finomszemcsés talajokban a földmegtámasztású pajzs a kedvezőbb, de lassabban reagál a váratlan hidrogeológiai változásokra, mint a hidropajzs. A kőzet finomszemcse hiánya esetén az optimális támasztó földpép előállítása, konzisztenciájának beszabályozása, a kondicionáló anyagok felhasználásával oldható meg. A kondicionáló anyagoknak köszönhetően kitágítható szemeloszlástól függő használhatósági tartománya.

A finomszemcse hiányos, szemcsés talajokban a hidropajzs alkalmazása a kedvezőbb. A megnövekvő finomszemcse arány esetén szeparálási (a bentonit zagy és a fejtett talaj szétválasztásánál) nehézségek léphetnek fel, ami bentonitvesztéssel járhat.

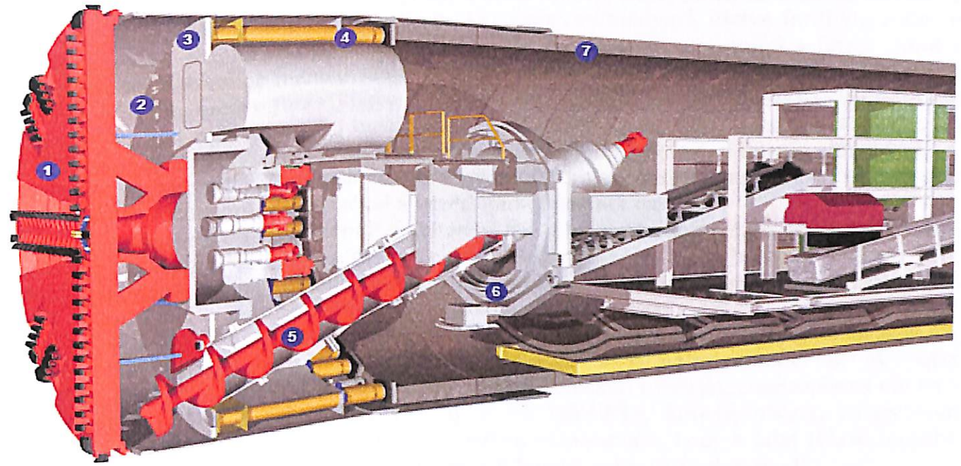
5.3.1. EPB – földmegtámasztású pajzsok

Az aktív homlokmegtámasztású pajzsok közé sorolható, de itt a fejtett talaj biztosítja a homlok megtámasztását. A neve is innen ered, Earth Pressure Balanced (EPB), amelyet sokféleképpen fordítottak le magyarra. Például földnyomás-kiegyenlítő, vagy földmegtámasztásos, vagy talajpép homlokmegtámasztásos pajzs. Régebbi típusait a 4.3.4. A földnyomásos pajzs c. fejezetben ismertettem. Néhány apró különbség teszi kiforrottabbá, megbízhatóvá ezt a módszert.

Különösen magas agyag-, vagy iszaptartalmú és csekély vízáteresztő tulajdonsággal rendelkező kötött talajban alkalmazzák. Alkalmazása kiterjeszthető laza porózus talajokra is, habképző anyag hozzáadásával, illetve megfelelő kötött, képlékeny talajokban, ahol kicsi a belső súrlódás és a vízáteresztő képesség. A földnyomásos pajzsnál a marótárcsa által kifejtett talaj a fejtési homlok támasztására szolgál, mellyel elkerülhető a felszínen a süllyedés vagy emelkedés, mivel minimalizálható a fejtés közbeni omlás és túlfejtés. A homlokon kifejtett talajnak az alábbi tulajdonságokkal kell rendelkeznie ahhoz, hogy támasztóanyagként funkcionáljon:

- jó plasztikai alakíthatóság, pépes vagy puha állag
- csekély belső súrlódás
- csekély vízáteresztő képesség.

Ezek a tulajdonságok általában sem a fejtés előtt, sem után nincsenek jelen teljes egészében. Az anyagot ezért adalékokkal, habbal kell dúsítani, hogy szállítható legyen és közben a homlok nyomásváltozásait, ki tudja egyenlíteni a munkakamrában.



5.12. ábra: EPB pajzs
(1) marótárcsa, (2) munkakamra, (3) nyomásálló fal, (4) hidraulikus sajtók,
(5) földkitermelő csiga

A talajt a forgó marótárcsa szerszámai (körmök, vágóélek és tárcsák) fejtik ki a fejtési homlokon, majd a marótárcsa [1] nyílásain keresztül a fejtési, munkakamrába [2] nyomják. (5.12. ábra) Itt vegyül el a már meglévő plasztikus földpéppel, melynek keverését a marótárcsa hátulján elhelyezkedő keverőlapátok segítik. A munkakamrát nyomásálló fal választja el a pajzs többi részétől. A pajzs, a nyomásálló falon [3] keresztül hat a földpépre és ezzel megakadályozza, hogy a fejtési homlokról a talaj ellenőrizetlenül behatolhasson a fejtési kamrába. Az egyensúlyi állapot akkor áll be, ha a fejtési kamrában lévő földpépet a meglévő föld- és víznyomással már nem lehet tovább sűríteni. A fejtési homlokon ekkor uralkodó földnyomás nagyjából a nyugalmi földnyomással egyezik meg. Ha a földpép nyomását az egyensúlyi állapot felettire emelik, a fejtési kamrában a földpép, valamint a talaj tovább sűrűsödik, és bizonyos körülmények között a pajzs előtti földfelület megemelkedhet. A földnyomás csökkenésekor behatolhat a talaj a fejtési kamrába és ez a felszín süllyedését eredményezi.

A kifejtett anyagot a szállítócsiga [5] továbbítja a nyomás alatt álló fejtési kamrából a nyitott szállítószalagra. A csigában lévő anyag kitermelését zsilippel szabályozzák a munkakamrában, a talajpép megfelelő nyomásának érdekében, amely a homloktámasztó hatást biztosítja.
A földnyomást ily módon az alábbi fő tényezők befolyásolják:

- fúrási sebesség
- fejtési mennyiség
- adalékok hozzáadása a talaj kondicionálásához.

Előírt sebesség mellett a földnyomás szabályozásának fúrás közbeni hagyományos módja a szállítócsiga sebességének megváltoztatása. Ha a megnövelt csigasebesség miatt a csiga egységnyi idő alatt több talajt szállít ki, mint amennyit a marótárcsa lefejt, akkor

csökken a talajpép támasztónyomása. Ha a talajt lassabban fejtik ki, a földnyomás nő. Általában a fúrási sebességgel is szabályozni lehet a földnyomást. Ennél az eljárási módnál a fúrási sebesség csökkentése a földnyomás csökkenését eredményezi, illetve fordítva: a fúrási sebesség növelése a földnyomás emelkedését váltja ki. Mind a csiga, mind a fúrás, mind a pajzs előretolási sebessége manuálisan és automatikusan is vezérelhető. Minden esetben az a cél, hogy a földnyomást fúrás közben egyenletesen tartsuk. A földkamrában létrehozott nyomásnak ki kell egyenlítenie a marótárcsa előtti földnyomást, hogy elkerülhető legyen a talaj túlfejtése és a talajvíz szivárgása, valamint ezek következménye, a felszín süllyedése. A földnyomás ill. támasztási nyomás értéke a nyomófal különböző magasságában elhelyezett földnyomásmérő dobozok segítségével a vezérlőpulton jelenik meg.

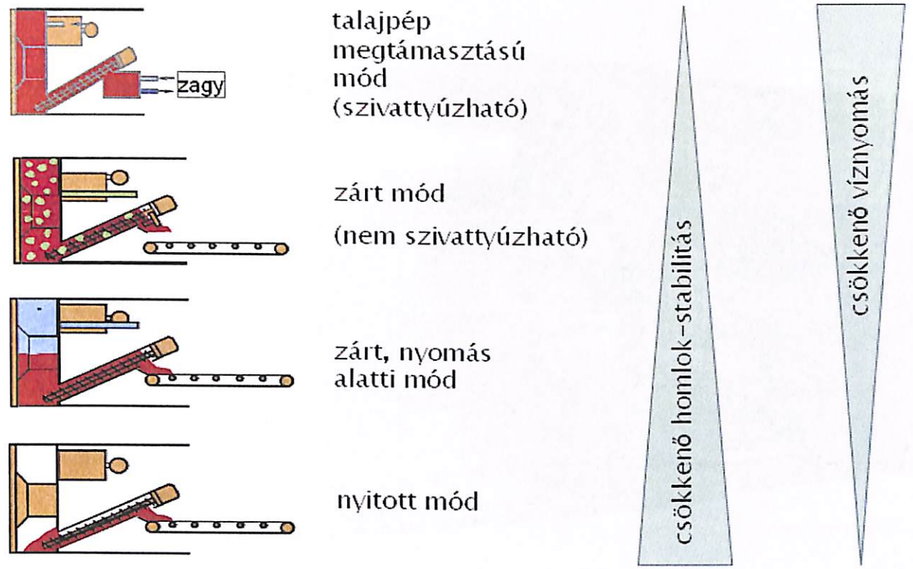
Ahol szükséges, ott a geotechnikai feltételekhez alkalmazkodó segédanyagot kevernek a talajba, hogy a megfelelő képlékenységet elérjék. Régen agyagot vagy bentonit szuszpenziót kevertek a talajhoz, ma már inkább habinjektálásos eljárásokat alkalmaznak. A hab buborékai a talaj pórusaiban rugalmas párnaként működnek, csökkentik annak sűrűségét, belső súrlódását és vízáteresztő képességét. Ily módon ideális plaszticitású talajpép képződik. A habosító oldat vízből, habképző ágensekből és stabilizáló polimerekből áll. A pajzs géplánchan keverik, és sűrített levegővel, fúvókákon keresztül nyomják a marótárcsa elé és a tárcsa mögötti térbe. A hab a kifejtett anyag 3-6 százaléka, környezetbarát, és gyorsan lebomlik. A marótárcsa forgási iránya fúrás közben módosítható, hogy a talaj lehető legjobb keverését és kondicionálását érhessük el, valamint, hogy a pajzs ne forduljon el.

A pajzs nem csak ebben az üzemmódban tud fejtést végezni. Négyféle üzemmódot különböztethetünk meg (5.13. ábra). A nyitott üzemmódot az állékony vízzáró talajokban alkalmazzák. Ilyenkor atmoszférikus légnyomás uralkodik a munkatérben. Ha a homlok állékonysága kismértékben csökken, akkor a munkatér nagyobb mértékű feltöltésével lehet azt stabilizálni.

A zárt, nyomás alatti módot repedezett, mállott vizes talajok esetén alkalmazzák. A különbség az, hogy itt a talajvíz távoltartására túlnyomás alá helyezik a kamrát. A budai oldalon részben ilyen üzemmódban haladtak a 4-es metró pajzsai.

A homlok állékonyságának romlása esetén zárt módot kell alkalmazni mely az előzőekben ismertetett földmegtámasztásos mód, amikor a munkatér teljesen fel van töltve a talajpéppel. A további talaj állékonyságának romlása és talajvíz mennyiségének növekedése esetén használják a negyedik üzemmódot. Ebben az esetben a talajt teljesen folyós pumpálható állapotba hozzák. A csiga végére egy pumpát szerelnek, melynek segítségével csővezetéken keresztül pumpálják ki a talajt. Ezzel ki lehet küszöbölni a csiga miatti vízbetörés lehetőségét, és nagyon pontosan lehet mérni a kitermelt talaj mennyiségét. Gyakorlatilag ebben az esetben közel úgy működik, mint félig zárt üzemmódban a hidropajzs.

Az alagút falazatának kiépítése rendszerint vasbeton tübbingekkel [7] történik, melyek a pajzson belül a faroklemez védelme alatt, atmoszférikus nyomási viszonyok között kerülnek beszerelésre. A tübbingek külső része és a fejtési átmérő között fennmaradó rést a pajzs faroklemez végén beépített injektáló nyílásokon keresztül folyamatosan habarccsal töltik ki.



5.13. ábra: EPB pajzs üzemmódjai nyitottól a zártig

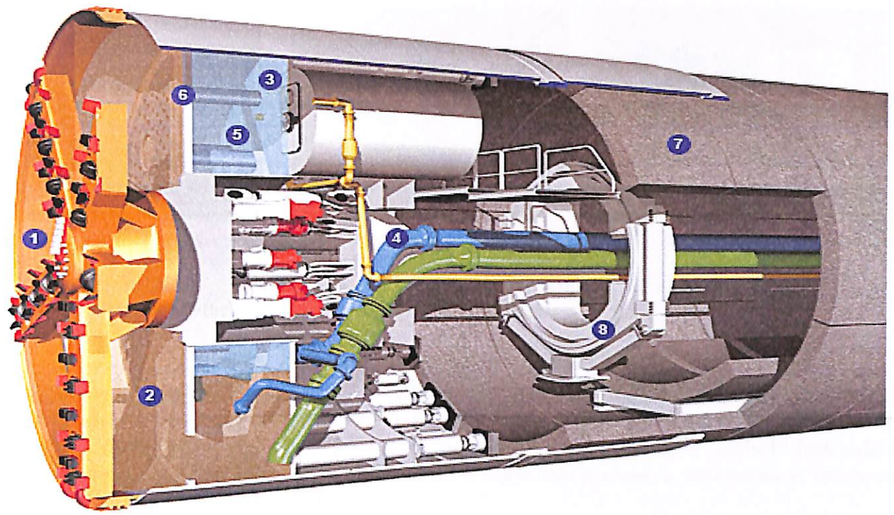
5.3.2. Hidropajzsok (mixshield)

A hidropajzsos alagútépítési módot már a 4.4.2. Aktív homloktámasztás (hidropajzsok) c. fejezetben ismertettem, de a mai változatai működésükben kisebb eltérést mutatnak.

A homlokmegtámasztás és fejtés szempontjából a pajzs gyakorlatilag bármilyen talajban képes lenne haladni. Egyetlen akadálya, hogy zagy segítségével csővezetéken keresztül szállítja ki a kifejtett talajt. A zagy és a talaj szétválasztása pedig csak szemcsés talajokban lehetséges. De ami ennél még fontosabb, olyan helyen, ahol nagy a talaj vízáteresztő képessége és/vagy vízbetöréssel lehet számolni, ott szinte kizárólag ezt a típust alkalmazzák.

Komoly fejlesztéseken esett át ez a típus is. Sokban finomították és javították a működését. Ebből két dolgot ki kell emelni. A kezdeti típusnál problémát okozott a szemcseátmérő nagysága, vagy a munkatérbe kerülő szikladarabok. 4-8 méter haladás után ki kellett tisztítani a munkateret. A mai pajzsoknál megoldották, hogy megállás nélkül tudjanak haladni, és ne kelljen élőmunkával tisztítani a munkakamrát. A nagyobb darabokat sziklatörővel, vagy valamilyen morzsolásos módszerrel az anyag kiszállításához megfelelő szemcseátmérőre aprítják.

A homlokmegtámasztást itt is a zárt munkakamrába [2] beadagolt bentonitzagy biztosítja (5.14. ábra). Viszont módosítást végeztek a földnyomás változásának gyorsabb lereagálása érdekében. A munkatérben a homlok megtámasztására szolgáló bentonit zagy nyomását nem az alagúton kívül elhelyezett gépházból biztosítják, mint az előzőleg alkalmazott típusoknál, hanem lent a pajzsban. A fejtő tárcsával [1] lefejtett kőzettel keveredve a bentonitzagy egy támasztó folyadéktulajdonságú zagyot képez, ami egyben a kitermelt kőzet szállíthatóságát is elősegíti. A munkakamrában lévő szükség szerinti nyomást a merülőfal [6] feletti légpárna [5] biztosítja. Ezzel a megoldással gyorsan lehet reagálni az

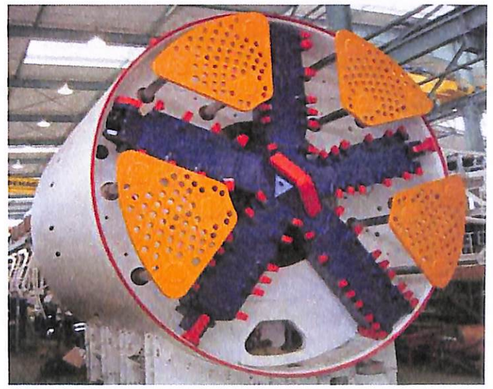


5.14. ábra: Mixshield
(1) fejtőkereszt, (2) munkakamra, (3) nyomásálló fal, (4) bentonit szuszpenziót szállító vezetékek, (5) nyomást kontroláló légpárna, (6) két kamrát elválasztó merülő fal. (7) tübbing elemek, (8) falaztat építő erektor

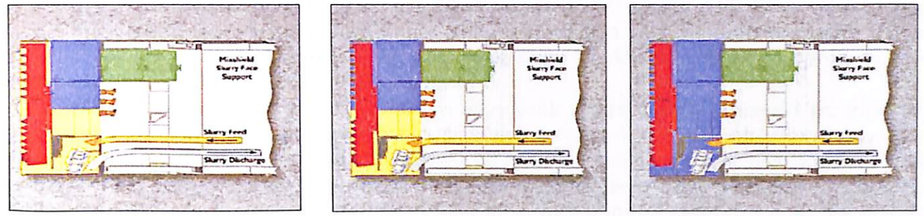
esetlegesen fellépő váratlan hidrogeológiai változásokra. A legújabban kifejlesztett változatoknál a légpárnát a pajzs szerkezetén kívül, a gépláncon elhelyezett kiegyenlítő tartály biztosítja. Így a pajzsköpeny rövidebb lehet, és ezáltal fordulékonyabb. A kifejtett kőzet szállítása tolózárakkal szabályozott, zárt csővezetéken keresztül zagyszivattyú segítségével történik és kerül a szeparátorba, ahonnan a bentonitzagy visszavezetésre kerül a munkakamrába.

A hidropajzs is több üzemmódban képes fejteni. A 5.16. ábrán láthatóak az üzemmódok. A nyitott üzemmódot leginkább a marótárcsán vagy a munkatérben felmerülő munka közbeni javítások esetén alkalmazzák. A félig-zárt üzemmód az állékonyabb talajok esetén alkalmazható, míg a teljesen zárt mód akár a teljesen folyós egyszemcsés anyagok esetén is megfelelő aktív homlokmegtámasztást biztosít.

Javítások esetén a durvaszemcsés kőzetekben a bentonitfilm a levegő



5.15. ábra: A homlokot mechanikusan megtámasztják



zárt	félig-zárt	nyitott
(teljes homlokon folyadékmegtámasztás)	(alsó rész folyadék, fölötte levegőmegtámasztás)	(teljes megtámasztás levegővel)

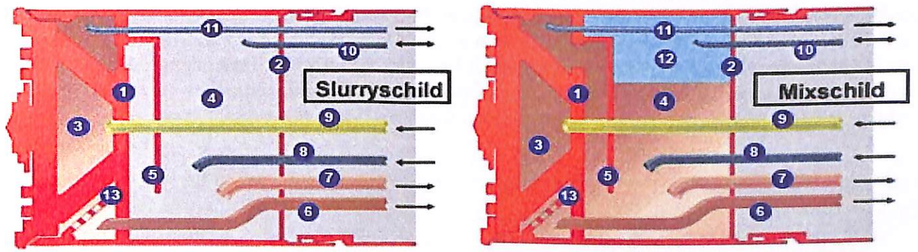
5.16. ábra: Hidropajzs üzemmódjai nyitottól a zártig

túlnyomáson megszakadhat, ilyenkor a talaj megtámasztás nélkül marad. Az ezekből származó esetleges omlások elkerülésére a bentonitzagy levegővel való lecserélése előtt a homlokot mechanikusan megtámasztják. A támaszok a nyomásálló falból hidraulikák segítségével kitolt szerkezetek. Így a sűrített levegő kiszorítja a vizet, a mechanikus támasztás pedig a kőzetet biztosítja (5.15. ábra).

5.3.3. AVN pajzs

Kialakításában leginkább az előzőleg ismertetett hidropajzshoz hasonlít. Ezeket a típusokat csak kisebb átmérőnél, mikropajzs technológiaként alkalmazzák. Két üzemmódban képes működni. Itt is megtalálható a kétkamrás rendszer, mely lehetővé teszi, hogy a két kamrát együtt, vagy egymástól teljesen elzárva használják. (5.17. ábra)

Az egyik üzemmódban kétkamrás hidropajzsként (mixshield) működik. Erre akkor van



5.17. ábra: I. kombinált pajzs

(1) két kamrát elválasztó elzárható nyomásálló fal, (2) munkakamrákat leválasztó nyomásálló fal, (3) elülső munkatér, (4) hátulsó munkatér, (5) merülő fal, (6) földkitermelő vezeték, (7) bentonit szuszpenziót szállító vezetékek, mely a hátsó munkatér kiürítésére szolgál az üzemmód megváltoztatásakor (8) kondicionáló anyag befecskendező vezeték, (9) bentonit szuszpenziót betápláló vezeték, (10) légnyomást szabályzó vezeték, (11) légtelenítő, (12) nyomást kontroláló légpárna, (13) kőzet morzsolóval ellátott rosta

szükség, ha kavicsos, homokos, iszapos, omlékony kis kohézióval rendelkező talajba ér. Ebben az esetben mindkét kamra el van árasztva, és a fal nyitott [1] állapotában merülő falként funkcionál. A két kamra ugyanúgy működik, mint a normál hidropajzsnál. Az első kamrát [3] bentonit szuszpenzió tölti ki, míg a hátsóban [4] létrehozott légbuborékkal [12] a munkakamrában lévő nyomást szabályozzák.

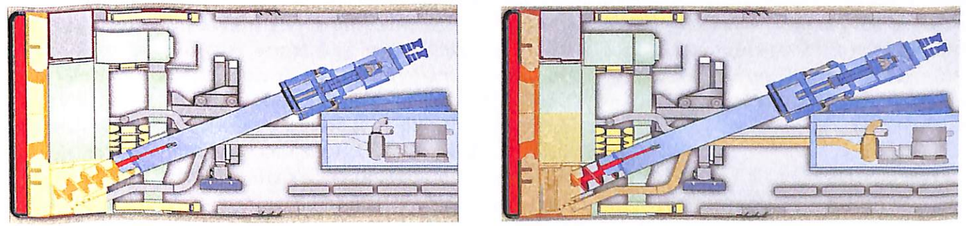
A másik üzemmódban (slurry shield) a zagy csak a talajszállító közeg. Erre akkor van szükség, ha a talaj adottságai megváltoznak és kőzetbe, vagy állékony, kohézióval rendelkező talajba ér. Ebben az esetben a falat [1] lezárják és csak az első kamrát [3] használják. A hátsó kamrában [4] nem végeznek munkát és a túlnyomást sem kell biztosítani. Az aktív munkatérben [4] a bentonit szuszpenziót cirkuláltatja. Itt a homlok megtámasztását a kitermelt földdel biztosítják, és a bentonit szuszpenziót csak a talaj pépesítésére és kiszállítására használják. Az EPB pajzshoz hasonlóan a marótárcsa által lefejtett talajhoz képest, olyan mértékben engedik a talaj kitermelését a munkatérből, hogy megfelelő mértékű legyen a homlokmegtámasztás. Ha több talajt termelnek ki a munkakamrából, akkor csökken a homloknyomás, ha csökkentik az adagot, akkor nő a nyomás.

5.3.4. Kombináltpajzsok

A pajzsok a főbb szerkezeti elemeik felhasználásával az alagútban átalakíthatóak a talajtól függő különböző típusú homlokmegtámasztásokra és így a megfelelő üzemmódban használhatóak. Előnyük a szélesebb területű felhasználás, változó talajviszonyok esetén. Az esetek többségében itt a hidropajzsot és EPB pajzsot próbálják egyesíteni. A technológia, bonyolultsága miatt igen nagy hozzáértést igényel. Ezek a gépek még nem kiforrott technológiák és áruk is magas.

Az 5.18. ábrán látható pajzs esetében a két üzemmód megfelel a hidro- és földmegtámasztásos pajzsnak, teljes mértékben kiváltja azokat. Ebből adódóan viszont a pajzs szerkezete jóval bonyolultabb. Az átállás egyszerű, gyakorlatilag a csiga mozgatásával könnyen elvégezhető. Ezt a típust fogják alkalmazni Párizs belvárosa alatt az új Socatop alagúthoz.

A közeli jövő biztosan a kombinált, egyre több talajhoz alkalmazkodni képes pajzsoké. A távoli jövőben lehetséges, hogy készülnek majd olyan gépek, melyek bármilyen típusú talaj esetén akadály nélkül képesek végighaladni, csak az alagút átmérőjét kell megadni. Talán még az is lehetségessé válik, hogy egy pajzzsal több alagútátmérőt és geometriát is lehet majd létrehozni. A mai technológiákkal ilyen lehetőségek még nincsenek, de abba az irányba mutatnak, hogy minél szélesebb körben, minél olcsóbban, minél biztonságosabban tudjunk alagutakat építeni.



