



SZENT ISTVÁN
EGYETEM



YBL MIKLÓS ÉPÍTÉSTUDOMÁNYI KAR, BUDAPEST



SZENT ISTVÁN
EGYETEM

YBL MIKLÓS
ÉPÍTÉSTUDOMÁNYI KAR
BUDAPEST

**Az M0 autópálya északi gyűrű 83+370. km-től a 83+470 km keresztaszvénýű
alagútszakasz tervezése Új Osztrák Alagútépítési Eljárással**

Külső Konzulens:

Grabarits József

Okl. mérnök

UNITEF'83 ZRt

Belső Konzulens:

Prof. Dr. Telekes Gábor

főiskolai tanár

Készítette:

Bíbok Gábor

Geotechnika Szakos Hallgató



Tartalomjegyzék:

-1. Az M0-ás autópálya részletesebb bemutatása	5
-1.1 Az M0-ás „körgyűrű” története	5
-1.2. Az eddig átadott szakaszok	6
-2. Mérnökgeológiai kőzetmodell és elemei	7
-2.1. A mérnökgeológiai modell elemei	7
-2.1.1. A mérnökgeológiai modell elemei	7
-2.1.2. Homogenitás, izotrópia a mérnökgeológiai kőzetmodellben	8
-2.2 Kőzetkörnyezet osztályozása a tagoltsági rendszerek száma szerint	8
-2.3 Egyirányú nyomószilárdság meghatározása laboratóriumban	9
-2.3.1. A szilárdságot befolyásoló tényezők	9
-2.4. A tagoltsági jellemzők meghatározása	10
-2.4.1. A tagoltság rendszere és kialakulása	10
-2.4.2. A tagoltság tágassága, nyitottsága	10
-2.4.3. Tagolófelületek felületi jellemzői és kitöltöttségük	11
-2.4.4. Tagoltság vagy tagoltsági rendszerek térbeli elhelyezkedése	12
-2.4.4.1. Megoldás dőlésrőzsában	14
-2.4.4.2. Sztereografikus projekció módszere	14
-2.4.5. A tagoltság mértéke	15
-2.4.5.1 Az integrálgeometriai módszer	16
-2.4.5.2. c (Hansági) módszer	16
-2.4.5.3. Az RQD érték meghatározásának módszere	16
-2.4.5.3.1 Az RQD értékei	18
-3. Kőzettest osztályozási módszerek	19
-3.1. Terzaghi-féle osztályozás	20
-3.2. RSR módszer	20
-3.3. RMR módszer	20
-3.4. A Q – index	22
-3.4.1. A kőzettest szerkezete	23
-3.4.2. A kőzettömbök nyírószilárdsága	24
-3.4.3. A feszültség értékek	25
-3.4.4. A súlyozott Q-érték meghatározása	26



-4. Fúró-robbantó munkák	27
-4.1. Robbanóanyagok fő csoportjai	28
-4.2. Robbanóanyagok napjainkban	30
-4.2.1. Az emulziós robbanószerkezetek előnyei	31
-5. Az alagútépítésben alkalmazható módszerek	32
-5.1 Nyitott módszer	32
-5.2 Zárt módszer	32
-5.2.1 Klasszikus módszerek	33
5.2.1.1. Feltöréses módszer	33
5.2.1.2. Réseles módszer	33
5.2.1.3. Sülvegszelvény fejtéses módszer	33
5.2.1.4. Oldaltárós módoszat	33
5.2.1.5. Alulról felfelé kialakított szelvény	34
-5.2.2. Belga módszer	35
-5.2.3. Az Angol technika	38
-5.2.4. Az Osztrák módszer	40
-5.2.5. Új Osztrák alagútépítési eljárás	41
5.2.5.1. A kőttbeton	43
5.2.5.1.1. A száraz lőttbeton	43
5.2.5.1.2. A nedves lőttbetonos megoldás	44
5.2.5.1.3. A két technika összehasonlítása	45
5.2.5.1.4. A visszahulló anyag mennyisége	46
-5.2.6. Alagútépítés pajzsos módszerrel:	47
-6. Talajszilárdítás	48
-6.1. Talajfagyasztás	48
-6.2. Az injektálás	51
-6.3. A Jet grouting eljárás	57
-7 Alagutak szellőzése:	59
-7.1. Munkahelyi szellőzés	59
-7.2. Természetes szellőzés	61
-7.3. Mesterséges szellőzés	62
-7.3.1. A hosszirányú szellőzés	63
-7.3.2. A keresztirányú szellőzés	63



-7.3.3. A félig keresztirányú szellőzés	64
-8. Folyamatos Monitoring rendszer	66
-8.1. Piezométer	66
-8.2. Inclinométer	66
-8.3. Extenzométer	66
-9. Számítástechnika a geotechnikában	68
-9.1. A geotechnikai modell kialakítása	68
-9.2. Talajmodellek	69
-9.2.1. Rugalmas talajmodell	69
-9.2.2. Mohr- Coulomb modell	70
-9.2.3. A puha talajmodell	70
-9.2.4 A felkeményedő talajmodell	70
-10. Források	72



Bevezetés

Korábbi tanulmányaim során, volt lehetőségem alagútépítéssel foglalkozni, amit nagyon megkedveltem, így gondoltam, hogy szívesen dolgoznék a szakdolgozatom keretében az alagutak tervezésével, kivitelezésével.

Jó lehetőségként mutatkozott, az M0-ás körgyűrű északi szakaszának tervezése, kivitelezése Pilisborosjenő közelében.

A témával kapcsolatban sikerült felvennem a kapcsolatot az UNITEF-83 Zrt.-vel, amely bővebb betekintést engedett meg, s végig a segítségemre volt, a projekt tervezését illetően.

Fontosnak tartom megemlíteni, hogy a szóban forgó alagút nyomvonala keresztül megy egy korábbi agyagbányán, amelyet azóta már hulladéklerakóként hasznosítottak, majd rekultiváltak. A mai világban a magas fokú emberi tevékenység miatt egyre sűrűbben fordulnak elő ilyen adottságok egy tervezés során. Szennyezett talaj és/vagy rekultivált hulladéklerakók bevonásával készül el egy-egy műtárgy. Eme adottságok nagyban befolyásolják a tervezést, hiszen egyre jobban a környezettudatosság és környezetvédelem kerül előtérbe. Ezt a környezettudatos felfogást én is vallom, ezért kihívásként élem meg, hogy olyan tervet készítssek, amely ezt nagymértékben kielégíti. Szeretnék kiválasztani egy megfelelően költséghatékony megoldást amellet, hogy eközben az említett szakasz tájvédelmi illetve környezetvédelmi területnek minősül.

Szakdolgozatom alapvetően két nagy részre tagolható. Első felében kívánom taglalni M0-s gyorsforgalmi út rövid történetét, kitérve a fontosabb mérföldkövekre, az épülő új szakasz geológiai történetére, magára a helyszínre és annak kondíciójára. A szakaszhoz kapcsolható alagútépítési technológiák rövid leírása. Részletesen kitérek az Új Osztrák Alagútépítési Módszerre és természetesen, tárgyalom a XXI. Században elengedhetetlen számítógépes szoftverek fontosságára és alkalmazhatóságára általánosan és a projektre nézve.

A dolgozat másik részében kívánom részletesen bemutatni az alkalmazott számítási módszereket, geotechnikai modelleket, összefüggéseket. Az alkalmazott mérnöki módszereket követően bemutatom a kapott értékeket, az ezekhez kapcsolható ábrákat és keresztmetszeteket. A dolgozat végét egy összefoglalással kívánom lezárni, amelyben szaktársam Kajcsos Balázs költségbecslésével fogom összehasonlítani, kiértékelni az eredményeimet. Itt leírom, hogy melyik technológia milyen feltételek mellett alkalmazható jobban költségvetés és egyéb szempontok alapján.



SZENT ISTVÁN
EGYETEM



YBL MIKLÓS ÉPÍTÉSTUDOMÁNYI KAR, BUDAPEST



1. Az M0-ás autópálya részletesebb bemutatása:

Az M0-ás autótút, amit a köznyelv sokszor „körgyűrűnek” nevez, egy Budapestet körbevevő gyorsforgalmi út. A tervezett hossza 108 kilométer, ebből 2015-re hozzávetőlegesen 77 km épült meg. 2010-ben megkezdődött a déli szektor kétszer három sávós bővítése, ami 2013. szeptember 11-én le is zárult.

Az M0-ás 4 fő szektorra osztható:

- M0 déli szektor: az 1-es főút és az M5-ös autópálya között,
- M0 keleti szektor: az M5-ös és M3-as autópályák között,
- M0 északi szektor: az M3-as autópálya és a 10-es főút között,
- M0 nyugati szektor: a 10-es főút és az 1-es főút között

A kilométer számlálás az 1-es főúttól indul az M1-es autópálya felé.

1.1. Az M0-ás „körgyűrű” története:

A főváros körüli gyorsforgalmi út gondolatát először dr. Vásárhelyi Boldizsár, a Budapesti Műegyetem egykori professzora fogalmazta meg, ő vázolta fel az általa javasolt nyomvonalat – Budapesttől a mainál kissé távolabb vezetve –, a magyar automobil utak hálózatáról 1942-ben megjelent munkájában. A megvalósításra azonban még több évtizedet kellett várni.

Az 1960-as években a fővárosba sugárirányban befutó autópályákat – az eredeti gondolattól eltérően – a Hungária körút vonalában egy városi magas vezetésű autópályával kívánták összefogni, a párizsi périphérique mintájára. Ezt a nyomvonalat az 1971-es Országos Közúthálózati Fejlesztési Keretterv ki is jelölte. 1974-ben az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság (OMFB) megbízásából elkészült A magyarországi autópályahálózat terve és megvalósítási lehetősége című munka. Ebben részletes tervtanulmányokat javasoltak egy főváros menti autópálya-körgyűrű létesítésére. Ez a gyűrű a külső körút telítődése után hivatott megoldani a forgalom gyűjtésének és szétosztásának feladatát valahol a beépített területek határán. Ekkor alakult ki a mai napig használt felosztás, azaz az északi, déli, keleti és nyugati szektor. Majd az 1977-ben megfogalmazott Országos Közúthálózati Fejlesztési Keretterv is a főváros külső térségében, illetve határában vezetett autópálya kiépítésének a gondolatát vitte tovább. Az UVATERV-ben az akkori Közlekedés- és Postaügyi Minisztérium (KPM) megbízásából 1977-ben megbízást kapott a déli M0-ás autópálya nyomvonalának vizsgálatára. Az út 1977-es elnevezése is az UVATERV-nél dolgozó Arató Balázshoz, mint névadóhoz köthető.

Az 1977-es tanulmány 36-58 ezer egységjárműre becsülte a déli szektor 2010-es napi forgalmát. Ez a járműmennyiség kétszer négy sávot igényelne az úgynevezett „megfelelő” szolgáltatási szint biztosításához, az „eltűrhető” szinthez kétszer három sáv is elegendő lenne.

1982-ben döntés született a nullás déli (az M1-M5 közti) szektorának megépítéséről. Az 1985-ben kiadott Országos Közúthálózat Fejlesztése tervdokumentáció ezt a nyomvonalat megerősítette. Miután a belső területek egyre intenzívebben beépültek, a nyomvonal-változatok fokozatosan a főváros határába kerültek.

A munkálatok 1987-ben kezdődtek, és 1990 végén helyezték forgalomba az első nagyobb szakaszt, amely a 6-os utat kötötte össze az M5-ös autópályával. Az új útvonal forgalmi jelentőségét elsősorban a Csepeltől délre megépített Duna-hidak adták. 1994-ben teljes hosszában megépült a déli szektor, a 29,5 kilométeres szakasz immár három autópályát (M1, M7, M5) kötött össze. Első lépésben az eredetileg tervezett kétszer háromsávós sztrádát takarékosági okokból autóúttá karcsúsították. A szerényebb műszaki tartalommal megvalósult megoldás következtében az utat gyakran Halálútként emlegették.

Az építés idején a Liszt Ferenc repülőtér (akkor Ferihegyi repülőtér) alatt kívánták a keleti szektort továbbvezetni. Emiatt csatlakozik közel merőlegesen az M51-es autóút (amely korábban a déli szakasz keleti vége volt) az M5-ös autópályához. Ez végül a költségek miatt nem valósult meg.

1999-2003 között az útpálya közepére végig betonelemeket helyeztek el a balesetek elkerülése érdekében a forgalmas déli szektor két irányt elválasztó sávjára.

2005-ben elkészült az M5 autópálya és az M4 autóút közötti szakasz. 2008. szeptember 16-án pedig a már az M3-as autópályáig, illetve az 1-es főútig ért az út, ezáltal elkészült a keleti és északi szektoron is.

1.2. Eddig átadott szakaszok:

1988-ban az M5-ös autópálya és az új 51-es főút közötti szakasz. 2013-tól a megváltozott nyomvonalfolytatás miatt ez az első szakasz kikerült az M0-s szakaszai közül, és M51-es autóúttá változott.

1990-ben az 51-es főút és a 6-os főút közötti szakasz a két Duna híddal.

1994-ben a 6-os főút és az M1-es autópálya közötti szakasz.

1998-ban az M3-as autópálya és 2-es főút között (2/B és 2/A néven). Ekkor történt a Dunakeszi-tőzegtavak természetkárosítása az építés során.

2005-ben az M5-ös autópálya és az M4-es autóút között. (Az M5-nél az M0 nyomvonala ekkor még nem volt folytonos, kb. 5 km hosszon az M5-ön kellett haladni. A folytonosságot biztosító 51-es út és M5 közötti, kb. 6 km-es szakasz 2013-ban készült el.)

2008-ban az M4-es autóút és az M3-as autópálya közötti, valamint a 2-es főút és a 11-es főút közötti szakasz. (Ez utóbbi magába foglalja az 1862 m hosszú Megyeri hidat is.)



2012. június 26-án átadták az M7-es és M6-os autópályák közötti 2x3 sávós szakaszt a forgalomnak.

2013. június 30-án adták át a forgalomnak az M6-os autópálya és 51-es főút közötti 2x3 sávósra szélesített 11 km-es szakaszt. Az építését 2010-ben kezdték meg a déli szektor (M1-M5-között) – a hiányzó déli pálya kiépítésével – 2x3 sávós autópályává történő bővítését együtt. A beruházás két új Duna-híd építését tette szükségessé a meglévő hidak mellé építésével.

2013. augusztus 31-én került átadásra az 51-es főút és az M5-ös autópálya közötti új nyomvonalon épült 6,3 km-es szakasz. Ez a szakasz köti össze az M0-s régebbi déli szakaszt az újabban épült keleti szakasszal. Erre azért volt szükség, mert a régi, 51-es főút és M5-ös autópálya közti M0-s szakasz nyomvonala az M5-ös autópálya után nem volt folytatható a XVIII. kerület lakott területei miatt. Az eredetileg ide tervezett alagútban folytatódó nyomvonal a költségek miatt nem készült el. Az M0 korábbi 2x2 sávós szakasza a jövőben M51-es autót elnevezéssel használható az M5-ös autópálya és Budapest felé.

2015. július 22-én elkészült az M1 - M7 autópályák közötti 2,7 km-es szakasz hiányzó balpályája. Az átadást a jobb pálya lezárása és teljes felújítása követi.

A 2012-es forgalom számlálási adatok alapján a 15 km szelvénynél 65.820 jármű halad el naponta, míg a 26 km-nél 55.842 jármű. Ezt csak az M3-as 10 km szelvényél mért 68.997 jármű haladja meg.



2. Mérnökgeológiai kőzetmodell és elemei:

A műszaki gyakorlat megköveteli, hogy az adott létesítménnyel foglalkozó szakemberek a kőzetkörnyezetet szakterületüknek megfelelően, de egységes szemlélettel kezeljék. Ez csak úgy lehetséges, ha bizonyos általánosításokat végzünk és a jelenségeket az általánosítások felhasználásával modellezzük, azaz idealizáló feltevésekkel élünk. Az idealizáló feltevések térbeli modellben öltenek testet, amelytől megköveteljük, hogy a valóságot jól kövesse, hogy modell-elemei, vagy a modell összessége a mérnöki munka alapját képező számítási és méretezési, valamint összehasonlítási munkák elvégzésére elégséges információt nyújtson.

2.1. A mérnökgeológiai modellalkotás folyamata:

A mérnökgeológiai modell részletessége a műszaki létesítmény, a földtani felépítés bonyolultságának, valamint az alkalmazás céljának függvénye. A mérnökgeológiai munkáknál olyan modellt használunk, amelynek térbeli rendszere elsősorban a földtani felépítést követi. Körülhatárolható térbeli, vagy síknak tekinthető elemei meghatározott térfogatúak, tömeggel rendelkeznek és ezekhez az általunk választott tulajdonságok vagy tulajdonságváltozások rendelhetők.

2.1.1. A mérnökgeológiai modell elemei:

- kőzettömeg
- kőzettest
- kőzettömb

A *kőzettömeg* a földtani formációnak az a téreleme, melynek határai mesterségesen, a mérnöki feladatnak megfelelően kerülnek kijelölésre. Alakját és a térfogatát a feladat műszaki paramétereinek, a kőzettömeget érő hatásoknak és a földtani körülményeknek együttes mérlegelésével lehet megadni.



A *kőzettest* olyan – általában tagolt – térelem, amely azonos kőzettani minőségű, tagolatlan kőzettömbökből áll. A kőzettest tulajdonságai részben a kőzettestet alkotó kőzettömbök tulajdonságaitól, részben a tagoltság mértékétől függenek.

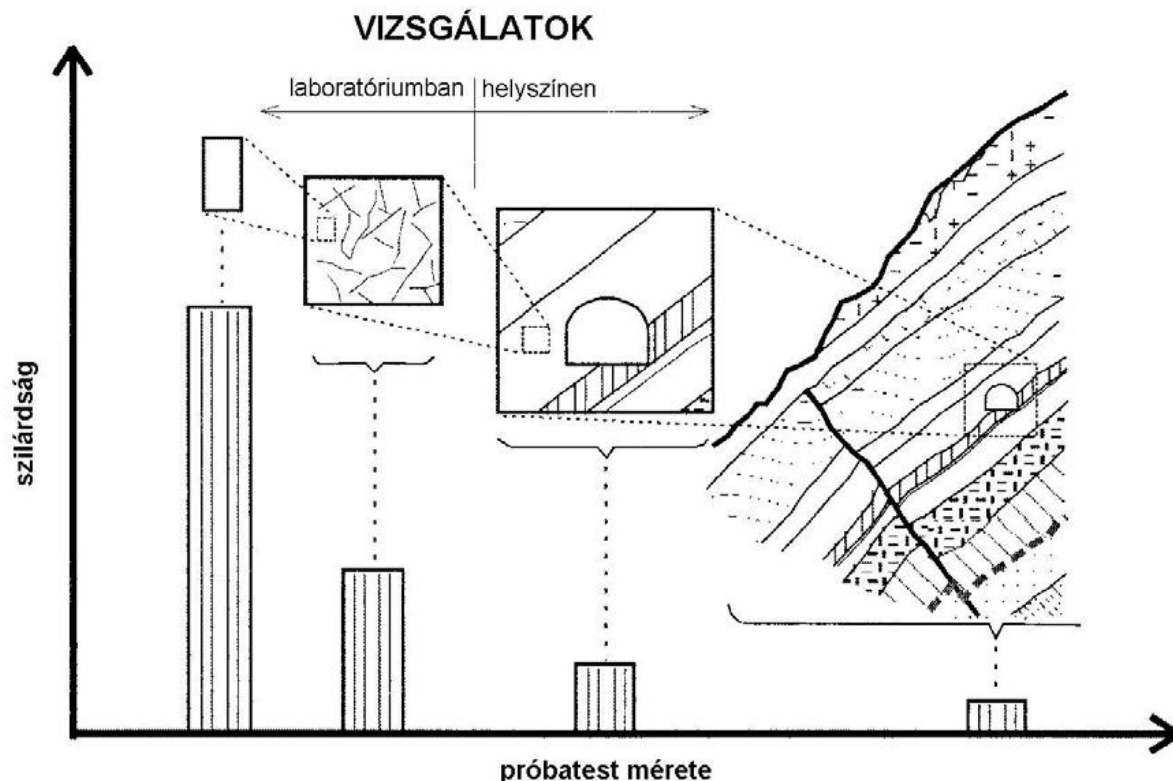
A *kőzettömb* a kőzettestnek az a része, amit tagoló-felületek határolnak. A kőzettömb tehát tagolatlan, homogén és izotróp rész, a mérnökgeológiai modell legkisebb eleme. Természetesen a kőzettömb tovább bontható még kőzetalkotó ásványokra, de ezek elemzése már általában nem tartozik bele a mérnökgeológiai vizsgálat szintjébe, ugyanakkor néhány esetben szükséges lehet ezek pontos ismeretére.

2.1.2. Homogenitás, izotrópia és folytonosság a mérnökgeológiai kőzetmodellben

A mérnökgeológiai kőzetmodell elemei szempontjából a homogenitás és a heterogenitás, valamint az izotrópia és anizotrópia fogalmát a modell-elemeknek, mint térelemeknek nagysága; a műszaki feladat jellege és a létesítmény, valamint a modell-elem hatásmechanizmusa szerint, dialektikusan kell értelmezni.

2.2. Kőzetkörnyezet osztályozása a tagoltsági rendszerek száma szerint:

Abban az esetben, ha a létesítmény kőzetkörnyezete egy, vagy két tagoltsági rendszert tartalmaz, mechanikai viselkedését homogén kőzettestként kezelni nem lehet. Különböző modellszinteken az elemek szilárdsági tulajdonságai nagyon eltérőek. Minél nagyobb egységet veszünk figyelembe, az elem annál kisebb szilárdsággal rendelkezik



2.3. Egyirányú nyomószilárdság meghatározása laboratórium vizsgálattal:

A kőzet egyirányú nyomószilárdságának meghatározására legáltalánosabban elterjedt módszer a henger alakú próbatesten végzett vizsgálat, mivel a fúrómagból a próbatest könnyen kialakítható, illetve a kőzettömbből laboratóriumban is ez a próbatest munkálható ki a legegyszerűbben. A henger alakú próbatestet lehetőleg 2:1-es magasság-átmérő arányú legyen, a korábbi hazai szabványok is ezt az arányt írták elő.

2.3.1. A szilárdságot befolyásoló tényezők:

Egy kőzet a legritkább esetben tekinthető homogénnek és izotrópnak, annak ellenére, hogy vizsgálatainknál így idealizáljuk

A nyomószilárdságot a kőzet víztartalma is jelentős mértékben befolyásolja. A vízzel telített kőzet szilárdsága jóval kisebb, mint száraz állapotúé.

A kőzet egyirányú nyomószilárdsága viszonylag tág határok között változik, sokszor egy a helyről származó, azonos ásványi összetételű kőzetblokkok szilárdságai között is nagyságrendi eltérések lehetnek.

Egyik első szilárdság alapján történő osztályozási módszert Protodjakonov (1969) alkotta meg,

Közetek szilárdság szerinti osztályozása Protodjakonov alapján

Osztály	Megnevezés	Közetnév	Nyomószilárdság σ_c [MPa]	Szilárdsági tényező, f
I.	rendkívül szilárd közet	szilárd, tömör kvarcit, andezit, bazalt, stb.	> 200	20
II.	igen szilárd közet	szilárd gránit, kvarcporfir, kvarcitpala, igen kemény homokkő	200...150	15
III.	szilárd közet	gránit, tömött mészkő, homokkő, konglomerátum, márga	150...80	10
IV.	közepesen szilárd közet	homokkő, mészkő, márga, agyagpala	80...50	8...5
V.	meglehetősen szilárd közet	kisebb szilárdságú homokkő és mészkő	50...20	5...2
VI.	kevésbé szilárd közet	laza pala, durva mészkő, gipsz, cementált homok, vulkáni tufák	< 20	2...1
VII.	tömör talaj	agyag, lösz, iszap	-	1...0,8
VIII.	laza talaj	tőzeg, vizes iszap, homok,	-	0,6
IX.	szemeses talaj	homok, kavics	-	0,5
X.	folyós talaj	iszap, vizes lösz, folyós homok	-	0,3

2.4. A Tagolsági jellemzők meghatározása:

A mérnökgeológiai, közetmechanikai gyakorlatban a tagoltságot olyan modellelemnek tekintjük, amely síkként, vagy sík-rendszerként kezelhető. Ezért a görbült, gyűrt felületeket is szakaszonként síkokkal helyettesítjük, majd jellemzésükhöz a szükséges tulajdonságokat megadjuk.