EPB üzemmód Hidro üzemmód

5.18. ábra: Kombinált pajzs

5.4. A pajzs főbb részei

A géplánc hosszát az alagút átmérője befolyásolja. Minél nagyobb az átmérő, annál könnyebb elhelyezni a gépészeti berendezéseket, ezért rövidebb lehet a géplánc. A teljes gépláncot röviden, felsorolásszerűen mutatom be, csak néhány fontos elemét emelem ki.

A pajzs és a hozzá tartozó géplánc főbb részeit röviden a 4-es metró építésénél használt gépláncon mutatom be.



5.19. ábra: A 4-es metró egyik pajzsához tartozó géplánc egyik kocsija a kettős sínrendszeren.

A pajzs maga három fő részből áll. Legelöl van a fejtőszerszám, a marótárcsa, amely mögött a munkatér van. A munkateret egy nyomásálló, zárt acél diagramma fal választja el a pajzs többi részétől. Ezen a falon csak két nyílás van. Alul az anyagszállító csiga nyílása, felül pedig a zsilipkamra ajtaja, amelyen keresztül zárt üzemmód esetén meg lehet közelíteni a munkateret. Túlnyomás csak ebben a munkatérben van, de itt is csak zárt üzemmód esetén.

A fal mögött a második részben helyezkednek el a hidraulikus meghajtómotorok. Ugyanitt találhatók a pajzs belső palástja mentén elhelyezkedő hidraulikus sajtók, amelyek az elkészült alagútfalazatra támaszkodva nyomják előre a pajzsot.

A harmadik részben van az erektor, amely előregyártott vasbeton tübbing elemekből, a pajzsfarok védelmében építi a végleges alagút falazatát. A körbe megépített tübbingek és a kifejtett szelvény között keletkezett hátűrt, a faroklemez hátsó élén elhelyezkedő injektáló berendezések töltik ki. A faroklemez és a tübbingek között körbefutó, gyűrűirányú szerelési hézagot a faroklemez szigetelés tömítőgyűrűje zárja le. Itt helyezkedik el az anyagszállító csiga hátsó része, ide szállítja a kifejtett anyagot és üríti a szállítószalagra. A pajzsköpeny végénél, középen helyezkedik el az irányító és vezérlőfülke, és a lent dolgozók részére kialakított pihenőkabin.

A pajzs folyamatos működéséhez egy kilenc egységből álló szerelvényt vontat maga után, speciális sínpályán. Ezt a pályát a szerelvény elhaladtával elbontják, majd elöl a pajzs mögött újra beépítik. A vonat úgy van kialakítva, hogy a pajzs kiszolgálását biztosító vasúti szerelvényt tudja fogadni. A szerelvényeken minden olyan gépészeti berendezés helyezkedik el mely a pajzs működéséhez és működtetéséhez kell. Közvetlenül a pajzs mögött helyezkedik el a híd, ami összeköti a kocsikat a pajzzsal. Ezen helyezkedik el az irányító kabin és a tübbing elemek lerakodására szolgáló bak daru.

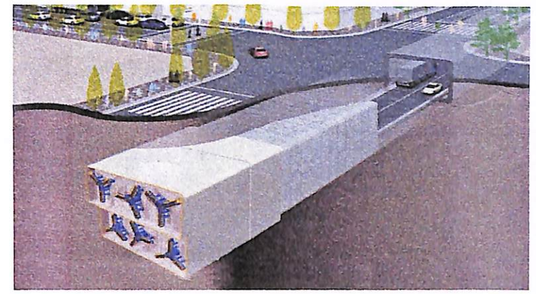
A pajzs felől hátrafelé haladva, a kocsikon a következők találhatók:

- az elsőn a habarcsinjektáló berendezés és tartály, a különböző (főtengely és faroklemez tömítéshez szükséges) zsírinjektáló egységek
- a második kocsin habosító anyagtároló, a zagytartály és lakatos műhely, hogy minden felmerülő problémát a helyszínen meg tudjanak oldani

- a harmadik kocsin három elektromotor a marótárcsa hidraulikájához, és a polimer alapú habosítóanyag tartály
- a negyedik kocsin a szennyvíztároló és ülepítő tartály, a szennyvíz pumpa, a hidraulikaolaj tartály, az olajhűtő és több elektromotor a sajtók -, az injektálás-, és az erektor hidraulikájához
- az ötödik kocsin van a futószalag vége, a megfigyelő állás a vonathoz, a megfigyelő kamera, a légtartály, a biztonsági kompresszor sűrített levegő hiánya esetén a homlokfal állandó biztosítására, és a biztonsági generátor az alap ellátáshoz, áramkimaradás esetén
- a hatodik kocsin a mobil WC, az üzemanyag a generátorhoz és a kapcsolószekrények az elektronikához
- a hetedik kocsin a járda, és cső tartó elemek, a transzformátor, a 20 kV-os kábel kábeldobja, melyről folyamatosan tekeredik le haladás közben
- a nyolcadik kocsin a szellőzőberendezés, a csővezetékekhez csövek, bilincsek, tömítések, a hűtőfolyadék koncentrátum, a biztonsági vízfüggöny víztartálya és vízpumpája (5.19. ábra). (Németh 2006)

5.5. Különleges kialakítású pajzsok

A legelső pajzs ugyan téglalap keresztmetszetű volt, *Barlow* pajzsa óta szinte minden esetben kör keresztmetszetet alkalmaznak. Vannak azonban olyan törekvések, hogy a pajzs nem kör keresztmetszetű, hanem az igényeknek megfelelő keresztmetszeti kialakítású. Ebben legmesszebbre a japánok jutottak. (5.20. ábra)



5.20. ábra: Téglalap alakú pajzs

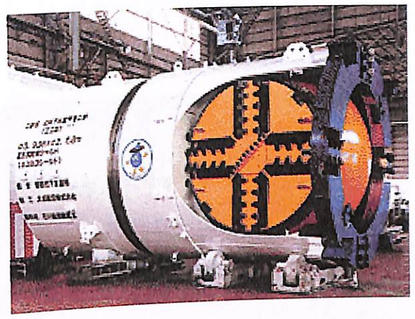
Az 5.21. ábrán látható pajzs három részből áll. A két szélső a középsőhöz igény szerint felszerelhető, illetve arról leszerelhető. Egy tokiói metróvonalon másfél kilométernyi szakaszt építettek ilyen típussal. A három pajzs együtt teljes egészében fejti ki az állomási keresztmetszetet.



5.21. ábra: 3 pajzs kombinációja

Az indítóaknában összeszerelték a középső, kétvágányú alagutat kihajtó pajzsot, amely az állomási fogadóaknáig ment. Innen kezdve már az állomási műtárgyat kellett

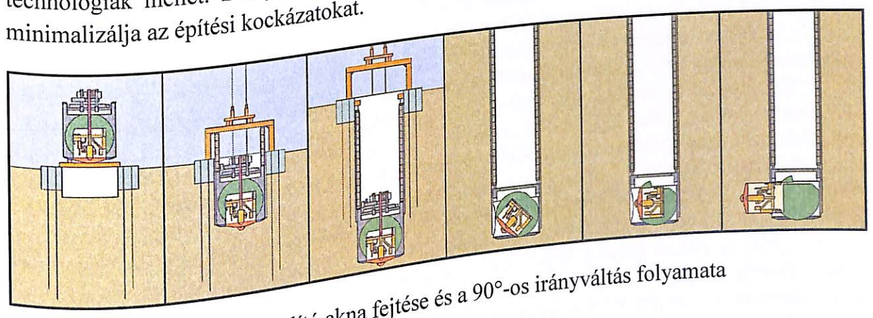
megépíteni. Az állomási fogadóaknába leeresztették a két oldalsó csonka pajzsot és hozzászerelték a vonal alagutat építő középsőhöz. Amikor a pajzs az állomási szakasz utáni fogadóaknához ért, a két szélső csonka pajzsot leszerelték és kiemelték, a középső pajzs pedig tovább folytatta az útját. A hármas pajzsban szerelték össze az öntöttvas tübbingekből álló, ugyanilyen alakú hármas gyűrűt, a két oszlopsorral együtt.



5.22. ábra: 90°-ban elfordított marótárcsa

Az 5.22. ábra olyan pajzsot mutat be, amely nem csak az alagutat, de az indítóaknát is maga fejti ki. Ez úgy lehetséges, hogy képes 90° elforgatni a marótárcsáját, majd az új irányba folytatni a fejtést (5.23. ábra).

Ez a néhány rövid példa jól mutatja, hogy még sok lehetőség van a pajzsos alagútépítésben. A pajzsok fejlesztése ma is folyamatosan zajlik, próbálják minél szélesebb körűvé tenni alkalmazhatóságukat. Az elkövetkező évtizedekben, ha csak nem készül valami forradalmian új technológia, akkor a pajzsos technológia jövője biztosított a ma használt alagútépítési technológiák mellet. Előnye, hogy nagymértékben lecsökkenti a nehéz fizikai munkát és minimalizálja az építési kockázatokat.



5.23. ábra: Indító akna fejtése és a 90°-os irányváltás folyamata

6. Falazóelemek, tübbingek és szigetelésük

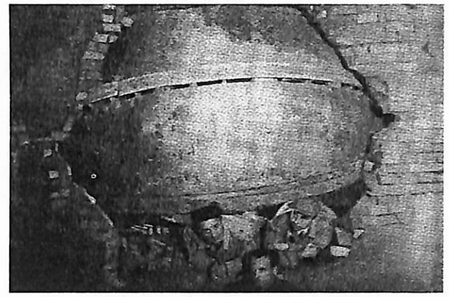


6.1. ábra: A 4-es metró tübbingjei beszerelés előtt

A pajzsos alagútépítés kialakulása és fejlődése során jellemzően a tübbinges, nagy elemes rendszereket részesítették előnyben. Ennek oka a gyorsabb építés lehetősége, és az, hogy az előregyártás során biztosíthatók a pontos méretek mind az öntöttvas, mind az acél, és később a vasbeton elemek gyártásánál is. További fontos szempont volt még a megfelelő szilárdság és az elemek vízzáróságí képessége. Az elemek méretének a gyártási, beszállítási lehetőségek és a szereléshez rendelkezésre álló eszközök jelentették a korlátot. Ma a korszerű pajzsokban, az erektorok segítségével szinte bármilyen súlyú elem beszerelhető. A 4-es metró pajzsai 3,5 tonnás tübbingeket szerelnek be minden gond nélkül, de a ma ismert nagyobb átmérőjű alagutaknál nem ritka a 6-8 tonnás vasbeton elem sem. A vasbeton megjelenéséig a pajzzsal épült alagutak többségét öntöttvas, vagy acél tübbingekkel szerelték, az egyes elemek között csavaros kapcsolatot alkalmaztak. A vasbeton elterjedésével az ötvenes évektől kezdve lassan kiszorultak az öntöttvas és acél tübbingek. Helyüket a vasbeton elemek vették át. Mára a vasbeton elemek egyeduralkodóvá váltak, öntöttvas és acél elemeket csak speciális esetekben alkalmaznak. A ma alkalmazott vasbeton elemek standard méretei a következők: a fal vastagság 30-40 cm, az elem szélessége 1,5 m, az elem hosszúsága pedig 2,5-4,5 méter között változik. Az elemek mérete függ magától a megépítendő alagút szelvényének méretétől, és a gyűrűn belüli helyzetétől (a záróelemek mérete általában kisebb a többinél). A falazóelemek méretezett vastagságúak és szilárdságúak. A nagyszilárdságú (C 40, C 50-es) előre gyártott tübbingeket vízzáró vasbetonból, nagypontosságú acélsablonokban készítik. Készülhetnek hagyományos vasalással, de ma már nem ritka az acélhajjal készült vasbeton elem sem. Az elemek között ideiglenes csavarkapcsolat van a gyűrűt körülvevő beinjektált anyag megszilárdulásáig, és egyúttal olyan tömítő rendszer az elemek között, amely beépítés után a falazatnak azonnali vízzáróságot biztosít. Így tehát a falazaton keresztül víz nem juthat be az alagútba. A vízzáró betonból, esetleg szulfátálló cementből előre gyártott falazó elemek teljes vízzáróságát, maga a vízzáró betonból készült falazó elem, a tübbing és a közöttük lévő a homloklapokon horonyban elhelyezkedő neoprén, vagy gumi anyagú szigetelés biztosítja.

A horonytömítő gumi, neoprén profilok a ténylegesen kialakuló nyomás szerint méretezettek, az alagút falazattal egyenértékűen, hosszú életűek. Kritikus, pl. folyó alatti szakaszon, a nagyobb biztonság érdekében a falazó elemek, tübbingek csavaros kapcsolata a szokásosnál hosszabb ideig, a mért alagúti konszolidáció befejezéséig, vagy véglegesen is bennmaradhat a biztonságot szolgálva. Másodlagos szigetelésként, és egy esetleges alagúti tűz fellépése esetére a neoprén, gumi szigetelés védelmeként a falazó elemek hornyait hő és tűzálló anyaggal töltik ki. (6.1. ábra)

7. Pajzsos alagútépítés Magyarországon



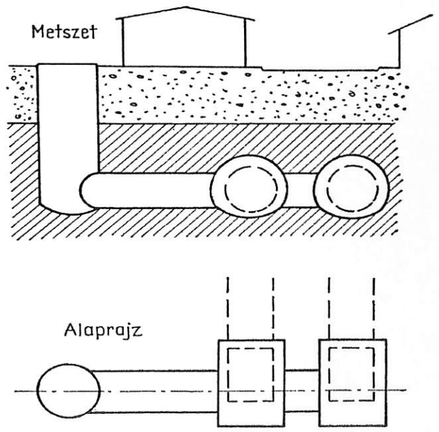
7.1. ábra: A marógömb szemből nézve Káposztásmegyeren

Magyarországon alagútfúró pajzsot először a két világháború között 1934-től – 36-ig alkalmaztak. A Szentendrei-szigetről a káposztásmegyeri vízművek gépházához két közműalagutat építettek. Az alagutak átmérője 280 cm volt, amelyekben 2x2 db 700 mm-es vízcsövet vezettek át. A *Hallinger* cégtől vettek kölcsön pajzsokat. A cég itt vetette be a világon először *Hallinger* típusú pajzsait. Ennél a típusnál a fejtést egy marógömb végzi. Az építkezés után a pajzsokat rögtön vitték tovább Dortmundban csatornaalagút építésére. Részletesen lásd az 3.3. számú fejezetben (7.1. ábra).

Mivel a pajzsok jól működtek, célszerűnek tűnt két ugyanilyen típusú, de nagyobb átmérőjű pajzsot beszerezni a kelet-nyugati metróvonal alagútjainak építéséhez. A gyártónak ilyen nagy átmérőjű pajzzsal még nem volt tapasztalata. Mivel a fejtési felület egy gömbszegmens volt, ez többszöröse a sík tárcsa fejtési felületének.

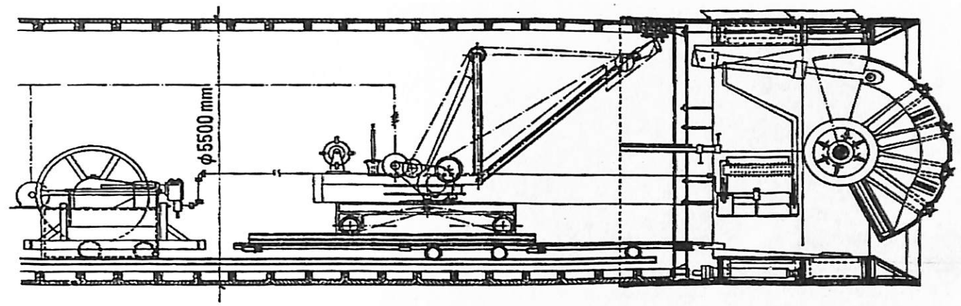
A pajzsos alagútépítés a Rákóczi út alatt kezdődött 1952-ben. A 66. sz. telken épített szellőzőaknából előzetesen bányászati módszerrel a vonalalagutak helyén betonszerkezetű pajzskamrákat építettek, és ezekből indították el a pajzsokat a Keleti pu. irányába (7.2. ábra).

A fejtést a hidraulikus sajtóval mozgatott marógömbök végezték. Ez a fejtési mód azonban nem vált be. A marógömbök csak a szelvény középső részét fejtették le (7.3. ábra). A vágóélek körül egy jelentős vastagságú talajréteget a vágóéleknek kellett lerepeszteni, ami a kemény agyagban nagyon nehezen ment. A marógömbök merevítő szögvasainak szegecsei lenyíródtak, a gerinclemez és a vágóél is behorpadt. Ezeket a problémákat a pajzsok eredendő hibáin kívül a kezelőszemélyzet tapasztalatlansága, helytelen kezelés és a sajtónyomások túlzott felfokozása okozta. Rövid idő után a munkát abba kellett hagyni. A marógömböket kiszerelték, és új vágóéleket beépítve kézi fejtésre tértek át. Így a pajzsok a továbbiakban mint kézi fejtésű nyitott pajzsok működtek. A pajzsok hajtási technológiája a helyi viszonyokhoz alkalmazkodott.



7.2. ábra: Pajzsindító kamrák

Az építés általában túlnyomásos (100-150 kPa) térben történt. Az agyagrétegekbe vékony homokerek, ezen kívül vetők vezették be a vizet, emiatt volt szükség a levegő

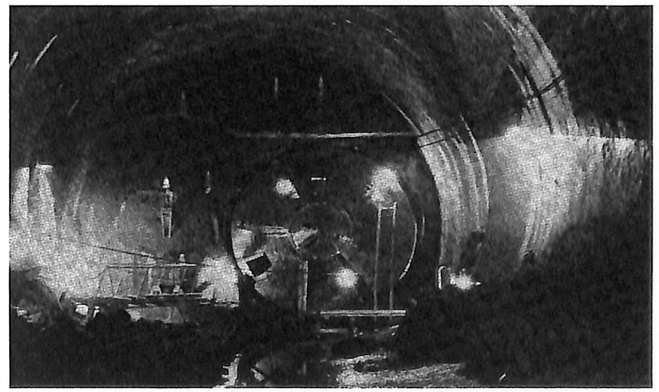


7.3. ábra: 1952-ben alkalmazott *Hallinger* típusú pajzs

túlnyomásra. Az elért haladás átlagosan naponta 1,5 m, később 2 m volt az időt rabló tűzés, a kézi fejtés és rakodás miatt. A pajzsokba 22 előretoló hidraulikus sajtó volt beépítve, egyenként 1 MN tolóerővel. A falazat anyaga öntöttvas tübbing volt. A helyenként előforduló folyósodásra hajlamos, finom homoktalajokban (Blaha Lujza tér környéke) csak nagyobb, 180 kPa levegőtúlnyomással sikerült a talaj elnedvesedését megakadályozni.

Ilyen folyóssá vált homoktalajban az észak-déli vonalon, a Ferenc körút alatt egy nagyobb szakadás is bekövetkezett. A szakadás a munkatér feletti gyalogos aluljáróig hatolt fel. Az aluljáró fenéklemeze alatt 2,5 m mély, nagy üreg képződött, amelyet cementhabarcs injektálással töltöttek ki. Az alagútépítést ezen a szakaszon csak teljesen zárt tűzéssel, később a levegőtúlnyomást is 180 kPa-ra növelve lehetett tovább folytatni.

A kézi fejtésű pajzsok mellett a teljesítmények növelésére szovjet *SCSN-1* típusú mechanikus pajzsokkal is építettek alagutat a kelet-nyugati vonal Szent István tér - Moszkva tér közötti szakaszán. Itt a talajviszonyok is kedvezőbbek voltak. A pajzs és a hozzá tartozó géplánc lehetővé tette a fejtési és rakodási munkák teljes gépesítését. A pajzsok átlagos sebessége naponta 2,1 m volt, de sokszor 5 m-t is haladtak. A beépített falazat részben vasbeton blokk, részben öntöttvas tübbing volt (7.4. ábra).



7.4. ábra: *SCSN-1* típusú mechanikus pajzs beérkezése a Moszkva téri állomásra

Az előrehaladást sokszor akadályozták a beágyazott kőrétegek, amelyeket a marótárcsa kései és bontótüskéi nem tudtak elmarni, ezért robbantással vagy kézi fejtéssel kellett őket eltávolítani. A pajzsok kúpos marótárcsája támasz nélküli, szakadásokra is hajlamos felületet vágott ki, ami a vetődésekkel szabdalt helyeken szakadásokat is

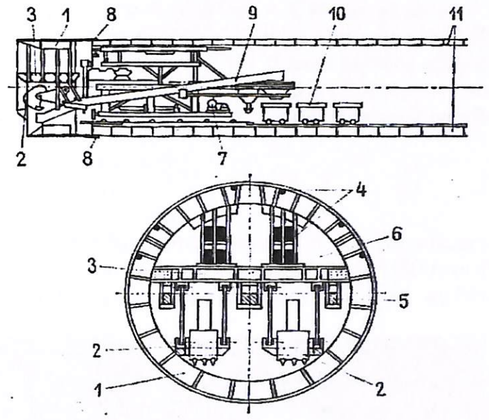
okozott. Így a Guszev utca (ma Sas utca) alatt történt egy nagyméretű szakadás, amely a felszínen 45 mm-es süllyedést okozott.

A Duna alatti szakaszon a nagyobb biztonság érdekében csavarkapcsolatos öntöttvas tübbinget építettek be. Vízbetörés esetére magasabban elhelyezett menekülőhidat szereltek be és vészjelző készülékeket alkalmaztak, hogy a dolgozók a vész-zsilipig biztonságosan eljuthassanak. A talajmechanikai szakvélemény itt metán előfordulását is jelezte. A metán betörés a Batthyány tér közelében jelentkezett. A max. koncentráció 0,7%-ot ért el, amit megfelelő szellőztetéssel sikerült 0,1%-ra csökkenteni.

Az észak-déli vonal építéséhez a két mechanikus pajzsot átalakították (7.5. ábra). A vonal magasabb fekvése miatt ugyanis a marótárcsa túl nagy súlya miatt aláfejtéséből származó esetleges szakadások elérhették volna a vízdús homokos-kavics réteget is. Ezért a rotort kiszerelték, és a merevítés átalakításával a felső munkaszint alá két *Schaeff* típusú fejtő-rakodó gépet építettek be. Így a keresztmetszet felső, kb. 30%-nyi területét kézzel, az alatta levő alsó 70%-nyi részét gépekkel fejtették (7.6. ábra). A rakodást a teljes keresztmetszetben gépekkel végezték. Az előrehaladás sebessége naponta 6-7 m volt. A faroklemez tömítésére a *Westfália* cég által gyártott gumiprofilt alkalmazták. A pajzsok irányításához bevezették a lézeres kitűzést.



7.5. ábra: A mechanikus pajzs a Dombóvári úton



7.6. ábra: Nyílt homlok, markoló rendszerű fejtő-rakodó géppel

(1) pajzsköpeny; (2) lejtő-rakodó markoló; (3) közbenső munkaszint; (4) állandóan felszerelt homloktámasztó hidraulikus sajtók; (5) rosszkőzetviszonyok esetén felszerelt hidraulikus sajtók; (6) szakaszos homlokbontás és építés kézi fejtéssel; (7) injektáló szivattyú; (8) faroklemez tömítés; (9) földszállító szalag; (10) földszállító csillék; (11) előre gyártott vasbeton alagútfalazat



7.7. ábra: Nyitott homlokú mechanikus markoló rendszerű mikro pajzs

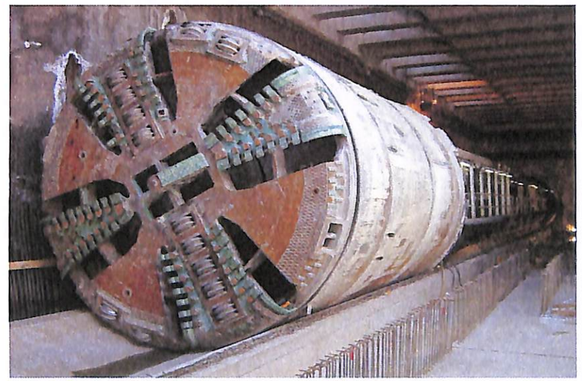
Azóta Magyarországon ilyen nagy átmérőjű pajzsot most alkalmaznak újra a 4-es metróvonal alagútjainak építéséhez. Kisebb átmérővel, számos helyen alkalmaztak és alkalmaznak mikro pajzsokat. Ezeket általában közműalagutak, csatornák építésére használják.

A mikro pajzsos alagútépítés 90-es évek végén kezdett elterjedni Magyarországon. Ez főként annak köszönhető, hogy a pajzsok bérelhetők a nagy gyártóktól. Számos kisebb munkát végeztek és végeznek el. Néhány nagyobbat emelnék ki, a teljesség igénye nélkül. 2005-ben Szegeden csatorna építésére egy 2400 mm átmérőjű EPB pajzsot alkalmaztak. A csatorna a Tisza alatt vezetett át 500 m hosszan. 2006-2007-ben készült el a Csepeli szennyvíztisztító összekötése a Duna alatt. Itt egy 1500 mm átmérőjű AVN típusú pajzsot alkalmaztak. 2008-2009-ben a Budai főgyűjtő építéséhez szintén egy AVN típusú és két nyitott homlokú pajzsot alkalmaztak. A 7.7. ábrán az egyik 2000 mm átmérőjű nyitott homlokú mechanikus pajzs látható. (Ábrahám 1982)

7.1. 4-es metró fúrópajzsai

A 4-es metró alagútjainak építéséhez olyan korszerű alagútépítő pajzsot alkalmaznak, amely biztosítja a napi 12-15 méter előrehaladási sebességet és a maximum 5-20 mm felszíni süllyedést. Az alagútépítő gépláncokat, a két pajzsot a *Herrenknecht AG* gyártotta és szállította. (7.8., 7.9., 7.10. ábrák)

Az alagútépítéshez szükséges alagútfúró berendezések gyártását Németországban, Schwanauban végezték. Az első pajzs 2006 október elején készült el, az üzemi próbákat követően szétszerelték, és Budapestre szállították. A kész pajzsindító műtárgyban újból összeszerelték, majd a beüzemelés után, 2007 április elején indulhatott meg az alagútépítés. Az EPB pajzsok, monoblokkos marótárcsájú, hidraulikus meghajtású berendezések.



7.8. ábra: A Tétényi úti állomáson a déli pajzs



7.9. ábra: Kelenföldön, az indítóaknában indulásra váró két pajzs szerelvényei az induláshoz szükséges nyomókeretekkel (piros és zöld)

A pajzsokat alapvetően kétféle üzemmódban tudják működtetni, nyitott és zárt üzemmódban. Nyitott üzemmód esetén gyakorlatilag úgy működik, mint egy mechanikus pajzs. Ilyen üzemmódban tervezték a budai oldalon, a kemény és tömör kiscelli agyagban való haladást. Az indulást követően a talaj pépesítő hab keverékének a beállításához rögtön EPB pajzsként alkalmazták. A süllyedések kedvező alakulásatka. Később álltak át a tervezett nyitott üzemmódra. A Duna alatt és a pesti oldalon a puhább és lazább talajok és a talajvíz jelenléte miatt át fognak átállni a zárt módszerre.
Pajzs műszaki adatai:

- Hossza: 116 méter.
- Átmérője: 6,05 méter.
- A marótárcsát 8 darab hidraulikus motor hajtja, amelyek mind két irányban tudják forgatni a marótárcsát. Erre az óriási forgatónyomaték okozta elfordulások korrigálhatósága miatt van szükség.
- Az erektor emelőkarja, vákuum segítségével fogja meg az egyes, akár 3,5 tonnás falazati elemeket és teszi a helyére. Az erektorra szükség esetén felszerelhető egy fúró berendezés, amely segítségével a homlokon keresztül geológiai feltáró fúrásokat lehet előre hajtani. A homlokon körbe több ilyen fúrásra alkalmas nyílás is van melyek Ø100 mm.
- A pajzsok esetén körbe, a megépített tübbingek és a kifejtett szelvény között, mintegy 15 centiméteres hátűrt kell kitölteni úgy, hogy a felszínen a lehető legkisebb felszínmozgások keletkezzenek.
- A pajzs folyamatos működéséhez egy kilenc egységből álló szerelvényt vontat maga után.
- A pajzshoz a felszínről egy 1,0 méter átmérőjű, a főtébe rögzített flexibilis csövön keresztül nyomják be a friss levegőt, így biztosítva a szerelőtér levegő ellátását.

- Az alagútfúró berendezés, a pajzs kiszolgálását hat kocsis vasúti szerelvény biztosítja, melyből egy, az egy gyűrűbe beépítendő tübbingeket, egy az injektáló (kb. 7 m^3) anyagot viszi be a pajzshoz, a többi négy pedig szintén egy gyűrűnyi, a homlokon kifejtett földet szállítja ki. A szerelvény mozgatását két diesel mozdony végzi, önálló vasúti pályán, melyet folyamatosan építenek ahogy halad előre a pajzs. A szerelvény felszínről történő kiszolgálása a felszínen mozgó két bakdaruval és egy nagy kapacitású toronydaruval történik, a leadó nyílásokon keresztül.
- A szerződésnek megfelelően, 2006 május végén készült el az első marótárcsa, amelyet június elején leszállítottak Budapestre. A több mint 1000 km utat, a Ø 6100 mm és 53 tonnás szerkezetet közúton, speciális szállító járműveken tette meg, mintegy 8 nap alatt.
- A marótárcsa un. monoblokkos, ami azt jelenti, hogy a gyárból a szerelés helyére egy darabban érkezett és került beépítésre, gyakorlatilag csak roncsolásos módszerrel bontható. A gyártás során azonban több darabból állítják össze. A magja, egy 3,0 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 a szerszámot szükség esetén tárcsás szerszámra lehet cserélni. A szerszámok elhelyezése olyan, hogy mindkét forgásirányban biztosítják a teljes keresztmetszetű fejtést. A marótárcsa anyaga S 355 acél, a szerszámok nagy keménységű, kopásálló acélból készülnek. A tárcsa felületén nagykeménységű lapkák vannak elhelyezve, hogy ne a tárcsa kopjon. Négy szerszámban kopásérzékelő szenzor van beépítve, ami a központi vezérlő egységbe van bekötve, így csak jelzés esetén szükséges a munkatérbe bemenni szerszámot cserélni. A marótárcsa tervezett előrehaladási sebessége a beépített 8 darab hidraulikus motor meghajtással 80 mm/perc. Ez több mint 2 m^3 föld kitermelését jelenti percenként.
- Energia igény: a működtetéséhez 4,1 megawatt, a kiszolgáláshoz további 1,7 megawatt teljesítményre van szükség.
- A két pajzs az Etele térről indulva előreláthatóan 84 hét alatt építi meg a kétszer 7,4 kilométer hosszú alagutat. Tervezett haladási sebességük 12-15 méter/nap, de akár 30 métert is képesek megtenni naponta.
- Egy pajzs ára kiszolgáló rendszerekkel együtt megközelítőleg 12 millió euró (Németh 2006)



7.10. ábra: A második fúrópajzs beérkezése a Tétényi úti állomásra

8. Az alagútépítő pajzs kiválasztásának szempontrendszere

A most épülő metró tapasztalatait felhasználva, egy gyakorlati példán mutatom be a tervezett 5-ös metróvonalra alkalmazható pajzsos alagútépítési technológia kiválasztásának szempontrendszerét. Ehhez először ismerni kell a vonalvezetést. Vonalvezetés teljes ismeretében lehet majd talajfeltárásokat, kutatásokat, tanulmányokat készíteni, melyek segítik a pajzs kiválasztását, és a későbbiekben a megtervezését.

8.1. Vonalvezetés

A vonalvezetés más-más szempontok alapján készül az alagutak funkciója szerint. Teljesen más szempontokat kell figyelembe venni egy közmű alagútnál, mint egy metró alagútnál. A következő szempontrendszer, egy metró alagút kialakítására vonatkozik. Az 5-ös metró vonalvezetését a FŐMTERV által készített tanulmány alapján vettem figyelembe, melyet itt bemutatok.

8.1.1. A vonalvezetést meghatározó tényezők

A vonal vízszintes és magassági vezetésénél a következő tényezőket kell figyelembe venni:

- a forgalmi és üzemi követelményeket;
- a topográfiai és a geológiai adottságokat;
- a városszerkezetet és a városrendezést;
- a közművek helyzetét és fejlesztését;
- a környezetvédelmi követelményeket;
- az építés lebonyolításának lehetőségét;
- a létesítmény gazdasági vonzatait, megtérülését.

Forgalmi helyzet és igény

A metróvonal kialakításának legfontosabb alapadata a várható utasforgalom. A várható csúcsórai utasforgalom alapján kell előirányozni a vonal teljesítőképességét. A legjobban terhelt keresztmetszet figyelembevételével határozható meg az óránként mozgatandó férőhely és ezzel összefüggésben a vonatszám. A távlatban várható legnagyobb utasszám alapján lehet meghatározni a metróvonal szükséges távlati vonathosszát és ezzel az állomási peronok hosszát.

Az állomások utasforgalmi létesítményeinek végleges méreteit a jövőben várható legnagyobb csúcsnegyedórai fel és leszálló utasforgalomra kell méretezni.

Városszerkezeti adottságok, lehetőségek és a városrendezési követelmények

A vonalvezetés meghatározásához, az állomások pontos helyének kijelöléséhez alapvetően fontos a városszerkezeti adottságoknak és lehetőségeknek, illetve a városépítési követelményeknek és a metróépítés városra visszaható következményeinek átfogó és részletes elemzése.

Szükséges a környező területek

- ipari, lakóterületi, zöldövezeti, kereskedelmi és közlekedési rendszerének vizsgálata;
- a nagy forgalmú közintézmények helyzetének, közlekedési hatásának számba vétele, a vonzáskörzetek meghatározása;

- az úthálózat kapacitásának és bővítésének elemzése.

A részletes vizsgálat során a feladatok:

- Elemezni kell a szóba jöhető nyomvonalakat és a tervezett állomások közelében levő épületállományt. Ott ahol az építés következtében talajmozgások léphetnek fel, tisztázni kell az egyes épületek rendeltetését, életkorát, szerkezeti rendszerét és ezek viselkedését a talajmozgások hatására. Vizsgálni kell az épületekkel kapcsolatos elképzeléseket (felújítás, bontás). Ezt követően lehet eldönteni, hogy az építési módból származó káros hatások (felszíni süllyedés, emelkedés) elkerülése vagy megengedhető mértékűre korlátozása céljából az építmények igényelnek-e műszaki beavatkozást (megerősítést, ideiglenes kilakoltatást, bontást), vagy pedig a vonalvezetést, építési módszert kell-e változtatni.
- Fontos a vonal összehangolása az utcák, az útvonalak vonalvezetésével, szélességével, kapacitásával, állapotával, jelenlegi és távlati városrendezési tervben való szerepével (pl. sétálóutca, új utak létesítése, stb.). Keskeny, törtvonalú utcák alatt nyitott építési mód nem jöhet szóba csak új szabályozási vonal kijelölésével és épületek bontásával.
- Szükséges a meglevő csomópontok elemzése, kapacitásuknak, forgalmi rendszerüknek tisztázása, a távlati koncepció kialakítása (szintbeli szétválasztás), mert ez az állomások helyét, kijáratainak elrendezését, a csomópont gyalogosközlekedésének kialakítását alapvetően befolyásolja.
- Nem közömbös a lakó és ipari negyedek elhelyezkedése a vonalvezetéshez képest. Kedvezőtlen körülmények között a nyitott építési mód akadályozhatja ezek folyamatos közműellátását, anyag és áruszállítását, közlekedését (személyi, tűzoltó, mentő).
- Jelentősebb tényezők főképp az állomások elhelyezése szempontjából az áruházak, a pályaudvarok, a vásárcsarnokok, a stadionok, a kikötők, a vásárterületek, stb. Ezek nagy utasforgalmuk révén eldönthetik a vonal vezetését, az állomások helyét, kijáratait számát és elrendezésüket.
- A magassági vonalvezetésre meghatározó lehet a város közműhálózata. Nagyméretű közműalagút, továbbá a telefonközpontok környezetében a sok kábel, a főgyűjtők, a főnyomó-vezetékek nem mindig válthatók ki. Fordított helyzet is kialakulhat, amikor a közművek szükségessé váló felújítása és a metró kis mélységben való építése gazdaságilag jól kiegészíthetik egymást.

8.1.2. Javaslat az 5-ös metró vonalvezetésére

Budapest metróhálózata a 4. (DBR) vonal megépítése és a korábbi vonalak tervezett kiegészítései után befejezettnek lesz tekinthető.

A közlekedés- és várospolitikai célkitűzések között szereplő (a tömegközlekedés részarányának további csökkenését lassító, esetleg a folyamatot visszafordító) szándék realizálásának egyik legfontosabb feltétele viszont a lehetőleg minden városrészre (esetenként a kapcsolódó városhatáron kívüli területekre is) kiterjedő gyors-tömegközlekedési hálózat megléte. A városközpont és a külsőbb területegységek színvonalas kapcsolatát biztosító közlekedési eszköz lehet a közúti gyorsvasút és a városi, elővárosi gyorsvasút; a metróhálózattal fel nem tárt területek ellátását ezen - nálunk új - ágazatokra kell alapozni.

A fenti program egyik meghatározó és várhatóan igen jó hatékonyságú eleme lehet az É-D-i regionális gyorsvasút. A szentendrei, csepeli, ráckevei HÉV vonalak felhasználásával, városközpont alatti összekötésével és az érintett területegységek kedvezőbb feltárását biztosító vonalkorrekciókkal, szárnyvonalakkal az új vonalcsoport jelentős területek színvonalas ellátást biztosíthatná, mégpedig a jelenlegi és várható utazási igények „minőségi"

kiszolgálásával.

Két ponton is közvetlen kapcsolódási lehetőség alakulhat ki a MÁV elővárosi hálózatával (kelebiai- és esztergomi vasútvonalak) az utóbbi esetében maga az elővárosi közlekedési üzem is a gyorsvasút kezelésébe kerülhet.

A vonal mentén több helyen teremtődik meg a P+R rendszerű közlekedés feltételrendszere, kiemelt jelentőségű átadópontok létesülnek Csepelen, Soroksáron (az M0-hoz és a Soroksári elkerülő úthoz kapcsolódva), illetve az északi szektorban Szentendrén, Pomázon, Piliscsabán és Pilisvörösváron.

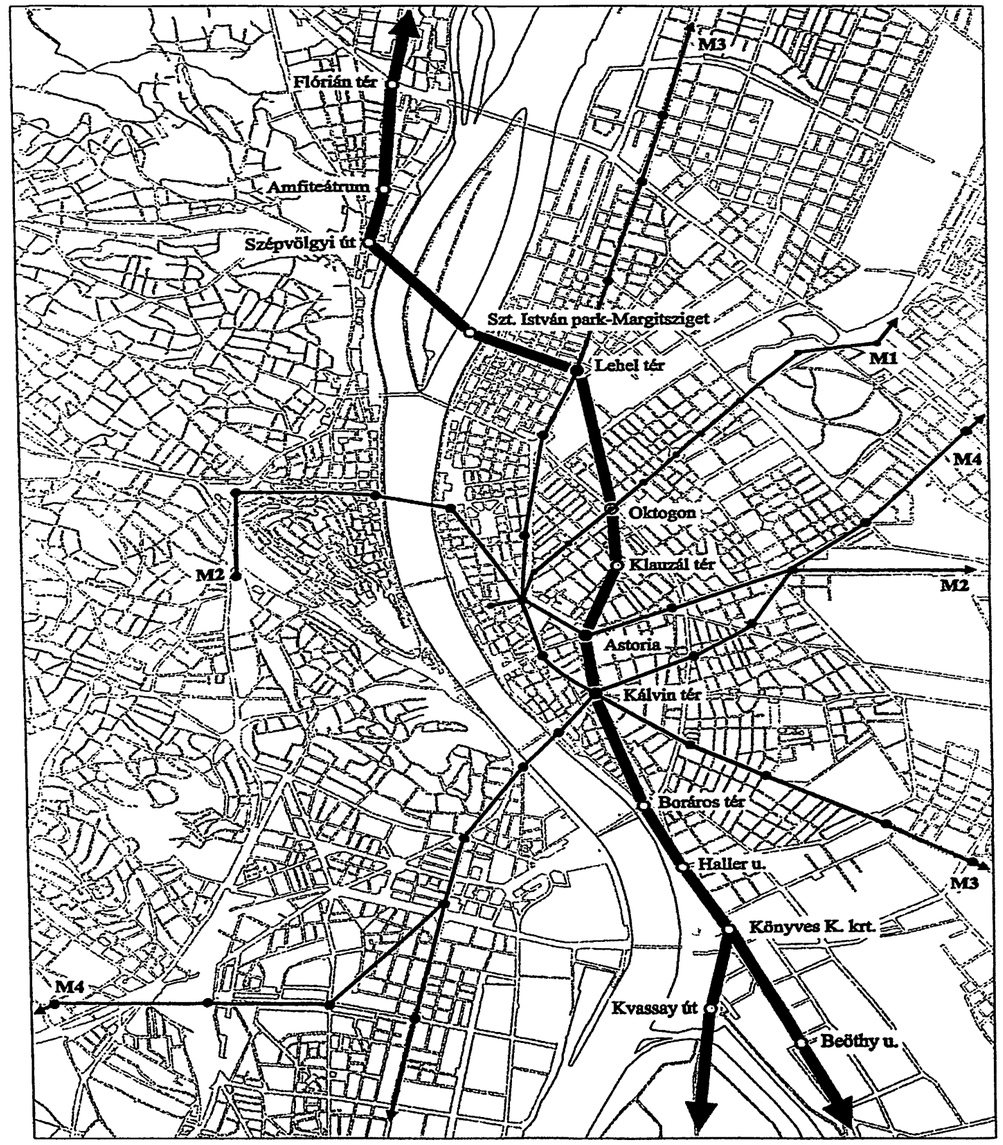
A legjellemzőbb utazási relációkban átlag 30-40%-kal csökkenhet az utazási idő, de nagyobb mértékben javulnak az utazás nem számszerűsíthető - minőségi - jellemzői. (Átszállásmentes, közvetlen kapcsolatok, növekvő járatgyakoriság, stb.)

A tervezett regionális gyorsvasúti rendszert - részben funkcionális alapokon, részben egyszerűen a könnyebb tárgyalhatóság végett - célszerű három fő (északi-középső-déli) részre osztani. A szakaszokat - természetes városszerkezeti elemként - a Hungária körgyűrű jelöli ki, választja el egymástól. (FŐMTERV Rt 1998)

Ennek a rendszernek a középső része az, mely igazán lényeges a pajzsos alagútépítés szempontjából. Ez az a szakasz, mely mély vezetésű, és ez az a szakasz, ahol alkalmazásra kerülhet a pajzsos technológia.

Erre a szakaszra a felhasznált tanulmány 11-féle vonalvezetési javaslatot ad. Mivel csak egy valósul meg, én is egyet veszek figyelembe, melyet a tanulmány is a legvalószínűbbnek jelölt meg (8.1. ábra). A vonalszakasz állomásai északról délre haladva: Flórián tér, Amfiteátrum, Szépvölgyi út, Szt. István park – Margitsziget, Lehel tér, Oktogon, Klauzál tér, Astoria, Kálvin tér, Boráros tér, Haller utca, Könyves Kálmán krt.

A vonalrész Könyves Kálmán krt. - Boráros tér közötti szakasza kéreg alatti, egyébként mélyvezetéses lehet. Különleges nehézségeket előre láthatóan nem tartalmaz, kb. 7,9 km vonal hossza 8 közbenső állomással, közepes költségigényű változat.



8.1. ábra: Az 5-ös metró leendő legvalószínűbb vonalvezetése

8.2. Építéstechnológia kiválasztásának szempontjai a következők:

- A kőzet környezet geológiai, mérnökgeológiai, geotechnikai adottságok
- A hidrogeológiai viszonyok (talajvíz, rétegvíz, karsztvíz helyzete, tulajdonságai)
- Az alagút, a műtárgyak feletti takarás mértéke
- A magassági és vízszintes vonalvezetés (lejtviszonyok, stb.)
- Az alagút, a műtárgyak geometriája (kitörési szelvény, vonalszakaszok hossza)
- Az épített környezet adottságai (felszín beépítettsége, stb.)
- A természeti környezet szempontjai
- A humán környezet elvárásai (zaj, rezgések, por, közlekedés, stb.)
- A gazdaságossági szempontok
- Az építési idő
- Az építési és környezetvédelmi előírások (Metró Tervezési Irányelvek, Országos Vasúti Szabályzat, hatósági előírások, stb.)

8.2.1. A kőzet környezet geológiai, mérnökgeológiai, geotechnikai adottságok és a hidrogeológiai viszonyok (talajvíz, rétegvíz, karsztvíz helyzete, tulajdonságai)

A kőzet környezet geológiai, mérnökgeológiai, geotechnikai és hidrogeológiai viszonyok bármilyenek is legyenek, nem jelent problémát a pajzs számára, hisz ma már minden körülmény között képesek pajzshajtással alagutat építeni. Úgy alakítják ki speciálisan az adott feladatra, hogy az adott nyomvonalon előforduló összes lehetséges helyzethez alkalmazkodni tudjon. Így bármilyen útvonalat jelölnek ki, az nem okoz problémát. Éppen ezért ezek a tulajdonságok a pajzs kialakításában típusának kiválasztásában játsszák a legfőbb szerepet. Ez könnyen belátható, hisz az előbbiekben bemutatott pajzstípusokat is a különböző talajokban, kőzetekben való alkalmazás alapján lehetett csoportosítani. Az alagút vonalvezetését kivételes esetekben változtatni kell ezen tulajdonságok miatt.

A 4-es metró nyomvonal kijelölése során fordult elő, hogy a Duna alatt, a Gellért hegy egyik dolomit rög nyúlványán haladt volna keresztül. A nyomvonalat módosítani kellett úgy, hogy ezt a részt kikerülje. A módosítás oka nem az volt, hogy nem voltak alkalmassá tehetők a pajzsok a sziklán történő áthaladásra. A dolomitban található karsztvizek miatt, környezetvédelmi okokból kellett elkerülni. Ennek következtében a pajzs kialakítása is megváltozott, nem kellett sziklás talajban való haladásra alkalmassá tenni.

Az 5-ös metró vonalvezetése északról dél felé haladva a Flórián tértől vált mélyvezetésűre és a Szépvölgyi úttól délre keresztezi a Dunát. Az É-D-i vonalat a Lehel és a Kálvin térnél keresztezi, míg a K-Ny-i vonalat az Astoriánál. Ha ezt a nyomvonalat vizsgáljuk geológiai és hidrológiai szempontból, az eddig megépített metróvonalak tapasztalatait figyelembe véve már ismert környezetben halad a vonal. Így a budai oldalon alapvetően kemény márgára lehet számítani, talán új elemként itt az jelenik meg, hogy a nyomvonal párhuzamosan halad a Duna alatti vetőzónával. A Duna alatti átvezetés remélhetőleg nem okoz meglepetést a K-Ny-i vonal hasonló szakaszán szerzett építési tapasztalatokhoz képest. A pesti oldalon szintén aránylag jól ismertek a geológiai és hidrológiai viszonyok.

Ezen ismeretek alapján, az alagútépítési technológia kiválasztásához, a tervezett nyomvonalat három szakaszra lehet felosztani:

- A budai vonalszakasz
- A Duna alatti átvezetés
- A pesti vonalszakasz

A vonal a budai oldalon jó minőségű homogén vízzáró „kiscelli agyagban" és meszes agyagmárgában kerül megépítésre. A homogén kőzetet helyenként vetőzóna törheti meg. A vetőzóna környezetében a kőzetkörnyezet repedezett. A repedezett kőzet az agresszív talajvizet mélyebb rétegekbe is lehozhatja. A kőzet alkalmas a vonalalagutak építésénél a budai oldalon a következő építéstechnológiák alkalmazására:

- Bányászati módszerű, lőttbetonos építési technológia
- Pajzsos építési technológia
- A fentiek kombinációi

A Duna budai oldalán „kiscelli agyag", meszes agyagmárga és „tardi agyag" homokos márga, és annak átmeneti rétegei találhatók. A Duna pesti oldalán a felsőoligocén agyag rétegek következnek változó, egyre emelkedő homoktartalommal. Az agyagok felső, fedő rétegei változó vastagságban átázottak és puhábbak. A Duna alatti átvezetésnél előállható különleges esetek, amelyeket a pajzstípus kiválasztásánál figyelembe kell venni: Duna víz bejutásának lehetősége a pajzsba és, vagy az alagútba. A zárt homlokú aktív megtámasztású pajzsok három típusának alkalmazása is számításba vehető:

- Bentonit-zagyos-hidropajzs
- Földmegtámasztású pajzs
- Kombinált pajzsok

A Duna alatti átvezetés után a tervezett alagút változó, kisebb szilárdságú, heterogén, rétegekben halad. A kőzet inhomogén, szabálytalanul váltakoznak az iszap, homokos iszap, iszapos homok, agyagos homok és homokos agyag, és bentonitos agyag rétegek valamint betelepülések. A homokos kavicsrétegekbe áramló talajvízzel lehet számolni. A nyílt víztartásos víztelenítés nem engedhető meg a pajzs körzetében, a sűrűn beépített városi környezet süllyedésre érzékeny épületei miatt. A pajzs szerkezeti, és a vízzáróságát biztosító szerelvények technológiai kialakításai megegyeznek a Duna alatti átvezetéshez szükséges pajzsok műszaki megoldásaival.