A tagoltság felvétele azt jelenti, hogy meghatározzuk:

- a tagoltság kialakulását és rendszerét,
- a tagoltság tágasságát vagy nyitottságát (apertúra),
- a tagoltság folytonosságát és egymástól mért távolságát,
- a tagoló felületek felületi jellemzőit és kitöltöttségét,
- a tagoltság vagy tagoltsági rendszer térbeli elhelyezkedését,
- a tagoltság mértékét.

2.4.1. A Tagoltság rendszere és kialakulása:

Tagoltság alatt mindazokat a diszkontinuitásokat (anyagi folytonossági hiányokat éshibákat) értjük, amelyeket kőzetképződési, tektonikai vagy egyéb tönkremeneteli folyamatok eredményeztek.

Repedésről akkor beszélünk, ha a tágasság és a felületi érdesség egy nagyságrendben van, hasadékoknál a tágasság nagyságrendekkel haladja meg a felületi egyenlőtlenséget; a hazai gyakorlatban szokásos megnevezések:

- repedések: mm – cm
- rés: cm – dm
- hasadék: dm – m

2.4.2. A tagoltság tágassága, nyitottsága:

Kőzetmechanikai szempontból, a kőzettest mechanikai vizsgálatánál külön jelentősége van az 1 cm-nél kisebb megnyílásoknak. Az ISRM (1978) ajánlása alapján öt különböző kategóriába lehet sorolni a tagoltságokat megnyílásuk alapján: a zárttól az 1 cm-nél nagyobb megnyílásúig.

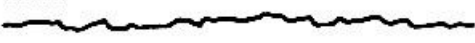
A tagoltságok megnyílásának osztályba sorolása (ISRM, 1978)

Osztály	Megnevezés	Megnyílás mértéke
1	zárt	< 0,1 mm
2	közeli	0,1 – 0,5 mm
3	kissé nyitott	0,5 – 2,5 mm
4	nyitott	2,5 – 10 mm
5	szélesen megnyílt	> 10 mm

2.4.3. Tagoló felületek felületi jellemzői és kitöltöttségük:

A tagoló felületek vizsgálatakor meg kell határozni annak érdességi viszonyait. Makroszkopikus megfigyelés alapján megkülönböztetünk:

- lépcsős
- hullámos
- sík

A tagolólófelület formája		JRC ₂₀	JRC ₁₀₀
lépcsős			
I	durva 	20	11
II	sima 	14	9
III	egyenletes 	11	8
hullámos			
IV	durva 	14	9
V	sima 	11	8
VI	egyenletes 	7	6
sík			
VII	durva 	2.5	2.3
VIII	sima 	1.5	0.9
IX	egyenletes 	0.5	0.4

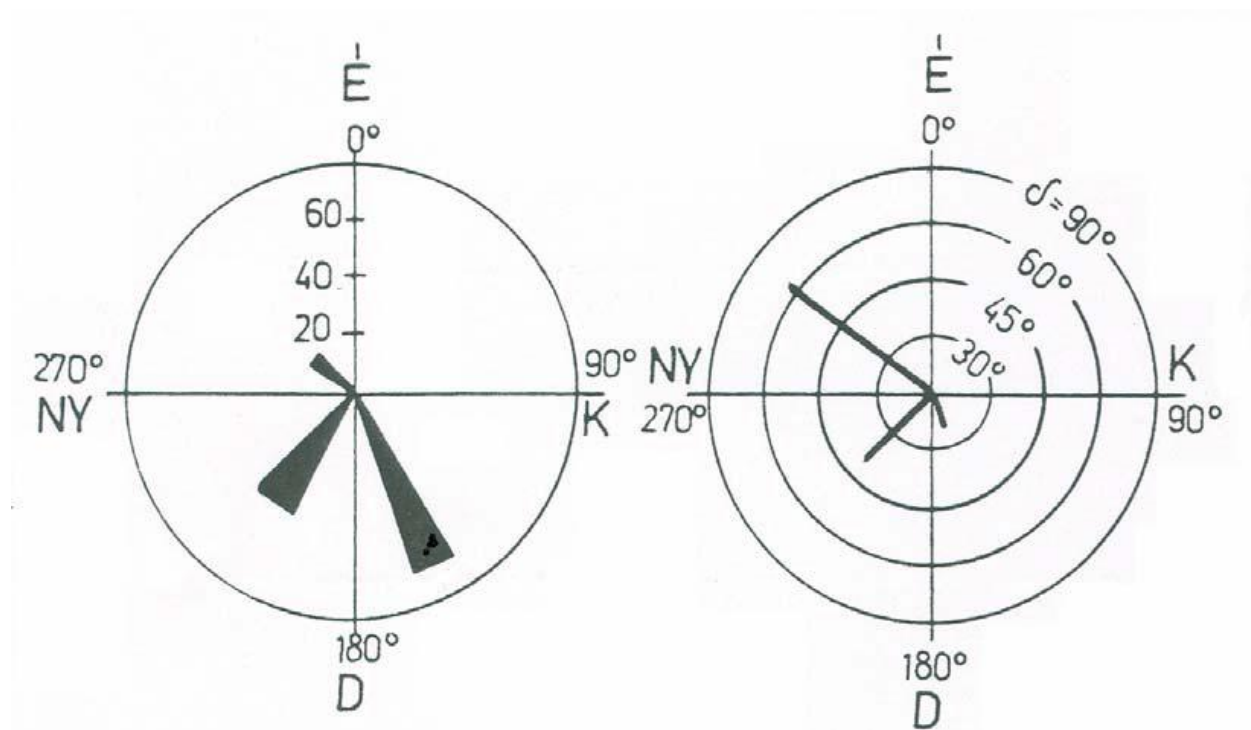
2.4.4. Tagoltság vagy tagoltsági rendszerek térbeli elhelyezkedése:

A tagoltság vagy a tagoltsági rendszerek térbeli elhelyezkedését a tagoló felületek dőlésadatainak – dőlésirány (α), dőlésszög (δ) – mérésével vesszük fel, és a mért eredmények ábrázolásával adjuk meg. A mért értékek ábrázolása többféle módon lehetséges. A gyakorlatban a két legfontosabb lehetőség az eredmények:

- dőlésrózsában (rózsadiagrammon)
- sztereografikus projekcióval való megadása.

2.4.4.1. Megoldás dőlésrózsában (rózsadiagrammon):

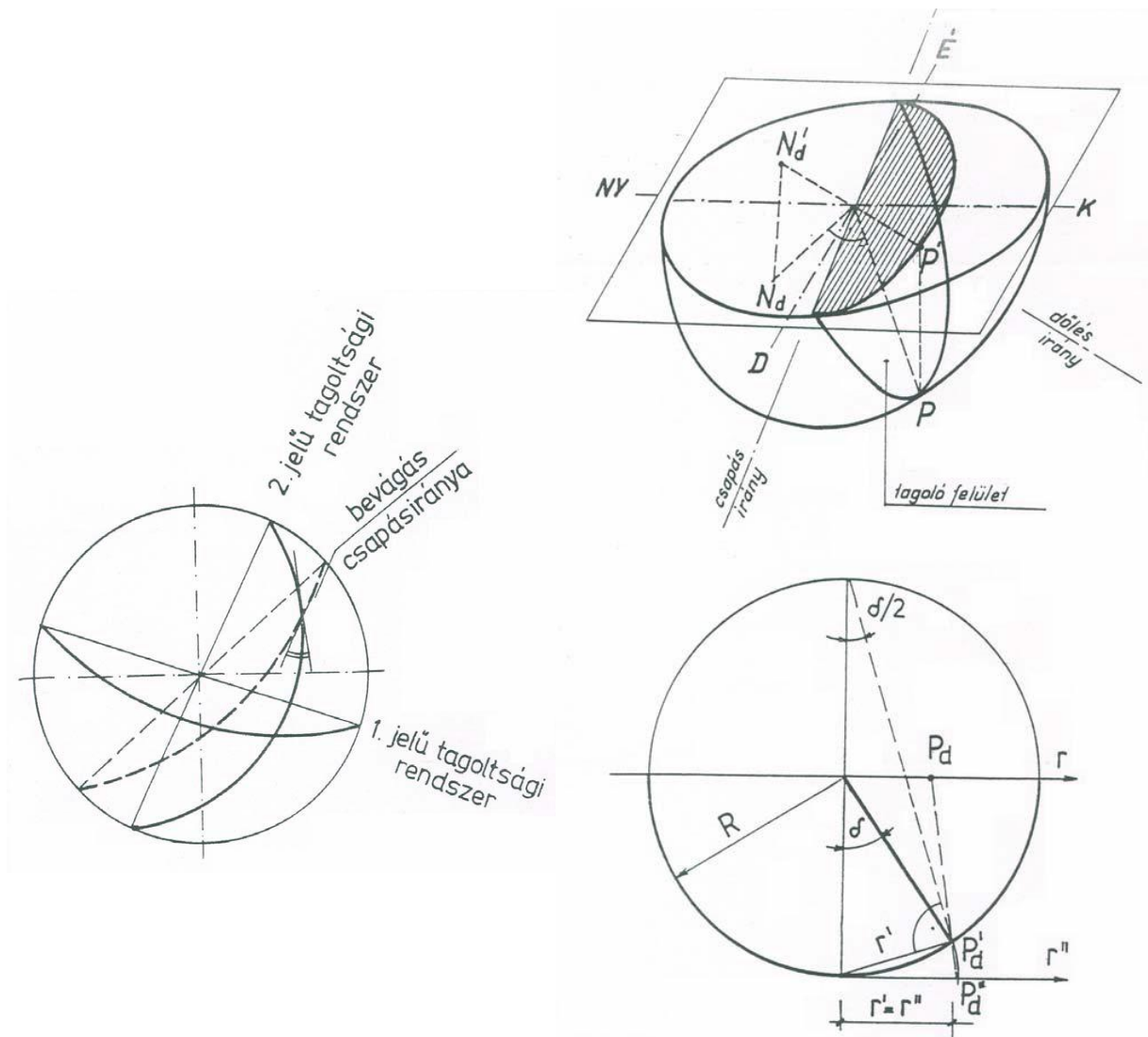
A tagoló felületek mérési eredményeit ezzel a módszerrel úgy ábrázoljuk, hogy dőlésirányban húzunk egy olyan vonalat, amelynek hossza arányos a dőlésszöggel. Így a nagyszámú mérési eredmények esetén egy a gyakoriságot jól mutató mező jelenik meg, ahol a terület a gyakorisággal arányos.



2.4.4.2. Sztereografikus projekció módszere:

A szabatos, mind méretezésre, mind földtani felvételre jól használható módszer a gömbprojekció szerinti ábrázolás, melynél a sztereografikus projekció használata terjedt el. A tagoló felületeket a vetítés rendje szerint két formában adhatjuk meg:

- poláris és
- ekvatoriális



2.4.5. A Tagoltság mértéke:

A tagoltság mértékének meghatározására számos módszer ismert. Az alábbiakban három különböző lehetőséget részletezünk:

- az integrálgeometriai módszert,
- a C (Hansági) módszert,
- az RQD érték meghatározásának módszerét.

2.4.5.1. Az integrálgeometriai módszer:

A tagoltság mértékének meghatározásához Beyer és Rolofs (1981) valószínűségi számítási megfontolások alapján javasolta az ún. integrálgeometriai módszert, melyet hazánkban Gálos (1985) terjesztett ki a magfúrásos kutatásból nyerhető adatok hasznosítására

2.4.5.2. C (Hansági) módszer:

Az RQD érték megalkotásakor Deere feltételezte, hogy a feltáró fúrásnál minimálisan 54 mm átmérőt használnak. Ez a kötöttség elég sok nehézséget okoz, hiszen sok esetben még igen nagy anyagi ráfordítás esetén sincs lehetőség ekkora átmérőjű fúrásra. Ezt figyelembe véve, valamint az RQD módszer egyéb korlátai miatt, Hansági (1965, 1986) ajánlására vezették be az ún. C tényező számításának módszerét, mely minden átmérő esetén használható. Kétségtelen tény, hogy a C tényező kiszámítása bonyolultabb, mint az RQD érték meghatározása, viszont a C tényező a gyakorlat szempontjából jobban megfelel az elvárt követelményeknek. A C tényező a C_p ún. próbatest-tényezőnek és a C_m maghosszúság-tényezőnek számtani középátlójából adódik, vagyis:

$$C = \frac{C_p + C_m}{2}$$

2.4.5.3. Az RQD érték a tagoltság mértékének meghatározása:

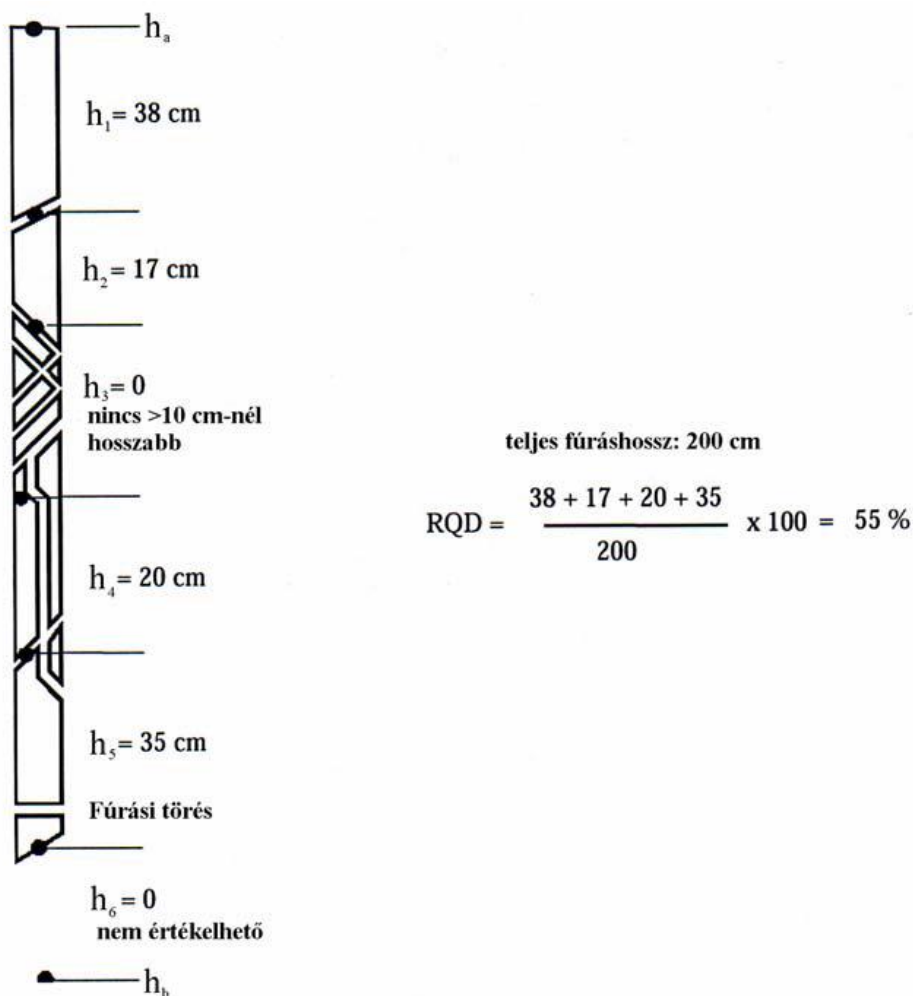
A tagoltság mértékének megállapítására és annak számszerűsítésére az RQD-módszer (RQD = Rock Quality Designation) terjedt el. Ezt a legtöbb kőzettest osztályozási módszer, mint alapadatot használja fel. Az RQD értéket előbb fúrómagra határozták meg, majd a szabad sziklafalakon felvehető egységnyi térfogatra eső tagoltsági értékkel is megfeleltették. A legújabb kutatásoknál már a tagolófelület irányát is figyelembe veszik e tényező pontos megállapításánál.

Az RQD érték használatát Deere vezette be 1964-ben, és ma már ez az egyik alapvető mérőszám a kőzettest tagoltságára vonatkozóan. Meghatározásánál a fúrómagból, (melynek átmérője

minimálisan 54,7 mm, azaz 2,15 hüvelyk) és a kihozott magmintadarabok hosszának méréséből indultak ki. Maga a mérőszám százalékban adja meg azon daraboknak az összhosszát, melyek hosszabbak, mint 100 mm (ill. az angolszász használatban 4 hüvelyk), azaz az RQD érték:

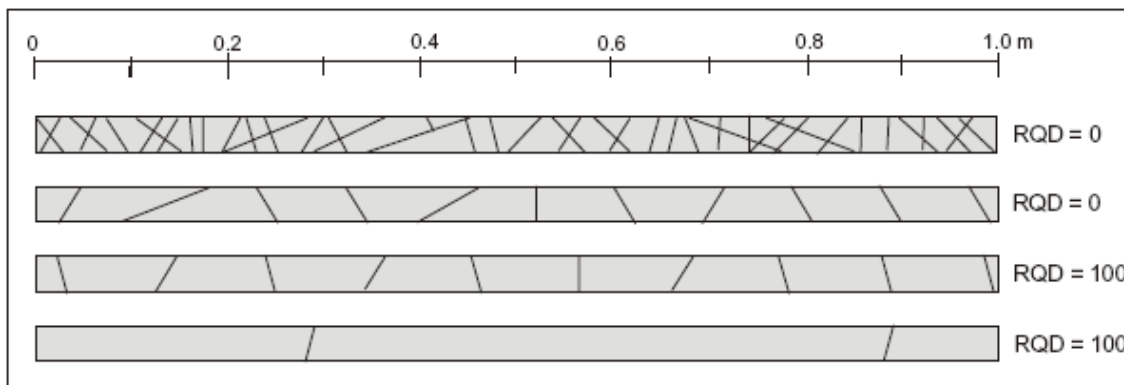
$$RQD = \frac{\sum h_{10}}{h_b - h_a} \times 100[\%]$$

Például:



Az RQD érték megállapításakor az egyértelműen a fúrásakor keletkezett friss törések figyelmen kívül hagyandók. Palás kőzetek esetében pedig közvetlenül a magkihozatal után kell a minősítést elvégezni, nehogy a paláság síkjában bekövetkező fellazulás az eredményt meghamisítsa. Megfelelő fúrás és magkihozatal mellett az RQD érték még rossz magkihozatal esetén is reális

képet ad, mivel a rossz magkihozatal oka ilyenkor általában a nagyon gyenge kőzetminőség. A fúrómagok hossza nemcsak a kőzet repedezettségétől függhet, hanem egyéb, a kőzet tulajdonságaitól független körülményektől is, így például az alkalmazott fúrás módtól, a fúróberendezés állapotától, sőt a fúrószemélyzet gyakorlottságától is.



2.4.5.3.1. Kőzettestek osztályozása az RQD érték alapján:

Kőzettestek osztályozása az EUROCODE 7 -1 szerint a kőzetmechanikai megnevezésekkel

RQD %	Kőzettest minősítése EUROCODE 7-1 alapján	Kőzettest kőzetmechanikai minősítő megnevezése
> 25	Nagyon gyenge	Gyakorlatilag talajként kezelhető
25 – 50	Gyenge	Nagyon töredezett
50 – 75	Megfelelő	Töredezett
75 – 90	Jó	Kisé töredezett
90 – 100	Kiváló	Ép

3. Kőzettest osztályozási módszerek:

- Terzaghi-féle kőzettest osztályozás
- RSR (Rock Structure Rating) módszer
- RMR (Rock Mass Rating) módszer
- Osztályozás a Q-index alapján

3.1. Terzaghi – féle osztályozás:

Terzaghi (1946) kőzettest osztályozási rendszere alagutak megtámasztásához az egyik első osztályozási módszernek tekinthető. Módszerével a biztosító acélhálóra ható kőzethez értéke becsülhető meg. Így a megtámasztás nagyságára ad közelítő értékeket.

Osztályozási módszerét egy, az 1920-as években, az Alpokban épített, 5,5 m átmérőjű, acélívekkel megtámasztott közúti alagút építéséhez dolgozta ki és az építés során a gyakorlati tapasztalatokat figyelembe véve korrigált.

Terzaghi kőzettest-osztályozását ma már nem használjuk, mivel a modern megtámasztási technológiákra (lőttbeton, kőzetcsavar) nincs átdolgozva.

3.2. RSR módszer:

Ezt a kvantitatív módszert a kőzettest minőségének meghatározására Wickham *et al.*

(1972) vezette be, majd a tapasztalatok alapján 1974-ben korrigálták a megadott értékeiket. A módszer ismertetésénél a korrigált értékeket adjuk közre. Az RSR osztályozást az angolszász mértékegységek figyelembe vételével határozták meg, ezért a bemutatott táblázatokban is így használjuk. Európában, Észak-Amerikával ellentétben, ez a módszer nem terjedt el.

Ez a kvázi-kvantitatív módszer három különböző csoportra osztja a kőzetestről összegyűjthető információkat, melyeket külön-külön vizsgál:

- a környezet földtani viszonyai (A paraméter),
- a tervezett alagút geometriája (B paraméter),
- víz jelenléte és mennyisége (C paraméter)

Mindhárom főcsoportban további alcsoportokat használ, melyekhez szintén számértékeket rendel.

3.3. RMR (Rock Mass Rating) módszer:



Az RMR módszert (melyet az angolszász szakirodalomban számos esetben Geomechanikai Osztályozásnak is neveznek) Bieniawski fejlesztette ki 1973-ban, Dél- Afrikában üledékes kőzetben (főleg mészkövekben), sekély mélységben vezetett alagutak építésére. Az eredetileg az üregállékonyság, üregbiztosítás érdekében kifejlesztett módszer kiválóan alkalmas telephely értékelésére is. Az RMR értékek megállapodásokon alapulnak, ezért csak összehasonlítást tesznek lehetővé telephelyen belül, illetve telephelyek között.

Az RMR módszer a kőzettest tulajdonságait a mérnöki létesítmény figyelembe vételével szuperponálja, azaz az alagút esetében a jövesztés irányát is figyelembe veszi. Az osztályozás az alábbi hat tényező figyelembe vételét tartja fontosnak:

- A kőzet egyirányú nyomószilárdsága; (r_{σ})
- RQD tényező; (r_{RQD})
- A tagoltságok távolsága („sűrűsége”); (r_x)
- A tagoltságok állapota; (r_a)
- Réteg- és talajvizek; (r_G)
- A tagoltságok iránya (r_d)

Példa egy ajánlott fejtési és biztosítási módszerre a kőzettest RMR osztályának ismeretében sekély mélységben, max. 15 méter átmérővel épülő alagút esetén (Bieniawski, 1989).

RMR érték	Fejtési hossz	Megtámasztás módja		
		Közethorgonyzás	Lötbeton	Acéltámiv
<i>I.</i> Nagyon jó 81-100	Teljes felületen 3 m hosszan	Általában nem szükséges, néha helyi erősítés		
<i>II.</i> Jó 61-80	Teljes felületen 1,0- 1,5 m hosszán. Teljes megtámasztás a vájvtól 20 m-en belül	Helyileg, 3 m hosszan, 2,5 m- ként, helyileg acélhálózattal	50 mm vastagságban a főténél, ahol szükséges	Nem szükséges
<i>III.</i> Megfelelő 41-60	Részlegesen 1,5 – 3,0 m-es előrehaladással. Általános megtámasztás minden vájvtól után. Teljes megtámasztás 10 m- rel a fejtés mögött.	Rendszeresen elhelyezve 4 m hosszú, 1,5-2 m- es közönséges a főténél és a falban, a főténél acélhálózattal.	50-100 mm a főténél és 30 mm az oldalaknál	Nem szükséges
<i>IV.</i> Gyenge 21-40	Részlegesen 1,0-1,5 m hosszú előrehaladás. 10 m-re a jövesztés után azonnal biztosítás elhelyezése	Rendszeresen közethorgonyzás 4-5 m hosszán, 1- 1,5 m-ként a főténél és acélháló a falakon	100-150 mm a főténél és 100 mm az oldalakon	Könnyű vagy közepes ívek 1,5 m-ként, ahol szükséges
<i>V.</i> Nagyon gyenge <20	Összetett fejtés 0,5-1,5 m hosszán. Biztosítás elhelyezése azonnal a jövesztés után. Lötbetonos biztosítás amilyen gyorsan csak lehetőséges.	Rendszeresen horgonyzás 5-6 m hosszan, 1-1,5 m sűrűséggel a főténél és a falban acélhálózattal	150-200 mm a főténél, 150 mm az oldalaknál és 50 mm a fejtésnél	Közepes és nehéz ívek 0,75 m-enként béléssel és ha szükséges előtűzéssel. Zárt ellenívvel

3.4. A Q-index:

A Norvég Geotechnikai Intézet (NGI) az addigi nagyszámú alagúttépítési tapasztalatokat felhasználva, Barton vezetésével 1974-ben foglalta össze vizsgálódásaik eredményeit, és állította össze kőzetminősítési módszerét kifejezetten alagutak építésre. Az általuk bevezetett módszert a szakirodalom Q módszerként ismerteti (Q: quality).