A vonalvezetés és egyéb körülmények kizárólagosan zárt alagútépítési módszert tesznek lehetővé. A pesti és a Duna alatti szakaszon nem alkalmazható nyitott homlokú pajzs. A bányászati módszer is csak a budai oldalon alkalmazható. Így többcélú pajzs jöhetne szóba, mely több üzemmódban képes haladni. A mai modern pajzstípusok általában mind képesek erre. Így az egész vonalszakaszra alkalmazható pajzstípusok a következő:

- Bentonit-zagyos-hidropajzs
- Földmegtámasztású pajzs
- Kombinált pajzsok

A kombinált pajzsok az egyik legújabb technológiát képviselik. Hátránya a tapasztalatok hiánya és a szerkezet összetettsége miatt, feltehetően magas ára. Bár könnyen tudna alkalmazkodni a nyomvonalon előforduló talajokhoz, de magas ára miatt nem látok lehetőséget ilyen pajzs alkalmazására.

A hidropajzs mellett szól, hogy a Duna alatt haladva, a Duna vizének, a Pesti oldalon a kavicsrétegekben áramló talajvíz betörésének lehetőségével kell számolni. A vízbetörés kivédésére ez a legalkalmasabb pajzstípus. A talajviszonyok viszont nem a legmegfelelőbbek e típus alkalmazásához. Bár a talaj homok tartalommal is rendelkezik, de nagyobb részt agyagrétegben kell haladni. Az agyagban való haladás esetén, a csővezetéken való zagyos talaj kitermelés illetve szétválasztás, nem lehetséges.

A földmegtámasztásos pajzsnak nem okozna problémát az agyagtalaj, sőt ilyen talajokra lett kifejlesztve. A megfelelő talajkondicionáló szerek alkalmazásával, sokkal jobban alkalmazható. A problémát ennél a típusnál a víz betörésének nagyobb kockázata okozza a

szemcsés talajok esetén, melyet már részleteztem a pajzs bemutatásánál (5.3.1. EPB – földmegtámasztású pajzsok fejezet).

Van lehetőség arra is, hogy az előbb említett pajzsos alagútépítési módok mellett a budai oldalon lévő rövid szakaszt bányászati módszerrel fejtsék ki. Ez nem lenne túl előnyös, a nagyobb kockázat és a pajzs rosszabb anyagi megtérülése miatt. A 4-es metrónál szerzett tapasztalatok is azt mutatják, hogy a budai oldalon az EPB pajzzsal is célszerű volt inkább zárt módszerrel haladni, ugyanis így kisebb a túlfejtés kockázata, különös tekintettel a törészónák környezetére.

A 4-es metró EPB pajzsai a budai oldalon jól teljesítenek, gyors tempóban haladtak és nagyon kedvezőek a felszínen mért süllyedés értékek is. Amennyiben a pesti oldalon is ilyen kedvező tapasztalatok lesznek, akkor érdemes lenne egy jól bevált ismert technológiát használni az 5-ös metró építése során. Ha viszont problémák merülnek fel a pesti oldalon, akkor érdemes fontolóra venni a hidropajzs alkalmazását. Főképpen azért, mert a pesti oldalon halad a vonalvezetés túlnyomó része.

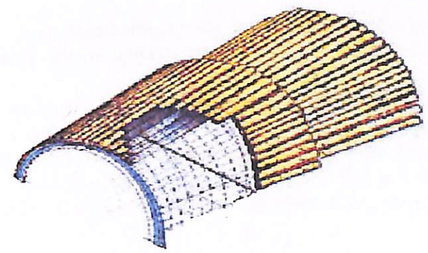
Sem a szemeloszlási görbék, sem pedig a vízáteresztő képesség alapján nem lehet könnyen kiválasztani a megfelelő pajzstípust. Minden megoldás kompromisszumot jelent. A kompromisszumok kockázatainak elemzéséből adódik a helyes válasz.

Én az eddigi tapasztalatok alapján és bizakodóan tekintve a 4-es metró pajzsainak pesti oldalon való haladására, az EPB pajzs alkalmazását javaslom.

8.2.2. Az alagút, a műtárgyak feletti takarás mértéke

Több szempontot kel figyelembe venni:

- geotechnikai szempontból a műtárgyak feletti takarás vastagsága befolyásolja a talajmozgásoknak felszínre ható mértékét
- az utazás nagy részét időben az átszállások, a le és kijárathoz való eljutás képezik, ezért nagyon fontos, hogy mennyi időt töltünk el a mozgólépcsőn, mert ez is befolyásolja az utazási időt
- függ a magassági vonalvezetéstől



8.2. ábra: Injektált ernyő

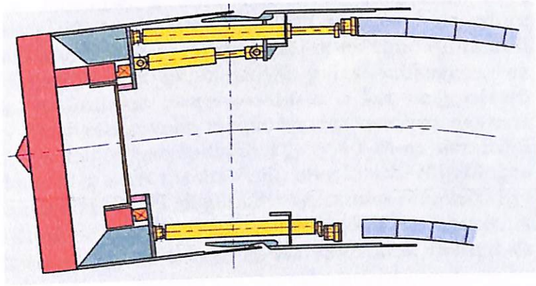
A takarás vastagsága nagyban befolyásolja a felszínig hatoló talajmozgásokat, így a süllyedések mértékét és kiterjedését. Minél nagyobb a takarás annál inkább átboltozódik a talaj és annál kisebb a felszínen keletkező süllyedés. Természetesen ezzel a felszínig hatoló felszakadás veszélye is csökken. Túl kicsi takarás esetén fennáll a veszély, hogy nem alakulhat ki átboltozódás. Ebben az esetben az alagút fejtése előtt a talajt külön meg kell erősíteni. Több módszer is van rá. Ilyen például a talajfagyasztás, vagy az 8.2 ábrán látható injektáló ernyő készítése. A 8.2.5. fejezetben Az épített környezet adottságai címszó alatt tárgyalom részletesen az alagút építése során fellépő mozgásokat.

Az 5-ös metró Könyves Kálmán krt. - Boráros tér közötti szakasza kéreg alatti, egyébként mélyvezetéses kialakítással lehet számolni. A mély vezetésű szakaszon 5 meghatározó pont van, amihez hozzá kell illeszteni a magassági vonalvezetést. Az első a Duna, melynél törekedni kell a minél mélyebb elkerülésre. A következő a Lehel térnél a 3-as metró, amely ezen a szakaszon kéreg alatti mélységben van vezetve, így alulról kell

kereszteznie. Hasonlóképpen kell eljárni a kis földalatti és a nagykörút alatti főgyűjtő keresztezésénél az Oktogonnál. A negyedik az Astoriánál a 2-es vonal amely alá nem érdemes lemenni. Az ötödik meghatározó pont, a Kálvin térnél a 3-as vonalát a 4-es vonala felülről kerüli, így az 5-ös vonal csak alulról tudja keresztezni. Ez az 5 pont nagyon behatárolja a magassági vonalvezetést, főleg ha figyelembe vesszük a maximálisan alkalmazható lejtők és emelkedők mértékét.

8.2.3. A magassági és vízszintes vonalvezetés

Az alagút funkciója határozza meg a magassági és vízszintes vonalvezetést. A szempontokat nem részletezem, csak nagy általánosságban tárgyalom, mert a pajzs kialakítását kis mértékben befolyásolja. Ezek a körülmények leginkább a pajzs irányíthatóságára hatnak ki. A mai modern számítástechnikával vezérelt irányítási rendszerek könnyen teljesítik a feltételeket. Inkább a fordulékonyság a meghatározó, melyet a pajzs hossza befolyásol. Minél rövidebb a pajzsköpeny, annál kisebb ívet lehet vele építeni. A jó fordulékonyság érdekében beépítenek csuklópontot is. Bangkokban a csapadékcsatornának 50 m sugarú ívét is meg tudták ezzel a módszerrel építeni. (8.3. ábra).



8.3. ábra: Csuklóval ellátott pajzs

A SMART alagútnál fordult elő, hogy egészen más szempontok alakították ki a vízszintes vonalvezetést. Kuala Lumpur érdekes magántulajdonra vonatkozó törvények miatt felszíni utak és közterületek vonalvezetését kellett követni az épülő alagúttal. Nem csak a felszínen lévő telek, hanem a föld magjáig lefelé terjedő rész is magántulajdon, így azt meg kellett volna vásárolni. Ehelyett inkább egy fordulékonyabb pajzsot alkalmaztak, mellyel jobban tudtak manőverezni a közterületek alatt.

A magassági vonalvezetés irányelvei és jellemzői metró alagút esetén (lejtviszonyok)

A metró alagútban fekvő vágányait legalább 3 ezrelék esésben kell építeni. Kéreg alatti alagutakban 2 ezrelék esés is megengedhető. Az állomásokat általában 3 ezrelékes, műszaki nehézségek esetén 2 ezrelékig csökkentett, vagy 5 ezrelékig növelt esésben kell elhelyezni.

A metró vonalain a legnagyobb megengedett emelkedő Budapesten 40 ezrelék.

A vízszintes vonalvezetés irányelvei és jellemzői.

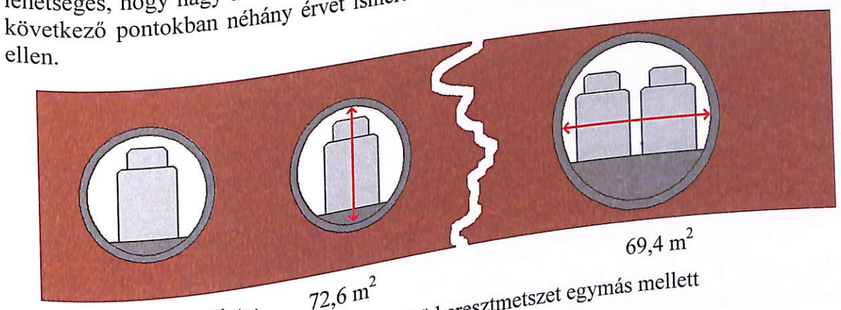
A vízszintes vonalvezetésű vasúti pályát egyenesekből és körívekből alakítják ki. A tervezésnél először az állomások helyeit kell kijelölni. A vonalat úgy kell tervezni, hogy az állomások a kiválasztott kedvező helyekre kerüljenek, és a vonalterv egyenes szakaszába illeszkedjenek be. Körívbe csak kivételes esetben kerülhet az állomás, és ekkor is csak 800 m-nél nagyobb sugarat szabad alkalmazni.

A budapesti metró forgalmi vágányaiban az oldalgyorsulás kiküszöbölése és a sínkopás csökkentése érdekében 500 m-nél kisebb sugarú ívet csak kényszerítő körülmények esetén, kivételesen szabad alkalmazni. Az ívsugár akkor sem lehet kisebb 400 m-nél. Külföldi metrókon egyes esetekben ennél kisebb ívsugarakat is (pl. 300 m) alkalmaznak. Üzemi

vágányokban 200 m, járműtelepi, harmadiksínes vágányoknál 150 m az alkalmazható legkisebb ívsugár. (Ábrahám 1982)

8.2.4. Az alagút, a műtárgyak geometriája (kitörési szelvény, vonalszakaszok hossza)

Az alagút vonalszakasz hosszát a vonalvezetés adja meg, míg a keresztmetszetét az alagút funkciója. Az 5-ös metró, gyakorlatilag nem is metró, hanem két HÉV vonalcsoportot köt össze a város alatt. Ebből következik, hogy az alagútban közlekedő vonatok felső vezetékes rendszerűek lesznek, mivel a felszínen a harmadik sínes megoldás nem alkalmazható. A felső vezetékes megtáplálás miatt azonban az alagúti szelvényt az eddig alkalmazott 5,20 m belső átmérőnél nagyobb szelvényűre, minimum 6,0 m-es átmérőjűre kell építeni. A 6,0 m-es belső átmérőhöz legalább 6,80-as átmérőjű pajzs szükséges, ez keresztmetszetben 2*36,3 m². Az építési kockázatokat összehasonlítva, a két nagyméretű alagút építése helyett, meggondolandó egy kicsivel nagyobb alagút építése, amiben egymás mellett elfér a két vágány. Egy kétvágányos alagút megépíthető egy 9,40 m-es átmérőjű pajzzsal. Ez keresztmetszetbe 69.4 m²-t jelent. Míg a két kis átmérőjű alagútnál a függőleges méretek határozzák meg az átmérőt addig a nagy átmérőjű alagútnál a vízszintes méretek. Így lehetséges, hogy nagy átmérőjű alagútnak kisebb a keresztmetszete, mint a két kisebbnek. A következő pontokban néhány érvet ismertetek az egy és a kétalagutas változatok mellett és ellen.

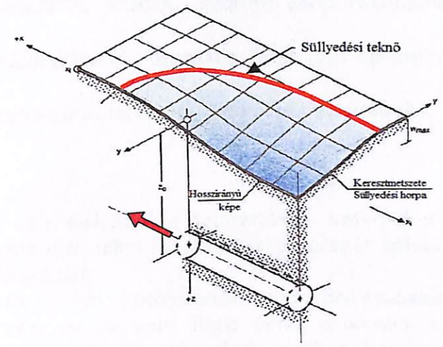


8.4. ábra: A két különböző keresztmetszet egymás mellett

8.2.5. Az épített környezet adottságai (felszín beépítettsége, stb.)

Az épített környezett szempontjából, a felszíni beépítettség mértéke a fontos. Olyan alagutaknál, mely tenger alatt, vagy autópálya alagutak esetén, ahol nem lakott terület alatt vezetik, ott sokkal kisebb gondot okoznak a süllyedések. Ezzel szemben lakott területen az alagutak általában a legsűrűbben beépített városrészek alatt haladnak el, ezért sokkal nagyobb problémát okozhatnak. Éppen ezért nem csak a süllyedés mértéke, de a süllyedési horpa mérete sem mindegy. Süllyedés nem csak az alagút szük keresztmetszete felett lép fel. Az alagútépítés során feszültség-átrendeződés, talajmozgások és ennek következtében külszíni elmozdulások jönnek létre. A felszínen a talaj átboltozódása miatt, az alagút keresztmetszetétől távolodva két oldalra egyre kisebb mértékben süllyedések alakulnak ki. A megváltozott térszín új alakja egy térbeli kiterjedésű süllyedési teknő (süllyedési horpa). A felszíni mozgások jelentkezése és ezáltal a horpa alakja és kiterjedése az üreg körüli talajtól, a talaj állapotától, településétől, szilárdsági és alakváltozási tulajdonságaitól, vastagságától, a talajvíz helyzetétől, az alagút mélységétől, méreteitől, az alkalmazott építési módszertől, a

beépülő alagút falazatától, a hátűr injektálásától, a túlfejtés mértékétől, stb. függ. (8.5. ábra és 8.6. ábra)



8.5. ábra: Süllyedési teknő kialakulása

Az előbb említett okok egymásra hatással vannak ok okozati összefüggésben. Kiemelném a túlfejtés problematikáját, mely talán a leginkább befolyásolja és ami miatt legnagyobbak a talajmozgások mértéke, illetve annak kockázata. Ez a körülmény a pajzs kiválasztásának szempontjából fontos lesz, hogy milyen fejtési módot kell választani a túlfejtés elkerülése érdekében. Minden típusnál van egy bizonyos mértékű túlfejtés melyből a süllyedések adódnak. A túlfejtés nem más, mint az alagút tejes keresztmetszetén kívül a többletben kifejtett talaj mennyisége. Ezt százalékban adják meg. Minden típusnál lehet tudni mekkora ez az érték átlagosan. Ezt nagyban befolyásolják a geológiai és hidrológiai viszonyok, illetve ezekhez megfelelően párosított fejtés és homlok megtámasztás módja. Bizonyos talajoknál még negatív túlfejtés is létrejöhet, amely viszont a felszínen a süllyedéshez hasonló teknő alakú térszínemelkedést eredményezhet. Ezek ugyanolyan károsak, mint a süllyedések. Könnyen belátható, hogy ennek mértékét le kell csökkenteni nullára. A túlfejtés lecsökkentése érdekében a kitermelt talaj mennyiségét pontosan figyelni kell az előrehaladás függvényében. Modern pajzsoknál általában mérik a kitermelt föld mennyiségét, a futószalagon elhelyezett súlymérő és lézer scanner segítségével, csak nem elég nagy pontossággal. A pontosabb méréshez megvannak a megfelelő módszerek. Például az EPB pajzsnál a kitermelt talaj súlyát és térfogatát pumpálva mérik. Az 5.3.1. EPB – földmegtámasztású pajzsok fejezetben látható az 5.13. ábra. Ezzel a módszerrel le lehet nullára csökkenteni a túlfejtést, amely bizonyított Londonban egy reptér alatti alagút építése során. A reptér folyamatos működése közben építették az alagutat és a felszínmozgások gyakorlatilag elhanyagolható mértékűek voltak.

Az éppen aktuális jogszabályok tekintetében meg kell vizsgálni a talajmozgások hatásterületbe eső elemeket. Meg kell vizsgálni milyen mértékben veszélyeztetik ezeket a



8.6. ábra: A felszíni horpa kialakulása jól látható a járda mentén (piros vonallal kirajzolva)

talajmozgások, és milyen mértékig viselik azokat el. Funkció szerinti csoportosításban a következő elemeket:

- épületek (lakó- és középületek, üzemek, pályaudvarok, speciális funkciójú építmények, műemlékek),
- közművek (víz-, csatorna-, gáz-, távhő-, elektromos-, telekommunikációs vezetékek),
- villamos és vasúti pályák,
- utak,
- hidak.

Ha ezek megtörténtek, akkor meg tudjuk adni mik azok a határértékek, amelyeket még elviselnek. Ez a művelet a kockázatelemzés. Ezek után lehet kiválasztani az alagút építésének technológiáját, mely képes megfelelni a kritériumoknak.

Persze nem csak a süllyedések, hanem épített környezetbe való beavatkozást is figyelembe kell venni egy metró építése során, de ez nem függ össze szorosan a zárt alagútépítés módjával. A dolgozatban éppen ezért nem is tárgyalom, csak néhány példát hozok fel, hogy érzékeltessem milyen fontos szempontokról van itt szó. Budapest példája mutatja, hogy földalatti, ill. metró építése a városi környezetet igen erősen befolyásolja.

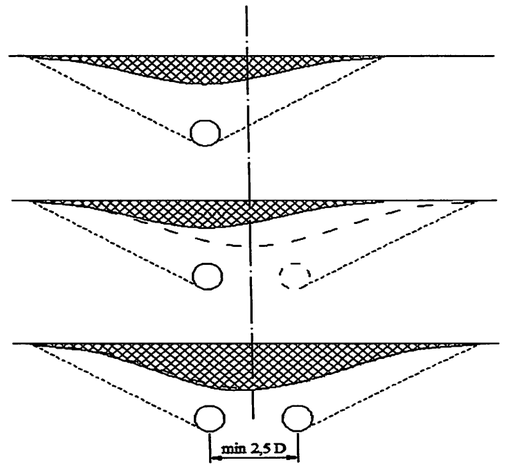
- A Millenniumi Földalatti Vasút építéséhez Terézváros jelentős épületállományát bontották le. Az Andrássy úton, mint fényűző sugárút, annak megfelelő új telekosztást valósítottak meg és azon elegáns épületeket emeltek. A Fővárosi Közmunkatanács városépítési akciójának következményeképpen értékek is pusztultak, ugyanakkor Budapest, Magyarország és Európa egyik legértékesebb épületegyüttese, városi környezete jött létre.
- Az első metró építésével Budapest kelet-nyugati tengelye erősödött meg és tisztult ki a Hegyalja út, Erzsébet-híd, Kossuth Lajos utca, Rákóczi út nyomvonala. Az építés következményeként néhány jelentősebb érték - szükségszerűen vagy feleslegesen - elveszett, mint a Blaha Lujza téri Nemzeti Színház, a Keleti (fő)pályaudvar előtere, a Baross szobor méltatlan új helye. A Rákóczi út felőli nézetben megjelenő Rottenbiller utca - Fiumei úti felüljáró, a Déli pályaudvar volt indítóháza és a régi villamos-forduló az épületével együtt, stb. Az új metró azonban óriási javulást hozott Buda és Pest tömegközlekedésében. A hidak permanens túlterhelésének tehermentesítésében, a budai és pesti belváros felszíni tömegközlekedésének és személygépkocsi forgalmának elviselhetőbb szinten tartásában.
- A második metró építésével Budapest - elsősorban a pesti oldal - észak-déli tömegközlekedése javult meg. Az építés következményeként néhány érték elveszett, mint az újpesti Árpád út térfala, ma is tátongó foghíj a Városkapu megállóban. Néhány helyi lakos az Üllői út és részben a Váci út mellett rosszabb helyzetbe került, hiszen a metróállomások ritkábbak, mint a korábban volt villamos megállók, így bár az eljutási idő átlagosan csökkent, mégis bizonyos csoportoknak a gyaloglási távolsága kényszerűen növekedett, stb.

A néhány példa is mutatja, hogy a város szövetébe történő beavatkozás mindig is sebekkel jár, még talán a legelőrelátóbb tervezéssel is. A mérleg másik serpenyőjében azonban a városi funkciók javulását és a városi környezetben hozott esztétikai, városképi értéket is súlyozni kell.

Az 5-ös metró vonalvezetése sűrűn beépített városrész alatt húzódik. Éppen ezért az egy és két alagutas módszernél, elsősorban a süllyedéseket vizsgáltam. Arra kerestem a választ, hogyan alakul a süllyedési teknő a két esetben.

Két alagút estén az alagutakat nem lehet egyszerre építeni. A két egymás mellett haladó pajzs okozta talajmozgások egymásra hatása miatt, nagyobb süllyedéseket okoznának. A két alagutat 2,5 D távolságra, budapesti metrók esetében 9-18 méterre építik meg egymás mellett.

Lemaradva egymástól, az első alagút építését 150 - 200 m-re követi a második alagút építése. Utóbbinál mindig valamivel nagyobb süllyedések jelentkeztek, mint az elsőnél. Ha egy keresztmetszetben vizsgáljuk az így kialakuló süllyedéseket, akkor az első alagút felett kialakult horpa, a második alagút építése során tovább süllyed. A két alagút felett egy összefüggő horpa alakul ki, mely sokkal szélesebb mezőben hat, mint egy alagút esetében. A süllyedési teknő alakja nem szimmetrikus, hanem kicsit eltolódik az először megépített alagút felé (8.7. ábra).



8.7. ábra: Süllyedési horpa kialakulás két alagút esetén

Számításokat végeztem a technológiából adódó süllyedési teknők alakulásáról az egy és két alagutas módszer esetére, amely részletesen a 10. Számítási melléklet fejezetben található. Megvizsgáltam külön a pesti és külön a budai oldalt, három különböző módszerrel.

Mind a három számítás alapján a két külön alagútnak 15-20 m-rel szélesebb a felszíni süllyedés hatászónája, mint egy alagút építése esetén. Ezzel szemben a legnagyobb süllyedések a különböző számítási módoknál eltérő eredményeket mutatnak. Az egy alagutas módszernél nagyobb süllyedések lépnek fel, de egyik számítás szerint ez a különbség jelentős, míg a másik kettő esetén elhanyagolható. Ugyanez áll fent a horpák meredekségének összehasonlításánál.

A teknő három kiszámolt jellemzője közül a legfontosabb a horpa meredeksége. Ez, illetve a horpa görbülete a legveszélyesebb az épületekre nézve. Az épületek alatt ez süllyedés különbséget és húzást vagy hajlítást idéz elő, melyből az épületkárok keletkeznek.

A három féle számítások közül kettőt tapasztalati és egyet véges elemes módszerrel végeztem . A valóságot a több talajfizikai jellemzőt is figyelembe vevő véges elemes módszer közelíti meg a legjobban. Ennek figyelembe vételével, főleg ebből a számításból kapott végeredmények alapján, minimális a különbség a süllyedések nagysága és a horpa meredeksége tekintetében. A számítások alapján a két alagutas módszer jobbnak mutatkozik. Azonban ezek a különbségek olyan minimálisak, ami nem zárja ki az egy alagutas módszer alkalmazását.

8.2.6. A természeti környezet szempontjai

A természetre ható zóna mérete hasonlóan alakul a felszíni horpa alakulásához. Városi környezetben kisebb problémát okoz, de környezetvédelem szempontjából kiemelten érzékeny területeken sokkal fontosabb és nagyobb figyelmet kell fordítani erre. A 4-es metró estén a Duna alatti szakaszon módosítani kellett a vonalvezetés környezetvédelmi okokból, a dolomitban található karsztvizek kikerülése miatt.

A környezetet érő hosszabb távú hatások, amennyiben betartják az építés során az előírásokat, nem számottevőek az építés folyamata miatt, inkább a végleges műtárgy hatásai a

mértékadóak. Erre külön tanulmányokat és vizsgálatokat kell készíteni, de ezeket a dolgozat nem tárgyalja.

Egy nagyobb szelvényű alagút építése kisebb kockázatot jelent a természeti környezet szempontjából, mert itt nem a süllyedéseket, hanem a hatászónáját kell inkább figyelembe venni. A számításokból jól látszik, hogy 15-20 m-rel kisebb zónát érintene (10. Számítási melléklett).