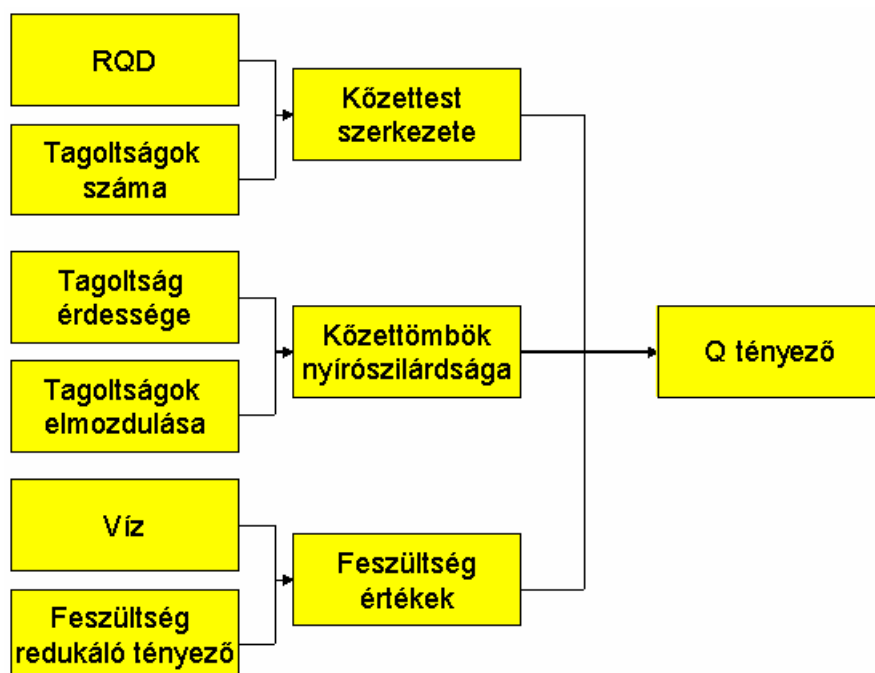
Kidolgozása óta számos alagút építésénél használták, és ma már az egyik legfontosabb kőzettestet minősítő eljárás.

A Q módszer az RMR-rel ellentétben a hatásokat figyelembe vevő jelzőszámokat nem összegzi, hanem a kőzettest szerkezete, a tagoltságok érdességének és töredezettségének, valamint a feszültségi paraméterek jelzőszámainak szorzatát, illetve hányadosát számolja. A Q értéke minimálisan 0,001, a maximálisan pedig 1000, azaz elméletileg kb. 300 000 különböző földtani kombinációt képviselhet.

A Q értékének meghatározása a következő:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \text{ ahol}$$

az RQD érték (a képlet csak $RQD > 10\%$ esetén használható), J_n a tagoltság csoportjainak számát kifejező számérték, J_r a tagoltság érdességének mérőszáma, J_a a tagoltság felületi mállottsága, J_w a tagoltságban megjelenő víz, SRF a feszültség redukáló tényező ($SRF = \text{Stress Reduction Factor}$).



3.4.1. A kőzettest szerkezete:

A kőzettest szerkezetét az RQD/J_n (azaz a tagoltság mérőszáma/a tagoltság csoportjainak száma) hányadosa mutatja. Maximális értéke 200 (100/0,5) és a minimális 0,5 (10/20). Az RQD értékét itt 5 egészre kerekítve kell felvenni (azaz 100, 95, 90, stb.).

A J_n értéke az alábbi táblázatból határozható meg

A tagoltság mérőszámának meghatározása

TAGOLTSÁG	J_n
Ha a kőzet masszív, nincs repedés vagy csak kevés repedés van	0,5-10
Egy repedéscsoport	2
Egy repedéscsoport + véletlen törés	3
Két repedéscsoport	4
Két repedéscsoport + véletlen törés	6
Három repedéscsoport	9
Három repedéscsoport + véletlen törés	12
Négy vagy több repedéscsoport + véletlen törés	15
Töredezett kőzetre	20

3.4.2. A kőzettömbök nyírószilárdsága:

A J_r/J_a hányados a tagoltság érdességét és töredezettségét, továbbá mállottságát leíró tényező, és így a kőzettömbök közötti nyírószilárdságról ad információt. Ez az érték az üde állapotú, nem kitöltött, érdes érintkező felületnél a legnagyobb, mivel ebben az esetben a maximális a nyírófeszültséghez a legnagyobb megnyílás tartozik, ami az alagútépítéshez a legszerencsésebb. Amikor agyagkitöltés található a tagoltságban, a nyírófeszültség jelentősen csökken.

A J_r értéke az alábbi táblázatból nyerhető:

A repedezettségi tényező meghatározása

REPEDÉSÉRDESSÉGI TÉNYEZŐ^a	J_r
Nem folyamatos lépcsős repedés	4,0
Durva vagy rendszertelenül hullámos felület	3,0
Sima vagy egyenletesen hullámos felület	2-1,5
Durva vagy rendszertelen sík felület	1,5
Sima felület	1,0
Egyenletesen sík felület	0,5

A J_a értéke az alábbi táblázatból nyerhető:

A tagoltság elmozdulási tényezőjének (J_a) meghatározása

<i>A TAGOLTSÁG MÁLLOTSÁGI TÉNYEZŐJE</i>			
<i>Zárt repedések esetén</i>			J_a
Összementálódott, kemény, nem lágyuló impermeábilis kitöltő-anyagoknál (pl.: kvarc, epidot)			0,75
Csak felületbevonat képződött			1,5
Agyagásványokat nem tartalmazó közettörmelék esetén			2,0
Iszapos vagy agyagos rétegek esetén			3,0
Lágyuló v. kevésbé sűrűlő agyagrétegek (kaolinit, csillám, gipsz, grafit, stb.) esetén, max. 2 mm résvastagságnál			4,0
<i>Nyitott repedések esetén</i>			
<i>10 cm-en belül záródnak mozgás alatt</i>	J_a	<i>Nem záródnak mozgás alatt</i>	J_a
Homokszemeknél v. közettörmeléknél	4,0	Homokos vagy iszapos (nem lágyuló) agyagnál	5,0
Erősen konszolidált, nem lágyuló agyagásvány kitöltésnél (folyamatos 5 mm vastagságú)	6,0	Közettörmelékes kitöltésnél	6-8
Közepesen vagy kissé konszolidált agyagásványnál (folyamatos 5 mm vastagságú)	7,0	Agyagos törmelékkitöltésnél	8-12
Duzzadó agyagnál (folyamatos 5 mm vastagságú)	8-12	Agyagkitöltés esetén	10-20

3.4.3. A feszültség értékek:

A feszültségérték két tényezőből tevődik össze: a tagoltságban lévő víz (J_w) és az ún. feszültség-redukciós tényezőből (SRF), melyek hányadosát (J_w/SRF) kell kiszámolni.

A J_w -hez tartozó táblázat a következő:

A repedés-víz redukciós tényező

Repedés-víz redukciós tényező	J_w
Száraz üreg vagy max. 5 l/perc vízszivárgás esetén	1,0
Mérsékelt vízbeáramlásnál, amely esetenként kimossa a kitöltő anyagot	0,66
Nagy mennyiségű vízfolyás, nagy nyomáson (0,25-1,0 MPa), amely nem zárt repedéseken vagy a réskitöltés kimosásával áll elő	0,5-0,33
Nem csökkenő, nagy mennyiségű vízfolyás, nagy nyomáson (1,0 MPa)	0,2-0,05

Az SRF értékének meghatározásához:

A feszültségi redukciós tényező (SRF) értékei.

Feszültségi redukciós tényező^a	SRF
Gyengült zóna, agyagos v. kémiaiilag bontott kőzetekben (bármely mélységben)	10,0
Egyetlen gyengült zóna esetén, mely agyagot és kémiaiilag bontott kőzetet tartalmaz (mélység < 50 m)	5,0
Egyetlen gyengült zóna esetén, mely agyagot és kémiaiilag bontott kőzetet tartalmaz (mélység > 50 m)	2,5
Vetős zóna többszöri előfordulás esetén, szilárd kőzetekben (bármely mélységben)	7,5
Egyetlen gyengült agyagmentes zóna esetén (mélység < 50 m)	5,0
Egyetlen gyengült agyagmentes zóna esetén (mélység > 50 m)	2,5
Nyitott és erősen töredezett kőzet esetén (bármely mélységnél)	5,0

^a:A felsorolt értékek 25-50 %-kal csökkentendők, ha a gyengült zóna nem esik az üreg szelvényébe, hanem csak hatással van az üreg állékonyságára.

FESZÜLTSGI REDUKCIÓS TÉNYEZŐ ^b			SRF
Szilárd kőzetben kihajtott üreg esetén			
	σ_c/σ_1	σ_t^*/σ_1	
Alacsony feszültségek, felszínközeli mélység	> 200	> 13	2,5
Közepes feszültség	200-10	13-0,66	1,0
Nagy feszültség, tömör szerkezetű kőzet	10-5	0,66-0,33	0,5-2
Közepes kőzetnyomás (szilárd kőzet)	5-2,5	0,33-0,16	5-10
Nagy kőzetnyomás (szilárd kőzet)	< 2,5	< 0,16	10-20
Képlékeny kőzetben való kihajtás esetén			
Közepes kőzetnyomás esetén			5-10
Nagy kőzetnyomás esetén			10-20

^b: Ahol σ_c , σ_t és σ_v a kőzet nyomó- és húzószilárdsága, valamint az üregnyitás előtt a kőzettestben lévő függőleges feszültség.

3.4.4. A Súlyozott Q-érték meghatározása:

Q tényező meghatározásánál törekedni kell arra, hogy „-tól -ig” határon belül állapítsuk meg az értékeket. Az így meghatározott bemenő adatok súlyozott figyelembe vételével lehet a Q tényezőt számítani. A számítási módot Barton (1993) alapján mutatjuk be; hogy vehetjük figyelembe a Q tényező súlyozott értékének kiszámításánál a mért minimális, maximális, illetve jellemző értéket.

Ezeket az alábbi súllyal kell számolni:

- *Legrosszabb érték:* 10 %
- *Általános érték:* 60 %
- *Maximális érték:* 30 %

Példa a súlyozott Q érték meghatározására

Q érték	Legrosszabb (10 %)	Általános (60 %)	Maximális (30 %)	Súlyozott érték
RQD	25	65	85	67
Jn	12	9	-	9,42
Jr	1,5	3	4	2,05
Ja	4	2	1	1,9
Jw	0,66	1	1	0,966
SRF	7,5	5	2,5	4,5

4.

4. Fúró - robbantó munkák:

A robbanóanyagok olyan vegyi folyamat kifejtésére képesek, melynek során egy szűk térben (robbantó lyukak) olyan nagy tömegű gáz és hő fejlődik rendkívül rövid idő alatt, hogy a kialakult hatalmas nyomás okozta feszültségek a kőzet szilárdságát bizonyos körzeten belül felülmúlják. A robbanás hatásfoka, tehát csak egy-bizonyos meghatározott sugarú körzetben érvényesül és azon belül is az alábbiak szerint csökkenő hatásfokkal.

A körzet sugarának nagysága az alkalmazott robbanóanyag típusán, mennyiségén és a fejtés hatósugarán kívül a kőzettől függ, és azt a gömbhéjat, melyen belül a robbantás még a kőzet károsodását, kiszakadását okozza, az a távolság szabja meg, melyen a robbanás hatására létrejövő rengési hullámok által okozott feszültségek még meghaladják a kőzet húzószilárdságát. Természetesen ez a feszültség is csak akkor hozhat létre elmozdulást, ha a hullámok irányában - szabad felület – a felszín, litoklázis vagy a már robbantott töltet által fellazított kőzetanyag található.

Normális körülmények között a robbantó furat egy olyan krátert fog a kőzetből kiszakítani, amelyet közel 45°-os oldalak határolnak. A robbantó furatok mélységének, az úgynevezett mellezési mélységnek megválasztása és a furatok kiosztása az alábbi elméleti meggondolások alapján történhet.

Az m mélységű furat alján elhelyezett robbanóanyag elméletileg a függőlegestől α szög alatt hajló kúpon belül eső anyagot fogja kirobbantani.

$$V = \frac{m}{3} \times \pi \times r^2, \text{ mivel}$$

$$r = m \times \operatorname{tg} \alpha; \quad V = \frac{\pi}{3} \times m^3 \times \operatorname{tg}^2 \alpha$$

Lebrun szerint a töltet mennyisége (L) és a mellezési mélység (m) között az alábbi összefüggés áll fenn.

$$L = C \times \frac{m^3}{\cos^3 \alpha}, \quad \text{és innen} \quad m^3 = \frac{L}{C} \times \cos^3 \alpha,$$

ahol C a talaj szilárdságától és a robbanóanyag minőségétől függő érték, tehát

$$V = \frac{\pi}{3} \times \frac{L}{C} \times \cos^3 \alpha \times \operatorname{tg}^2 \alpha,$$

melynek szélsőértékét képezve α szerint $\frac{d \times V}{d \times \alpha} = \frac{\pi}{3} \times \frac{L}{c} (2 \sin \alpha \times \cos^2 \alpha - \sin^3 \alpha),$

ami akkor 0, ha $2 \cos^2 \alpha = \sin^2 \alpha$, vagyis $\tan \alpha = \sqrt{2}; \alpha = 54^\circ 44'$ és innen az optimális kúpnak megfelelő mellzési mélység.

$$m_0 = \frac{4}{7} \times \sqrt[3]{\frac{L}{c}},$$

amely értéknek csak 70-80%-át vesszük alapul, mert a tapasztalat szerint a robbatás lefelé is hat, így a robbantási tölcser a furatba helyezett töltetnél mélyebbről fog kiindulni.

A vizsgálatok szerint egyébként a fejlődő energiáknak csupán körülbelül 20%-a fog ténylegesen a kőzetfejtésre fordítódni.

4.1. Robbanóanyagok Fő csoportjai:

A robbanóanyagokat alapvetően két fő csoportba sorolhatjuk:

- A közvetlen, lassú hatású (flegmatikus) robbanóanyagok,
- A hirtelen (heves) hatású (brizáns) robbanószerek, de szükségesnek érzem még megemlíteni a robbantási folyamat megindításához szükséges
- szúróhatású (iniciálós) robbanóanyagokat

A közvetlen, lassú hatású (flegmatikus) robbanóanyagok, melyek egyszerű, közvetlen láng hatására robbannak, és aránylag kis sebesség mellett sorjában égnek el úgy, hogy a környező anyagokat szétfeszítik, azután a lassan kifejlődő gáznyomás folytán eltolják, és nem őrlik össze. Ilyenek a feketelőpor, paxit stb.

A hirtelen (heves) hatású (brizáns) robbanóanyagok, amelyek csak lényegesen erősebb szúró láng hatására robbannak, azonban akkor úgyszólván egyetlen pillanat alatt egész tömegükre szétbomlanak (mintegy 600 m/sec terjedési sebességgel), miközben a közvetlen környezetet elporlasztják, a távolabbiakat összetörik, majd tovaszakítják. Ilyenek a nitrotoluol, nitroglicerín, nitrocelluloze, dinamit, ekrazit stb.

A szúróhatású (iniciálós) robbanóanyagok, amelyek a robbanási folyamatok megindításához szükségesek, ezeket gyutacsok készítéséhez használják. Ilyen például a durranóhigany.

Alagútépítési robbantásoknál általános feladat a lehető legkevesebb robbanóanyag felhasználásával, a lehető legnagyobb tömegű kőzet fellazítása. A repesztésen kívül a kirobbantott anyag felaprózására is törekedni kell a könnyebb szállítás érdekében.

A feladat helyes végrehajtásában igen nagy szerep jut a furatok elhelyezésének és a robbantások egymásrakövetkezési sorrendjének, az az a késleltetésnek is. Ha két furat nincs egymástól túl messze elhelyezve, akkor a robbanás ereje kiszakítja a közöttük maradó anyagot. A ferde vagy csapott furat a gyakorlatban sokszor hatásosabb, mint a merőleges, mert a feszítő erő normálisan hat a furat tengelyére és a fojtás kifújásának veszélye kevésbé áll fenn. Ha a töltetet két egymásra merőleges szabad felület között helyezzük el, akkor a robbantás a szerint alakul és hatása a elrendezéshez képest 2,5-szeresre, három egymásra merőleges felület esetén pedig 3,5-szeresre nő.

A gyakorlatban a robbantó furatok átmérője rendszerint 26-40 mm, és mélységük 1,2-3,5 m között változik. Nem célszerű 2,5 méternél hosszabb furatokat készíteni, mivel például egy 3,6 méter hosszúságú furat elkészítése annyi ideig tart, mint 2 db 2,4 méteresé. Emellett a mélyebb furatokat nagyobb kezdőátmérőjű fúróval kell indítani. Az alkalmazott fúrás mélység erősen függ a kőzet anyagától is. A lazulásra hajlamos, kis szilárdságú anyagban érdemes rövidebb furatokat készíteni és kisebb robbantó tölteteket alkalmazni. Figyelembe veendő az is, hogy a furatokat soha nem lehetnek mélyebbek, mint az alagút szélessége, továbbá hogy a robbantás hatása viszont csak a furat aljától 30-40 cm-rel feljebb kezdődik. A hatásfok növelése érdekében célszerű a furat aljában brizánsabb robbanóanyagot elhelyezni.

A furatok mélysége Randzio szerint:

$$m = (f - 1)\alpha + 0,5,$$

ahol f a táró homlokfelülete, α pedig a furat átmérőjétől (δ) – *delta* függő tényező, ha

$$\delta = 60 - 80 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,20$$

$$\delta = 45 - 60 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,18$$

$$\delta = 20 - 30 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,10.$$

A robbantó furatokat a homlokfalon bizonyos rendszer szerint helyezik el, és meghatározott sorrendben robbantják. Az elhelyezés függ a furat hosszától, a kőzet rétegződésétől és viselkedésétől. (A rétegződéssel párhuzamosan elhelyezett furatok nem előnyösek!)

A kialakult gyakorlat szerint középen V alakban összehajló, úgynevezett szívfuratokat, a széleken pedig kifelé hajló ún. koszorúfuratokat helyeznek el. A furatok elrendezése lehet soros vagy koszorúszerű, legújabban spirális.

A robbantás sorrendje a közethez és a munkamenethez, a vágatok helyzetéhez igazodó, legváltozatosabb formában történik. Sorrendileg célszerű, a folyamatot középről indítani és a külső széleken befejezni, mivel ezáltal a további robbantások már legalább két szabad felület irányában fejthetik ki feszítő hatásukat. Különös figyelmet igényelnek a talpfuratok és a szelvényhatár szomszédságába telepített furatok, amelyek a nehéz utánfejtési munkálatok kiküszöbölése érdekében lefelé, illetve kifelé hajlanak. Ugyanis a robbantás határfoka a bennmaradó közettömb nagy tömegellenállása következtében itt a legkisebb, és az esetleg bennmaradó vékony takarórétegek utólagos eltávolítása a legnehezebb és a leggazdaságtalanabb.

A robbantás összhatását és főként a kőzetfelaprózást igen kedvezően befolyásolja a robbantások közötti eltelt idő (késleltetési idő) és a késleltetés sorrendje is. Ha a szomszédos furatokban már akkor robbantunk, amikor az előző robbantási folyamat fizikai hatásai nem fejeződnek be, akkor a hatások kedvezően szuperponálódnak. Ezt a kedvező hatás összeadódást használja ki a millszekundumos robbantás, melynél a szomszédos töltetek robbantásai néhány század másodperccel követik egymást.

4.2. Robbanóanyagok napjainkban:

Manapság azonban már sokkal fejlettebb anyagok alkalmazása terjedt el, amely így biztonságosabbá teszi a folyamatot. Az által, hogy az alkalmazott robbanóanyag nem érzékeny külső fizikai behatásokra.

Nelvin Cook 1956-ban találta fel a robbanóiszapot. Ebből fejlesztették ki az alacsony víztartalmú, vízre nem érzékeny, a dinamittal azonos vagy nagyobb hatékonyságú (LWC: Low-Water-Composition) emulziós robbanóanyagot. Az emulziós robbanóanyag igen finom eloszlású vizes-olajos emulzió és sóoldat-cseppekből áll. A sóoldat-cseppecskék átmérője 10^{-6} m, és ezt egy még finomabb 10^{-9} m vastagságú olajréteg veszi körbe. A finom anyagszerkezet ellenére ez az elegy még nem robbanóképes. Robbanóanyaggá akkor válik, ha igen finom eloszlású levegő- vagy gázbuborékokat, gömböcskéket hoznak létre benne. A már érzékennyé tett robbanóanyagnak is nagy a hő- és ütésálló képessége (5-ször nagyobb, mint a dinamité). Így biztonsággal alkalmazható mind patronként, mind plasztikus anyagként a furatba pumpálva. A patronok részére az anyagot viasszal, ill. parafinnal teszik merevvé, hogy megakadályozzák a gáz- ill. légbuborékok összefolyását. A patronok így jelentős merevségűek és jól használhatók. Az anyag érzékennyé tétele történhet üzemben vagy a helyszínen is. Ez utóbbi nagy előnye, hogy nem kell az anyagot a helyszínen robbanóanyagokra kialakított és előírt szigorú szabályok szerint tárolni, mert csak közvetlenül a bedolgozás előtt teszik érzékennyé, robbanóképesé az anyagot.

A robbanás a „forró pont” elve alapján zajlik le igen nagy égési sebességgel. A nagy sebesség az anyag finom szerkezetével függ össze. A lökőhullám hatására a kis gáz- ill. légbuborékok összenyomódnak és felforrósodnak, és így áll elő a „forró pont”, amely kiváltja, ill. tovább is viszi

a robbanás folyamatát. A robbanóanyag tulajdonságai különböző kiegészítő adalékokkal a helyi igényeknek megfelelően módosíthatók, pl. száraz alumíniumnitrát vagy alumíniumpor adagolásával csökkenthető a robbanás sebessége, de növelhető az energiasűrűsége. A teljes kémiai energia a robbanás pillanatában szabadul fel, ezzel magyarázható a magas nyomás és hőmérséklet valamint a nagy robbanási sebesség.

Az emulziós robbanóanyag fő jellemzői tehát:

- nem tartalmaz veszélyes és környezetszennyező robbanóolajat (nitroglicerint)
- érzékeny robbanóanyaggá csak a fizikai érzékenységi tétel (gáz ill. légbuborékképzés) után válik
- 4/5 % vizet tartalmaz, de vízben nem oldódik
- a robbanásban résztvevő anyagok vizes-olajos emulziós bensőséges elegye.

4.2.1. Az emulziós robbanószerek előnyei:

- közepes teljesítmény, de magas robbanási sebesség kis átmérőjű furat esetén is
- robbantástechnikai értékei adalékokkal a helyszínen az igényeknek megfelelően befolyásolhatók
- a dolgozókra nincsen kedvezőtlen élettani hatása (pl. nincs fejfájás)
- nagy biztonság a szállítás és bedolgozás közben jelentkező hő- és mechanikai igénybevételekkel szemben
- lényegesen kevesebb toxikus alkotórész a robbanógázokban
- a kirobbantott anyag környezetbarátabb
- nagyon gazdaságos.

Ehhez az új anyaghoz elektromos gyújtás helyett általában gyújtótömlős eljárást alkalmaznak.

A kőzetek fejtésére tehát a brizáns robbanó anyagokat használják. Ezek a külső behatásokkal szemben (ütődés, rázkódás) nem érzékenyek, kezelésük biztonságos. Csak iniciáló anyagokkal robbanhatnak fel. A robbantásuk robbanógyutacsokkal, vagy robbanózsínókkal történik. A gyutacsokban kis mennyiségű igen érzékeny robbanóanyag van elhelyezve, amelyet a gyújtózsínórral, vagy villamos árammal, vagy gyújtó tömlővel robbantanak. A gyújtózsínór lőporral van töltve, meggyújtva lassan ég el és így időt ad a biztonságos fedezékbe jutáshoz, kb. 1 cm/s az égési sebessége.

A szükséges töltet tömegére (kg) igen sok tapasztalati képletet használnak. Stini képlete a következő:

$$L = e \times v \times f \times s \times w^2, \text{ ahol}$$

- e a robbanó anyag brizánsságára jellemző tényező értéke 0,8-1,1 közötti,
- f a kőzet szilárdsági tényezője, amely 0,6-1,5 között változik. A kisebb érték a puha mészkőre, a nagyobb kvarcitra vonatkozik,

- w a legkisebb távolság a furat és a szabad felület között,
- v a feszítési tényező, értéke 1,2-1,6 között vehető fel, ahol csak egy szabad felület van 1,6, ahol kettő ott 1,2,
- s a kőzet rétegződésétől függő tényező, értéke 0,6-2,0 között változik.

5. Az alagútépítésben alkalmazható módszerek:

A földalatti műtárgyak építése alapvetően két nagy kategóriába sorolható:

- Nyitott építési módszer
- Zárt építési módszer

5.1. Nyitott építési módszer:

Ebben az esetben a talajt a műtárgy teljes felület feletti részénél eltávolítják, s az így kialakított munkaárkokban, munkagödörben, előbevágásban kezdik meg a tervekben megalkotott szerkezet kivitelezését a megfelelő szigetelési igények kielégítése mellett.

Ezt a módszert általában felszín közelében létesített építmények esetébe célszerű, illetve szokás alkalmazni, esetleg olyan esetben, amelyben a tervezett létesítmény feletti rész is hasznosításra kerül. Tehát sekély mélységű alagutak esetén használható ez a módszer. (Pl. M1 – Andrássy út alatt ugyanilyen technológiával készült.) A bányászati módszerrel készülő alagút indítása az un. fejtési portáltól az előbevágásból indul.

Tekintettel arra, hogy a nyitott módszer építési technológiája megfelel a hagyományosan épített szerkezetek technológiájával így ezt a témát nem kívánom tovább részletezni, inkább áttérnék a témámhoz szorosan kapcsolódó Zárt építési módszer részletesebb bemutatására.

5.2. Zárt építési módszer:

A módszer lényege, hogy a kijelölt talajkörnyezetben a szerkezetünknek csupán a kontúrjai mentén kerül a talaj eltávolításra. Természetesen a mai tudásunk, technológiánk alapján ezt csak úgy tudjuk megoldani, ha valamelyest kapcsolódunk a nyitott építési módszerhez. Gondolom ez alatt azt a tényt, hogy a kiszemelt réteget valahogyan meg kell közelítenünk és sok esetben ez csak úgy lehetséges, ha a felszínről indított függőleges vagy ferde hossz tengelyű, tetszőleges alakú, méretű műtárggyal tesszük ezt. Ez igaz a metróalagútakra, a közúti és vasúti alagútnál a fentebb írtakat használják.



A zárt módszeren belül, három nagy módszer családot különböztetünk meg.

A Klasszikus módszerek

Az Új Osztrák módszer

Gépesített, azaz pajzsos módszer

5.2.1. A Klasszikus módszerek:

Alapvetően elmondható, hogy a régi klasszikus módszereknél a kis üregméretekből kívánták kialakítani a teljes szelvény keresztmetszetét több lépésben. Amely azt jelentette, hogy eltérő módon kezdtek bele a munkafázisokba, de a végeredmény mindig ugyanaz volt. Az előnye a kis üregméretnek, a viszonylagos biztonság, hiszen ilyen paraméterekkel rendelkező vájat körül könnyebben kialakulnak az átboltozódások, viszont ez igen sok ideig is eltarthat. Igen sok időt és faanyagot emésztett fel a kívánt támasztó szerkezetek kialakítása a vájatokban, mellyel ideiglenes megtámasztást biztosítottak mind addig, amíg a teljes szelvény elkészült. Most néhány példán bemutatom az ide vonatkozó eltérő módszereket.

5.2.1.1. Feltöréses módszer:

Melynek lényege, hogy első lépésben a talptárót alakítjuk ki, majd ebből néhány tíz-száz méterenként feltöréseket alakítunk ki a főte irányába. A kibányászott talajt a felső vájattól az alsóban kialakított elszállító egységekben termelik, Előnye a független munkavégzés, nagy sebesség.

5.2.1.2. Réseléses eljárás:

A fejtést alulról felfelé folyamatosan végzik. Állékony kőzetben alkalmazható, akár beépített megtámasztó szerkezet nélkül is. A végleges szerkezet is a fejtési technikával megegyezően alulról felfelé készül.

5.2.1.3. Süvegszelvény fejtéses technika:

Kialakítása a gerinctárból indul, ahol egy bizonyos szakaszon kitermelik a talajt a szelvény felső egyharmadában, majd kialakítják a tetőboltozatot. Ezt követően fentről lefelé folytatódik a kitermelés a jobb és bal oldali egységek váltakozásával.

5.2.1.4. Oldaltárós módozat:

A keresztmetszet kialakítása az oldaltárok megnyitásával kezdődik, ahol megépítésre kerülnek az oldalfalak, amelyek már képesek megtámasztani a tető boltozatot. Ezért a munka a gerinctáróban folytatódik, ahol a kitermelést követően a tetőboltozat kerül kialakításra.

5.2.1.5. Alulról felfelé kialakított szelvény:

A munka, a talptáróban kezdődik ahol az előreahajtott vájatokban készül el először a falazat, majd több lépcsőben haladunk felfelé a kitermeléssel és a szerkezet beépítésével.

Szeretnék bemutatni néhány fejlettebb technológiát is, amelyek az azt először alkalmazó nemzetről kapták a nevüket. Alapvetően elmondhatjuk, hogy a kitermelés megegyezik a korábban felsorolt technikákéval. Tehát részleteiben termelik ezt ki, annyi különbséggel, hogy itt a végleges szerkezet egy lépésben, azaz teljes keresztmetszetében kialakításra kerül. Ehhez persze szükséges hosszirányú „törések” megvalósulására van szükség, a termelékenységi kritériumok miatt. Ami alatt azt értem, hogy egyszerre csak néhány métert tudtak megépíteni a végleges teherbíró falazatból. Ide tartozik a Belga, Német, Angol és Osztrák módszer.

5.2.2. Belga módszer:

Alapvető lényege, hogy a fejtést és a falazást részletekben egymással felváltva végzi.

Két fő típusa létezik, az egytáros és a kéttáros építési mód.

A kezdő iránytárot csak száraz kőzetben és rövid alagutaknál célszerű a gerincben elhelyezni, máskülönben előnyösebb a talptáró.

Az eredeti belga rendszer alagútépítési mód egy gerinctárral való indításra van alapítva és részletes leírása a következő.

Elsősorban felső iránytárot, gerinctárot indítunk, az alagút tengelye irányába majd ebből a felső boltozati szakasz kiépítését indítják meg.

A táro ácsolt süvegfaít behúzott koronagerendákkal fogják alá és az a tetősüveget mindkét oldal felé tegelyre merőlegesen hajtott tűzőpallók segítségével ívesen kiszélesítik.

A tűzőpallókat közben újabb és újabb koronagerendákkal fogják alá az oszlopokat pedig a már miemelt szelvény aljára (magra) illetve az egyre lejjebb helyezett talpgerendákra támasztják.

A süvegshelvényt addig bontják, termelik ki a talajt, amíg el nem érik a boltozat vállát, majd az oszlopokat a felfalazandó munkaszakaszt 4 – 9 méteres hosszúságban lezárják, ácsolattól

megtisztítják. A terheket a szakasz két végén sugráirányban elhelyezett oszlopokra terhelik, azaz a falazandó részt kiváltják. Ezt követően a mintaíveket beállítják és megkezdik a falazást a tetőpont felé.

Amennyiben a talaj szilárddásga nem tűnik elegendőnek vagy elég egyenletesnek, akkor a boltvállnál egy összefüggő vasbeton koszorúgerendát vagy fa vállgerendát alakítanak ki, építenek be, majd erre helyezik el a falazatot.

Amint a falazással a járomfához, oszlophoz érnek, kiveszik és a főtét ideiglenesen pallókkal, dúcokkal alátámasztják, ugyanígy kiveszik és a következő szakaszba áthúzzák a koronagerendákat is. Ha munka közben a talaj annyira meglazulna, hogy utólagos omlásoktól kell tartani, akkor az összes megtámasztást bent hagyják és körül falazzák, esetleg kizsaluzzák és betonnal kitöltik.

Ha a fejtés a talppal kezdődik, akkor a munka több szakaszban indítható és az alagút bizonyos hosszúságú gyűrűkben készíthető.

Előny, hogy a fejtési és boltozatfalazási munkáktól külön vákasztva folyik, és nagyobb a haladássebesség.

A boltozat elkészülte után fognak hozzá a szelvény lemélyítéséhez és aláfalazásához. A benthagyott kőzetmag elvátolítása és az oldalfalak megépítése most már teherbíró boltozat védelme alatt megy végbe. Ez a munka ismét többféle módon hajtható végre.

Első ilyen módszer lehet, amelynél kijelölt pontokon 2 – 3 m széles aknaszerű mélyítéseket vájnak ki, és innen pillérszerű falazatokkal fogják alá a boltozat vállát, annak kényesebb szakaszait. Az alátámasztás sakktáblaszerűen kerül kiosztásra a két oldalon, arra nagyon odafigyelve, hogy egy időben a két egymással szemben lévő rész ne legyen kibontva. Nagyon laza talajoknál a pillérek közé eső szakaszt is aknaszerűen falazzák alá és utoljára távolítják el a magot. Jobb szilárdságú talajban, meggyorsítja a munkát, ha a magot és a pillérek közé eső szakaszt egyszerre távolítják el, s az eltávolítás után falazzuk fel a hiányzó részeket.

Második alkalmazható megoldás lehet, ha az anyagszállítást és a munkavégzést helyezzük előtérbe. Ekkor az alagútszelvény közepén egy hasítékot vájunk, majd ebből mindkét irányba ki – kitörve készítik el az alátámasztást, szintén sakktáblaszerűen.

A boltváll szintjén 1,5 – 2,0 méter széles kőzetpadokat hagynak, amelyekben meredek részével mélyítik le a hasítékot, ennek fenekén helyezik el a szállításra alkalmas vágányokat. Csak szilárdabb, legalább közepesen állékony kőzetben használhatjuk.

Az aláfalazás rendkívül kényes munka és 2 – 3 méter széles kihagyásos szakaszokban végzendő el.

Különös figyelmet kell fordítani a boltvállakhoz csatlakozó részre, amely nehezen csömoszölhető, ezért utólagos cemetbesajtolással szokták megerősíteni.

Az oldalfalak elkészítése után kerül sor a mag eltávolítására és a fenékboltozat kialakítására.

Végül történhet az oldalfalak készítése folyamatosan is bizonyos fáziseltoltással.

Az oldalfalak építése 3 – 4 méter távolságban követi a fejtést, s mind a fejtés, mind a falazás folyamatosan történik.

Ezen esetben igen fontos a boltvállak gyámfákkal való alátámasztása. Ezenkívül az elmozdulások megakadályozására feszítőgerendákat helyeznek el a felső boltváll síkjában és az ellenboltozat készítésekor a talpboltozat síkjában. Ebben az esetben sem célszerű a szemben lévő oldalak egyidejűleges kibontása, hanem bizonyos eltolással követi az egyik oldal a másikat.

Az eljárás lehetővé teszi, hogy – ahol szükséges – a fenékboltozat készítése gyorsan követhesse az oldalfalak ütemét, amely a gyorsan kialakuló oldalnyomások esetén lehet szükséges. Három méternél magasabb oldalfalak kialakítási igénye esetén az aláfalazást több lépcsőben kell elvégezni.

Szilárdabb közében a boltvállak megtámasztása magán a kőzeten is lehetséges a vállak kiszélesítésével.

A belga módszer később alkalmazott másik típusa a kéttáros módszer. Ez abban tér el az „elődjétől”, hogy a gerinctáron kívül talptárót is alkalmaz, s a munka itt kezdődik.

Az előrehajtott talptárót a gerinctárhoz 25 – 30 méterrel követi, s a felső és alsó táro között áttöréseket létesítenek. Ezzel megoldódott a belga rendszernek egyetlen táróban mutatkozó anyag ki- és beszállítási, víztelenítési nehézségei.

A fejtési és falazási munkák nem zavarják egymást, viszont a talptárával meggyengítésre kerül a mag, amelyre a felső boltozati rész készítésekor a teljes kőzetnyomás nehezedik.

Tehát míg az egytáros rendszernél egy viszonylag sértetlen talajban tudjuk kialakítani a boltozatszelvényt, addig ebben az esetben az előre hajtott talptárhoz miatt, már némi mozgás lezajlik a kőzetben, mely a süvegboltozat kialakításába már számításba kell venni, ezért inkább nagyobb szelvényű alagutak kialakításánál érdemes alkalmazni a kéttáros módszert. Illetve, ha 1 km-nél hosszabb alagutat kívánunk készíteni, ugyanezen rendszer igénybe vétele indokolt.

A nagyszelvényű alagutak kihajtásánál a belga rendszert sokszor nem csak két, hanem három vagy több táro egyidejű hajtásával párosítjuk.

A módszer nagy előnye, a főtte gyors végleges biztosítása, a boltozat gyors megépítése, amely védelmet biztosít a további, fentmaradó munkálatoknak.

A nagyobb kőzetnyomások megelőzhetőek, így kisebb lesz a munkálatok alatt felhasználandó fa mennyisége. Sok helyen indulhat meg egyidejűleg a munka, s a fejtés során nem zavarják egymást és a rendszer jól kombinálható más megoldásokkal.

Például a Kuncz-féle módszerrel, ahol a gerinctárot egy előretolt fejtárol helyettesíti, a megtámasztást sínbordákkal oldják meg, így a teljes szelvény kifejthető. Az oldalfalak pillérszerű aláfogásokkal készülnek el.

A belga rendszer hátrányai a boltozat aláfogásban és a szelvénylemélyítésben mutatkozik, amely kényes és veszélyes folyamat. A tökéletlen csömöszölési lehetőségek és az oldalfalak helyének kialakítása sokszor robbantással zajlott. Ezen robbantások által keltett dinamikai hatás sokszor károsította a már elkészült boltozatot.

A robbantások által keltett problémák mellett nem szabad figyelmen kívül hagyni a kényesebb helyeken – a boltozat vállánál – csatlakozási hézaga van a falazatnak, szerkezetnek.

Ezenkívül a víztelenítési és szállító pályákat is többször átkell helyezni az építés során.

A rendszer alkalmazása tehát száraz középszilárd vagy repedezett kőzetben, rövid vagy középhosszú alagutak építésénél előnyös.

Erős nyomások fellépése esetén vagy görgeteges illetve folyós talajokban a technológia felhasználása annál kevésbé ajánlott, minél nagyobb az alagút fesztávolsága és az üreg keltette vízhozzáfolyás.

5.2.3. Az Angol technika:

A teljes alagútszelvény kifejtése után 3 – 6 méter hosszú szakaszokban, gyűrűkben falazzák ki.

A munka a talptárol, majd 50 – 60 méterenkénti feltöréseken át gerinctárol építésével kezdődik. Többször a gerinctárol mérete kisebb és úgy helyezkedik el, hogy a belső felső éle az elkészítendő végleges szelvény tetejével van egy szintben. A két tárol biztosítása megegyezik, csak hosszban térnek el, amíg a talptárol több száz méter hosszú, addig a gerinctárol csak 20 – 25 méter.

További kifejtés a kőzet mőnőségétől függően három – hat méter hosszú gyűrűkben történik, minél lazább a talaj, annál rövidebb gyűrűt készítenek el egyszerre.

A bővítés úgy folytatódik, hogy a gerinctárhoz tetejét aláfogják két darab 30 – 40 cm átmérőjű koronagerendával, amely azért jó, mert megtámasztják a tárhoz süvegfaírt, így a dúcoszlopokat el lehet távolítani. Ezt követően a tárhoz oldalainál lehet megkezdeni a szélesítést, szükség szerint tűzőpallókkal. A tűzőpallók bejutatásának lehetősége a bukztatás vagy – ha el akarjuk kerülni a kőzetlazulást – a segédzsámolyos megtámasztás.

A tűzőpallók megtámasztására folyamatosan gerendákat húzunk be és fadúccal támasztjuk alá, amelyekkel ideiglenesen a talajra, később a keresztirányba állított ászokgerendára állítanak. Mérvadó még az adott szakasz homlokfalának lefedése pallókkal és megtámasztása gerendákkal.

A koronagerendákat rögzíteni kell távolságbiztosító és merevítő támoakkal, ezt követően megkezdődik a gerinctárhoz talpának mélyítése és szélesítése, amely magával hozza a folyamatos talpáthezetéseket, aminél az alátámasztó oszlopokat át kell váltani, az az meg kell hosszabítani. Amint a mélyítés elérte a boltváll vonalát, elhelyezik a végleges kereszt- ászokgerendákat amire valamennyi koronagerendát és ferdedúcot átterhelnek. Továbbiakban a munka a talptárból folyik. Elsődlegesen az alagút talpáig érő oszlopokkal átfogják a végleges kereszt- ászokgerendákat, s ezután indul a fejtés. A fejtés a talptárból mindkét oldal irányába kitörnek és addig szélesítik illetve mélyítik, amíg az oldalfalazat számára elegendő hely nem biztosított. Az oldalfalazat ideiglenes palló és hosszgerendás megtámasztást kap, ezeket dúccal az oszlopokhoz rögzítik.

Nagyon ügyelni kell arra az egész munkamenet alatt, hogy a tűzőpallók mögött üreg ne maradjon. Ezek az üregek lehetnek megindító további hegymozgásoknak, ezért tömedékelésük erősen javasolt. A teljes szelvény elkészültekor azonnal megkezdjük a falazási munkákat, alulról fölfelé. Kezdetünk a fenékboltozattal, ha viszont nem szükséges, akkor az oldalfalazat elkészítése az első, majd a mintaívek és a zsaluzat felállítása után befejezzük a teljes szerkezetet, addig építjük, míg a gerincben a két oldal egymáshoz nem záródik.

Az angol módszer igen jó és gyors munkalehetőséget biztosít, de elsősorban kis nyomású, szilárdabb telejben alkalmazható.

Komolyabb nyomásoknál szaporítani kellene a gerendákat, oszlopokat, amelyek már túl sok faanyagot emésztene fel. Előfordulhat olyan is, hogy ezeket a támasztószerkezeteket bent kell hagyni, és körbefalazást igényelnek.

Előnye a kőzetfejtés és szállítás könnyen végezhető, a falazás kényelmesen folyhat, ugyanis ezek a műveletek egymást időben és térben nem zavarják, a víztelenítés, szellőzés jól megoldott.

Hátránya a koronagerendás kiváltások miatt a tervezettnél nagyobb üreg készítése szükséges, amelyet precízen ki kell tölteni. Egyes esetekben befalazott koronagerendák, pallók elkorhadása utólagos roskadásokat idézhet elő.

A homlokfalak nagy nyomást kapnak, ezért ideiglenes megtámasztásuk körülményes és igen sok fát igényel.

5.2.4. Az Osztrák módszer:

A munka a talptáró kitörésével indul, majd 50 – 100 méterenként a megfelelő feltörésekkel kialakítják a gerinctáró indulási pontját. A gerinctáróból a süvegszelvényt ugyanúgy alakítják ki, mint a belga módszernél, de a tűzőpallórendszer itt nem kereszt, hanem hosszirányú és ezek nem tengellyel párhuzamos koronagerendákra, hanem arra merőleges szaruzatokra támaszkodnak.

Ezért alkalmasabb ez a módszer az előreahajtott pallózás alkalmazására, mint a szelemenés, ahol nagy túlfejtéssel kell számolni.

A szaruzatok 1,2 – 1,5 – 2,0 méteres kiosztásban kerülnek elhelyezésre. Ez a rendszer azért alkalmas arra, hogy lazább talajokban alkalmazzuk, mert a szaruzatok tetszőleges kiosztásával nagyobb nyomásokat is képes felvenni. Ekkor a szaruzatok megfogására, vízszintes hosszmerítők támaszokat húzunk be. A kallot kifejtésekor a tűzőpallókat ezen rövid, hosszmerítőkre támasztva hajthatjuk ki keresztirányba.

Szilárdabb talajok esetén a tűzőpallók elhagyhatók, ugyanis a szaruzatok és a közéjük helyezett hosszmerítők elegendőek a talaj megtámasztására. A süvegszelvény kihajtása után a szaruzatokat a boltváll magasságában elhelyezett kereszt- ászokgerendákra támasztjuk, amelyek a talptárót kiváltó oszlopokon nyugszanak.

Az angol módszerhez hasonlóan a váll magasságánál szintén nem állnak meg, hanem a szelvényt középen elhelyezett váll kereszt- ászokgerendákon kívül, sokszor a talpnál is elhelyeznek egy második kereszt- ászokgerenda sort. Ezen tartók elhelyezése után, megkedődik a fenékboltozat elkészítése, s a mintaívek elhelyezése után a végleges falazat alulról felfelé való egyben kifalazása.

Mivel a szaruzatok igen közel vannak egymáshoz, a kifalazás kisebb zömökben vagy fáradságosabb kiváltó munkával történik. A rendszerrel a fenti részleteket egymáshoz szorosan kapcsolódó eltolt lépcsőkben hajtják végre, így a munkafolyamatok áttekinthetően kapcsolódva

haladnak folyamatosan előre. Ez a folyamatos munka nehezzé teszi, hogy egyetlen talptárra több munkahelyet kapcsoljanak rá, így a haladást gyorsabbá tegyék.

Éppen ebből fakad a módszer hátránya, hogy a főte igen sokáig van ideiglenes szerkezetekkel alátámasztva, amit emellett több alkalommal ki is kell váltani, s minden egyes kiváltás többletmozgást okoz. Ezek a süllyedések megnövekedett kőzetnyomást okoznak, olyan sűrű dúchálózatra és megnövekedett faátmérőre lenne szükség, amellyel már autóutak alagútjai kivitelezhetetlené válnak.

Ezért az osztrák módszert újabban az angolal kombinálták. Megmaradt az eredeti szaruzatos megtámasztás, de a szelvényt teljes keresztmetszete nem lépcsősen, hanem a tárókból sűrűbben feltörve gyűrűben történt a kifejtés és ezt követően egyben falazták ki.

A fenékboltozat a felfalazás után kerül megépítésre. Egy- egy szomszédos gyűrű kifejtését csak akkor szabad elkezdni, ha kiinduló szelvény már befejezésre került. A gyűrűk hosszúsága 1,5 – 12 méter között változik, s több gyűrűt egy közös fejtárral szolgálnak ki. Lehetőség van a kihagyásos építésre, ahol a kimaradó szelvényeket a már kész, végleges falazattal ellátott szerkezetek végelme mellett folyhat, így biztonságosabbá és gyorsabbá téve az építést. A falazásnak a fejtéstől legalább 12 – 15 méterre kell történnie, nehogy a már elkészült szakaszban kárt tegyenek a robbantások hatásai.

A módszer előnye, hogy laza kőzetben is biztonságosan alkalmazható, viszont faanyagban és munkaerőben igen igényes, tehát drága.

5.2.5. Új Osztrák alagútépítési eljárás:

Ez az építési eljárás hegyi alagutaknál, szilárd kőzetekben alakult ki Ausztriában. Később kiterjesztették alkalmazási körét iszap és agyagtalajokra, általában kohézióval rendelkező talajokra.

Az eljárás az alagutat körülvevő kőzetkörnyezet tudatos bevonását használja ki. A környező kőzet bevonása a teherviselésbe, amellyel elérhető az, hogy bizonyos talajokban, kőzetekben egy vékony lőtt beton réteg, esetleg kőzethorgonyokkal kiegészítve elegendő megtámasztást nyújtson a kibontott üreg részére. Így a kivált üreg mentesül a szelvény ürméretét csökkentő dúcolatoktól, lehetővé téve a nagyobb munkagépek alkalmazását.

Hangsúlyoznunk kell, hogy a rendszer csak úgy alkalmazható megfelelően, ha nincs jelentős vízbefolyás, vízáramlás a már kibontott „táróba”. Ilyenkor ugyanis a lőtt betont nem lehet felhordani, tehát a beáramlás megszüntetése szükséges különböző eljárásokkal, mint például légnyomásos építési mód, talajvízszint süllyesztés vagy más vízkizárásos módszerrel kell gondoskodni a víztelenítésről.

Az üreg körüli kőzetgyűrű a kezdetekben fokozatos elmozdulásokat végez. A lőtt beton beépítésére ezen mozgások sebessége lecsökken.

Csak a teljes gyűrű elkészülte után számíthatunk a mozgások csillapodására, amikor az épített szerkezet a kőzettel együtt dolgozva eléri a végleges teherviselő állapotát. (Ez a gyengébb kőzetre igaz, jobb kőzetben ahol patkószelvény készül, nem szükséges a gyűrűzárás.)