8.2.7. A humán környezet elvárásai (zaj, rezgések, por, közlekedés, stb.)

A rezgés és zajvédelemre különböző szabványokban foglalt határértékeket kell betartani. Ezek a határértékek függenek a beépítettség típusától. Általában külön vizsgálják az épületre és személyekre ható rezgéseket. Míg az épületre a rezgések sebessége van hatással, addig az emberre a rezgésből adódó gyorsulás.

A közlekedési igényeket már a vonalvezetés kitűzésénél részletesen kellett vizsgálni. Itt inkább arra kell gondolni, hogy az építés során, minél kisebb mértékben zavarja a felszíni közlekedést.

A nagyobb alagútszelvény, a nagyobb hely miatt kedvezőbb lehetőséget biztosít a zaj és rezgés védelem szempontjából. A sínpárok alatti tér sokkal nagyobb, mely azzal jár, hogy nem kell drágább kis helyigényű rezgésvédelmet beépíteni. A nagy átmérő még arra is lehetőséget ad, hogy akár zúzottkő ágyazatot alkalmazzanak, amely a zaj és rezgésvédelem szempontjából kedvezőbb lehetőségeket biztosít.

Hátránya viszont az, hogy a szellőzéshez és a tűzvédelemhez sokkal nehezebb a légmozgást biztosítani. A kis átmérőnél, még ha a kétcsöves rendszerről van is szó, a légmozgást könnyebb biztosítani. A nagy átmérőnél sokkal nagyobb levegő, illetve füst elszívási kapacitásra van szükség.

8.2.8. A gazdaságossági szempontok

A gazdasági szempontok mindig nagyon fontosak. Tanulmányok készülnek a beruházás megtérüléséről, létjogosultságáról, több szempontból megvizsgálva. Nagyon fontos, hogy egy hosszabb alagút építése még a gazdag országok büdzséjét is megterheli. Ezek akkora összegek, hogy a közvélemény is fokozott figyelmet fordít rá. Az építési technológiák is befolyásolják a végleges árat. Itt mérlegelni kell, mik azok a felvállalható kockázatok, melyeknek anyagi vonzata már túl nagy lenne. Lehet alagutat építeni olcsón és gyorsan, de nem mindegy, hogy utána mennyi kár keletkezik a felszínen. A felszíni kárrendezéseket az építtetőnek kell fizetnie és összege magasabbra rúgna, mint egy drágább, de megbízhatóbb technológia alkalmazása.

Sajnos nagyon nehéz hozzájutni tényleges árakhoz, főleg a pajzsok árához, de az egyéb tételekhez is. A vizsgálataim során megpróbáltam könnyen belátható érveket felhozni.

Az első szempont a pajzsok ára. Ez függ a pajzs típusától, a beépített, alkalmazott rendszerektől és a gyártótól. A világon kevés cég foglalkozik ilyen gépek gyártásával. Ráadásul e cégek eltérő elveket vallanak. Jól szemlélteti a pajzsok kialakítása is. A pajzsok váza általában mindig egyedi. A berendezései általában a *Herrenknecht* gépein már máshol is alkalmazott jól bevált alkatrészekből áll össze, sok esetben használt, felújított részeket is alkalmaznak. Arra törekednek, hogy ha nem is a teljes gép, de minél több alkatrésze többször felhasználható legyen. Más pajzsgyártóknál, főleg a Japán cégek esetén teljesen egyedi gépet terveznek minden alkalommal, mert úgy gondolják minden alagúthoz teljesen egyedi gépekre van szükség. Sajnos nincs még közelítő becsült érték sem, hogy mennyibe kerülhet a két

kisebb, vagy az egy nagyobb átmérőjű pajzs. Így csak valószínűsítem, hogy a nagyobb átmérő esetén csak egy gépláncot kell megépíteni. Az átmérő különbsége miatt előállítása ugyan többe kerül, mint egy kisebbé, de így is olcsóbb lehet, mint a két kisebb.

Ennél sokkal egyértelműbb, hogy egy pajzs esetén ez sokkal egyszerűbb kiszolgálás és csak egy ellátó rendszert kell kiépíteni, viszont annak nagyobb teljesítményűnek kell lennie. Ennek ellenére ez utóbbi megoldás egyszerű és gyorsabb, amiből következik, hogy olcsóbb is. A 8.2.9. Az építési idő címszó alatt tárgyalom részletesebben.

A keresztmetszetből adódó különbségből egyértelműen következik, hogy a kisebb keresztmetszet olcsóbb és ez az alagút hosszának növekedésével egyre nagyobb mértékű. A 8.1. táblázatban néhány rövid számítást végeztem ezzel kapcsolatban.

8.1. táblázat: Keresztmetszeti jellemzők

Átmérő (m)	 6,8*2	 9,4	**Különbség**
Felülete (m^2)	72,6	69,4	**3,2**
Kitermelt föld mennyisége 1 km-en (m^3/km)	72597	69363	**3234**
Tübbing vastagsága (m)	0,3	0,4	-
Tübbing térfogata 1 km-en (km/m^3)	6264	5778	**487**

Jól látszik, hogy már egy km esetén a kitermelt föld mennyiségének különbsége igen jelentős. Anyagi vonzatai nem csak kifejtésből és az alagútból való kiszállításából, hanem elhelyezéséből is adódnak. Minden egyes köbméter kitermelt talaj komoly pénzekbe kerül. Egy kilométeren 3234 m^3-rel több földdel kellene foglalkozni két kisebb alagút esetén. Ugyan ez látszik a beépített falazat mennyiségén. Egy kilométeren 487 m^3-rel több betonra lenne szükség két kisebb alagút esetén. Ha ezt a teljes hosszra számoljuk, ami több mint 8 km, akkor ez egy igen jelentős különbség. Ezeket figyelembe véve, akkor feltétlenül a nagyobb átmérőjű pajzs alkalmazása a célszerűbb.

8.2.9. Az építési idő

A mai tendencia azt mutatja, hogy az építési időt egyre inkább megpróbálják lerövidíteni, egyre szűkülnek a tényleges építésre kiadott határidők. Érdekes adat, hogy egy nagyobb beruházás lefolytatásának tényleges építési ideje a teljes projekthez képest csak egyharmada része. A fennmaradó idő a pályázatkiírás és elbírálás, tervezés, de leginkább az engedélyezési procedúrákra megy el.

Az alagutak építése során sincs ez másképp. Városi környezetben sokkal több problémát okoznak az engedélyeztetések. Sokkal több probléma merül fel, mint egy ritkábban lakott területen. Nem csak a hatóságokkal, de a lakossággal való együttműködés is nehezíti a helyzetet. A másik probléma, hogy biztosítani kell a beruházás során a város zavartalan életét.

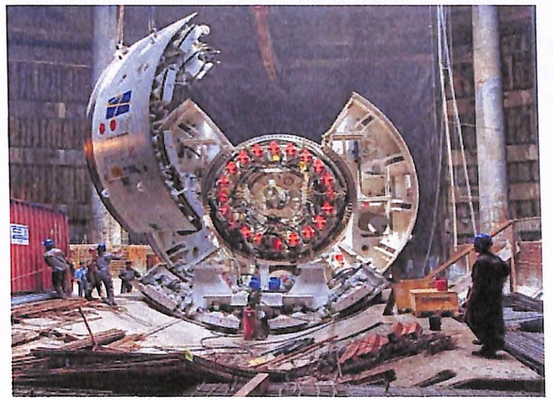
Ez komoly szervezési munkákat igényel. Itt jönnek képbe az építési határidők, melyek minél rövidebbek, annál hamarabb térhet vissza a város az eredeti, illetve megújult életritmusához.

A modern pajzsok mára már annyira gyorsak, hogy a legnagyobb problémát az építés közbeni kiszolgálás jelenti. A nem megfelelő kiszolgálás nagyban befolyásolja az építési időt. A kiszolgáláson belül a szállítás okozza a legnagyobb problémát (a tübbingek és az injektáló anyag be- valamint a kifejtett föld kiszállítása). Ez még nehezebb a metró építése során, ahol még az állomások építésével is össze kell hangolni a pajzs kiszolgálását.

Egy pajzs alkalmazása esetén az építési idő is lerövidül. Azonos talajban ugyan olyan gyorsan haladhatnak az azonos típusú pajzsok, de a kiszolgálás egyszerűsödik. Nem kell külön - külön kiszolgálni a két pajzsot, amivel időt lehet megtakarítani. Két alagút esetén a keresztalagutak építése is nagyban lassítja az építkezést. A keresztalagutak építése miatt a pajzs kiszolgálása lelassul, mert az egyik alagutat le kell zárni. Ennek eredményeképpen csak egy irányú forgalmat tudnak biztosítani. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a kiszolgálást a keresztalagutakhoz is az indítóaknából a kész alagúton keresztül kell megoldani, ami még bonyolultabb és még lassabb kiszolgálást eredményez. A másik érv, a nagy átmérő mellett, hogy amennyiben a kész állomásszerkezetbe érkezik a pajzs, csak egy fogadását és újraindítását kell megszervezni, mely nem csak a pajzs haladását gyorsítaná, hanem az állomások építését is. Az építési idő szempontjából egyértelműen az egy nagy átmérőjű alagút lenne a jobb választás.

8.3. Javaslat

A szempont rendszerből kimaradt a biztonsági rendszerek, menekülő utak vizsgálata. Nem vizsgáltam, hogy a két kis átmérőjű, vagy az egy nagy átmérőjű alagút lenne a biztonságosabb, vagy könnyebben biztonságosabbá tehető. Ennek oka, hogy erre nincsenek Magyarországon kész szabványok, így ez mindkét megoldás esetén külön tervezési és engedélyezési feladatot jelent. Bár a biztonsági szempontok nagyon fontos elemei az alagutaknak, összetettsége és terjedelme miatt kihagytam dolgozatomból.



8.8. ábra: Sau Paulo-ban a 9,5 m-es EPB pajzs összeszerelés közben

A szempontrendszer alapján kapott eredményeket összegezve az 5-ös vonal belső szakaszának építésére javaslatom, egy olyan nagy átmérőjű, (kb. 9,40 méteres) EPB pajzs alkalmazási lehetőségének vizsgálata, amely által épített alagútban a két felsővezetékes űrszelvény elfér egymás mellett. EPB pajzs feltétele a 4-es metró pajzsainak jó teljesítménye a pesti oldalon. Hasonló megoldásokat már alkalmaztak máshol is. Például Sau Paulo-ban egy 9,5 m átmérőjű, Barcelonában pedig egy 9,4 m átmérőjű EPB pajzzsal építettek metró alagutat városi környezetben (8.8. ábra)

9. Összegzés

A mai modern pajzsoknál, mint azt már többször kihangsúlyoztam a dolgozat során, nincsenek olyan követelmények, melyeket ne tudnának teljesíteni a pajzs tervezése során. Bár sok tényezőt megemlítettem, melyek nagyban befolyásolják a pajzsok kialakítását, de a pajzsgyártóknak nem jelent megoldhatatlan problémát. Két fő kérdés számít döntően kiválasztásuk során:

- gazdasági szempontok
- várható süllyedések mértéke, az építési kockázatok minimalizálása.

A gazdasági szempontok mindig az elsők. Itt nem arra gondolok, hogy a műtárgy, melyet építeni akarnak, megtérül-e, és hogyan, bár ez is fontos kérdés. A pajzsok beszerzése során a beruházónak lehetősége van a legkedvezőbb ajánlat kiválasztására. A kiírások sok technikai részletet írhatnak elő, amelyeket teljesíteni kell.

A minőségi szempontok közül legfőbb szerepet a várható süllyedések mértéke játssza. A kitételek nagy részét közvetlenül és közvetetten ez befolyásolja. A dolgozat során, az kapott hangsúlyt, hogy milyen fontos szerepe volt a pajzsok fejlődés történetében a felszíni süllyedések minimalizálásának.

Az alagútépítési eljárások során általában mindig számolni kell talajmozgásokkal. Az alagútépítés ugyanis megbontja a kőzet egyensúlyi helyzetét és új egyensúlyi helyzet kialakulását idézi elő, amely mindig alakváltozásokkal és elmozdulásokkal jár. Bár a kezdeti alagútépítéseknél még az elsődleges cél az alagút minél kisebb veszteségek és áldozatok nélküli elkészítése volt, de a gyors fejlődésnek köszönhetően ezeket az akadályokat hamar leküzdötték. Már a legkezdetlegesebb pajzsokkal is el tudták végezni a feladatukat. Ettől kezdve nem az volt a kérdés, hogy meg tudják építeni az alagutat, hanem hogy milyen gyorsan és hogy milyen felszíni károkkal kell számolni. Az építési sebességet nem csak a fejtési sebesség és a talajok keménysége befolyásolta, hanem ha közvetve is, de a felszíni süllyedések. Ez könnyen belátható, és itt visszautalok a bevezetőkben írtakba. Ha üreget képezünk ki, akkor az üreg tetejének legkisebb elmozdulása után a talaj az üreg fölött bizonyos mértékben átboltozódik és az eredeti feszültségállapot megváltozik. Az egyensúly azonban nem áll rögtön helyre, és az alá nem támasztott felső rétegek lassan süllyedni kezdenek, esetleg az oldalak is befelé nyomódnak. A környező földtömegek meglazulnak, és a lazulás állandóan tovább terjed. Ez addig fokozódhat, míg végül az üreg fölötti földtömeg beomlik, úgynevezett felszakadás jön létre, ami akár a felszínig is felérhet. Ebből következik, hogy minél kevesebb idő telik el a fejtés, az esetlegesen ideiglenes biztosítás és a végleges megtámasztás között, annál kisebbek a talajmozgások. Természetesen ez nem mehet a minőség rovására. A nem elég precíz munka is süllyedésekkel járhat. Ha végigtekintjük a dolgozatban a pajzsok fejlődését, jól látszik ezen elvek figyelembevétele.

Talajmozgások mindig előfordulnak. A beépített dúcolat és a végleges falazat is csak további alakváltozásokkal képes a terhelés felvételére. A falazatok mögött általában üregek, hézagok maradnak vissza, amelyeknek injektálással való kitöltése esetén is kisebb mozgások bekövetkeznek. Így elkerülhetetlen a talajmozgások létrejötte. Mióta az injektálással való kitöltést alakmázzák, negatív süllyedésekről is beszélhetünk (9.1. ábra). Ilyen akkor fordulhat elő, ha a kitöltendő üregbe több injektáló masszát juttatnak, mint amekkora az üreg. A felszínen felpúposodás alakul ki, amely ugyanolyan veszélyeket rejt magában, mint a süllyedések. Arról már sokat írtam az előző fejezetekben, hogy a süllyedések mikor jöhetnek létre. A felszínen bekövetkező süllyedések elsődlegesen épület-, és építménykárokat, valamint a közműhálózat rongálódását okozhatja. Egy metróvonal építése során, a közművek, és épületek száma, melyek alatt az alagút áthalad, igen jelentős. Ha az építkezés során a süllyedések miatt károsodnak, akkor ezeket javítási, szélsőséges esetben újraépítési költségei az adott metróberuházást terhelik. Ezek a költségek az egekbe rúghatnak egy rosszul megválasztott, megépített, helytelenül használt pajzs esetében.



9.1. ábra: A pajzs injektáló rendszere által kiszorított talajvíz 40 m mélyről szökőkútként tör a felszínre egy cementálatlan extensométer járatán keresztül

Éppen ezért nagyon fontos szerepe van az alapos előkészítő munkának. Ennek során az alagútépítés közvetlen, és közvetett környezetét a lehető legpontosabban föl kell tárni, hogy a legjobb döntést tudjuk hozni az alkalmazandó pajzs tekintetében.

10. Számítási melléklet

Számítás az 5-ös metróra vonatkozik, azt vizsgáltam, hogy két 6,8 méter átmérőjű alagút, vagy egy 9,4 méter átmérőjű alagút építése közben bekövetkező süllyedések milyen hatással vannak a felszínre. Arra a kérdésre kerestem a választ, hogy melyik esetben nagyobbak a süllyedések és hogyan alakul a süllyedési horpa mérete, zónája és meredeksége. Az alagutak nagy hosszára és általában a változatlan keresztmetszetére tekintettel a süllyedési teknő számítását síkbeli feladatként kezelik. A kétféle keresztmetszeti kialakítás érdekében mind két süllyedési horpát számítottam, háromféle módszerrel. A nyomvonalra jellemző fúrásszelvényekkel dolgoztam, melyeket a 4-es metró szakvéleményeiből válogattam ki. Az egyik horpát a Kálvin tér és Keleti pályaudvar állómásokhoz készült szakvélemény alapján készítem, melynek talajviszonyai jellemzőek az egész pesti oldalra és a tervezett 5-ös vonal vonalvezetés is itt halad. Az 5-ös vonal a Kálvin téren keresztezi a 4-es vonalat melynek 22 m mélyen van a legmélyebb pontja. Valamint a 3-as vonalat is, mely 2 m-rel mélyebben egy 6 m átmérőjű alagútban halad. Ezeket alulról kerüli, 3 m-rel mélyebben elkerülve a 3-as vonalat, így 33 m magas földtakarással kell számolni. A pesti oldalon jellemző, hogy a felső rétegekben szemcsés talaj helyezkedik el és csak mélyebben találhatók az agyagrétegek. Ez a kettős réteg befolyásolja a süllyedési horpa alakulását is. A másik számítást a Móricz Zsigmond körtéri állomás szakvéleménye alapján végzem, mely bár mesze van a tényleges vonalvezetéstől, de talajviszonyai nagyon hasonlóak az 5-ös metró budai oldalon vezetett szakaszával. A budai oldalon a Duna alatti átvezetés határozza meg a függőleges vonalvezetést. Számításaimban az alagút a felső rakpartokhoz mérve mintegy 30 m mélyen kerüli el a folyót. A talaj jóval kedvezőbb, mint a pesti oldalon, mert itt a felszíntől végig kötött talajokkal találkozunk. Számításom során először a 2-es és 3-as metró vonal tapasztalati képletei alapján készítem el a süllyedési görbéket (ezek a tapasztalatok elsősorban a pesti oldali talaj viszonyokra vonatkoznak). Ez az elmélet már legalább 30 éves. Ezért végzek még egy számítást, mely a tudomány mai állása alapján elfogadott tapasztalati képleteket alkalmaz. Végül a Plaxis program segítségével készítettem el a süllyedési horpákat. Plaxis programmal végeztem még egy kontrollszámítást. A modellt a Keleti pályaudvar térségére jellemző talajrétegződés alapján készítettem. Ezzel szeretném igazolni, hogy a leegyszerűsített modellek, amelyekkel számításaimat végzem, közelítőleg megegyeznek a valósággal. Számításaim során csak a túlfejtésből adódó süllyedést vettem figyelembe.

A túlfejtés a homlok fejtése közben kifejtett többletet jelenti, ez a kifejtett térfogat és az alagút térfogatának különbsége. A fejtés közben a nyomások hatására a talaj, főleg a főténél felszakad és benyomul az alagútba. A túlfejtés miatt az alagút felett térfogatveszteség jön létre, melyek a felszínen a süllyedéseket okozzák. A térfogatvesztés mértéke leginkább a homlokmegtámasztás módjától és a fejtett talaj tulajdonságaitól függ.

Térfogatveszteség V_l (Rlaph Peck 1969):

V_d - kifejtendő talaj térfogata a pajzs keresztmetszeti adataiból (marótárcsa átmérője)
V_e - teljes kifejtett térfogat, a ténylegesen kifejtett talaj mennyisége
$\Delta V = V_e - V_d$

$$V_l = \Delta V / V_e$$

Jellemző térfogatveszteségek:

- Nyitott homlokú pajzs állékony agyagtalajban 1,0-2,0 %
- Aktív homlokmegtámasztás (EPB, Slurry) mellett szemcsés talajban 1,0-2,0 %
- Aktív homlokmegtámasztás (EPB, Slurry) mellett agyag talajban 0,5-1,0 %

A dolgozatban EPB pajzsos technológiát javaslok, így a túlfejtés mértékét is ilyen alagútépítés során tapasztalt értékre veszem fel. A 4-es metró építésével kapcsolatban a térfogatveszteségre mért adatok még nem állnak rendelkezésemre. Előzetes számítások készültek, így ezeket használom fel. Ezen számítások szerint a túlfejtés 1% körül alakul.

A két 6,8 m átmérőjű alagút esetén a tengelyek távolságát úgy vettem fel, hogy megfeleljen a minimumnak megadott 2,5D távolságnak.

10.1. Számítások a 2-es és 3-as metró tapasztalatai alapján

A süllyedési teknő tapasztalati alapon való meghatározásához a legnagyobb süllyedés *(s_{y0})* és a teknő szélességének *(2L)* ismerete szükséges. A süllyedések jó közelítéssel az alagút középpontja felé sugárirányban lépnek fel, így az eredő süllyedés a függőleges elmozdulásból egyszerűen meghatározható.

A tapasztalati képlet alapján megbecsüljük a legnagyobb süllyedést. A teknő szélességi mérete a határszög (β) felvételével határozható meg (10.1. ábra).

A határszög általában 30° körüli érték a budapesti tapasztalatok szerint. Homoktalajokban kisebb, 23°-30°, agyagtalajokban nagyobb, 30°-38°.

A teknő fél szélessége:

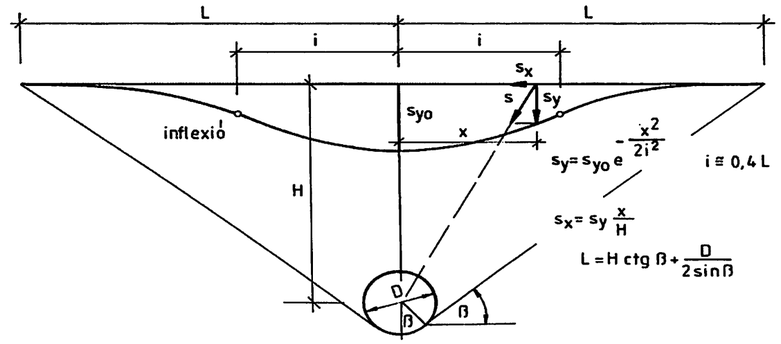
$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta} + H \cdot \operatorname{cotg}\beta ,$$

a jelölések a 10.1. ábrán láthatók.

A süllyedési teknőt kapcsolatba lehet hozni a kibontott üreg területének nagyságával. *Aversin* görbéjét alkalmazva, a süllyedési teknő területe:

$$A = 0{,}906 \cdot s_{y0} \cdot L_0$$

így az s_{y0} értékét L ismeretében közelítőleg meg lehet határozni, *A-t* a megbecsült 1%-ra felvéve. (Petrasovics, Fazakas, Kovácsházy. 1992)

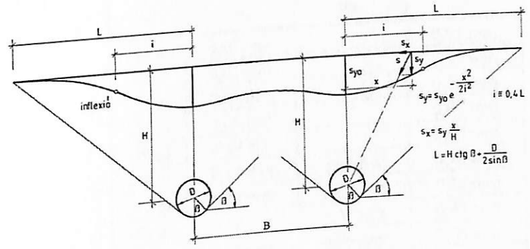


10.1. ábra: Süllyedési teknő szélessége és jellemző adatai

10.1.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút

Alapadatok:

D= 6,8 m
B_f= 25°
H_f= 22,5 m
B_a= 35°
H_a= 13,9 m
B= 20 m
Túlfejtés: 1 %



Egy alagút esetén:

Alagút területe

$$T = \frac{D^2 \cdot 3{,}14}{4} = 36{,}3 \ m^2$$

Süllyedési teknő területe

$$A = T \cdot 0{,}01 = 0{,}363 \ m^2 = 363000 \ mm^2$$

A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta_a} + (H_f \cdot \operatorname{cotg}\beta_f + H_a \cdot \operatorname{cotg}\beta_a) = 74{,}03 \ m$$

Legnagyobb süllyedés a süllyedési teknő területéből kifejezve

$$A = 0{,}906 \cdot s_{y0} \cdot L_0$$

$$s_{y0} = \frac{A}{0{,}906 \cdot L_0} = 0{,}00541 \ m = 5{,}41 \ mm$$

Inflexiós pont

$$i = 0{,}4 \cdot L = 29{,}61 \ m$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

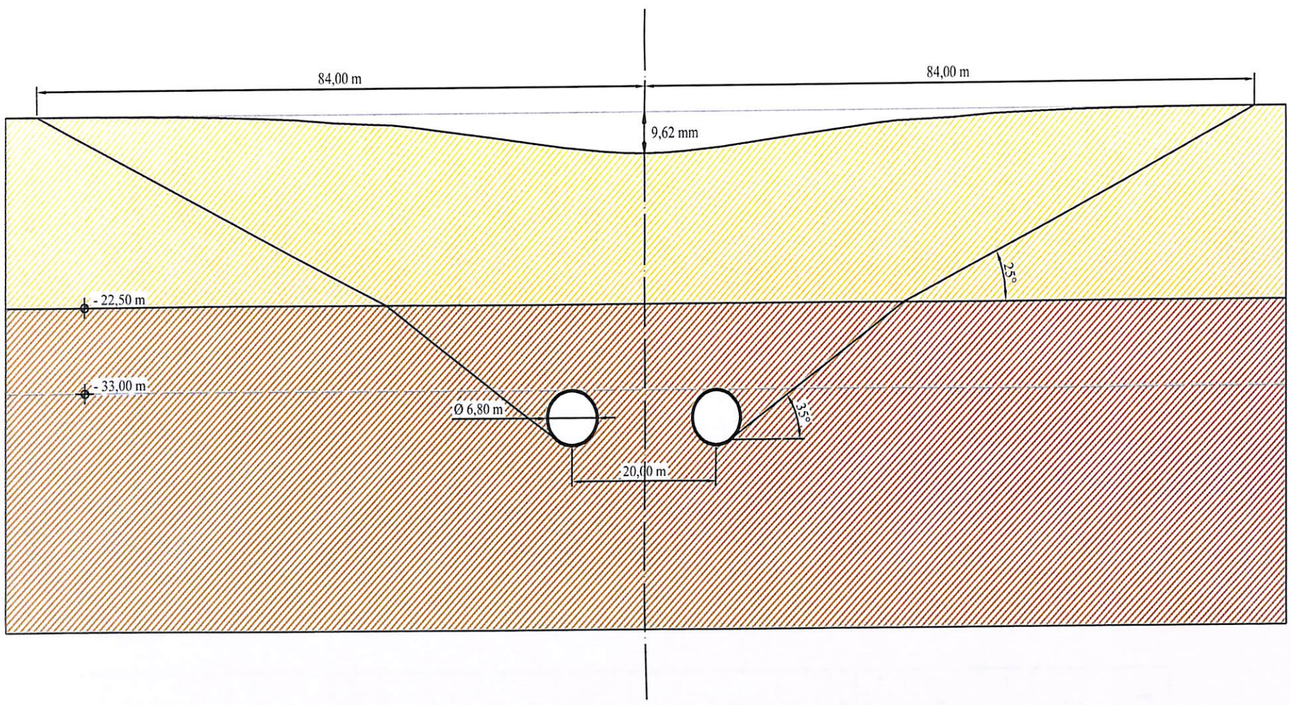
$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

A süllyedési horpát az R10.1 4/1-es rajzon ábrázoltam.

Süllyedések számítása 4 méterenként

Egy alagút esetén	
x	s_y
-76 m	0,01 mm
-72 m	0,01 mm
-68 m	0,03 mm
-64 m	0,05 mm
-60 m	0,09 mm
-56 m	0,15 mm
-52 m	0,25 mm
-48 m	0,39 mm
-44 m	0,59 mm
-40 m	0,87 mm
-36 m	1,23 mm
-32 m	1,68 mm
-28 m	2,21 mm
-24 m	2,80 mm
-20 m	3,43 mm
-16 m	4,04 mm
-12 m	4,59 mm
-8 m	5,03 mm
-4 m	5,31 mm
0 m	5,41 mm
4 m	5,31 mm
8 m	5,03 mm
12 m	4,59 mm
16 m	4,04 mm
20 m	3,43 mm
24 m	2,80 mm
28 m	2,21 mm
32 m	1,68 mm
36 m	1,23 mm
40 m	0,87 mm
44 m	0,59 mm
48 m	0,39 mm
52 m	0,25 mm
56 m	0,15 mm
60 m	0,09 mm
64 m	0,05 mm
68 m	0,03 mm
72 m	0,01 mm
76 m	0,01 mm

Két alagút összegzése			
x	s_{1y}	s_{2y}	$\sum s_y$
-86 m	0,01 mm		0,01 mm
-82 m	0,01 mm		0,01 mm
-78 m	0,03 mm		0,03 mm
-74 m	0,05 mm		0,05 mm
-70 m	0,09 mm		0,09 mm
-66 m	0,15 mm	0,01 mm	0,16 mm
-62 m	0,25 mm	0,01 mm	0,26 mm
-58 m	0,39 mm	0,03 mm	0,42 mm
-54 m	0,59 mm	0,05 mm	0,65 mm
-50 m	0,87 mm	0,09 mm	0,96 mm
-46 m	1,23 mm	0,15 mm	1,39 mm
-42 m	1,68 mm	0,25 mm	1,93 mm
-38 m	2,21 mm	0,39 mm	2,60 mm
-34 m	2,80 mm	0,59 mm	3,40 mm
-30 m	3,43 mm	0,87 mm	4,30 mm
-26 m	4,04 mm	1,23 mm	5,27 mm
-22 m	4,59 mm	1,68 mm	6,27 mm
-18 m	5,03 mm	2,21 mm	7,24 mm
-14 m	5,31 mm	2,80 mm	8,12 mm
-10 m	5,41 mm	3,43 mm	8,84 mm
-6 m	5,31 mm	4,04 mm	9,35 mm
-2 m	5,03 mm	4,59 mm	9,62 mm
2 m	4,59 mm	5,03 mm	9,62 mm
6 m	4,04 mm	5,31 mm	9,35 mm
10 m	3,43 mm	5,41 mm	8,84 mm
14 m	2,80 mm	5,31 mm	8,12 mm
18 m	2,21 mm	5,03 mm	7,24 mm
22 m	1,68 mm	4,59 mm	6,27 mm
26 m	1,23 mm	4,04 mm	5,27 mm
30 m	0,87 mm	3,43 mm	4,30 mm
34 m	0,59 mm	2,80 mm	3,40 mm
38 m	0,39 mm	2,21 mm	2,60 mm
42 m	0,25 mm	1,68 mm	1,93 mm
46 m	0,15 mm	1,23 mm	1,39 mm
50 m	0,09 mm	0,87 mm	0,96 mm
54 m	0,05 mm	0,59 mm	0,65 mm
58 m	0,03 mm	0,39 mm	0,42 mm
62 m	0,01 mm	0,25 mm	0,26 mm
66 m	0,01 mm	0,15 mm	0,16 mm
70 m		0,09 mm	0,09 mm
74 m		0,05 mm	0,05 mm
78 m		0,03 mm	0,03 mm
82 m		0,01 mm	0,01 mm
86 m		0,01 mm	0,01 mm



Megjegyzés:

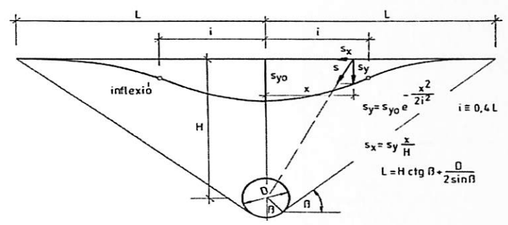
- Szemcsés talaj
- Agyag talaj
- A süllyedések függőleges irányban M 1:1,5
- Minimálsi földtakarás

SZIE – YMÉTK KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK			2008/2009 II. félév
Pajzsos alagútépítés			R10.1 4/1
10.1. A 2-es és 3-as metró tapasztalatai alapján 10.1.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút			M 1:75 2009.05.19
tervező: Németh Zsolt	belső konz.: Keszeyné Say Emma		külső konz.: Dr. Greschik Gyula

10.1.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút

Alapadatok:

D= 9,4 m
B_f= 25°
H_f= 22,5 m
B_a= 35°
H_a= 15,2 m
B= 20 m
Túlfejtés: 1 %



Alagút területe

$$T = \frac{D^2 \cdot 3{,}14}{4} = 69{,}4 \ \text{m}^2$$

Süllyedési teknő területe

$$A = T \cdot 0{,}001 = 0{,}694 \ \text{m}^2 = 694000 \ \text{mm}^2$$

A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta_a} + (H_f \cdot \operatorname{cotg}\beta_f + H_a \cdot \operatorname{cotg}\beta_a) = 78{,}15 \ \text{m}$$

Legnagyobb süllyedés a süllyedési teknő területéből kifejezve

$$A = 0{,}906 \cdot s_{y0} \cdot L_0$$

$$s_{y0} = \frac{A}{0{,}906 \cdot L_0} = 0{,}0098 \ \text{m} = 9{,}8 \ \text{mm}$$

Inflexiós pont

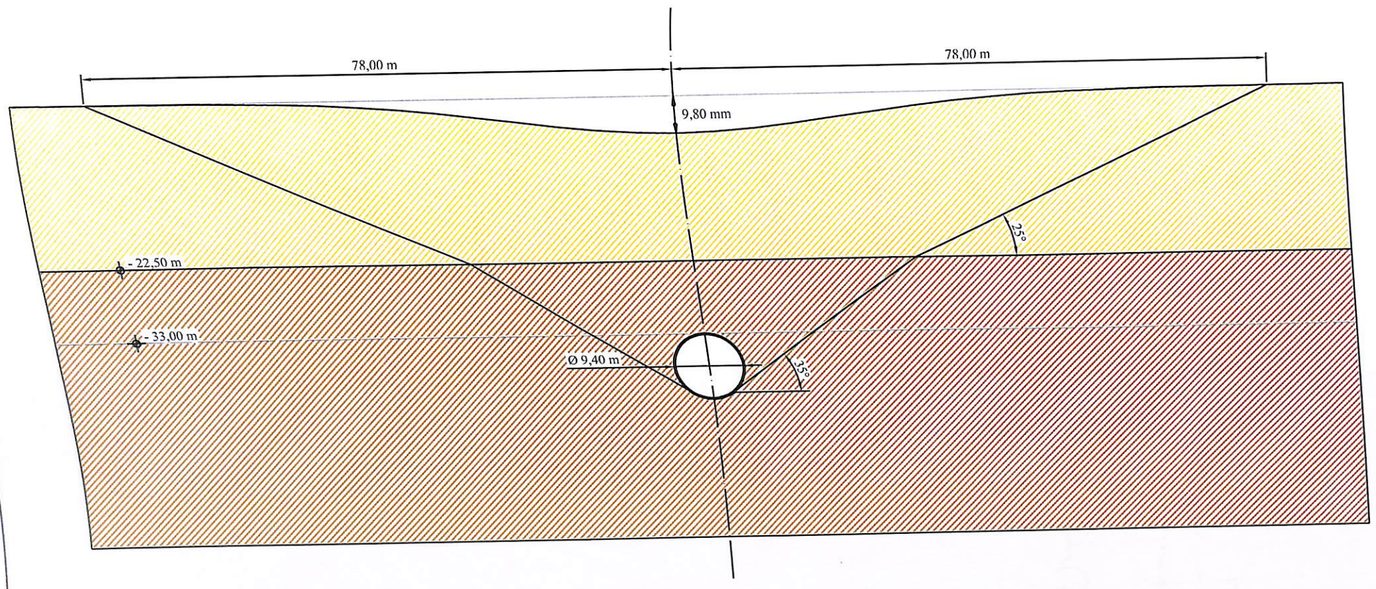
$$i = 0{,}4 \cdot L = 31{,}26 \ \text{m}$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

A süllyedési horpát az R10.1 4/2-es rajzon ábrázoltam.

Egy alagút esetén	
x	**s_y**
-80 m	0,01 mm
-76 m	0,03 mm
-72 m	0,05 mm
-68 m	0,09 mm
-64 m	0,15 mm
-60 m	0,25 mm
-56 m	0,40 mm
-52 m	0,62 mm
-48 m	0,93 mm
-44 m	1,35 mm
-40 m	1,91 mm
-36 m	2,60 mm
-32 m	3,44 mm
-28 m	4,39 mm
-24 m	5,44 mm
-20 m	6,51 mm
-16 m	7,54 mm
-12 m	8,46 mm
-8 m	9,18 mm
-4 m	9,64 mm
0 m	9,80 mm
4 m	9,64 mm
8 m	9,18 mm
12 m	8,46 mm
16 m	7,54 mm
20 m	6,51 mm
24 m	5,44 mm
28 m	4,39 mm
32 m	3,44 mm
36 m	2,60 mm
40 m	1,91 mm
44 m	1,35 mm
48 m	0,93 mm
52 m	0,62 mm
56 m	0,40 mm
60 m	0,25 mm
64 m	0,15 mm
68 m	0,09 mm
72 m	0,05 mm
76 m	0,03 mm
80 m	0,01 mm



Megjegyzés:

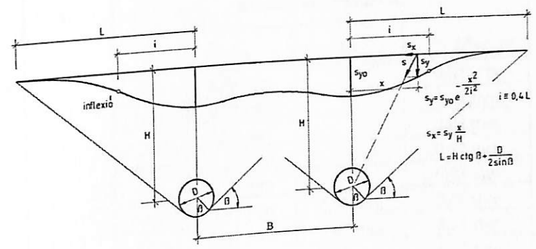
- Szemcsés talaj
- Agyag talaj
- A süllyedések függőleges irányban M 1:1,5
- Minimálsi földtakarás

SZIE – YMÉTK KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK	2008/2009 II. félév
Pajzsos alagútépítés	R10.1 4/2
10.1. A 2-es és 3-as metró tapasztalatai alapján 10.1.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút	M 1:75 2009.05.19
tervező: Németh Zsolt	belső konz.: Keszeyné Say Emma külső konz.: Dr. Greschik Gyula

10.1.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút

Alapadatok:

D= 6,8 m
B= 35°
H= 33,4 m
B= 20 m
Túlfejtés: 1 %



Egy alagút esetén

Alagút területe

$$T = \frac{D^2 \cdot 3{,}14}{4} = 36{,}3 \ \text{m}^2$$

Süllyedési teknő területe

$$A = T \cdot 0{,}01 = 0{,}363 \ \text{m}^2 = 363000 \ \text{mm}^2$$

A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta} + H \cdot \text{cotg}\beta = 53{,}63 \ \text{m}$$

Legnagyobb süllyedés a süllyedési teknő területéből kifejezve

$$A = 0{,}906 \cdot s_{y0} \cdot L_0$$

$$s_{y0} = \frac{A}{0{,}906 \cdot L_0} = 0{,}00747 \ \text{m} = 7{,}47 \ \text{mm}$$

Inflexiós pont

$$i = 0{,}4 \cdot L = 21{,}45 \ \text{m}$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

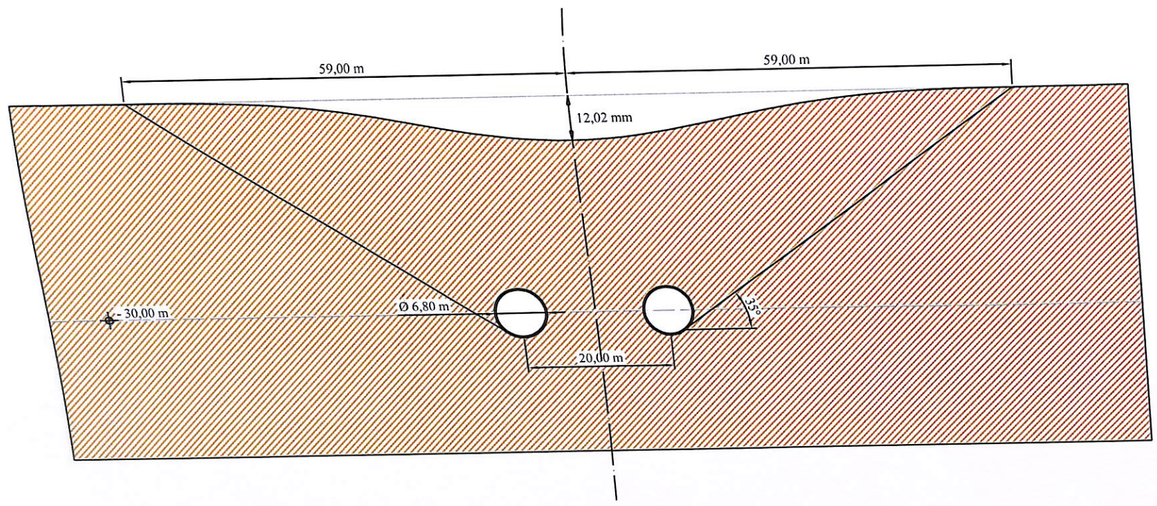
$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

A süllyedési horpát az R10.1 4/3-es rajzon ábrázoltam.

Süllyedések számítása 4 méterenként

Egy alagút esetén	
x	s_y
-56 m	0,01 mm
-52 m	0,02 mm
-48 m	0,05 mm
-44 m	0,11 mm
-40 m	0,23 mm
-36 m	0,45 mm
-32 m	0,81 mm
-28 m	1,36 mm
-24 m	2,14 mm
-20 m	3,13 mm
-16 m	4,28 mm
-12 m	5,46 mm
-8 m	6,50 mm
-4 m	7,21 mm
0 m	7,47 mm
4 m	7,21 mm
8 m	6,50 mm
12 m	5,46 mm
16 m	4,28 mm
20 m	3,13 mm
24 m	2,14 mm
28 m	1,36 mm
32 m	0,81 mm
36 m	0,45 mm
40 m	0,23 mm
44 m	0,11 mm
48 m	0,05 mm
52 m	0,02 mm
56 m	0,01 mm

Két alagút összegzése			
x	s_{1y}	s_{2y}	$\sum s_y$
-66 m	0,01 mm		0,01 mm
-62 m	0,02 mm		0,02 mm
-58 m	0,05 mm		0,05 mm
-54 m	0,11 mm		0,11 mm
-50 m	0,23 mm		0,23 mm
-46 m	0,45 mm	0,01 mm	0,46 mm
-42 m	0,81 mm	0,02 mm	0,83 mm
-38 m	1,36 mm	0,05 mm	1,41 mm
-34 m	2,14 mm	0,11 mm	2,25 mm
-30 m	3,13 mm	0,23 mm	3,36 mm
-26 m	4,28 mm	0,45 mm	4,73 mm
-22 m	5,46 mm	0,81 mm	6,27 mm
-18 m	6,50 mm	1,36 mm	7,86 mm
-14 m	7,21 mm	2,14 mm	9,35 mm
-10 m	7,47 mm	3,13 mm	10,60 mm
-6 m	7,21 mm	4,28 mm	11,50 mm
-2 m	6,50 mm	5,46 mm	11,96 mm
2 m	5,46 mm	6,50 mm	11,96 mm
6 m	4,28 mm	7,21 mm	11,50 mm
10 m	3,13 mm	7,47 mm	10,60 mm
14 m	2,14 mm	7,21 mm	9,35 mm
18 m	1,36 mm	6,50 mm	7,86 mm
22 m	0,81 mm	5,46 mm	6,27 mm
26 m	0,45 mm	4,28 mm	4,73 mm
30 m	0,23 mm	3,13 mm	3,36 mm
34 m	0,11 mm	2,14 mm	2,25 mm
38 m	0,05 mm	1,36 mm	1,41 mm
42 m	0,02 mm	0,81 mm	0,83 mm
46 m	0,01 mm	0,45 mm	0,46 mm
50 m		0,23 mm	0,23 mm
54 m		0,11 mm	0,11 mm
58 m		0,05 mm	0,05 mm
62 m		0,02 mm	0,02 mm
66 m		0,01 mm	0,01 mm



Megjegyzés:

Agyag talaj

A süllyedések függőleges irányban M 1:1,5

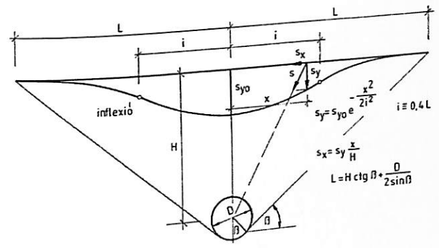
Alagút tengelyének mélysége

SZIE – YMÉTK KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK	2008/2009 II. félév
Pajzsos alagútépítés	R10.1 4/3
10.1. A 2-es és 3-as metró tapasztalatai alapján 10.1.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút	M 1:75 2009.05.19
tervező: Németh Zsolt / belső konz.: Keszeyné Say Emma / külső konz.: Dr. Greschik Gyula	

10.1.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút

Alapadatok:

D= 9,4 m
β= 35°
H= 34,7 m
Túlfejtés: 1 %



Alagút területe

$$T = \frac{D^2 \cdot 3{,}14}{4} = 69{,}4 \ \text{m}^2$$

Süllyedési teknő területe

$$A = T \cdot 0{,}001 = 0{,}694 \ \text{m}^2 = 694000 \ \text{mm}^2$$

A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta} + H \cdot \text{cotg}\beta = 57{,}75 \ \text{m}$$

Legnagyobb süllyedés a süllyedési teknő területéből kifejezve

$$A = 0{,}906 \cdot s_{y0} \cdot L_0$$

$$s_{y0} = \frac{A}{0{,}906 \cdot L_0} = 0{,}01326 \ \text{m} = 13{,}26 \ \text{mm}$$

Inflexiós pont

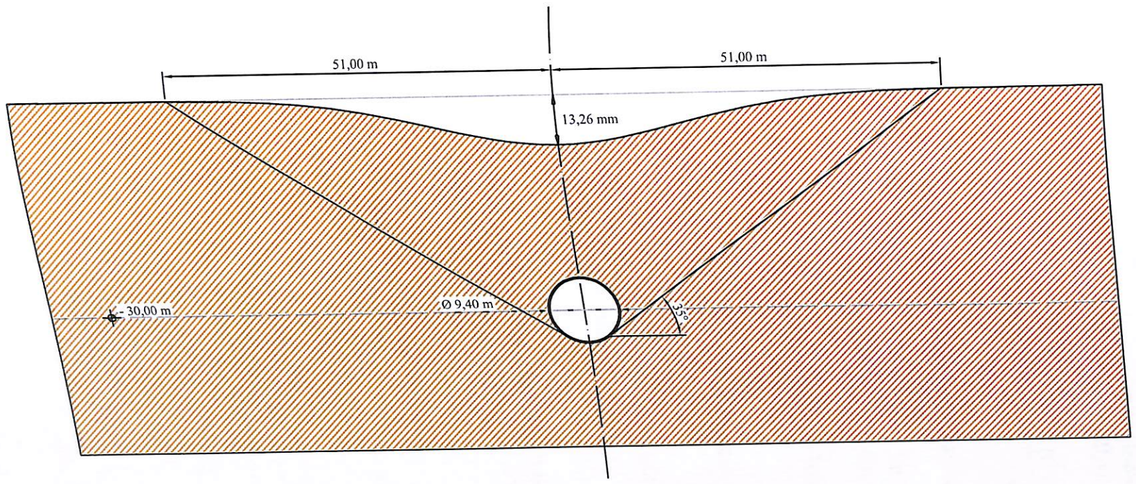
$$i = 0{,}4 \cdot L = 23{,}1 \ \text{m}$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

A süllyedési horpát az R10.1 4/4-es rajzon ábrázoltam.

Egy alagút esetén	
x	**s_y**
-68 m	0,00 mm
-64 m	0,01 mm
-60 m	0,02 mm
-56 m	0,04 mm
-52 m	0,08 mm
-48 m	0,18 mm
-44 m	0,35 mm
-40 m	0,66 mm
-36 m	1,17 mm
-32 m	1,95 mm
-28 m	3,05 mm
-24 m	4,51 mm
-20 m	6,27 mm
-16 m	8,21 mm
-12 m	10,12 mm
-8 m	11,76 mm
-4 m	12,87 mm
0 m	13,26 mm
4 m	12,87 mm
8 m	11,76 mm
12 m	10,12 mm
16 m	8,21 mm
20 m	6,27 mm
24 m	4,51 mm
28 m	3,05 mm
32 m	1,95 mm
36 m	1,17 mm
40 m	0,66 mm
44 m	0,35 mm
48 m	0,18 mm
52 m	0,08 mm
56 m	0,04 mm
60 m	0,02 mm
64 m	0,01 mm
68 m	0,00 mm



Megjegyzés:

Agyag talaj

A süllyedések függőleges irányban M 1:1,5

Alagút tengelyének mélysége

SZIE – YMÉTK KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK	2008/2009 II. félév
Pajzsos alagútépítés	R10.1 4/4
10.1. A 2-es és 3-as metró tapasztalatai alapján 10.1.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút	M 1:75 2009.05.19
tervező: Németh Zsolt / belső konz.: Keszeyné Say Emma / külső konz.: Dr. Greschik Gyula	

10.2. Tapasztalati képletek

A süllyedési teknő tapasztalati alapon való meghatározásához használt képletek nem sokban különböznek az előzőekben alkalmazott képletektől. A legnagyobb süllyedést *(S_{y0})* nem a horpa szélességéből, hanem az inflexiós pont helyzetéből számítjuk.

Maximális süllyedés

$$s_{y0} = \frac{\Delta V}{i \cdot \sqrt{2 \cdot 3{,}14}} = V_l(\%) \cdot \frac{1}{i \cdot \sqrt{2 \cdot 3{,}14}} \cdot \frac{D^2 \cdot 3{,}14}{4} = \frac{0{,}31 \cdot V_l(\%) \cdot D^2}{i}$$

i - inflexiós pont

Az inflexiós pont függ a talajtól, a talajrétegek vastagságától és az alagút mélységétől.