A kőzetet csak olyan mértékig szapad terhelni, amíg az nem veszíti el szilárdságát, tehát meg kell akadályozni a túl nagy alakváltozásokat, amelyek a kőzet szilárdságának elvesztéséhez vezetnek. Ezen kritikus mozgások megelőzésének érdekében folyamatosan mérni kell az alakváltozásokat és ezzel kell kézben tartani az építés menetét.

Az új osztrák építési mód tulajdonképpen egy már régen alkalmazott módszer továbbfejlesztése. Már korábban alkalmazták, megvárták amíg a jelentős kőzetmozgások lezajlanak az alagútban, majd ezt követően építették be a végleges szerkezetet, amelyre így sokkal kisebb terhelés hárult.

A kőzet az üreg kibontására a szelvény belseje felé mozdul el. Ha ezen mozgások közben építjük be a lőtt beton alagútgyűrűt, akkor a mozgások erősen lefékeződnek. Azonban fontos a megfelelő időpont, ha túl korán építjük be, akkor lényegesen nagyobb terhelést kap a szerkezet. A falazat beépítésének időpontját úgy kell megválasztani, hogy a biztonság legalább $n > 1,5$ legyen a fellazulással szemben.

Agyagtalajokban illetve kevésbé állékony kőzetekben acél mintaíveket is használnak biztoításra. Az üreget megtámasztó gyűrűt minden esetben hézag nélkül kell a kőzethez építeni, így biztosítva az együttdolgozást. Ellenkező esetben a lőtt beton szerkezet külön álló tartóként dolgozna.

Kisebb szelvényeknél ($x < 6,0$ méter) az építés egyik módja a kőzet teherbírásától függően a teljes szelvényben való építés, azonban a leggyakoribb a két ütemben történő (metrók építése esetén).

A felső ívnek (kalott) megfelelő ívet kibontják 1,0 – 1,5 méter mélységben, fogásban, majd a kalott teljes löveltbeton biztosítása kerül beépítésre. Ezt követi a szelvény alsó részének (mag/talp) kibontása és a teljes löveltbeton biztosítás beépítése. A lőtt beton felhordását talajoknál gyorsan kell végezni, hogy ne alakulhassanak ki fellazulások. Talajokban általában a kibontástól számított 24 órán belül be kell zárni alul a gyűrűt, hogy elkerüljük a kellemetlen fellazulásokat.

Nagyobb alagútszelvényeknél kőzetekben alkalmazzák a rámpás építési módot. Itt először a felső félszelvényt (kalott) bontják ki, és az előrehaladással megfelelően építik be a lőtt beton boltozatot. Ezt követi a második ütem 5 – 6 méterrel hátrébb, az alsó félszelvény (mag/talp) kibontása és a boltozat zárása. (5-6 m-ként nem érdemes rámpát építeni és elbontani, hosszabb

szakaszt szoktak választani 20-30 m) A felső és alsó szintet egy 1:3 hajlású rámpa köti össze. Ezen közlekednek a munkagépek (fejtőgép, földet elszállító munkagépek). A munkát mindkét szinten ugyanaz a fejtőgép végzi, amikor befejezi a felső szint fejtését, az alsó szakaszon folytatja, miután a löttbeton felhordásra került. (Nincs párhuzamos munkavégzés, vagy lövelltbetont hordanak fel, vagy vasalást szerelnek, vagy fejtenek). Kevésbé állékony talajban vagy acéltartók vagy köracélból összeállított rácsos tartókat építenek be.

Nagyméretű alagutaknál, gyengébb talajokban (> 10 méter), először két tojás alaku válltárót hajtának ki, amelyeket löttbetonnal támasztanak meg (Csak nagyon gyenge kőzetek, vagy alacsony kohéziójú talajok esetén igaz). Emellett a külső oldalon kőzethorgonyokat is alkalmaznak. Ezt követi a kallot kihajtása és felső boltozat építése, majd utolsó lépésben a mag bontása következett és a talpboltozat építése. A felső boltozat építésénél jó alátámasztást nyújtanak az első lépésben kialakított lött beton „támaszok” amelyeket csak a mag fejtésével egy időben bontanak el. A stabilizált válltárók jó szolgálatot tesznek, ugyanis drén- szerűen viselkedve elvezetik a vizet, így biztosítva a száraz munkateret a kallott építésénél.

A lött beton kezdő szilárdsága nagyobb kell legyen a beton szokásos értékénél, ezért kötégysorítót alkalmaznak, amelyet gyakran folyadék vagy por formájában adagolnak.

A friss beton még lehetővé tesz alakváltozásokat, amelyeket sokszor előnyös megengedni.

(Végleges falazat maga a belső falazat. Kettős szerkezet magára az eljárásra vonatkozik, ahol külső ideiglenes megtámasztás a vasalással ellátott lövelltbeton biztosítás, és a végleges belső vasbetonfalazat.) A külső vasbeton gyűrűn belül egy belső vasbeton falazatot is beépítenek. Legtöbbször a lött beton szerkezet felületére erősítik a szigetelést és ezt támasztja meg a belső köpeny, s részt vesz a teherhordásban is. Más esetekben a belső vasbeton falazatot vízzáró betonból készítik, így szükségtelenné válik külön szigetelés alkalmazása.

Építés közben nagyon lényeges a folyamatos, hozzáértő mérnöki jelenlét, aki a kőzet, talaj változásait, mért alakváltozásait, az elmozdulásokat állandóan figyelemmel kíséri és amennyiben szükséges, azonnal változtat a lött beton vastagságán, a vasaláson, módosítja a horgonyzást vagy az acéltartók keresztmetszetének megválasztásán illetve annak kiosztását. Különösen kis fedőmagasság esetében, ahol gyors intézkedések szükségesek a talaj esetleges hamarabbi fellazulása miatt.

5.2.5.1. A löttbeton:

Az új osztrák módszernél igen fontos szerepet tölt be a lött beton biztosítás (ne írjunk burkolást, azt a földszobában csinálják, ez falazat, biztosítás, tartószerkezet). Ezzel az eljárással zsaluzás



nélkül lehet elkészíteni a héjjazatot, szorosan hozzáépítve a tajához, így biztosítva az együttműködést.

A lőtt beton elkészítésére két eljárás alakult ki.

- Száraz eljárás
- Nedves módszer

A száraz eljárás lényege, hogy a szárazon összekevert betonanyagot levegőtúlnomással a beépítés helyére szállítanak, majd a szórópisztolyba vizet vezetve a vízzel együtt lövellik a beépítési felületre.

5.2.5.1.1. A száraz eljárás:

A száraz eljárásnak két típusa van:

- Kétkamrás levegőtúlnomásos adagolóval működő berendezés
- Forgódobos adagolóval dolgozó berendezés

Az első típusnál egy kétkamrás berendezést használnak. Az alsó a munkakamra, amelyből a szárazkeverék a levegőtúlnomás és egy kerek adagoló segítségével a csővezetékbe kerül. Innen a túlnomás továbbítja a pisztolyba, ahonnan a becsatlakozó vízzel összekeveredve lövellik ki. A felső kamra az előadagoló, ebbe helyezik az új adagot. A két kamrát harangszelep különíti el egymástól, nyitásával az anyag az alsó kamrába hullik, eme elválasztó eszköz segítségével válik elérhetővé a berendezés folytonos üzeme.

Másik típus a forgódobos adagológép, amelynél egy vízszintesen fekvő dobba hull be, a tengellyel párhuzamos nyílásokon, a felső tölcseren betöltött száraz keverék. Itt egy forgó berendezés továbbítja a kifúvónyílásokon át a csővezetékbe, s onnan légnyomás szállítja a szórópisztolyhoz.

A vizet gyűrű alakban vezetik be a pisztolyba, úgy hogy körülölelje a száraz keveréket. A szükséges levegőtúlnomás 6 – 7 bar, ami a pisztolyban 3 – 4 barra csökken le. A csatlakozó víz nyomásának 1,5 szörösének kell lennie a levegőnyomásához képest. A csővezeték hossza ne haladja meg a 200 métert. A beton kiáramlási sebessége 300 km/h. Víz adagolását a kezelő szabályozza, ha túl sok vizet ad a keverékhez, akkor a beton nem tapad megfelelően és a szilárdsága is kisebb lesz, ha túl keveset adagol, akkor túl sok anyag hullik vissza, így a sikeres munka csak megfelelő adagolással érhető el. Levegőfelhasználás 12 – 18 köbméter per perc. A gépi berendezéssel 3 – 9 m³ beton hordható fel óránként.

5.2.5.1.2. A nedves löttbetonos megoldás:

A nedves eljárásnál a vízzel együtt elkészített betont lövellik a kívánt felületre.

Szintén két alapvető típusa van:

- A dugattyús szivattyúval működő berendezés
- Forgótárcsás kialakítású megoldás

Az először említett gépezetnél dugattyús betonszivattyúval nyomják a csővezetékbe a betont a beépítés helyszínére, ahol egy kisebb csőméretre áttérve levegőtúlnyomással szállítják a lövőfejhez, hozzáadva a folyékon alakban a kötégysorsítót is.

A második megoldásnál nem olyan nagy a sűrített levegő igény, ezért ezt alkalmazzák szélesebb körben. Itt egy forgótárcsás szerkezet adagolja a csővezetékbe a betont, ahonnan sűrített levegővel szállítják tovább.

5.2.5.1.3. A két technika összehasonlítása:

A száraz és nedves eljárást összehasonlítva a következők állapíthatók meg:

- a száraz eljárásnál a szórófej-kezelőtől függ a vízadagolás mértéke és ez befolyásolja a betonminőségét,
- erős a porképződés, több a visszahulló anyag.

A nedves eljárásnál:

- egyenletesebb a betonminőség, bár a visszahulló anyagok miatt itt is megváltozik az eredeti összetétel,
- kisebb a porképződés, kevesebb a visszahulló anyag.

Annak ellenére, hogy kedvezőbbnek látszik a nedves eljárás, mégis a száraz módszer van jobban elterjedve. Ennek a legfőbb oka, hogy a munkamenet nem tesz lehetővé folytonos, egyenletes betonozást. A talaj fejtése, a hálóvasalás behelyezése szakaszos betonozást kíván meg.

A nedves eljárásnál a vezetékekben csak rövid ideig állhat a beton, mert megkezdődik a kötés és szilárdulás folyamata. Ezért alkalmazzák a száraz módszert, ahol ez a probléma nem

jelentkezik.

A lőttbeton minősége hasonló, más betonszerkezetekhez. Az adalékanyagoknál a 16 mm-es max. kavics méretet használják.

A 8 mm-nél nagyobb szemcsék átlag 70 %-a visszahull, így nem érdemes nagyobb méretre áttérni, mert az ugyanis csak kis mennyiségben fog bekerülni a falazatba. A nagyobb méret a szállítást is nehezíti, így a 16 mm max. méret mellett az 50 mm-es átmérőjű vezetékek használhatók.

A beton keveréknél számolni kell átlag 25% visszahulló anyagveszteséggel. A visszahulló anyag nagyobb része kavics, úgyhogy a kész beton cementtartalma nagyobb lesz a keverék cementtartalmánál. A beton szilárdsága 35 N/mm² körüli értékű, a cement és vízadagolástól függően.

5.2.5.1.4. A visszahulló anyag mennyisége:

Több tényezőtől függ:

- a kezelő hozzáértésétől,
- a felület minőségétől,
- a szórópisztoly távolságától,
- a pisztoly helyzetétől,
- a keverék vízadagolásától.

Általában az 1 m-es távolság a legelőnyösebb a távolság csökkenése, vagy növelése kedvezőtlen hatású.

A szórópisztoly vízszintessel bezárt szögének függvényében is változik a visszahulló anyag mennyisége. Függőleges helyzetben 20-25 %, míg vízszintesen csak 10 % a visszaeső anyag. A betonhoz alumíniumbázisú kötésgyorsítót szoktak hozzáadni. A nedves eljárásnál ezt folyadékba adagolják a keverékhez. A kötésgyorsító a cementmennyiség 5-6 %-át teszi ki. A száraz eljárásnál a felhasznált anyag nedvességtartalma ne legyen 8-10 %-nál nagyobb. A lőttbeton felhordása erős porképződéssel jár. Ezért a dolgozókat a szilikózis veszély ellen megfelelő védőfelszereléssel kell ellátni. Arra kell törekedni, hogy a finom por kvarc tartalma minél kisebb legyen. Célszerű átmosott adalékanyagot használni.

A por csökkentésére használnak előnedvesítő fúvókákat is. E megoldásnál a szórófej előtt kb. 2 m-rel beadagolják a víz egy részét gyűrű alakban, úgyhogy a száraz keverék már a csővezeték e részében átnedvesedik, és így kevesebb por kerül a levegőbe.

5.2.6. Alagútépítés pajzsos módszerrel:

A pajzsos alagútépítés eszméje Bruneltől származik. A sikeres megvalósításban Greathead végezte az úttörő munkát, ő alakította ki a pajzs ma is használatos formáját.

A pajzsos alagútépítés régen kialakult, elsősorban kézi fejtéssel dolgozó megoldásait, ma a gépesített eljárások váltották fel. A talaj fejtése igen gyakran teljesen automatizált módszerekkel történik, és ehhez igazítják hozzá a teljes munkafolyamatot. A kibontott talaj rakodását, szállítását, az alagút falazati elemek beszállítását, elhelyezését, az injektálási munkákat stb. Gazdaságos építés csak a teljes géplánc kialakításával érhető el.

A pajzs lényegében egy mozgó dúcolás, amely biztosítja a kibontott üreg folyamatos megtámasztását, és a biztonságos munkaterületet a fejtéshez és a falazat beépítéséhez.

A pajzsos építés hosszú, kb. 2,5-3 km-nél hosszabb alagutaknál válhat gazdaságossá, amely különösen jól gépesíthető építési eljárás.

A pajzsok két nagy csoportra oszthatók :

- fix köpenyes pajzsok,
- késes pajzsok.

A késes pajzs az 1970-es év találmánya, és a 70-es – 90-es évek között alkalmazták széles körben monolit beton és monolit vasbeton egy bejáratú alagutak építésére.

Minden pajzs három fő részből áll: a vágóél (lv), törzs (lt), és faroklemez (lf).

E három rész külső felülete a pajzs köpenye, amely fix köpenyű pajzsoknál egy kör keresztmetszetű acél henger, a vágóélnél és törzsnél, és faroklemezeknél eltérő hajlítási merevséggel. A késes pajzsnál e köpeny egymáshoz képest hornyoltan csatlakozó késekből áll, amelyek egymáshoz képest eltolhatók. Itt a pajzs alakját egy hegesztett szerkezet biztosítja, amelyen a kések eltolhatók. A vágóél feladata a szabályos üregfejtés biztosítása. A törzs a pajzs hajlításra legmerevebb része. Ez biztosítja a pajzs alaktartását, és itt helyeznek el minden gépi berendezést, amely a pajzs mozgatásához, a földfejtéséhez és a falazati elemek beépítéséhez szükséges. A faroklemez fix köpenyű pajzsoknál kis merevségű acél henger és ebben szerelik össze az alagút falazatot, késes pajzsoknál pedig ebben a részben készül a monolit beton vagy vasbeton alagútfalazat.

A talajszilárdítási eljárások célja a talaj természetes vagy végleges jelleggel tulajdonságainak, szilárdságának és vízáteresztő képességének a megváltoztatása ideiglenes

A szilárdítások lehetővé teszik a vízáteresztő talajok vízzáróvá tételét, laza folios anyagok szilárd, teherbíróvá alakítását.



6. Talajszilárdítás:

A jelen esetben taglalt zárt építési módszernél a talajszilárdítás felhasználható:

- főtebiztosításra, az alagút üreget körülfogó talaj állékonyságának, a szilárdságának vízzáróságának növelésére,
- mállott, repedezett közetek megerősítésére,
- az alagútfalazat mögötti üregek kitöltésére és a víz behatolási útjainak elzárására,
- építmények védelmére, épületsüllyedések elkerülésére az alagútépítésekkel kapcsolatban.

Három jellegzetes csoportja van ezen eljárásoknak:

- a hőelvonáson alapuló fagyasztások,
- az injektálással végzett szilárdítások,
- Jet-groutingos talajszilárdítás.

6.1. A Talajfagyasztás:

A talajfagyasztást a talaj vízzáróvá tételére és szilárdságának növelésére alkalmazzák az építési idő szakaszában.



Az elérhető szilárdságot a talajnem, a víztartalom és a hűtési hőmérséklet határozza meg. Elsősorban szemcsés talajokban érhető el nagyobb szilárdásnövekedés.

Vízzel összefagyasztott homoktalajokban 3000- 15000 kN/m², agyagtalajoknál 1500-6000 kN/m² szilárdság érhető el a fagyasztási hőmérséklet függvényében. Esetenként célszerű kísérleti úton megvizsgálni a szilárdságot.

A vízzel való fagyasztásnál figyelemmel kell lenni a víz sótartalmára is, amely jelentősen csökkenti a víz fagyaszthatóságát, emellett az sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy ez az eljárás jelentős térfogat növekedéssel jár.

Többféle eljárás használatos:

- Kétfázisú
- Egyfázisú
- Eglyépcsős
- Kétlépcsős
- Hagyományos lassú
- Új gyorsfagyasztási eljárás

Legjobban elterjedt a kétfázisú fagyasztásos módszer. Amelynél a hűtőközeg igen gyakran ammónia gáz, amelyet komrimálnak, majd a nyomását lecsökkentik, eközben a környezetéből hőt von el. Ez a folyamatot ismételve hűtik le a fagyasztó folyadékot (CaCl₂) amely így, -25 C- -35 C-re lehül és a talajba fűrt csövekben áramoltatásra kerül.

Az új egyfázisú gyorsfagyasztási módszert Svédországban dolgozták ki. Ez a korábbi széndioxidon alapuló eljárással szemben folyékony nitrogént használ, amelyke a kiindulási hőmérséklete -196 C.

Ez a szokatlanul alacsony hőmérséklet nagyon lerövidíti a fagyasztás idejét. Ezzel a módszerrel 4-6 nap alatt elérhető a 2 méteres fagyköpeny, amelyhez a régi módszer alkalmazásával 100 napra volt szükség.

A folyékony nitrogén nem gyúlékony, nem mérgező színtelen és szagtalan anyag. 1,45 l folyadékból, amely 1,17 kg tömegű, 1 köbméter gáz keletkezik 1 bar nyomáson és 15 C hőmérsékleten. A hideg folyadék gázzá alakulásához 248 kJ/m³ hőmennyiség szükséges. A további melegedéshez 3,5 kJ/m³ Kelvin hőt von el a környezetétől Kelvin fokenként.

A folyékony nitrogént 600- 7500 l-es tartályokban szállítják a helyszíre, jól szigetelt tárolókban. Felépítésüket kettős fal jellemzi, amelyek között vákuumot hoznak létre és szigetelő porral töltik ki a hézagot. Nagy előnye, hogy közvetlenül a tartályból lehet a fagyasztó csöveket táplálni. A fúrásokat amelyeken keresztül a folyadék áramoltatása megy végbe, általában kettős koaxiális csőrendszert alkalmaznak. A belső vagy külső csövön a bejutó gáz felmelegszik, így hőt von el környezetétől, majd gáz formájában a szabadba távozik. Legfeljebb 3 fúrást lehet egy tápláló csőre kapcsolni. Olyan esetekben, amikor a talaj elég porózus, akkor a nitrogént közvetlenül a talajba juttatják, ez nyújtja a legkedvezőbb hűtőhatást. Ezért alkalmazzák kevésbé porózus talajokban azt a módszert, amikor a hűtőcsöveket, porózus anyaggal veszik körül s ezen keresztül hagyják a gázt eltávozni.

A csöveket 0,7- 1,2 méterenként helyezik el egymástól.

Természetesen a mai fejlett technológiákra tekintettel ez a rendszer is automatikus szabályzórendszerrel ellátott ellenőrző berendezésekkel van ellátva. Minden csőfej előtt található egy mágnesszelep egy biztonsági és egy elzárószelep. Emellett minden fúrásnál hőmérőket helyeznek el, amelyek a távozó gáz hőmérsékletét mérik és ehhez viszonyítva szabályozzák a hűtőfolyadék adagolását. A fagyasztás fázisában körülbelül -130 és -100 C között tartja az automatika az elpárolgó gáz hőmérsékletét, míg a kívánt fagyfál elérte után „csupán” 60 és -70 C körül tartja amely a kialakult fagyfalat már képes fenttartani.

A fagyasztás költségei igen jelentősek, ezért csak az igen kedvezőtlen talajokban használják, ott is rövid ideig.

A zárt építési módszernél közel vízszintes fúrásokkal tudják a főté vagy a teljes alagútgyűrű körül kialakítani a kívánt fagyasztott talajköpenyt. Ugyanakkor, a felszínről az alagút mellé fúrt függőleges csövekkel is megoldható a fagyasztás.

Ilyen szokatlanul hideget az acél is nehezen viseli, ezért speciális szénttartalmú csövekkel végzik a folyamatot, amelyek kevésbé ridegek ilyen hőmérsékleten a általánosan elterjedt acélcsövekhez képest.

A fúrások készítésénél igen precízen kell eljárni az irányhajtás tekintetében. Ha ugyanis a csövek elferdülése miatt a falban kellően át nem fagyasztott ablakok jöhetnek létre, ahol kellemetlen vízbetörések alakulhatnak ki. A tapasztalat szerint 30-40 méter hosszú fúrások esetén az 1% alatti irányeltérésekkel lehet számolni egynemű talajban. Zárt építési módszernél különösen oda kell figyelni a pontos iránytartás biztosítására, hogy minél hosszabb szakasz kifejtése és beépítése legyen megoldható, így elkerülhető a sűrű munka megszakítás.

Hosszabb 100 méteren felüli fagyasztó csővezésnél a pontosabb iránytartásra van szükség. Ilyenkor alkalmazzák azt az eljárást, ahol két vezetőfúrást készítenek, amelyeket pontos



kihajtását gondosan biztosítják és bemérik. A további fúrásokat ezekhez a fúrásokhoz igazítják, elektromotorral ellátott excenter segítségével, amely csőhajtás közben korrigálja az eltéréseket.

Ezt a technológiát alkalmazták az egyik metróépítésnél Bécsbe a Mariahilfer Str.-n egy úruháza alatti vonalszakaszon. Az alagút 2 méterrel feküdt az épület alapsíkja alatt. Magukat a fúrásokat a tervezet alagút boltozat felett helyezték el íves alakban. A tervezett 70 méterre tervezett fagyasztást két fázisban oldották meg, tehát egy-egy szakasz 35 méter. Az építés másfél hónap alatt zajlott le. Kezdetben 1-2 mm emelkedés majd mindössze 7-9 mm süllyedés volt észlelhető az épületen.

6.2. Az Injektálás:

Az injektálással végrehajtott szilárdítások két jellegzetes csoportba sorolhatók:

- szuszpenziókkal (cement, agyag, betonit),
- folyadékokkal (vegyi anyagokkal végzett szilárdítások).

A szuszpenziós eljárásoknál elsősorban cementszuszpenziót alkalmaznak, esetleg agyaggal, vagy bentonittal együtt, de előfordul csak agyag vagy csak betonit használat is. Ha repedések, üregek kitöltése a cél akkor szokás homokot is hozzákeverni a injektálandó anyaghoz.

A Cementszuszpenziókat homokos-kavics, durva homok- és kavicstalajok pórusainak kitöltésére és eme talajok szilárdítására illetve vízzáróvá tételére alkalmazzák, esetenként közetek repedéseinek kitöltésére.

A folyadékokkal való injektálásnál, az injektálás vegyi anyagokkal történik.

Legfontosabb ilyen anyag a vízüveg. Ennek hígított oldatát használjuk a leggyakrabban a megfelelő reagensek hozzáadásával. Az eljárások lehetnek két- vagy egyfolyadékos módszerek, aszerint, hogy a gélesedést kiváltó reagenst a besajtolás előtt adagolják a folyadékhoz vagy külön sajtolják be.

Külön csoportot alkotnak a műgyanták, amelyek finomszemcsésű homokok pórusaiba is betudnak hatolni.

A kitöltendő üregek mérete szerint az injektálás lehet:

- üregkitöltő (minden irányba $x > 2$ cm)
- repedéskitöltő ($x < 2$ cm)
- pórus kitöltő

Üregkitöltésre általában cementhabarcsot használunk. A keverék jobb besajtolhatósága érdekében gyakran keverünk hozzá bentonitot vagy agyagot, amellyel így jobb vízzárás is elérhetővé válik. Az agyaggal 3-6%-os keverék készítése javasolt.