Egynemű talaj esetén:

- kohéziós talaj esetén: $3m < z_0 < 34$ $i = 0{,}43\ z_0 + 1{,}1m$
- kohézióval nem rendelkező talaj esetén: $6m < z_0 < 10m$ $i = 0{,}28\ z_0 - 0{,}1m$

Két különböző talajréteg esetén:

- Az alagút kohéziós talajban épül, de felette kohézióval nem rendelkező talaj helyezkedik el
  $i = 0{,}43\ z_a + 0{,}28\ z_b + 1{,}1m$
- Az alagút kohézióval nem rendelkező talajban épül, de felette kohéziós talaj helyezkedik el
  $i = 0{,}28\ z_a + 0{,}43\ z_b - 0{,}1m$

A maximális süllyedés és az inflexiós pont ismeretében, a süllyedések mértéke a távolság (x) függvényében meghatározható.

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

Ezek után már csak a süllyedési teknő szélességét kell meghatározni. A teknő szélességi mérete a határszög felvételével határozható meg. Ez a szög főként a talajtól, a talaj belső súrlódási szögétől függ.

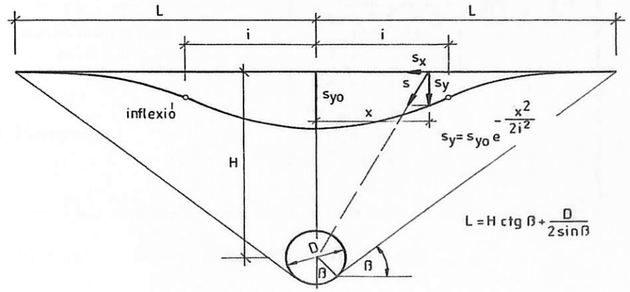
A hatás szögének számítása (β):

- Durva becslés (nagyobb biztonsággal) $\beta = 45°$
- Durva becslés (valószerűbb) $\beta = 60°$
- Pontosabb $\beta = 45° + \varphi/2$

φ - belső súrlódási szög

A belső súrlódási szög ismeretében pontosabb számítást végeztem.

Az adatok ismeretében már fel lehet rajzolni a várható becsült süllyedési horpát. (10.2. ábra) (O'Reilly and New 1991; Mair, Taylor. and Burland 1996)



10.2. ábra: Süllyedési teknő szélessége és jellemző adatai

10.2.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút

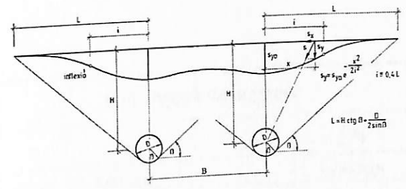
A hatás szögének számítása (β)

A hatás szögét egy fúrásszelvényből vett belső súrlódási szögekből a 45+φ/2 képlettel határozom meg. A szögeket átlagolom a rétegvastagság figyelembe vételével és csak két szöget határozok meg a szemcsés és a kötött talajrétegekre. A határszögek felszerkesztésével vagy kiszámításával meghatározható a süllyedési horpa határa. (10.1 táblázat)

Mélység	Rétegvastagság	Talaj megnevezése	φ	φ (átlagolt)	φ (figyelembe vett)	45+φ/2
2,8 m	2,8 m	épülettörmelékes homok feltöltés			32°	61°
6,1 m	3,3 m	iszapos homokliszt	30°	31°		
			31°			
12,4 m	6,3 m	sárga homokos kavics	40°	40°		
14,5 m	2,1 m	sárga, sovány agyag	33°	29°		
			24°			
20,0 m	5,5 m	sárga iszapos homokliszt	32°	25°		
			21°			
			23°			
20,8 m	0,8 m	sárga iszapos homok	32°	32°		
22,5 m	1,7 m	sárga kavicsos homok	29°	29°		
32,0 m	9,5 m	sárgásszürke agyag	17°	19°	20°	55°
			19°			
			24°			
			10°			
			16°			
			19°			
			12°			
			13°			
32,6 m	0,6 m	sárga iszapos homokliszt	34°	31°		
			28°			
40,0 m	7,4 m	sárgásszürke agyag	9°	21°		
			29°			
			7°			
			22°			
			31°			
			26°			

10.1. táblázat: A hatás szögének számítása (β)

Alapadatok:



D= 6,8 m
z_f= 22,5 m
z_a= 13,9 m
B= 20 m
Túlfejtés: 1 %

Egy alagút esetén

Az alagút kohéziós talajban épül, de felette kohézióval nem rendelkező talaj helyezkedik el

$$i = 0{,}43\ z_a + 0{,}28\ z_f + 1{,}1m = 13{,}38\ m$$

Maximális süllyedés

$$s_{y0} = \frac{0{,}31 \cdot V_l(\%) \cdot D^2}{i} = 0{,}01071\ \ m = 10{,}71\ \ mm$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta_a} + (z_f \cdot \mathrm{cotg}\beta_f + z_a \cdot \mathrm{cotg}\beta_a) = 26{,}36\ \ m$$

A süllyedési horpát az R10.2 2/1-es rajzon ábrázoltam.

Süllyedések számítása 4 méterenként

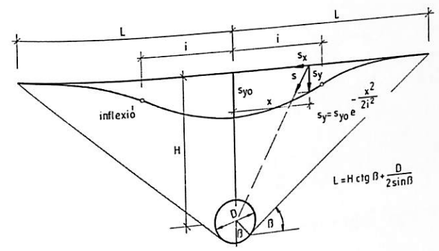
Egy alagút esetén	
x	s_y
-40 m	0,00 mm
-36 m	0,01 mm
-32 m	0,04 mm
-28 m	0,13 mm
-24 m	0,43 mm
-20 m	1,15 mm
-16 m	2,56 mm
-12 m	4,79 mm
-8 m	7,49 mm
-4 m	9,79 mm
0 m	10,71 mm
4 m	9,79 mm
8 m	7,49 mm
12 m	4,79 mm
16 m	2,56 mm
20 m	1,15 mm
24 m	0,43 mm
28 m	0,13 mm
32 m	0,04 mm
36 m	0,01 mm
40 m	0,00 mm

Két alagút összegzése			
x	s_{1y}	s_{2y}	$\sum s_y$
-50 m	0,00 mm		0,00 mm
-46 m	0,01 mm		0,01 mm
-42 m	0,04 mm		0,04 mm
-38 m	0,13 mm		0,13 mm
-34 m	0,43 mm		0,43 mm
-30 m	1,15 mm	0,00 mm	1,15 mm
-26 m	2,56 mm	0,01 mm	2,57 mm
-22 m	4,79 mm	0,04 mm	4,83 mm
-18 m	7,49 mm	0,13 mm	7,63 mm
-14 m	9,79 mm	0,43 mm	10,22 mm
-10 m	10,71 mm	1,15 mm	11,86 mm
-6 m	9,79 mm	2,56 mm	12,36 mm
-2 m	7,49 mm	4,79 mm	12,28 mm
2 m	4,79 mm	7,49 mm	12,28 mm
6 m	2,56 mm	9,79 mm	12,36 mm
10 m	1,15 mm	10,71 mm	11,86 mm
14 m	0,43 mm	9,79 mm	10,22 mm
18 m	0,13 mm	7,49 mm	7,63 mm
22 m	0,04 mm	4,79 mm	4,83 mm
26 m	0,01 mm	2,56 mm	2,57 mm
30 m	0,00 mm	1,15 mm	1,15 mm
34 m		0,43 mm	0,43 mm
38 m		0,13 mm	0,13 mm
42 m		0,04 mm	0,04 mm
46 m		0,01 mm	0,01 mm
50 m		0,00 mm	0,00 mm

10.2.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút

Alapadatok:

D= 9,4 m
z_f= 22,5 m
z_a= 15,2 m
Túlfejtés: 1 %



Az alagút kohéziós talajban épül, de felette kohézióval nem rendelkező talaj helyezkedik el

$$i = 0{,}43\ z_a + 0{,}28\ z_f + 1{,}1m = 13{,}94\ m$$

Maximális süllyedés

$$s_{y0} = \frac{0{,}31 \cdot V_l(\%) \cdot D^2}{i} = 0{,}01965\ \ m = 19{,}65\ \ mm$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

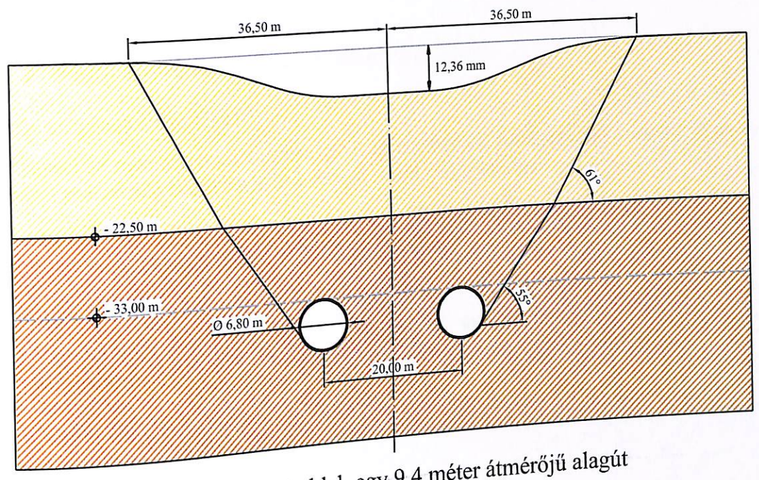
A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta_a} + (z_f \cdot \operatorname{cotg}\beta_f + z_a \cdot \operatorname{cotg}\beta_a) = 28{,}85\ \ m$$

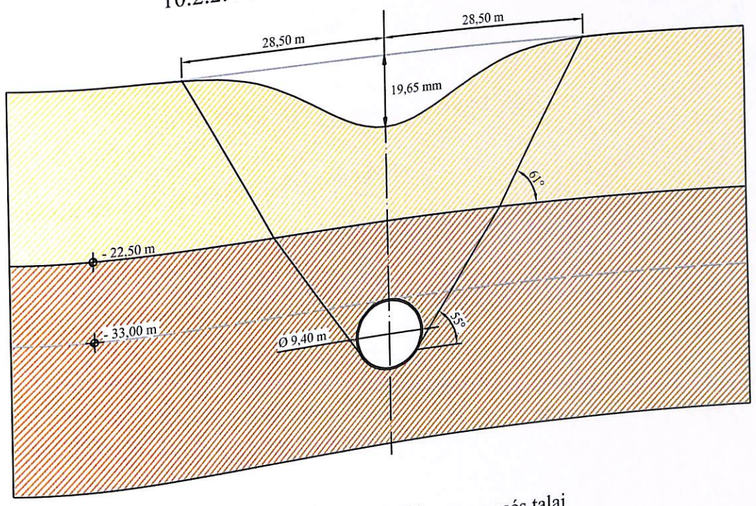
A süllyedési horpát az R10.2 2/1-es rajzon ábrázoltam.

Nagy alagút esetén	
x	**s_y**
-44 m	0,00 mm
-40 m	0,01 mm
-36 m	0,02 mm
-32 m	0,10 mm
-28 m	0,35 mm
-24 m	1,01 mm
-20 m	2,51 mm
-16 m	5,26 mm
-12 m	9,37 mm
-8 m	14,14 mm
-4 m	18,10 mm
0 m	19,65 mm
4 m	18,10 mm
8 m	14,14 mm
12 m	9,37 mm
16 m	5,26 mm
20 m	2,51 mm
24 m	1,01 mm
28 m	0,35 mm
32 m	0,10 mm
36 m	0,02 mm
40 m	0,01 mm
44 m	0,00 mm

10.2.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút



10.2.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút



Megjegyzés:

- Szemcsés talaj
- Agyag talaj
- A süllyedések függőleges irányban M 1:1,5
- Minimálsi földtakarás

SZIE – YMÉTK KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK	2008/2009 II. félév
Pajzsos alagútépítés	R10.2 2/1
10.2. Tapasztalati képletek (pesti oldal)	M 1:75
	2009.05.19
tervező: Németh Zsolt / belső konz.: Keszeyné Say Emma / külső konz.: Dr. Greschik Gyula	

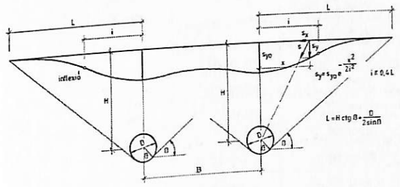
10.2.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút

A hatás szögének számítása (β)

Mivel itt nem állt rendelkezésemre a nyomvonalon fúrásszelvény, a szakvélemény által megadott mértékadó belső súrlódási szöget vettem figyelembe.

φ=17°

β=45+ φ/2=53,5°



Alapadatok:

D= 6,8 m
z= 33,4 m
B= 20 m
Túlfejtés: 1 %

Egy alagút esetén

Az alagút kohéziós talajban épül

i = 0,43 z+ 1,1m=15,46 m

Maximális süllyedés

$$s_{y0} = \frac{0{,}31 \cdot V_l(\%) \cdot D^2}{i} = 0{,}00927 \ m = 9{,}27 \ mm$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta} + z \cdot \mathrm{cotg}\beta = 28{,}94 \ \mathrm{m}$$

A süllyedési horpát az R10.2 2/2-es rajzon ábrázoltam.

Süllyedések számítása 4 méterenként

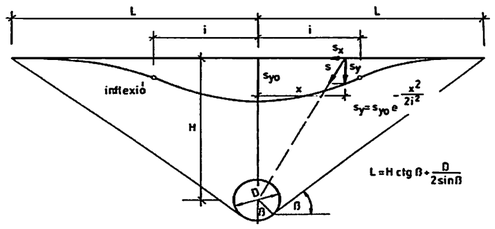
Egy alagút esetén	
x	s_y
-44 m	0,00 mm
-40 m	0,01 mm
-36 m	0,04 mm
-32 m	0,13 mm
-28 m	0,35 mm
-24 m	0,83 mm
-20 m	1,74 mm
-16 m	3,18 mm
-12 m	5,08 mm
-8 m	7,09 mm
-4 m	8,67 mm
0 m	9,27 mm
4 m	8,67 mm
8 m	7,09 mm
12 m	5,08 mm
16 m	3,18 mm
20 m	1,74 mm
24 m	0,83 mm
28 m	0,35 mm
32 m	0,13 mm
36 m	0,04 mm
40 m	0,01 mm
44 m	0,00 mm

Két alagút összegzése			
x	s_{1y}	s_{2y}	$\sum s_y$
-54 m	0,00 mm		0,00 mm
-50 m	0,01 mm		0,01 mm
-46 m	0,04 mm		0,04 mm
-42 m	0,13 mm		0,13 mm
-38 m	0,35 mm		0,35 mm
-34 m	0,83 mm	0,00 mm	0,84 mm
-30 m	1,74 mm	0,01 mm	1,75 mm
-26 m	3,18 mm	0,04 mm	3,22 mm
-22 m	5,08 mm	0,13 mm	5,20 mm
-18 m	7,09 mm	0,35 mm	7,44 mm
-14 m	8,67 mm	0,83 mm	9,50 mm
-10 m	9,27 mm	1,74 mm	11,01 mm
-6 m	8,67 mm	3,18 mm	11,85 mm
-2 m	7,09 mm	5,08 mm	12,17 mm
2 m	5,08 mm	7,09 mm	12,17 mm
6 m	3,18 mm	8,67 mm	11,85 mm
10 m	1,74 mm	9,27 mm	11,01 mm
14 m	0,83 mm	8,67 mm	9,50 mm
18 m	0,35 mm	7,09 mm	7,44 mm
22 m	0,13 mm	5,08 mm	5,20 mm
26 m	0,04 mm	3,18 mm	3,22 mm
30 m		1,74 mm	1,74 mm
34 m		0,83 mm	0,83 mm
38 m		0,35 mm	0,35 mm
42 m		0,13 mm	0,13 mm
46 m		0,04 mm	0,04 mm
50 m		0,01 mm	0,01 mm
54 m		0,00 mm	0,00 mm

10.2.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút

Alapadatok:

D= 9,4 m
z= 34,2 m
Túlfejtés: 1 %



Az alagút kohéziós talajban épül

$$i = 0{,}43\ z + 1{,}1m = 15{,}8\ m$$

Maximális süllyedés

$$s_{y0} = \frac{0{,}31 \cdot V_l(\%) \cdot D^2}{i} = 0{,}01734\ \ m = 17{,}34\ \ mm$$

Süllyedések mértéke távolság [x] függvényében

$$s_y = s_{y0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

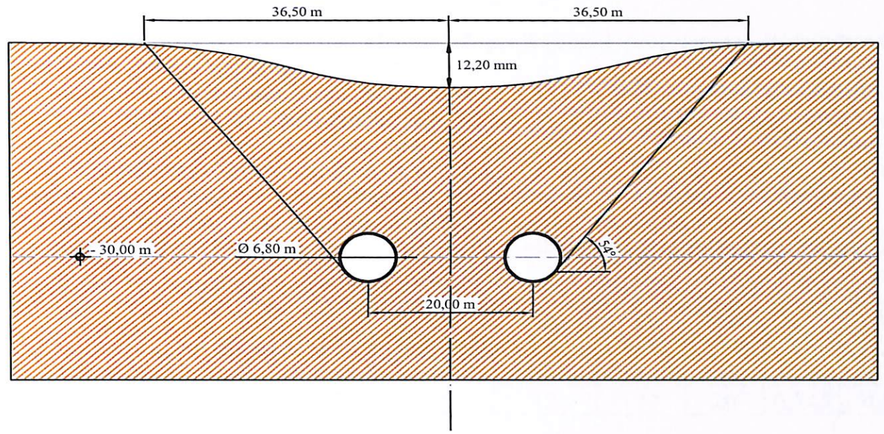
A teknő fél szélessége

$$L = \frac{D}{2 \cdot \sin\beta} + z \cdot \operatorname{cotg}\beta = 31{,}15\ \ m$$

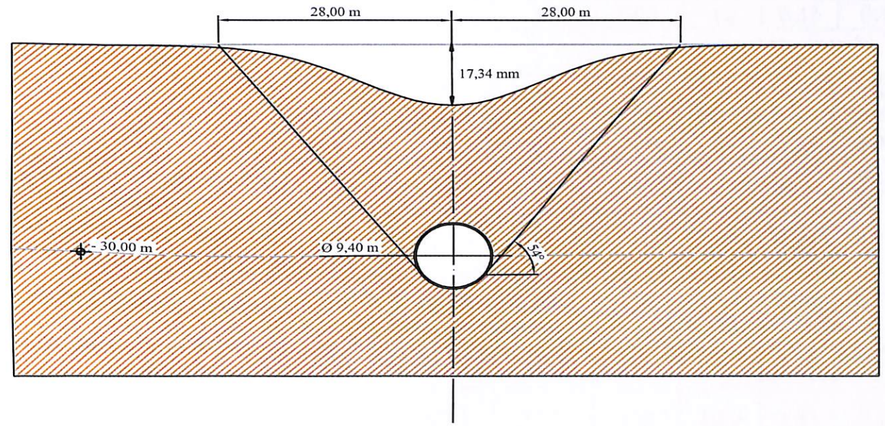
A süllyedési horpát az R10.2 2/2-es rajzon ábrázoltam.

Nagy alagút esetén	
x	**s_y**
-48 m	0,00 mm
-44 m	0,01 mm
-40 m	0,03 mm
-36 m	0,10 mm
-32 m	0,29 mm
-28 m	0,75 mm
-24 m	1,73 mm
-20 m	3,49 mm
-16 m	6,22 mm
-12 m	9,74 mm
-8 m	13,42 mm
-4 m	16,26 mm
0 m	17,34 mm
4 m	16,26 mm
8 m	13,42 mm
12 m	9,74 mm
16 m	6,22 mm
20 m	3,49 mm
24 m	1,73 mm
28 m	0,75 mm
32 m	0,29 mm
36 m	0,10 mm
40 m	0,03 mm
44 m	0,01 mm
48 m	0,00 mm

10.2.3. Budai oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút



10.2.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút



Megjegyzés:

- Agyag talaj
- A süllyedések függőleges irányban M 1:1,5
- Alagút tengelyének mélysége

SZIE – YMÉTK KÖZMŰ- ÉS MÉLYÉPÍTÉSI TANSZÉK	2008/2009 II. félév
Pajzsos alagútépítés	R10.2 2/2
	M 1:75
10.2. Tapasztalati képletek (budai oldal)	2009.05.19

tervező:	belső konz.:	külső konz.:
Németh Zsolt	Keszeyné Say Emma	Dr. Greschik Gyula

10.3. Plaxis programmal

A számítógépes számításokat Plaxis 8.2 professional programmal készítettem el. A program véges elemes módszerrel számol.

A modelltér felvételénél az alagút tengelyétől 3,5 D távolságot vettem figyelembe lefelé. A szélességet pedig az előző tapasztalati képletekkel kiszámolt horpák alapján vettem fel.

A modell felvételénél azt a szempontot vettem figyelembe, hogy az előzőekben használt egyszerű modellekkel össze tudjam hasonlítani. Ezért ebben az esetben is ezeket a leegyszerűsített modelleket használtam. A számításaim igazolására készítettem a Keleti pályaudvar fúrásszelvényei alapján egy részletes számítást, mind a két esetre.

A számítások során a Hardening Soil modellt alkalmaztam minden talaj esetén.

10.2. táblázat: Pesti oldalnál bevitt talajjellemzők:

talaj	γ_t [kN/m3]	γ_n [kN/m3]	φ [°]	c [kPa]	E_{oed} [Mpa]	υ	K_0 (υ/1-υ)
szemcsés	19	17	28	-	13	0,26	0,351
agyag	22	20	12	177	20	0,345	0,527

10.3. táblázat: Budai oldalnál bevitt talajjellemzők:

talaj	γ_t [kN/m^3]	γ_n [kN/m^3]	φ [°]	c [kPa]	E_{oed} [Mpa]	υ	K_0 (υ/1-υ)
agyag	23	21	50	600	12	0,15	0,176

10.4. táblázat: Keleti pályaudvarnál:

talaj	γ_t [kN/m3]	γ_n [kN/m3]	φ [°]	c [kPa]	E_{oed} [Mpa]	υ	K_0 (υ/1-υ)
feltöltés	20	18	30	-	8	0,25	0,333
sárgásbarna homoklisztes finomhomok	21	19	28	-	7	0,3	0,429
sárgásbarna homokos kavics	21	19	31	-	17	0,23	0,299
szürke közepes agyag	21,5	19,57	10	114	14,4	0,34	0,515
szürke bentonitos kövér agyag	22	20,26	12,7	137	15,9	0,36	0,563
sárgásbarna puha homokos agyag	22	20,01	13,3	168	19,9	0,33	0,493
szürke sodorható közepes agyag	22,5	20,42	13	290	23,7	0,35	0,538

A számításokhoz több munkafolyamatot használtam. Minden esetben külön folyamatként számítottam az alagút kifejtését és az 1%-os túlfejtést. Két alagút esetén a két alagút kifejtését külön munkafolyamatként vettem figyelembe. Először az egyik alagút felett lejátszódó süllyedéseket számítottam ki, ezek után a másik alagút okozta többletsüllyedéseket. Ez azért is fontos, mert a valóságban sem egyszerre fúrják a két alagutat.