Repedéskitöltésre is a cementszuszpenzió azaz cement és víz keveréke ajánlatos. A jobb tulajdonságok elérése érdekében ebben az esetben is célszerű lehet agyag vagy betonit hozzáadása.

A szuszpenziókkal végzett átítatott, póruskitöltő injektálásoknál a szűrőszabály szabja meg a talajok injektálhatóságát. Terzaghi szerint egy anyag szemcséi akkor hatolnak be a talaj pórusaiba, ha az injektáló anyag szemeloszlási görbéjének a 85%-hoz tartozó szemcseméretének a négyszeresénél kisebb szemcsék a talajban a 15%-nál kisebb mértékben fordulnak elő.

A tapasztalat szerint azonban ennél lényegesebb nagyobb különbségre van szükség a jó injektálhatóság érdekében.

Ha d_{15} -tel jelöljük a talajnál a szemeloszlási görbe 15%-ához tartozó szemcseátérőt és D_{85} -el az injektáló anyagnak a 85%-hoz tartozó szemcseméretét, az $N = \frac{d_{15}}{D_{85}}$, viszonszám a 15-öt kell elérje, hogy az injektáló anyag tökéletesen behatoljon a szemcsék közé.

Ha $N < 15$, részbeli kiszűrődés jelentkezik, és $N = 5$ az alsó határ, amelynél kisebb viszonszám esetén az injektálás már nem hajtható végre, ugyanis teljes kiszűrődés állna elő.

A talajok szemcsenagysága szerint különböző anyagokkal injektálhatóak.

Így a 0,1 mm-es szemcsenagyságú cementtel a d_{15} -höz tartozó szemcseméret nagyobb 1,5 mm-es homoktalajok már injektálhatóak, viszont $d_{15} = 0,5$ -nél finomabb homok már egyáltalán nem injektálható. A vízüveges kémiai szilárdítások a $d_{15} = 0,06$ mm-ig alkalmazhatóak. A finom szemcséjű homokok csak műgyantákkal szilárdíthatók.

Az injektálásoknál a besajtolást nyomás alatt kell elvégezni, hogy a szuszpenzióból a felesleges víz kipréselődjön és a szemcsék mélyen betudjanak hatolni a talajhézagokba. Emellett igen fontos a megfelelő talajfedés, hogy ne következzen be talajtörés vagy talajemelkedés az injektálás hatására.

A besajtolási nyomás kezdetben nagy, majd fokozatosan nő a cementszemcsék leülepedését követően. A csökkenő anyagfelhasználás és növekvő nyomás jellemzi a jó injektálást.

Ha a besajtolási nyomás hirtelen lecsökken, akkor talajtörésre lehet következtetni. Az efféle problémák kiküszöbölése érdekében célszerű próbainjektálásokat végezni, amelyből meghatározhatóvá válik a maximális nyomás nagysága.

Cementszuspenzióval körülbelül $k = 10^{-2} \text{ m/s}$ vízáteresztő képességig lehet eredményesen injektálni.

Kedvezőbb a cement-agyag vagy bentonitos keverék, amely stabilabb szuszpenziót nyújt, vízzárásra alkalmasabb. A bentonittal kialakított (6-12%-ot tartalmazó keverék) szuszpenzió már hatásos vízzárást eredményez 10^{-3} m/s vízáteresztőképesség esetén.

Finomabb talajokban is alkalmazzák az injektálást, két fázisban.

Első fázisban telítik a talajt, így a nagyobb hézagokat töltik meg, míg a második fázisban a vegyi szilárdítással érik el a finomabb pórusok telítését és a jobb vízzárást.

Cement injektálásánál, érdemes finomabb őrlési finomsággal rendelkező cementek alkalmazása, amelyek jobb eredményt nyújtanak telítés szempontjából.

Abban az esetben, ha a szilárdítás a cél, akkor célszerű kevesebb „adalékanyagot”, azaz bentonitot vagy agyadot a keverékhez adagolni, ugyanis így nagyobb szilárdság érhető el.

Amennyiben a vízzárásra kell nagyobb hangsúlyt fektetni, akkor több bentonit vagy agyag hozzáadása javallott.

Az agyag és vízüveg szuszpenziók is alkalmasak vízzárásra, 20-30% agyagot és 5-10% vízüveget tartalmazó keverék már jó tömítés nyújt. Amennyiben komolyabbak a kritériumok vízzárás szempontjából, a vízüveg mennyisége megütheti a 20-25%-ot is.

Áramló talajvíz esetén, előfordulhat, hogy az injektálás sikertelen illetve nem megfelelő, ugyanis a víz elmosza a cement szemcséket. Ilyenkor ajánlatok kötésgyorsító adalékszerek alkalmazása.

Vegyi szilárdításoknál nagy szerepe van a viszkozitásnak besajtoláskor, régebben gyakran alkalmazták a kétfolyadékos Joos-ten eljárást. Alapanyaga nátron-vízüveg-oldat amelyet a megfelelő hígításban injektáltak, majd reagensként magnézium-kloridot injektáltak rá, mely hatására a gélesedés azonnal beindult. Ezzel az eljárással, homoktalajokban $k = 10^{-3}$ és $k = 10^{-5}$ vízáteresztő képességig alkalmazható.

Újabban egyre inkább alkalmazzák az egyfolyadékos eljárásokat, amelyeknél a reagens előre be van keverve a vízüvegoldatba, előre meghatározott kötési idővel.

Régebben etilacetátot használtak, de tűzveszélyessége miatt, manapság egyre inkább elvetik alkalmazását és áttérek más –nem tűzveszélyes anyagok- alkalmazására.

Ilyen például a Soletanche cég által kifejlesztett durcisseur 600 anyag, amellyel $k = 10^{-4}$ és $k = 10^{-5}$ m/s áteresztőképességgel rendelkező homoktalajokban alkalmazható megfelelően. Vízzárással alapvetően puhább géleket alkalmaznak, szilárdításra kemény géleket.

Injektálás szempontjából külön csoportot alkotnak a műgyanták. A karbamid gyantafolyadék ammónium-klorid vagy sósav reagensre gélesedik, 700-3000 kN/m² szilárdság érhető el vele.

Újabban az AM-9-es műgyantát is elterjedten használják. Alkalmazása igen hasznos, ugyanis ez az injektáló anyag rendelkezik a legkisebb viszkozitással, így képes behatolni a nagyon finom ($k = 10^{-7}$ m/s) vízáteresztő képességgel rendelkező talajokba is.

Injektálás esetében a fúrások távolsága a talajminőség szerint változik. Kavics talajban 1,7 méter, homokban 1,2-1,5 m, finom szemcsésű homokban 1,0-1,2 méter.

A szilárdított réteg vastagságát általában 3 méterre veszik fel, amennyiben csak vízzárással van szó, akkor 1,5 méter.

Bécsi ajánlások szerint az alagút körüli szilárdító köpeny vastagsága az alábbi határok közé sorolható. $2r > x > r$, ahol az r a kör alakú alagút sugara. Minimális vastagság 2 méter és az injektált hossz ne haladja meg a 35-40 métert.

Mivel a fúrást készítő gépek átválya dönthető, ezért ebben is koltatot kell felállítanunk. A ferde fúrások szöge ne haladja meg a 45 fokot.

Vegyí folyadékokkal való szilárdítás tervezésénél négy dologra kell különösen oda figyelni:

- Az oldat viszkozitása, amely meghatározza a beszajtolhatóságot, emellett hatással van az injektálási nyomásra és az injektálás hatósugarára.
- A kötési idő. A megkeverés idejétől számolt idő és addig tart, amíg a gél eléri a 100 centipoise viszkozitási értéket.
- Kimosással szembeni ellenállás. Ez különösen áramló talajvíz esetében fontos éssben tartani.
- Az egyirányú nyomószilárdítás. Összefügg a talaj fajlagos felületével, az egységnyi tömegre jutó szemcse felületével és a hézeagok telítésénél elérhető mértékkel.

Vízüvegoldat mennyiségének növelésével szilárdságnövekedés érhető el. A beinjektálandó anyag mennyiségét a tervezett szilárdság és a talaj hézagterfoglata határozza meg. Általában 30-40%-os hézagterfoglattal kell számolni.

Durvább szemcsésű talajokban, ha vízarást szeretnénk elérni, először cementszuspenzióval kell injektálnunk, ezt követően injektáljuk csak a vízüveget. Cementtel 5-20%-os hézagterfogat telítése érhető el, a további 20-30% hézagterfogatba sajtolják a vízüveget.

Tehát tervezésnél mindenképp rögzíteni kell a tervezett nyomószilárdsági és vízáteresztő képesség értékeit. Érdemes a rögzített értékeket és összetételt megvizsgálni, ezért próbainjektálásokat kell végezni, amelyből kiderül a megfelelés, illetve nem megfelelés. Ezért részben helyszínen részben pedig, laboratóriumban kell vizsgálni az értékeket, s ezekből diagrammokat kell kialakítani.

Ezek a diagrammok alakíthatóak ki a mért eredményekből:

- A talaj fajlagos felülete és az elérendő nyomószilárdság közötti összefüggés
- A kötési idő, a szilárdság és a durcisseur C és B adagolásának aránya közötti kapcsolat
- Az injektálási nyomás, a vízáteresztőképesség és a viszkozitás összefüggése

Szilárd kőzetekbe az injektálás kétféleképpen történhet.

Az egyik eljárásnál szakaszosan méjítik le a fúrásokat, azaz egy szakaszt kifúrnak és utána injektálják, majd tovább mélyítik a fúrást, és így követik egymást a fúrási és injektálási folyamatok, míg el nem érik a tervezett mélységet.

A másik módszernél a lyuk teljes méretben kifúrássá kerül, majd ezt követően kezdődik az injektálás alulról felfelé haladva.

Erősen repedezett talajban csak az első módszer alkalmazható eredményesen, mert a injektáló anyag képes megkerülni a záródugót elkerülve a szabadba távozhat.

Talajokban célszerű a mandzsettás cső alkalmazása. A furatba egy 33 cm-ként perforált és szorosan illeszkedő gumimandzsettákkal ellátott csövet helyeznek, majd ebbe egy kettős tömítésű dugattyús cső kerül.

Ez azért előnyös, mert injektáláskor a nyomás hatására a mandzsetták kinyílnak és az anyag szabadonáramolhat kifelé, a művelet befejezésekor az addig nyitott részek bezárulnak megakadályozván a talaj bejutását. Továbbá ezzel a megoldással a talajba jutó anyag irányítható és ellenőrizhető.

A Szilárdításoknál a fúrások történhetnek a felszínről vagy közvetlenül az alagútból esetleg a táró(k)ból.

Most néhány példát szeretnék bemutatni:

Párizsban az expressz metró építésénél kb. 25 méteres mélységben 20 m-es vizoszlopnymomás alatt 900 méter hosszúságban egy erősen repedezett meszes, márgás kavics-hordalékon átvezető szakaszon alkalmaztak szilárdítást.

A folyamat két fő ütemben történt.

Az első lépésben a szilárdítást egy táróból végezték, ahol a szilárdítást az előrehaladás irányába folyt. Egy szilárdítással 19 méteres szakaszt megerősítve a táró szelvényét teljesen körülfogva. Ezt követően előrehajtották a táró, úgy hogy a végén még maradjon egy három méteres védelem alatt álló szakasz, ahonnan az injektálást folytathatták.

A második ütem során a táróból fúrt sugárirányú lyukakon keresztül szilárdították meg az alagtú talajkörnyezetét.

Budapesten a Kálvin tér közelében a metró építésénél folyósodásra erősen hajlamos homoktalajban alkalmaztak egyfolyadékos vegyi szilárdítást.

A fúrásokat a felszínről végezték. A talaj vízáteresztő képessége erősen lecsökkent a szilárdítás hatására, amely a tervezéskor $500-1000 \text{ Kn/m}^2$ volt.

A talajszilárdításánál az elért eredményt a következő jellemzők adják:

- A szilárdított talaj nyomószilárdsága,
- Az elért vízáteresztő képességi együttható,
- A jellemzők tartóssága

A szilárdsági értékek talajban igen nagy intervallum között alakulnak ki.

Ugyanakkor a vízáteresztő képesség is hasonló változásokat mutat.

A talajjal összekveredett gél időben is változást mutat, öregszik. Térfogata csökken, amely így rontja a vízzárást. Ez a folyamat kevésbé észlelhető finom szemcsésű talajokban. Ezt a jelenséget nevezik szinerézisnek, melynek igen fontos szerepe van a szilárdítás tartósságában.

A szilárdításoknál egy injektáló központot szoktak létesíteni, ahol a besajtolásra kerülő anyagokat tárolják, összekeverik, s a sajtolási gépeket, mérő és ellenőrző berendezéseket elhelyezik.

Injektáló géplánc

A berendezés cementszuszpenziók és vízüveg oldatok injektálására használható.

Vízüveg injektálása esetén a vízüveget és reagensét, a vizet egy keverőtartájba összekverik, innen egy szivattyú juttatja tovább a furatokhoz, ahol 20 literes injektáló tartályokból folyik a sajtolás, amelyek töltése és ürítése automatikusan történik.

Egy-egy elosztóba a keverék (20 liter) tizenhét perc alatt injektálható be. Ez az idő kb. fele az injektálhatóság teljes idejének, ami körül belül 35-40 perc.

A szokásos keverék összetétele a következő határok között változik:

- vízüvegoldat (40 - 70%)
- durcisseur (3,5 - 6,2%)
- víz (56 – 21%)

A kötésidő a 600 B reagensnél 33-70 percig, a 600 C-nél 67-134 percig tart, a keverék összetételétől függően.

Az injektálásnál nagyon fontos az előzetes talajfeltárás, a talaj jellemzők meghatározása.

Fontos a talaj szemeloszlása, hézagterfogata, vízáteresztő képessége. Emellett lényeges a talajvíz vízáramlása és vegyvizsgálata is. Pontosan meg kell határozni a közművek helyzetét és egy-egy csövet maximum 50 cm-re lehet megközelíteni a fűrészekkel.

Az injektálásról részletes naplót kell vezetni, minden furatnál pontosan fel kell jegyezni a rávonatkozó jellemzőket. A nyomás alatt bejuttatott anyag mennyiségét, nyomását és az idejét.

A szivattyút fel kell szerelni olyan műszerekkel, készülékekkel, amelyek pontosan mérik az injektálási teljesítményt, s ezzel összhangban mérni kell a nyomások alakulását is.

A keverékből mintákat kell kivenni és ellenőrizni kell a hál sűrűségét, a kötésidőt, a szilárdsági paramétereket 7, 14, és 28 napos korban és a gél viszkozitását.

Márni kell geodéziai mérésekkel a felszíni mozgásokat, mérni a közelben lévő épületeket. Emelkedések esetén, ha az meghaladja az 5 mm-t akkor szünetet kell tartani és később folytatódhat a munka csökkentett nyomással, újabb mérések mellett.

6.3. A Jet grouting eljárás:

A talajszilárdításoknak egy új fajtáját fejlesztették ki a hetvenes években Japánban.

Az új szilárdítási eljárás a CCP (Chemical Churning Pile) ismertetett módszer amelyet másnéven „jet grouting” eljárásnak is szokás nevezni.

Lényege, hogy igen nagy nyomással fecskendezik a talajba a cementszuszpenziót. Ez a magasnyomás, mozgásba hozza a talajszemcséket is, s összekeveredésükkel egy talaj-cementszuszpenzió keverék alakul ki, amely így egy tömbként szilárdul meg az injektálás környezetében.

Az eljárás kötött talajokban és lazább kőzetekben is alkalmazható.

Kezdetben, vegyes talajokban végeztek ilyen szilárdításokat, ugyanis a talajba befecskendezett magas nyomású anyagsugár összetöri a talaj vázszerkezetét és azt átformálva „új tömböt alkotva” szilárdul meg. Ennél az eljárásnál kevésbé játszik szerepet a talaj vízáteresztőképessége, ami a többi szilárdítási módszernél annyira fontos tényező.



Itt cementált, szilárdított talajoszlopokat lehet szorosan egymás mellé telepítve készíteni, amelyekkel munkateretek határolhatóak le, esetleg épületek biztosítására alakíthatunk ki vele védelmet, vagy alagutak építésénél alkalmazhatjuk talajszilárdításra.

Az eljárás először a fúrási munkával kezdődik, azaz a furatokat elkészítik a tervezett mélységig. A fúrás befejezése után megkezdődik az injektálás folyamata. A cső végén két ellentétes irányú fúvóka helyezkedik el, amelyeken keresztül nagy nyomással besajtolásra kerül az injektáló anyag. Eközben a csövet lassan forgatják és felfelé húzzák, így egy 50 – 120 cm átmérőjű szilárdított oszlopszerű tömb alakul ki.

A jet oszlopok, azaz a tömbösítésben alkalmazható cemet, bentonit, víz és vízüveg vagy más vegyi anyag.

Finomszemcséjű talajokban 2- vagy 3-szoros magasnyomású injektálást is alkalmaznak többféle injektáló rudazattal.

Első lépésben csak víz-levegő és vízszugár nagy nyomású (400-600 bar) besajtolásával lazítják fel a talajt, őrlik fel annak vázszerkezetét.

Következő lépésben egy olyan injektálórudazatot helyeznek be, amelyen levegő és víz sajtolható be, és ez alatt kb. 0,5 – 1,0 m-rel van elhelyezve a cementszuspenziót bejuttató nyílás. Egy újabb víz – levegő „kombináció” lefuttatása után 30 – 50 bar nyomással a cementszuspenzió kerül beinjektálásra. Ezzel a módszerrel kemény kötött talajok is szilárdíthatóak.

Az injektálási nyomás igen széles intervallumon mozoghat 1-től egészen nyolcszázig.

Alapvetően a fúrás körül kialakult szilárdított talajhenger átmérője függ az alkalmazott cső átmérőjétől, az injektálási nyomástól, az időtartamtól és a talaj nyírószilárdságától.

A Talajszilárdításoknál a környezetkárosító hatást is meg kell vizsgálni, amely első sorban a talaj vegyi szilárdításai esetén léphet fel. Főként a talajvízben jelentkezhetnek ezek a károsító hatások.

Volt példa, vízüveg és annak reagense alkalmazásakor, ahol a szilárdulás után a talajvízben még fél év után is, igen magas volt a talajvíz klorid tartalma, amely a környező épületek betonszerkezeteire igen veszélyes volt. Eme kellemetlen hatások miatt, lakott területek közelében mellőzik a kémiai szilárdításokat.



7. Alagutak szellőzése:

Az alagútépítésnél megkülönböztetünk:

- munkahelyi
- végleges

S ez utóbbi még további két részre osztható:

- természetes
- mesterséges

7.1. Munkahelyi szellőzés:

A föld alatti zárt munkatérben a természetes levegőcseré csak ritkán van meg, mert a kőzet és a talajrétegek légáteresztő képessége csekély, és a természetes úton, hőmérsékletkülönbség okozta áramlás folytán bekerülő friss levegő mint utánpótlás csekély még akkor is, ha a pneumatikus légszerszámokból kipufogó levegőmennyiséget, vagy az anyagszállító vonatok, tehergépjárművek okozta légmozgásból származó légcserét is hozzávesszük. A dolgozók természetes levegőfogyasztása mellett a robbantásokból, füst-és egyéb gázokból származó fertőzéssel is számolnunk kell amellet, hogy a levegő sokszor kellemetlen felmelegedését is légcserével kell kiegyensúlyoznunk. A levegő felhasználását növeli a munkatempo növelése, ami viszont a termelékenység növelésére irányuló természetes törekvés. Egyes munkahelyeken, de

főleg a fejtési homloknál rendkívül fontos a megfelelő minőségű és mennyiségű levegő biztosítása, főképp a dolgozók egészsége, munkaképessége és teljesítménye végett.

Ha a levegő 21%-os oxigéntartalma 20% alá esik, már bágyadtságot és fejfájást okoz, ha pedig 17% alá esik, akkor a közegben eltöltött huzamosabb idő ájuláshoz okoz.

Ahhoz, hogy a munkahelyi szellőztetés levegőszükségletét megállapíthassuk, ismernünk kell azokat a tényezőket, amelyek a levegő fertőzőttségét, elhasználtságát okozzák.

Ezek szerint a levegőszükséglet függ:

- a műszakonként a munkahelyen dolgozók létszámától
- a szállítóberendezések üzemétől
- a felhasznált robbanóanyag mennyiségétől és minőségétől
- az üzemmenettől
- a geológiai viszonyoktól és a fejtett kőzetek gáztartalmától vagy gázképző képességétől.

A műszakonkénti levegőszükséglet megállapítása

Ha a 20%-os oxigéntartalmat vesszük a levegőben alsó határnak, akkor emellett 0,9%-os CO_2 engedhető meg. Mivel a kilégzett levegőben 4% szén-dioxid van, tehát $\frac{4,0}{0,9} = 4,5$ -ször annyi friss levegőről kell gondoskodni, mint amennyit a dolgozók kilélegeznek. A veszteségekre és a kedvezőbb hígításra való tekintettel azonban tízszerest szoktak felvenni. Egy ember természetes levegőfogyasztása percenként 30 liter. A bányagázokra és egyéb fertőzésekre való tekintettel ennél lényegesen többet, fejenként és percenként legalább 2 m^3 levegőt szoktak a tervezésnél alapul venni. Ehhez jön még hozzá a hosszabb alagutaknál kialakult hűtési igények, melyet műszakváltásonknál szintén fejenként szoktak megállapítani. A gyakorlatban minimum $60 \text{ m}^3/\text{perc}$ levegőszükséglettel kell számolni, egy hosszabb táró szellőztetésénél számolni.

Nincs külön levegőigény elektromos vontatás vagy sűrített levegővel hajtott légmotoros vontatás esetén. Diesel – vontatás esetén Rabcewicz minden lóerőre $1,2 \text{ m}^3/\text{min}$ levegőt számít. Robbanómotoros vontatóknál a kipufogó gázok CO -tartalma üzem közben 3%, üres járásnál 7% is lehet.

Robbantások esetén, döntő fontosságú a folyamat során a homloknál keletkező gázok megfelelő eltávolítása, felhígítása. A robbanóanyagok tekintélyes, de változó mennyiségű mérgező gázt termelnek, mely főleg CO -t, CO_2 -t, NO_2 -t tartalmaz. Ha például szén-dioxidra vonatkoztatjuk, aminek ártalmatlan értékét 0,02%-ban állapítjuk meg, a percenként szükséges Q levegőmennyiség m^3 -ben

$$Q = 5 \frac{A \times b}{t}, \text{ ahol}$$

A a robbanóanyag mennyisége kilogrammban, b az 1 kg robbanóanyagból fejlődött CO gáz mennyisége literben és t a szellőztetés ideje percekben; b értékéne felvétele igencsak bizonytalan, mert a robbanóanyagon kívül, függ a fejtési és robbantási módszertől.

Az üzemmenettől és a geológiai viszonyoktól függő levegőszükséglet mindenkor a tényleges helyzetnek megfelelően állapítandó meg, vagyis a szállítás intenzitásától, a robbantások sűrűségétől stb. függően.

A szellőztetés eredményes végrehajtásához a friss levegőt bizonyos nyomással kell a szellőztetendő munkatérbe juttatni. Miután a levegő beszállítása csővezetéken történik, a szükséges nyomómagasságot a csőben való szállítás közben fellépő ellenállásokból határozhatjuk meg. Az ehhez szükséges nyomómagasság három részből tevődik össze, mert le kell győznünk a vezetékekben fellépő súrlódást, valamint a kanyarulatok, zárok okozta ellenállást, és a fenn kell tartanunk egy állandó szállítási v sebességet.

Tehát körszelvényű csőre:

$$h = h_s + h_d + h_n = \frac{v^2}{2 \times g} \times \gamma \left[\frac{\lambda \times L}{D} + 1 + \xi \right]$$

összefüggést írhatjuk fel, ahol a λ a súrlódási együttható, γ a levegő fajsúlya, L az egyenes csővezeték hossza, D az átmérője, ξ pedig a talapasztalati tényező, amely az összes helyi ellenállás viszonylagos hosszát kifejezi.

A munkahelyi szellőzés háromféle lehet:

- fúvó szellőztetés
- szívó szellőztetés
- kombinált módszer

A *fúvó szellőztetésnél* a friss levegőt közvetlenül a fejtési munkahelyre tápláljuk be, és azaz elhasznált levegőt az alagút teljes keresztmetszetében és hosszában visszanyomja. A munkahelyről viszonylag gyorsan kinyomja a fertőzött levegőt, és ott a friss levegő hűtő hatása is jól érvényesül, a dolgozók munkaképessége és teljesítménye emelkedik. Hátránya, hogy teljes keresztmetszeten visszaáramló „rossz” levegő lassan áramlik, ami miatt a teljes szelvényt ellepi a felszálló por és gáz.

A *szívó szellőztetésnél* az irány fordított. Itt a fejtési homloktól vezetéken szívjuk el a fertőzött levegőt, és annak helyére az alagút teljes szelvényén keresztül nyomul be a levegő. A robbantáskor fejlődő por és füst nem terjed a már kész szerkezet felé, de az itt lévő levegő tisztulása/cseréje lassabban megy végbe, ezért ideiglenes csőtoldatokat kell alkalmazni.

A *kombinált módszer* tulajdonképpen célja, hogy a korábban említett kétfajta eljárás előnyeit egyesítse és a megfelelő időben és megfelelő helyen mindig a megfelelő szellőztetési módszert alkalmazza.

7.2. A természetes szellőzés:

A természetes szellőzés lehetőségeinek kihasználása rendkívül fontos, és már az alagút topográfiai elhelyezésénél gondolnunk kell erre, Tehát az alagt tengelyét lehetőleg az uralkodó szélirányba helyezzük, a portálok ne kerüljenek szélárnyékba, sem az előbevagás; az alagút tengelyét ne vezessük erős görbületbe vagy ellenesésbe. Meteorológiai szempontokat is érdemes szem előtt tartani, és az alagutat célszerű erősen széljárta helyen létesíteni, amennyiben lehetséges.

A természetes szellőzés erősen megkönnyíti a fenntartás munkáját, mert szárító hatásával ellensúlyozza a páralecsapódást, a kisebb ízbeszivárgások okozta felületi átnedvesedéseket. Ezek pedig előfeltételét adják a különböző korrozív hatásoknak.

A természetes szellőzés alapját részben az alagút irányába eső külszíni légmozgások, szelek, részben pedig a külső és belső levegő hőmérséklet- és fajsúlykülönbségére visszavezethető nyomáskülönbség képezi.

Bonyozos körülmények mellett a természetes szellőzés egészen tekintélyes értékű lehet, mégis nem javasolt figyelembe venni a tervezéskor Andreae szerint, ugyanis nem lehet rá állandóan számítani.

7.3. Mesterséges szellőzés:

Végleges alagutak mesterséges szellőzése elsősorban közúti alagutaknál, továbbá földalatti vasúti alagutaknál. A mesterséges szellőzésnél jelentkező levegőszükségletet ismét a levegő megengedhető fertőzöttsége, illetőleg a fejlődött melegmennyiség eltávolíthatása alapján kell meghatározni. A levegő mennyiségének megállapításánál figyelembe kell venni, hogy az egyes mérgező gázokra megállapított megengedhető koncentráció értéke függ a benttartózkodás idejétől. Minél rövidebb a benttartózkodás ideje, a megengedhető koncentráció annál magasabb. A szellőző levegő mennyiségét alapvetően befolyásolja a számításba vett közlekedési

eszközön kívül a forgalom sűrűsége. Így több alagútnál előfordult, hogy a létesítés után, utólagosan vált szükségessé mesterséges szellőzőberendezés telepítése. (pl. budai Várhegy alagút).

A mesterséges szellőzés számításánál figyelembe kell venni, hogy a természetes szellőzést megindító tényezők, tehát a barometrikus nyomómagasság, hőfokkülönbség, szélnyomás fellépése esetén is az előírt légmennyiséget a mesterséges szellőzőberendezéssel biztosítani kell. Számításnál ugyancsak figyelembe kell venni a járművek mozgása által keltett levegőmozgást, az úgynevezett levegőutánáramlást.

Az alagutak szellőzésénél figyelembe kell venni, hogy az itt oly nagy levegőmennyiségre van szükség, melyeknél a levegő előkészítése, melegítése, hűtése vagy kondicionálása szóba sem jöhet.

A legnagyobb CO fertőzés egy alagútban minimális sebesség és kocsitávolság mellett fog bekövetkezni. tehát a szellőzőberendezést erre kell méretezni.

Kress szerint a nyom teljesítőképessége:

$$C = \frac{1000 \times V}{a} = \frac{3600 \times V}{a_1 + 0,5 \times v + 0,166 v^2},$$

számú kocsik óránként, V az átlagos menetsebesség km/óra és v – m/sec, a a kocsik követési távolsága méterben, és a_1 egy kocsik átlagos hossza (m), akkor az alagútban egy időben tartózkodó összes kocsik száma

$$z = 2 \times C \frac{L}{V} = 2000 \frac{L}{a}$$

A végleges szellőzési módszerei között megkülönböztetünk:

- hosszirányú szellőzést
- keresztirányú szellőzést
- félig keresztirányú, kombinált szellőzést

7.3.1. A hosszirányú szellőzés:

A hosszirányú szellőzésnél maga az alagút közlekedési tere képezi a légcsatornaát portáltól portálig, illetve szellőző aknáig.

A szellőző levegő áramlási iránya megegyezik az alagút hossz tengelyével. E rendszer előnye, hogy beruházási költségei alacsonyak, mivel külön szellőzőcsatorna építési költségei nem terhelik a beruházást.

A szükséges légmennyiség áramlását többféle módon biztosíthatjuk. Szokásos módja ennek, hogy az alagút mentén egy vagy több szellőző aknát létesítenek, melyeken keresztül a szükséges légmennyiséget ventilátorokkal benyomják, illetve elszívják. Több akna esetén a szívó- illetve nyomóaknák váltakozva kerülnek elhelyezésre. A légmennyiség egyenletes eloszlását az aknák megfelelő telepítésével kell biztosítani.

Hátránya e szellőzési módszernek, hogy bármilyen gondos telepítés esetén is kedvezőtlen külső körülmények következtében az alagút jelentős részén a szellőzés kimaradhat. Ilyen módszerek például Saccardo-rendszer illetve Sängér-féle szellőzés.

Közúti alagutaknál a tisztán hosszirányú szellőzés ritkán kerül alkalmazásra, viszont vasúti és földalatti vasúti alagutaknál csaknem kizárólag ezt a rendszert használják.

7.3.2. A keresztirányú szellőzés:

Lényege, hogy a légcseré keresztirányban történik. A szekvény alján friss levegőt fújnak e, az elhasználtat pedig a szelvény tetején szívják el. Több befúvó és elszívó nyílás együttesen egy-egy szellőzési szakaszt képez. A friss levegőt a felső térből leválasztott külön csatornán vezetik az alagútba, és a meghatározott hosszúságú különválasztott szellőzési szakaszokba juttatják be a közlekedési térbe. Az elhasznált levegőt pedig ugyanezen különválasztott szakaszokban külön elszívó fővezetékbe szívják el és juttatják ki ismét a szabadba.

A keresztirányú szellőzés kétségtelenül költségesebb, mint a hosszirányú, de nagyteljesítményű szellőzést hosszú alagutaknál forgalom zavarása nélkül legjobban ezzel az elrendezéssel lehet biztosítani. Rendkívül nagy előnye, hogy a forgalmat egyáltalán nem zavarja és a fertőzött könnyebb levegőt az alagútból a legrövidebb úton távolítja el.

7.3.3. A félig keresztirányú szellőzés:

A friss levegő befívása ugyanúgy történik, mint a keresztirányúnál, viszont az elszívás nem külön vezetéken keresztül történik, hanem csak a hosszirányban a szellőző aknákon keresztül szívják el. Természetesen ez a rendszer nem annyira tökéletes, mint a keresztirányú, de bizonyos magasabb szelvényű, patkó alakú alagutaknál számtásba jöhet, mert a szennyezett levegő a főte szelvényébe kerül, és ott nagyobb bajok okozása nélkül áramolhat a kijáratok, illetőleg a szellőző aknák felé.



A keresztirányú szellőzés erőszükségletének számításánál a következő veszteségeke legyőzését kell figyelembe vennünk:

- Befúvásnál:

- A külső levegőnek a ventilátorterembe való beszívásakor a légszűrőkön előálló veszteségek
- A levezető csatornákon és azok íveiben, könyökeiben előálló veszteségek
- A fő légszállító csatornákból az úttestre vágott nyílásokon való kiáramlás közben előálló veszteségek

- Elszívásnál:

- A szennyezett levegőnek a tetőn vágott nyílásokon való áthaladásakor keletkező veszteségek.
- A szívó főcsatonán, az ívekben és a könyökön való eltávozáskor keletkező veszteségek
- A ventilátorban és a kivitelező nyílásokon való eltávolításkor keletkező veszteségek



8. Folyamatos monitoring rendszer:

Igen fontos az építés közbeni folyamatos megfigyelés, ugyanis ha például egy előre nem látott lecsédesedésbe vagy karsztosodásba futunk bele, amely problémát okozhat, ezekkel a műszerekkel jó eséllyel megelőzhetünk egy esetleges havária eseményt.

Ezek a műszerek a következők:

- piezométer
- inclinométer
- extenzométer

8.1. Piezométer:

Pórusvíznyomás mérésre alkalmas műszerrel folyamatosan figyelemmel kísérhetjük a szerkezetünkben illetve környékén alakuló víz által okozott feszültségeket. Ezzel a megfigyeléssel megelőző lépéseket tehetünk a víz okozta többletnyomások kialakulása ellen. Alapvetően gátak és töltésekben mozgó víz monitorozására szokás legelterjedtebben használni, de természetesen az alagútépítésben is alkalmazzák.



8.2. Inclinométer:

A vízszintes irányú elmozdulások érzékelésére, regisztrálására alkalmas monitoring eszköz. Alkalmas támfalak, résfalak, töltések, gátak folyamatos mozgásellenőrzésére. Vízszintes irányban is képes mérni, ezért alagutak feletti függőleges mozgásokat is képesek vagyunk vele nyomonkövetni.

8.3. Extenzométer:

Az extenzométeres mérés segítségével nyomon tudjuk követni különböző mélységben elhelyezett fix pontok függőleges elmozdulásait. A mérés elve a mágneses rezonancián alapszik. A mérendő fix mélységekben elhelyezünk mágneses szalagokat, melyeken amikor áthalad a mérőműszerünk akkor jelet adva a vevő felé leolvassa a fix ponthoz viszonyított helyzetét. A fix pontot úgy kell kiválasztani, hogy az már a süllyedési határon túl legyen. Elhelyezése történhet függőlegesen és vízszintesen, függőleges esetben süllyedéseket tudunk vele mérni, vízszintesen pedig vízszintes mozgásokat regisztrálhatunk vele.

A vízszintes elhelyezés főleg az alagútépítésben hasznos, ugyanis ezzel nyomonkövethetjük a homlokfal mozgását, így növelve a biztonságot.



9. Számítástechnika a geotechnikában:

A 21. században elengedhetetlen a számítógépek használata, nincs ez másképp a geotechnikában sem. Rohanó világunk megköveteli a gyors és precíz munkavégzést, amelyhez nagy segítséget nyújtanak a számítógépek. Ugyanis ma már nem kell több száz vagy akár több ezer oldalt bonyolult képletekkel és összefüggésekkel teleírni. Ezt a munkát elvégzik helyettünk, az erre a célra kifejlesztett speciális programok. Legismertebb programok között szerepel a Plaxis, amelyről szeretnék egy kicsit bővebben beszélni.

A Plaxis egy végeselemes módszert alkalmazó folyamatos fejlesztés alatt álló szoftver, melynek „tudástárát” folyamatosan bővítik, így egyre több mindenre alkalmas, egyre bonyolultabb modellek valósíthatóak meg benne. Mára szinte elmondható, hogy nincs olyan, amit ne lehetne benne lemodellezni.

A geotechnikában a véges elemek módszerét elsősorban vonalas műtárgyak keresztmetszeinek számítására használjuk. Ahol a végtelen féltér helyett egy zárt tartományt vizsgálunk. Célszerű betartani néhány szabályt a tartományt illetően:

- Természetes lehatárolás: merev réteg
- A peremzavar minimalizálása

9.1. A geotechnikai modell kialakítása:

A vizsgált tartományt úgy kell lehatárolni, hogy a peremzavarok ne hamisítsák meg az eredményt. Az olyan rétegek, amelyek jelentősen merevebbek, általában megfelelő határok.

Ha nincs ilyen, előzetesen meg kell vizsgálni, hogy milyen eredményeket várunk, és ehhez milyen tartományok vizsgálata szükséges.

A lehatárolás néhány szempontja:

- Határmélység süllyedésszámításnál
- A potenciális törési mechanizmus várható kiterjedése stabilitásvizsgálatnál
- A terhelés-tehermentesítés várható hatástartománya
- A természetes rézsűn túl általában nem terjednek a hatások

Az eredményeket ellenőrizni kell:

- A törési mechanizmus nem éri-e el a peremet
- Nem túl nagyok-e az elmozdulások a peremnél
- Nem túl nagy-e a feszültségek eltérése a peremen a várhatótól

Túlságosan nagy területet nem jó vizsgálni, ugyanis az „értékes” területek aránya lecsökken, így az érdekesebb helyekre kevesebb vizsgálati pont esik, ezzel rontva a pontosságot. Ezért a vizsgált alagutnál szintén fontos a jó dobozmodell kialakítás.

A felszínsüllyedések szempontjából a természetes rézsű szabja meg a modellvízszintes kiterjedését. Az alagút alatt a zavaró hatások a feszültségekben a távolság négyzetével arányosak, a végtelen térben levő, kör alakú üreg peremére ható terhelés analógiája alapján, $5R$ távolságban.

A talajtömeg modellezése finomított háromszögekkel történik, amelynek nem csak a csúcsaiban találhatóak csomópontok, hanem az oldalain és a belsejében is. Ez a 15 pont-30 elmozdulási szabadságfok teljes negyedrendű elmozdulásmezőt ír le. A háromszögelemek rugalmasabban használhatók a geotechnikai modellezésben, mint a négyszögelemek.

9.2. Talajmodellek:

A mai végeeselemes programok alapvetően négy féle fizikai talajmodellt használnak.

Mégpedig:

- Rugalmas modell
- Mohr-Coulomb modell
- Puha talajmodell
- Felkemalajmodellell

9.2.1. Rugalmas Talajmodell:

A rugalmas modell használati köre korlátozott, csak kis terhelési szinteknél, nagy teherbírású talajoknál lehetséges. Betonelemek modellezésére is használható. Paraméterei: rugalmassági (összenyomódási) modulus, Poisson-tényező. A rugalmassági modulus (E) triaxiális kísérletből vagy egyirányú nyomásból határozhatjuk meg (kötött talajoknál). Általában az 50 %-os terhelési szinthez tartozó húrmodulust használjuk.

Az összenyomódási modulus (E_s) kompressziós kísérletből nyerhető, a mélységnek megfelelő terhelésnél. Homogén talajrétegben a merevség a mélységgel (az előterheléssel) nő, ha van rá adatunk, ezt számításba vehetjük.

9.2.2. A Mohr – Coulomb modell:

A Mohr-Coulomb modell rugalmas-ideálisan képlékeny. A törési feltétel: a Mohr kör érinti a Coulomb egyenest. Az elmozdulásokat rosszul modellezi, de stabilitásvizsgálatra tökéletesen alkalmas.

9.2.3. A Puha talajmodell:

A puha (Cam-Clay) modell puha-sodorható állapotú kötött talajokhoz alkalmazható. Az alapja az, hogy a kompressziós vizsgálat féllogaritmikus léptékben közel lineáris. A kompressziós tényező (λ , szűz terhelésnél) és a duzzadási tényező (κ , tehermentesítésnél-újraterhelésnél) az alakváltozási jellemzői. A nyírási teherbírás a Mohr-Coulomb modell szerinti

9.2.4. A felkeményedő talajmodell:

A felkeményedő talajmodell kemény kötött és tömör szemcsés talajoknál használható.

A nyírószilárdság a Mohr-Coulomb modell szerinti. Az összenyomódási és a rugalmassági modulus független paraméter, nincs Poisson tényező.



A geometriai modell megrajzolása a CAD programokban megszokottak szerint működik. Az aladatok és paraméterek megadhatóak billentyűzettel vagy egérrel az eszközsávon.

Az eszközsávon található ikonok:

- Réteghatárok
- Lemezek
- Lemezcsuklók
- Geotextíliák
- Határfelületek
- Horgonyok és dúcok
- Alagutak
- Peremfeltételek

Az alagút szerkesztése:

Az alagútfalazat egymáshoz csatlakozó ívekkel alakítható ki. Ismernünk kell az ívek sugarát és nyílásszögét, tehát a szerkesztéseket előre (pl. AutoCAD-del) el kell végezni.

Hs nyílásszögét, tehát a szerkesztések

A hálózatgenerálás automatikus. Megválaszthatjuk a globális sűrűséget, és helyi sűrítéseket is előírhatunk, talajrétegre vagy vonal mentén.

Eredmények kiértékelése:

A számítási eredmények megtekintése gomb segítségével. Ekkor a Plaxis Output , része nyílik meg ahol részletesen megvizsgálhatjuk a megoldást.

Például, megtekinthetjük a különböző irányú deformációkat, pórusvíznyomást vagy éppen a szerkezetünkre ható terheléseket.



Forrás:

Dr. Széchy Károly: Földalatti Műtárgyak

Dr. Széchy Károly: Alagútépítéstan

Gálos Miklós – Vásárhelyi Balázs: Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban

V.M. Mosztkov: Nagyszelvényű földalatti létesítmények

Petrasovits Géza - Fazekas György - Kovácsházy Frigyes: Városi földalatti műtárgyak

HEFOP_Alagútépítés - HEFOP/2004/3.3.1/0001.01(PDF)

HEFOP_fölaalatti műtárgyak - HEFOP/2004/3.3.1/0001.01 (PDF)



Műszaki leírás

Megbízás:

A Szent István Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Kar Közmű és Mélyépítési Intézete bízott meg a feladattal, amelyet 2015/16 –os év első félévében kaptam meg. A cél nem más, mint egy megfelelő szintű s minőségű szakdolgozat elkészítése, amelyet bizottság előtt védhetek majd meg. A feladat kiosztását követően, a témaválasztás volt esedékes, amelyben igen nagy segítségemre volt Prof. Dr. Telekes Gábor.

Sok fejtörés és gondolkodás után sikerült kiválasztani, hogy alagúttal szeretnék foglalkozni, így éppen kapóra jött az M0-ás autópálya Megyerihídtól a 10-es útig vezető szakasza, ahol a tervek szerint Természet védelmi területek miatt alagúttal kell megoldani a bővítést. Ezt követően felvettünk a kapcsolatot az UNITEF'83 ZRt-vel, ahol sikerült megismerkednem Grabarits Józseffel, aki az első találkozásunk után vállalta a külső konzulensi feladatkört.

A továbbiakban folyamatos konzultáció mellett igyekeztem eleget tenni az elvárásoknak, közzetani, közetmechanikai, alagúttervezési és egyéb feladatok vártak rám..

Alapadatok:

Sajnos a projekt még annyira friss, hogy nem sikerült hozzájutnom pontos labor és fúrási eredményekhez. Ezen munkálatok 2016 első félévre tehetőek, így a laborálással együtt leghamarabb nyárra várhatóak pontos eredmények. Viszont alapadatként kaptam egy képet amelyen a területen található homokkő közelítőlegesen szilárdsági paraméterei vannak megadva.

Megnevezés		Testsűrűség	Rugalmassági modulus	Egyirányú nyomószilárdság	GSI	mi
Homokkő	átlagérték	21.6 kN/m ³	1.4 GPa	17.9 MPa	50	17
	szórás	-	0.4	8	15	4

Ezen alapadatok felhasználásával jutottam egyre előrébb a feladatot tekintve, egyik számítási eljárás követte a másikat és így tovább...

Természetesen meg kell jegyeznem, hogy mivel a korábban említett fúrási és labor eredmények nem álltak rendelkezésemre, ezért az elvégzett számításokban elképzelhető némi pontatlanság.

Helyszín:

A néhány évvel ezelőtt átadott Megyeri híd és a Pilisborosjenő mellett elhaladó 10-es út közötti szakasz tekinthető az alapvető iránynak. Ezt pontosítván a tervek szerint, a Megyeri hídról Budakalász mellett egy völgy híddal juthatunk el a tervezett két alagút szakasz rövidebbikéhez, amely 2000 méter hosszúságban épül majd meg. Az említett szakasz végénél, a hegygerincnél lehetőségünk lesz arra, hogy, hogy folytassuk utunkat, esetlegesen meglátogatjuk Üröm városát. Amennyiben a tovább haladás mellett döntünk, rövid szakaszt követően megérkezünk a tervek szerinti hosszabb alagúthoz, ami a tervek szerint 3,2 km hosszú.

A nyomvonal mentén igen változó talajjal állunk szemben, ugyanis a tervezett mélységben található, homokkő, dolomit, Kis- Celli agyag stb.

Technológia:

Én Az NATM, azaz Új Osztrák Építési eljárás mellett döntöttem, amely a löttbeton héj és a kőzet/talaj együttdolgozásán alapszik. A talajviszonyok változatosságát szem előtt tartva, úgy gondolom, hogy ilyen állapotok között a projektre nézve „globálisan” megállja a helyét, hiszen a különböző szilárdsági és egyéb paraméterrel rendelkező rétegben is jól alkalmazható.

A technológia alapvetően a fejtés valamely formájával kezdődik, amely lehet robbantás, kotrás, esetleg más fejtési mód. Talajtól függően ezt követően célszerű némi időt várni, hogy kissé leépüljenek a talajban/kőzetben lévő feszültségek, így a löttbeton héjazatunk terhelései lényegesen kisebbek lesznek. Amint létrejön a löttbeton héjazat, némi szigetelést követően akár a végleges szerkezet is beépíthető.

Számításaimat a már korábban említett kiinduló adatokból építettem fel, s határoztam meg belőle a löttbeton vastagságot és az erre ható terheket.

Első lépésként a kőzetet, azaz a homokkővet valamely kőzet osztályozási módszerrel vizsgáltam meg, illetve kategorizáltam be

(IV. osztályú kőzet – Q index szerint, Súlyozott Q értéke = 0,04856).

Ezt követően meghatároztam a kőzet belső súrlódási szögét és kohézióját($\varphi = 45, c = 450$)

Számított belső súrlódási szög:($\varphi = 45, c = 450$)

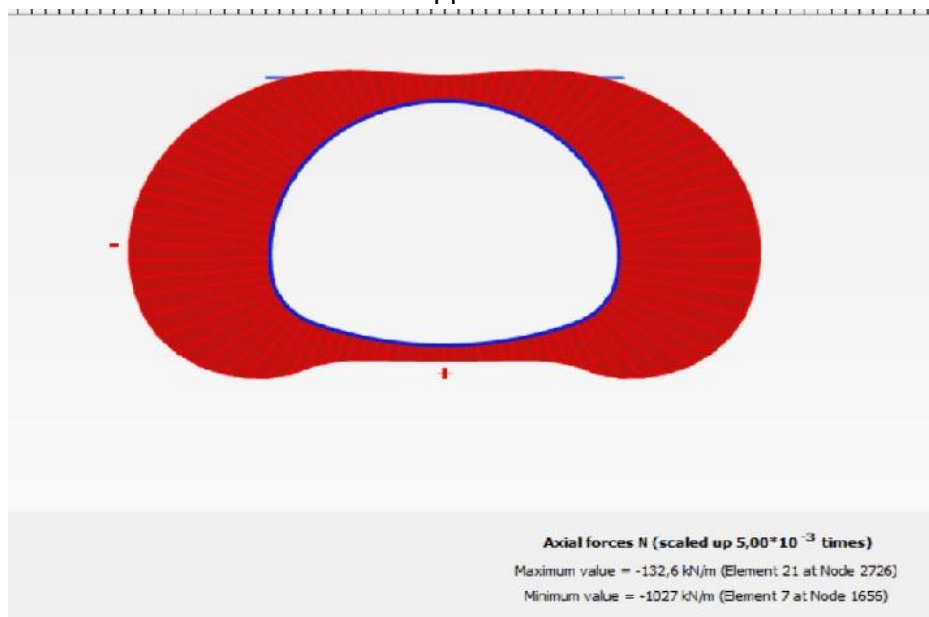
Ezekkel a paraméterekkel már képes volt a löttbeton vastagságot meghatározni, az alagút várható elmozdulásaiból.

Ez 0,2 méterre adódott.