10.3.1. Pesti oldal, két 6,8 méter átmérőjű alagút

Munkafolyamatok:

- Bal oldali alagút kifejtése és falazat beépítése
- 1% túlfejtés figyelembe vétele a bal oldali alagúton
- Jobb oldali alagút kifejtése és falazat beépítése
- 1% túlfejtés figyelembe vétele a jobb oldali alagúton

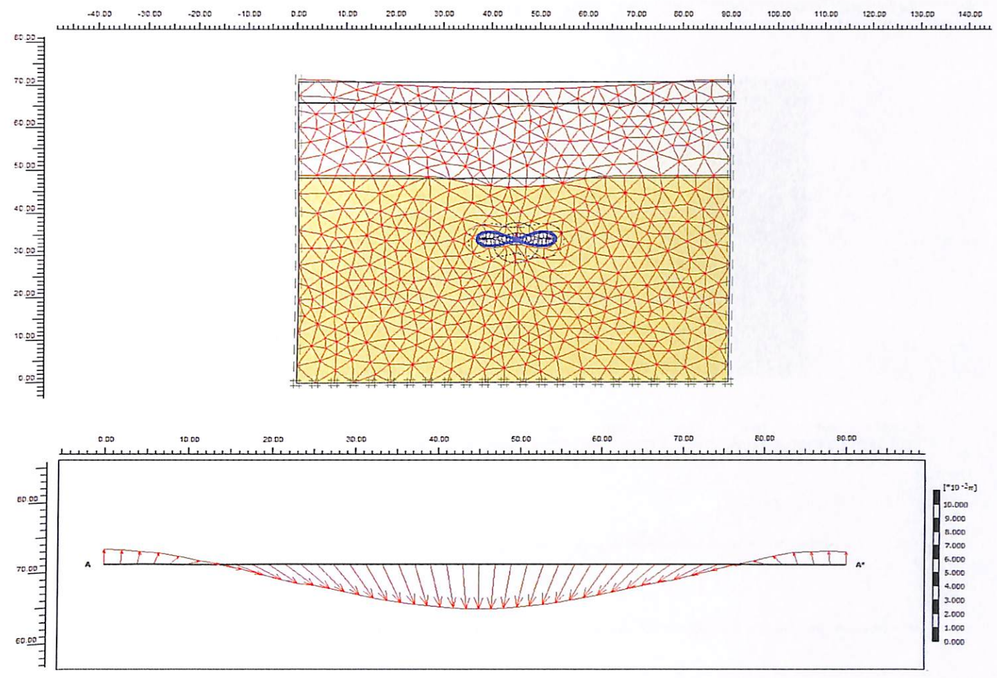
Maximális süllyedéskülönbség

S_{y0}= 5,0 mm

A teknő szélessége

L≈ 95 m

10.3.2. Pesti oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút



Munkafolyamatok:

- Alagút kifejtése és falazat beépítése
- 1% túlfejtés figyelembe vétele

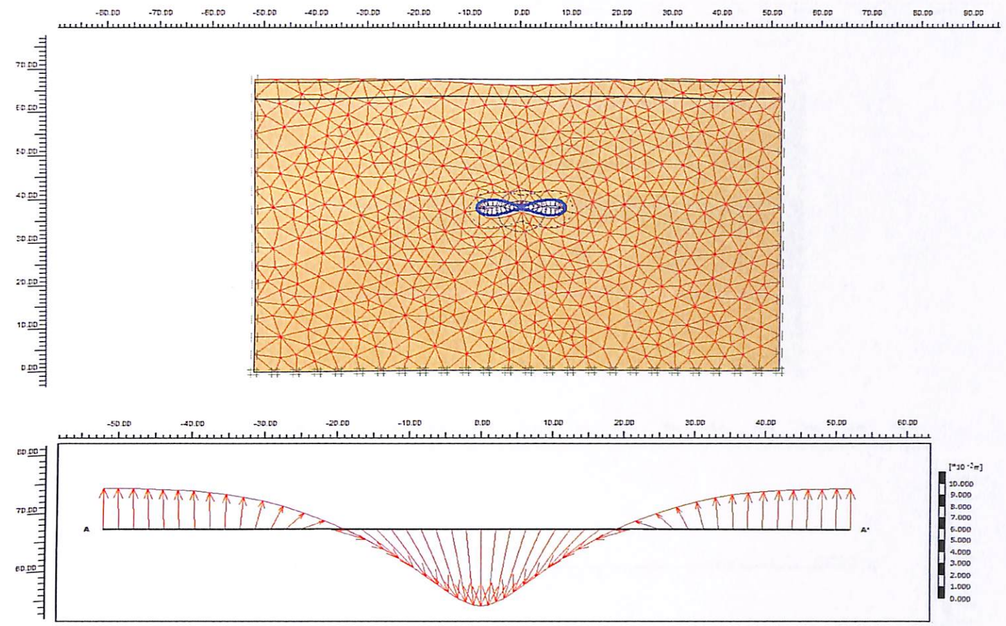
Maximális süllyedéskülönbség

S_{y0}= 5,2 mm

A teknő szélessége

L≈ 70 m

10.3.4. Budai oldal, egy 9,4 méter átmérőjű alagút



Munkafolyamatok:

- Alagút kifejtése és falazat beépítése
- 1% túlfejtés figyelembe vétele

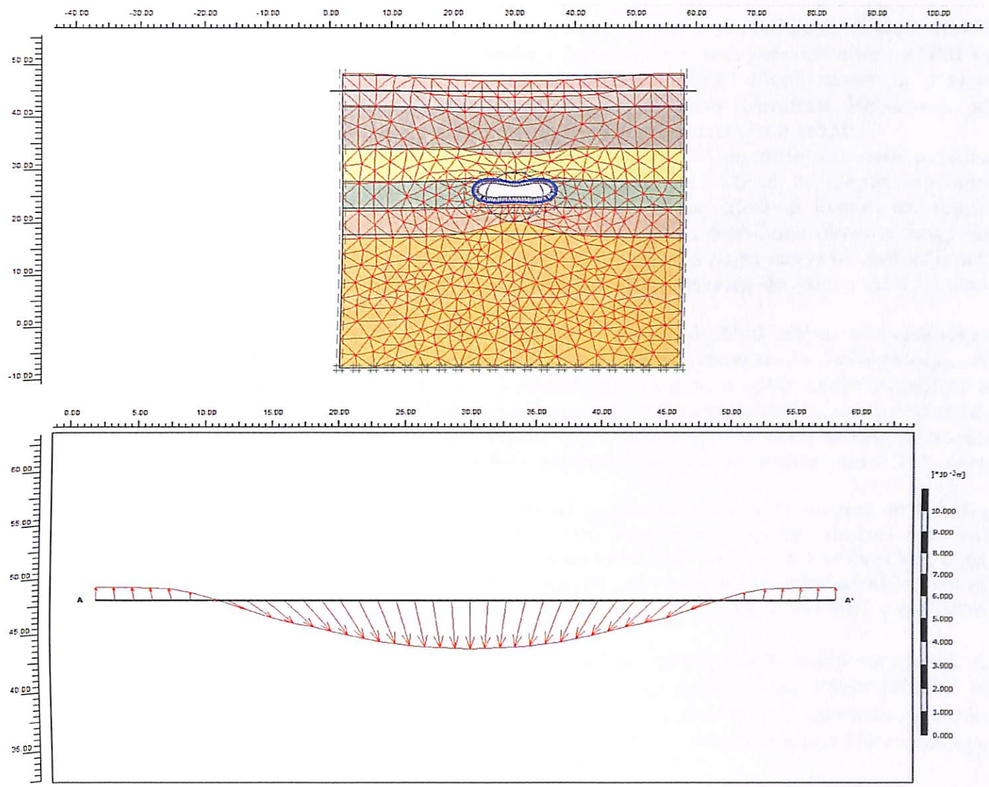
Maximális süllyedéskülönbség

S_{y0}= 10,2 mm

A teknő szélessége

L≈ 75 m

10.3.6. Keleti pályaudvar, egy 9,4 méter átmérőjű alagút



Munkafolyamatok:

- Alagút kifejtése és falazat beépítése
- 1% túlfejtés figyelembe vétele

Maximális süllyedéskülönbség

S_{y0}= 3,1 mm

A teknő szélessége

L≈ 50 m

10.4. Eredmények kiértékelése

A számításom során sok esetben egyszerűsítenem kellett a modelleken. A tapasztalati képletek miatt nem tudtam részletes talajszelvényt felvenni, így leegyszerűsítettem kötött és szemcsés talajrétegekre. Az egyszerűsítés miatt fellépő hibák ellenőrzésére a Keleti pályaudvar fúrás szelvényei alapján készítettem egy pontosabb számítást Plaxis-sal. Itt figyelembe vettem az összes réteget, és ezek felvételével készítettem el a modellt.

A Plaxis program hiányosságaiból adódóan viszont az 1%-os túlfejtést nem a pajzs keresztmetszetére vettem fel, hanem csak a falazat átmérőjére. Mivel az alagút végleges falazatát a pajzsköpeny védelmében építik, így minden esetben kicsivel kisebb az alagút átmérője, mint a pajzsé. A program általam használt verziójában problémát okozott, hogy ha megadtam az alagút átmérőjét és anyagát, nem tudtam megadni a pajzs nagyobb átmérőjének túlfejtését. A másik megoldás szerint kifejtem a pajzs keresztmetszetét, de sajnos nem lehetett megadni a hátűr injektálás modellezését.

A számítások elején kikötöttem, hogy itt csak a technológiából adódó süllyedéseket veszem figyelembe. Azonban a horpa alakulását sok egyéb tényező is befolyásolja. A süllyedések leginkább a homloknyomástól, a haladási sebességtől, a hátűr injektálásától és a talajviszonyoktól függenek. Ezen kívül befolyásolhatja még a felszíni terhelés, az építési mód, vagy szemcsés talajban akár a talajvíz ingadozása is. Az idő függvényében is folyamatosan változik a horpa alakja. Nem csak az építés közben, hanem az építés után 2-3 évre megfigyelték, hogy lassan ellaposodik a görbe.

A tapasztalati számításosoknál az eredményeket fenntartásokkal kell kezelni. Itt mindig valamilyen mérések alapján készül egy elmélet. Olyan képleteket alkottak, amivel igazolni lehet a mérési eredményeket. A méréseket még az újabb elmélet esetén is 80-as években mért eredményekre alapozzák. Azóta sokat változott a pajzsos technológia és sokkal kisebb felszíni süllyedésekkel vagyunk képesek alagutat építeni. Ez nagyon jól látszik a mostani 4-es metró építésén mért adatok alapján is.

A Plaxis program minimum hét talajfizikai jellemzővel dolgozik egy talajréteg esetén. A tapasztalati képleteknél nem tesz különbséget csak kötött és szemcsés talaj között. Ezeket is átlagos értékekkel veszi figyelembe. Így lehetséges az, hogy számítógépes számításom során jóval kisebb süllyedési értékeket kaptam. A Plaxis nem régi mérések alapján feltételez egy görbét, hanem a talajfizikai jellemzők alapján számítja ki.

Maximális süllyedések				
Számítási mód	Pesti oldal		Budai oldal	
	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m
Budapesti tapasztalatok	8-9 mm	~9 mm	~12 mm	13-14 mm
Tapasztalati képletekkel	12-13 mm	19-20 mm	12-13 mm	17-18 mm
Plaxis	~5 mm (5,0)	~5 mm (5,2)	~10 mm (9,9)	~10 mm (10,2)

10.5. táblázat: Süllyedések alakulása a háromféle módszer szerint

Ha csak a két, tapasztalati képletekkel foglalkozó elméletet nézzük, rögtön szembetűnik az óriási különbség. A budapesti tapasztalatok alapján a horpa kiterjedését a szemcsés talajban nagyobb, míg a kötött talajban kisebbnek feltételezi. Ezzel szemben a másik elmélet szerint éppen fordítva van. A tapasztalat is azt mutatja, hogy a süllyedések az agyagrétegekben jobban szétterjednek, mint a szemcsés talajokban.

A budapesti tapasztalati képletek alapján meghatározott elmélet szerint a horpa kiterjedésének vízszintessel bezárt szöge homoktalajokban kisebb, 23°-30°, agyagtalajokban nagyobb, 30°-38°. Ha a talajra jellemző belső súrlódási szöget veszünk fel, akkor látszik, hogy a 45-φ/2 képlet ezt az eredményt adja. Tehát a budapesti tapasztalati képletek a passzív csúszólappal számolnak. Ezzel szemben a másik elmélet a horpa kiterjedés vízszintessel bezárt szögét a 45+φ/2 képlettel veszi figyelembe, tehát az aktív csúszólappal számol. Így lehetséges az, hogy a budapesti tapasztalatok alapján számított horpa szélessége kétszer akkora, mint a másik tapasztalati képlettel számított érték.

A Plaxis-sal számolt horpák szélessége nagyon hasonlóan alakult a 45+φ/2 képlettel számított horpa szélességéhez. Ez azért is alakult így, mert a modellhez is az aktív csúszólappal kellett meghatározni a modellteret. Viszont az is látszik, hogy a budapesti talajokban valószínűleg ennél jellemzően szélesebb a teknő kiterjedése. Az eredmények azt mutatják, hogy a 45+φ/2 képlettel kiszámított szélességnél 20-30 m-rel szélesebb horpa alakul ki a számítógépes számítások szerint. Az aktív és a passzív csúszólapot meghatározó szögérték közé teszi a kiterjedés szögét, de az aktív csúszólaphoz közelít.

Horpa teljes szélessége				
Számítási mód	Pesti oldal		Budai oldal	
	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m
Budapesti tapasztalatok	168 m	156 m	118 m	102 m
Tapasztalati képletekkel	73 m	57 m	73 m	56 m
Plaxis	100 m	90 m	90 m	75 m

10.6. táblázat: Süllyedési horpa alakulása a háromféle módszer szerint

A Plaxis-sal végzett számítások fedik legjobban a valóságot. Ez várható volt, mivel a program több talajfizikai jellemzővel számol, a tapasztalati számításokkal szemben. A végeredmény is mutatja, hogy jóval kisebb süllyedési értékek jöttek ki, amely jobban közelít a valósághoz. A számítások elején kikötöttem, hogy itt csak a technológiából adódó süllyedéseket veszem figyelembe. A Plaxis nem csak a technológiából adódó túlfejtést vette figyelembe, hanem az üreg kibontásával fellépő mozgásokat is. Valószínű, hogy akarva, akaratlanul a tapasztalati képletek is számolnak ezzel. A számítógépes számítások során külön számítottam az üreg kifejtését és a túlfejtést. Ez alapján a süllyedések nagyobb része az üreg kibontásából adódik. A túlfejtésből adódó süllyedések egy nagyságrenddel kisebbek, mint a kifejtéstől létrejövők.

A számítógépes számítások pontosságát mutatja, hogy két alagút esetén, asszimmetrikus horpa alakul ki, ahogy azt a valóságban is megfigyelték a budapesti metrók építésénél. A legnagyobb süllyedés nem a tengelyben van, hanem az elsőnek megépített alagút irányába eltolódik. Az első alagút felett a horpa kicsit megnyúlt a másik feléhez képest, nagyobb távolságra terjed ki.

A Plaxis eredményeiből jól látszik, hogy az alagút kifejtése után az expandáló agyagtalaj miatt az alagút is és a felszín is felfelé elmozdul. A süllyedéseknél nem a legnagyobb süllyedést vettem figyelembe, hanem a megemelkedett térszín legmagasabb pontjának és a horpa legalsó pontjának különbségét. Ez azért fontos mert az épületeket, utakat és egyéb műtárgyakat a süllyedéskülönbség veszélyezteti.

A kontroll számításokból jól látszik, hogy a leegyszerűsített modellek esetén a süllyedések nagyobb mértékűek, mint a valóságban, de a teknő szélessége nagyjából egyezik.

A kontrol számítás esetén az alagutakat nem helyeztem olyan mélyre, mint a többi esetben, ezért kisebb a teknő szélessége. Ebből viszont az következik, hogy a süllyedés különbségek is kisebbek lesznek. (10.7 táblázat)

Keleti pályaudvar		
Átmérő	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m
Maximális süllyedések	~3 mm (2,8)	~3 mm (3,1)
Horpa teljes szélessége	65 m	50 m

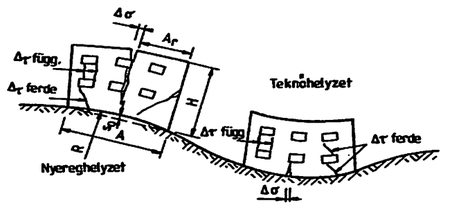
10.7. táblázat: kontrolszámítás

10.4.1. Süllyedések hatása az építményekre

A felszíni süllyedések az érintett zónában lévő épületekben is elmozdulást idézhetnek elő. Ezek a mozgások többlet igénybevételeket okozhatnak, repedéseket, vagy egyéb, esetleg súlyos károsodásokat idézhetnek elő

Az épületekben bekövetkező hatásokat a következő tényezők befolyásolják:

- A süllyedési teknő jellemzői, a mozgáselemek (elmozdulás, szögforgás, görbület, összenyomódás, megnyúlás).
- Az épület helyzete a süllyedési teknőhöz képest, méretei és magassága.
- Az épület merevsége. Minél merevebb, annál könnyebben megrepedhet.
- Az épület állapota, kora szerkezeti rendszere.



10.3. ábra: Süllyedések hatása az építményekre

A süllyedési teknő adataiból meghatározhatók a szögforgás, a görbület, a vízszintes elmozdulás és a fajlagos vízszintes hosszváltozás. (10.3. ábra) (Petrasovics, Fazakas, Kovácsházy. 1992)

Mivel számításaim során nem a teljes süllyedési görbét számoltam, hanem csak a technológiából adódót, így nem érdemes a görbék meredekségét határértékekhez viszonyítani. Abból indultam ki, hogy minél kisebb a görbe meredeksége annál jobb a megoldás.

A kézi számítások esetében egyszerű, mert a 4 méterenként kiszámolt süllyedések legnagyobb különbsége megadja a legnagyobb meredekséget.

Süllyedéskülönbségek 4 méteren				
Számítási mód	Pesti oldal		Budai oldal	
	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m	2 db Ø 6,4 m	Ø 9,4 m
Budapesti tapasztalatok	~1 mm	~1 mm	1-2 mm	~2 mm
Tapasztalati képletekkel	2-3 mm	4-5 mm	2-3 mm	3-4 mm

10.8. táblázat: Legnagyobb süllyedés különbségek

Ezek az értékek egyértelműen azt mutatják, hogy a két alagutas módszer esetén kisebb a görbe meredeksége. Viszont komoly ellentmondás, hogy míg a budapesti tapasztalatok alapján minimálisak, majdnem hogy elhanyagolhatóak a különbségek a kétféle alagút átmérő esetén, addig a tapasztalati képletek alkalmazása során igen jelentős az eltérés a kétféle megoldásra számolt meredekség között. Sajnos a Plaxis-sal végzett számítások eredményéből nem lehet számszerűen kiolvasni az erre vonatkozó adatokat, csak grafikailag lehet megjeleníteni. De ezeken az ábrákon is észrevehető, hogy a két alagút esetén az asszimmetrikus horpa egyik fele meredekebb. A horpa ezen része a pesti oldal esetében egy rövid szakaszon meredekebb, mint az egyalagutas módszernél. (10.4 ábra)

10.4. ábra: Plaxissal készített süllyedési görbék

10.4.2. Eredmények összegzése

Számításaim alapján egyértelmű, hogy a technológiából adódó süllyedések a két alagutas módszer esetén 15-20 méterrel szélesebb sávot érintenek . A legnagyobb süllyedések tekintetében már nem annyira egyértelmű a helyzet. Bár a süllyedés minden esetben nagyobb egy alagút esetén, de az eltérés mértéke az alkalmazott számítási módszerek függvényében más és más. A budapesti tapasztalatok és a Plaxis-sal végzett számítások szerint, minimális a süllyedés mértékének különbsége. Olyan kicsi a különbség, hogy ezekben az esetekben elhanyagolható. Ezzel szemben a tapasztalati képletek alapján a különbség már igen jelentős.

A horpa meredekségét nézve is az eredmények nagyon vegyesek, amit az előzőekben tárgyaltam már. Így kijelenthető, hogy a két alagutas módszer, ha minimálisan is, de kedvezőbb a süllyedés mértéke és a süllyedési horpa meredekségét tekintve is. Ha a süllyedési horpák meredekségét pontosabban meg lehetne állapítani a Plaxis programmal, akkor egyértelműbb lehetne az eredmény. Véleményem mégis az, hogy a Plaxis által kirajzolt görbék alapján kicsi a különbség az egy és két alagutas módszer között. Nem jelenthető ki egyértelműen, hogy sokkal rosszabb megoldás az egy alagutas módszer a süllyedések szempontjából, így ez nem zárja ki ennek a módszernek alkalmazási lehetőségét.

11. Felhasznált irodalom

Alagútépítési módszerek Elérhető az interneten:
http://epito.bmeeok.hu/%D6ssze_vissza_t%E1rgyak/Geotechnika/ (2007.10.01)

Ábrahám Kálmán (1982): Metró Kézikönyv, Budapest: Műszaki könyvkiadó.

A csősajtolás, Elérhető az interneten:
http://www.vbt.bme.hu/oktatas/melyep/Hallgeloadas/Csovek/A%20cs%8Bsajtol%A0s.doc (2007.10.01)

Budapest közműrendszerei, Elérhető az interneten:
http://budapestmania.freeweb.hu/kozmu.htm (2007.11.03)

Bennett, David (2005): Metro, A földalatti vasút története, Budapest: Kossuth kiadó Rt

Firnigel Zoltán (2004): Alagútépítési módszerek, Elérhető az interneten:
http://www.vbt.bme.hu/oktatas/melyep/Hallgeloadas/Alagut/Alag%82p.doc (2007.10.01)

Apel, Fritz (1968): Tunnel mit Schildvortrieb, Düsseldorf: Werner-Verlag.

FŐMTERV Rt (1998): É – D irányú budapesti tömegközlekedési gerincvonal, tanulmányterv

Illési József (1954): A pajzsos alagútépítés, különös tekintettel a pajzs tervezése, Budapest: Felsőoktatási jegyzetellátó vállalat.

Kas János (1981): Mélyvezetésű metró alagútépítési technológia gépláncának szervezési és fejlesztési kérdései, doktori disszertáció.

Korszerű pajzsos alagútépítés alkalmazása a 4-es metrónál, Elérhető az interneten:
http://www.metro4.hu/hogyanepul_alagutepites.php

Lőrincz János: Alagutak építése Elérhető az interneten:
http://gradex.hu/pdf/09_alagutak_epitese.pdf (2007.10.01)

Herrenknecht, Martin / Dr Ulrich Rhem: Mixshield Technology, Elérhető az interneten:
http://www.mines.edu/academic/mining/research/emi/papers/seminar/04_soft_ground_tbms_slurry.pdf (2007.10.01)

Mair R.J., Taylor R.N. and Burland J.B. (1996): Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. In: Proc. Of the Int. Symp. on Geotech. Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam.

New B.M, O'Reilly M.P. (1991): Tunnelling induced ground movements; predicting their magnitude and effects. J.D. Geddes Ground movements and structures, Proc. of 4th International Conference, University of Wales College of Cardiff

Németh M. Tibor (2006): „A vonalalagút és kapcsolódó műtárgyai (III. rész)" Mélyépítő Tükörkép Magazin 2006/3. június,

Petrasovics G., Fazakas Gy., Kovácsházy F. (1992):Városi földalatti műtárgyak, Budapest: Akadémiai kiadó

Posgay György (2003) „Pajzsos alagútépítés" Mélyépítő Tükörkép Magazin 2003/2. április, Elérhető az interneten: www.mtm-magazin.hu/pajzsos alagútépítés.htm (2007.10.01)

Szaló Csaba (2004): „Pajzsos alagútépítés" Mélyépítési Vasbetonszerkezetek, Elérhető az interneten: http://www.vbt.bme.hu/oktatas/melyep/Hallgeloadas/Alagut/Pajzsos_alagutepites.pdf (2007.10.01)

Szepesházi Róbert (2008): Geotechnika Egyetemi jegyzet, harmadik korszerűsített, bővített kiadás, Győr

Szesztay László (1897): „Alagutak a Themze alatt" A Magyar Mérnök-és Építész-Egylet közlönye XXXI. kötet I. füzet, Budapest: Magyar Mérnök és Építész Egylet.

Széchy Károly (1961): Alagútépítéstan, Budapest: Tankönyvkiadó

Takács Ilona (2007): Alagútépítés technológiai története, Elérhető az interneten: http://vasbeton.vbt.bme.hu/oktatas/melyep/Hallgeloadas/2007t/TakacsIlona.doc (2007.10.01)

Tolnai Világlexikona (1926), Budapest: Tolnai Nyomdai Műintézet és Kiadóvállalat Rt.

Mostkov, V. M. (1978): Nagyszelvényű föld alatti létesítmények, Budapest: Műszaki Kvk

Interneten található források:

http://www.herrenknecht.de/
http://www.metro4.hu/
http://www.microtunel.com/
http://www.mtm-magazin.hu/
http://www.nordseetaucher.de/

12. Köszönetnyilvánítás

Építéstörténet tantárgy alkalmával kerültem kapcsolatba Keszeyné Say Emmával. Órai témájával kapcsolatos beszélgetés után, közölte velem: „Magának írnia kell egy TDK dolgozatot". A tanárnő kérésének eleget téve, folyamatos felügyelete alatt kezdtem el ezt a dolgozatot megírni először a kari TDK-ra, amely most a szakdolgozatommá nőtte ki magát .

Nagy segítségemre volt Németh M. Tibor a BKV Zrt. DBR Metró Projekt Igazgatóságról a TDK dolgozat elkészítésében, az anyaggyűjtéstől kezdve az összeállításában, felépítésében és a megfelelő műszaki megfogalmazásában. A kari TDK megnyerése után az OTDK-ra való felkészülés során is komoly külső segítséget kaptam tőle, amely az országos versenyen a második helyezés eléréséhez segített hozzá.

A kari TDK-n értékelésre a dolgozatom Dr. Greschik Gyulához került. Így kerültünk kapcsolatba, így lett külső konzulensem a szakdolgozatomhoz. Szakmai tudásának segítségével és felügyeletével készítettem el végleges formájában TDK dolgozatomból a szakdolgozatomat.

Sok segítséget kaptam Hont Imrétől és Fejes Gábortól a Plaxis program megtanulásához, megfelelő használatához.

A jó munkához nem elég csak a belső és külső konzulens. Kell az a támogatás, amit a családomtól és barátnőmtől kaptam. Főként, amikor nyomtatás előtti napokban éjszaka a dolgozatom több mint 100 oldalát böngészték, helyesírási hibát, vagy éppen az előző hajnalban írt érthetetlen mondatokat keresve.

Szeretném megköszönni mindannyiuk áldozatos munkáját, segítségét. Nélkülük a dolgozatom nem készülhetett volna el.