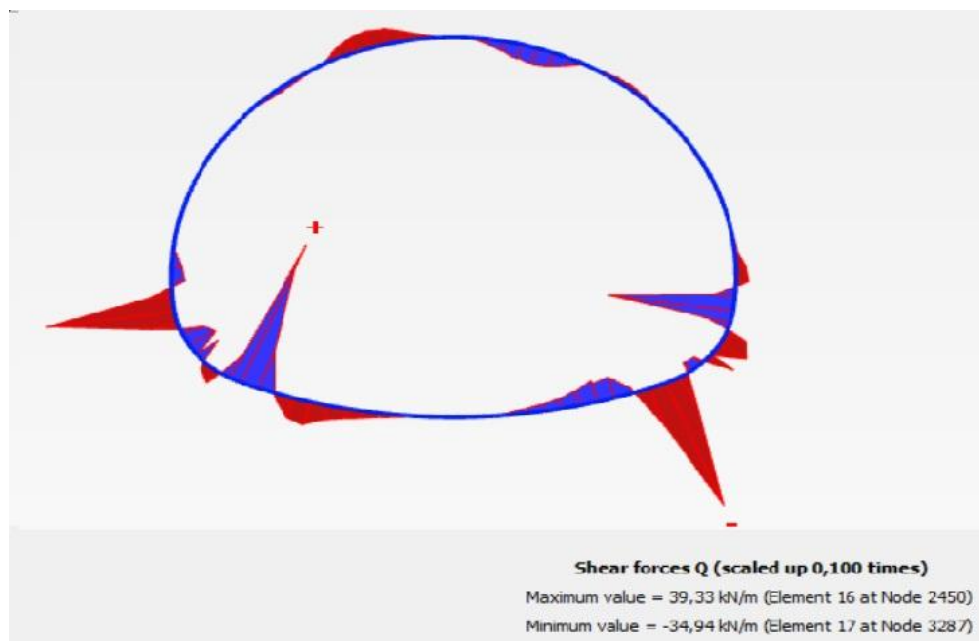
Itt több eshetőséget is megvizsgáltunk, de a ráeső terhelések következtében ezen keresztmetszetek nem voltak elegendőek.

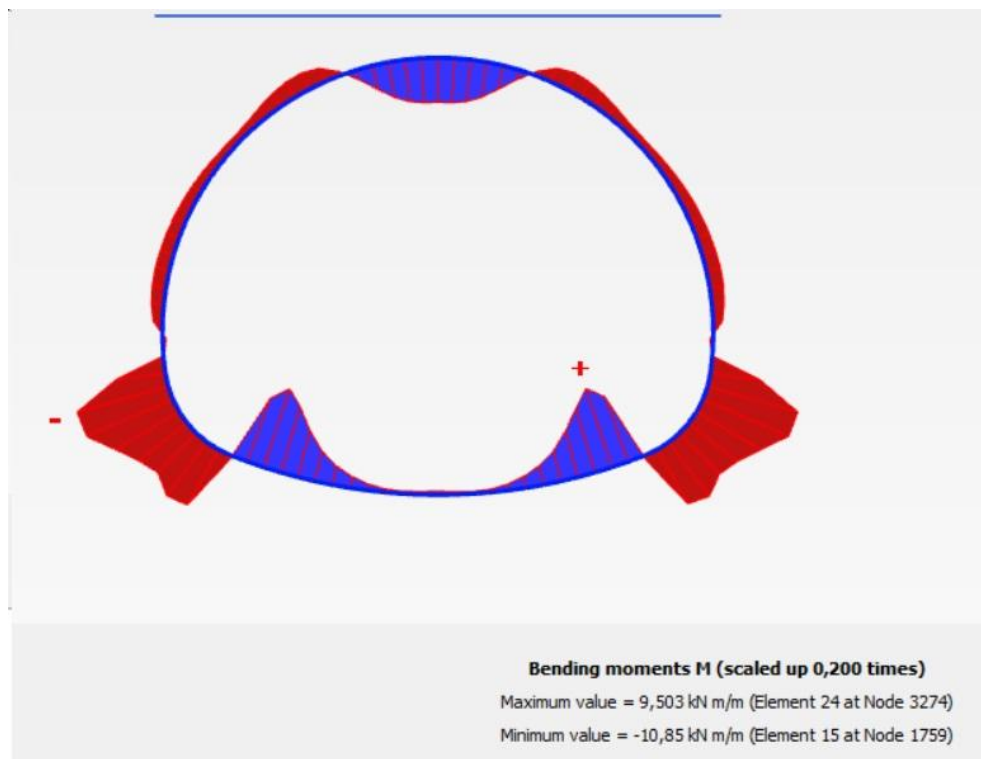
A közelítő vizsgálatot, a Plaxisban kapott értékek alapján végeztük el. A Plaxis által közölt nyomatékkel és normál erővel terheltük a 20-cmes szerkezetünket Axisban, ahol csak oszlopként tudtuk vizsgálni.

Az említett terhek Plaxisból a következő képpen

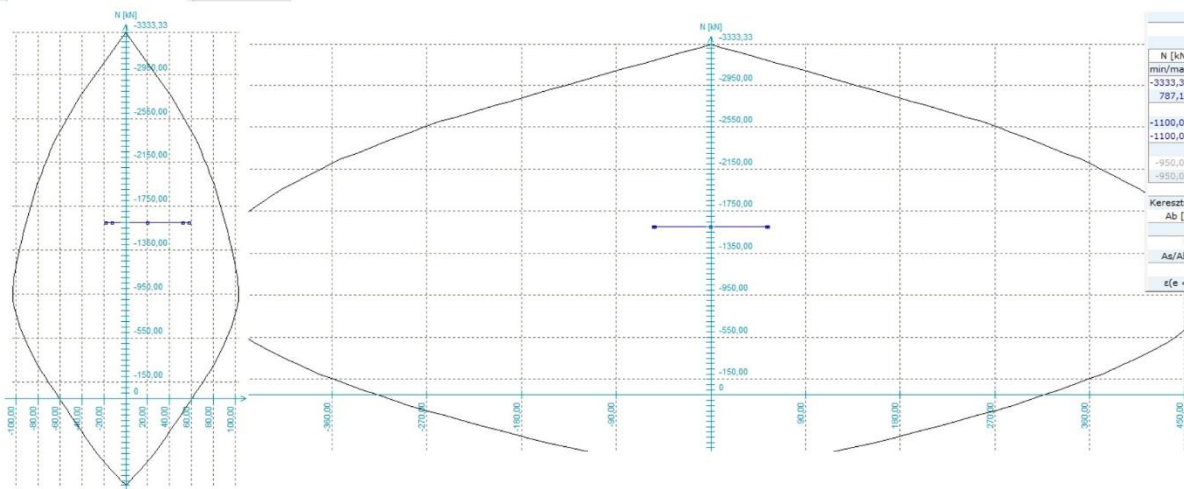


alakulnak.

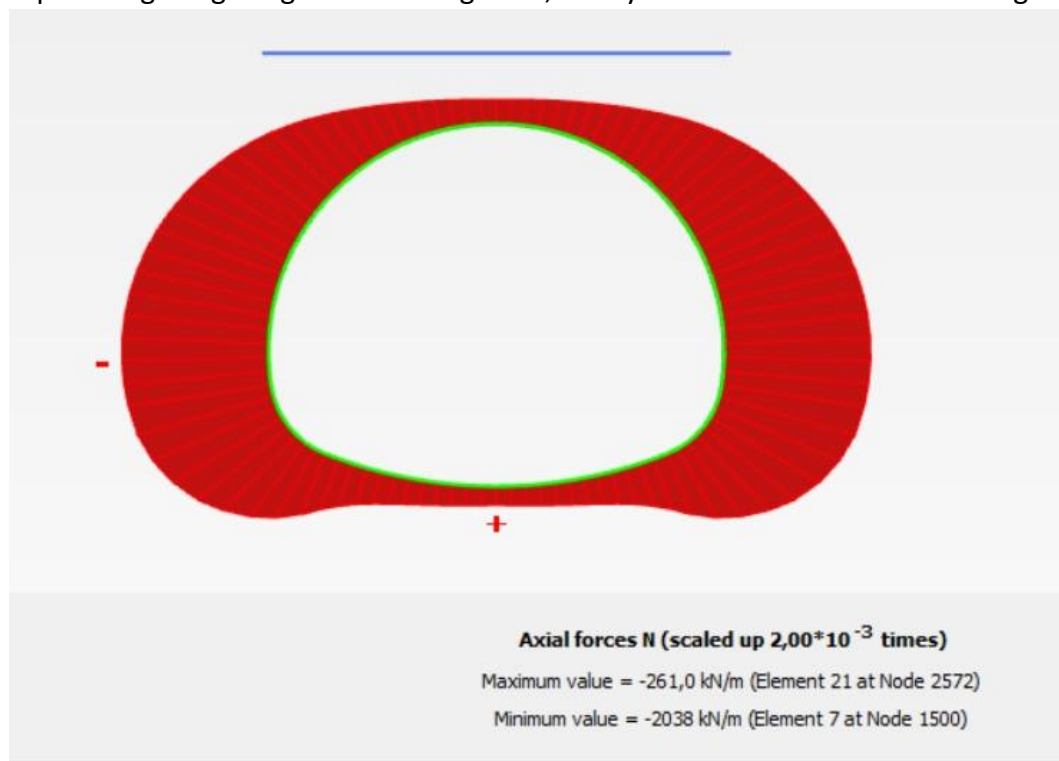


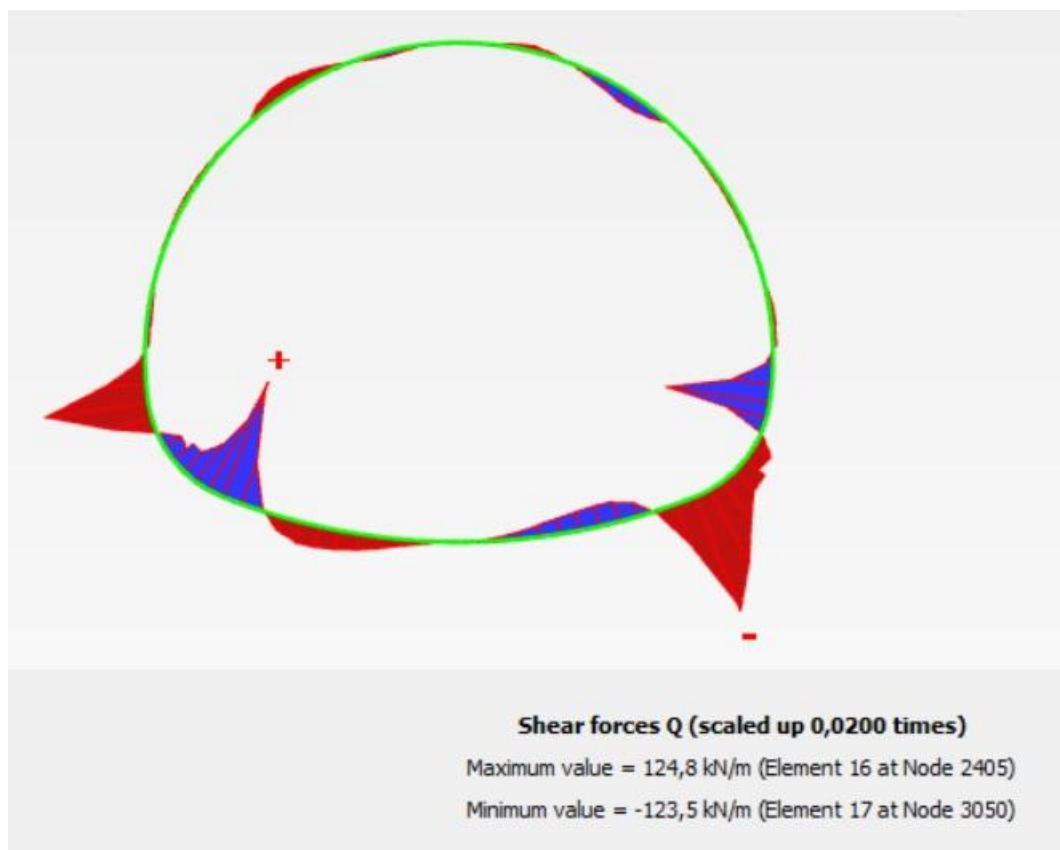


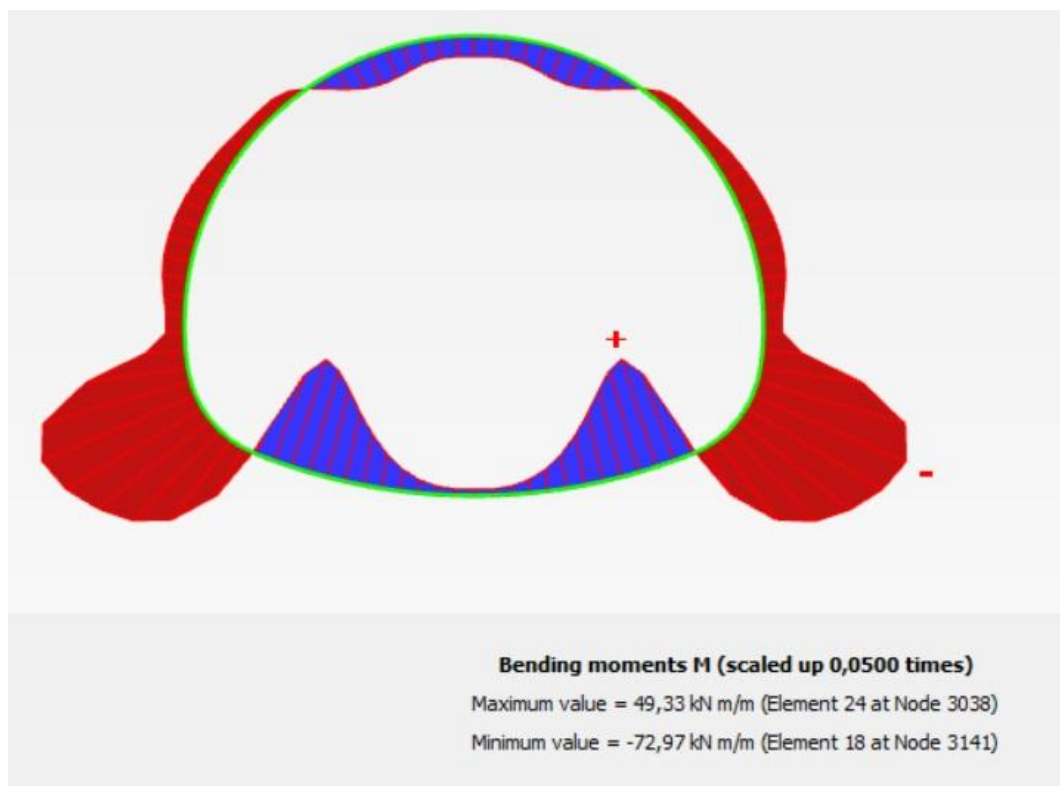
Az elvégzett Axis
ellenőrzés:



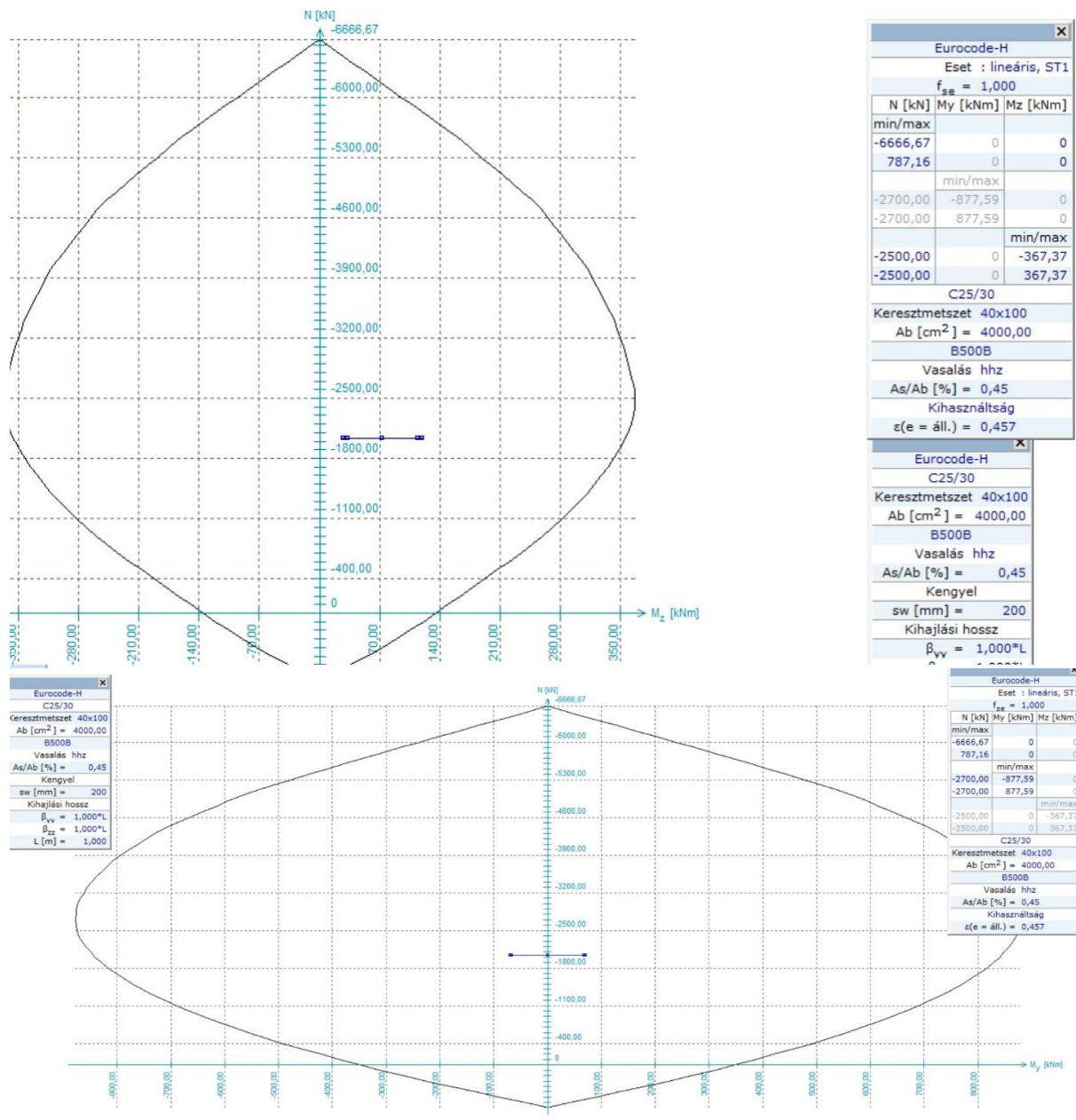
A végleges szerkezet a rá háruló terhek alapján került tervezésre és vastagságra 40 cm-re adódott. Figyelembe kell venni, hogy a szerkezetet 100 évre készítjük, ezért a szükséges repedéstágasság vizsgálatot is elvégeztük, amely a számítási mellékletben megtalálható.







A 40 cm-es szelvény ellenőrzése Axisban:



Munkavédelem:

- Az új vasbeton alagútfalazat, mint vasbeton építmény a "nem tűzveszélyes" E osztályba sorolható az 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet szerint.
- A tervezés során a vonatkozó tűzvédelmi előírások, illetve az 54/2014. (XII. 5.) BM sz. rendelet, az Országos Tűzvédelmi Szabályzat előírásai betartásra kerültek.

A tervezés

- a közúti közlekedés szabályairól (KRESZ) szóló 1/1975. (II. 5.) KPM-BM együttes rendelet,
- továbbá az utak építésének, forgalomba helyezésének és megszüntetésének engedélyezéséről szóló 93/2012. (V. 10.) Korm rendelet,
- az utak forgalomszabályozásáról és a közúti jelzések elhelyezéséről szóló 20/1984. (XII. 21.) KM rendelet figyelembe vételével készült, ezek betartásáról a kivitelező köteles gondoskodni.

Az alkalmazott műszaki megoldások kielégítik a vonatkozó ágazati szabványok és műszaki előírások követelményeit.

A tárgyi tervdokumentáció műszaki megoldásai megfelelnek az általános érvényű kötelező és az eseti hatósági előírásoknak. A terv a kivitelezési előírásokra való tekintettel, az érvényben lévő óvórendszabályok, munkavédelmi-, és tűzvédelmi előírások és szabványok figyelembevételével készült.

Az építés során az érvényben lévő munkavédelmi és balesetelhárítási óvórendszabályokat a legszigorúbban be kell tartani.

Tűzvédelem

A tűzvédelem szempontjából a 28/2011. (IX.6.) BM rendeletben közzétett Országos Tűzvédelmi Szabályzat előírásai mértékadóak, melynek rendelkezéseit a legszigorúbban be kell tartani.

A Kivitelező köteles tevékenységi területén a közvetlen tűzvédelmet szolgáló – jogszabályban, szabványban, hatósági határozatban előírt – tűzvédelmi berendezéseket, készülékeket, felszereléseket, technikai eszközöket állandóan üzemképes állapotban tartani, időszaki ellenőrzésükről, valamint az oltóvíz és egyéb oltóanyagok biztosításáról gondoskodni.

A tűzvédelmi szabály megszegéséért, ha az közvetlen tűz- vagy robbanásveszélyt, illetőleg tüzet idézett elő, vagy veszélyezteti a személyek biztonságát, akadályozza a mentésüket; a tűzjelzéshez és a tűzoltáshoz szükséges eszköz, felszerelés, készülék, berendezés, oltóanyag beszerzésének, készenlétkben tartásának, karbantartásának vagy ellenőrzésének elmulasztásáért, illetőleg rendeltetéstől eltérő – engedély nélküli – használatáért esetlegesen kiszabott tűzvédelmi bírság a Kivitelezőt terheli.

Ha a Kivitelező tüzet vagy annak közvetlen veszélyét észleli, köteles azt haladéktalanul jelezni a tűzoltóságnak, vagy ha erre nincs lehetősége, a rendőrségnek vagy a mentőszolgálatnak, illetőleg a települési önkormányzat polgármesteri hivatalának. A Kivitelező köteles a tűzoltási lehetőséget a kivitelezés során befolyásoló változtatásokat (út, közművezetékek elzárása, forgalom elterelése stb.) az állandó készenléti szolgálatot ellátó hivatásos önkormányzati tűzoltóságnak szóban azonnal és írásban is bejelenteni.

A Kivitelező köteles a létesítmények, az építmények, a technológiai rendszerek kiviteli tervezésével és megvalósításával összhangban gondoskodni a jogszabályokban [különös tekintettel az Országos Tűzvédelmi



Szabályzatban foglaltakra] és a szabványokban meghatározott tűzvédelmi követelmények megtartásáról, valamint a tevékenységi körükkel kapcsolatos veszélyhelyzetek megelőzésének és elhárításának feltételeiről.

A fentiekben nem említettekén túlmenően a Kivitelező köteles minden vonatkozó – tűzvédelemmel összefüggő – jogszabályban meghatározott követelményt betartani, különösen az alábbiakban foglaltakat:

· 1996. évi XXXI. törvény a tűz elleni védekezésről, a műszaki mentésről és a tűzoltóságról, · 30/1996. (XII. 6.) BM rendelet a tűzvédelmi szabályzat készítéséről.

Ha a Kivitelező katasztrófát vagy annak veszélyét észleli, vagy arról tudomást szerez, haladéktalanul köteles bejelenteni azt a katasztrófavédelem hivatalos szerveinek, illetve az önkormányzati tűzoltóságnak és a polgármesteri hivatalnak.

Ebből a szempontból katasztrófa alatt azt a szűkséghelyzet vagy a veszélyhelyzet kihirdetésére alkalmas, illetőleg a minősített helyzetek kihirdetését el nem érő mértékű olyan állapotot vagy helyzetet (pl. természeti, biológiai eredetű, tűz okozta) kell érteni, amely emberek életét, egészségét, anyagi értékeiket, a lakosság alapvető ellátását, a természeti környezetet, a természeti értékeket olyan módon vagy mértékben veszélyezteti, károsítja, hogy a kár megelőzése, elhárítása vagy a következmények felszámolása meghaladja az erre rendelt szervezetek előírt együttműködési rendben történő védekezési lehetőségeit és különleges intézkedések bevezetését, valamint az önkormányzatok és az állami szervek folyamatos és szigorúan összehangolt együttműködését, illetve nemzetközi segítség igénybevételét igényli.

Ha a Kivitelező az építés során elhagyott robbanótestet vagy annak tűnő tárgyat talál, illetve ilyen tárgy hollétéről tudomást szerez, akkor köteles az építési munkát haladéktalanul felfüggeszteni és bejelentést tenni a helyi rendőri szervnek **a tűzszerészeti mentesítési feladatok ellátásáról szóló 142/1999. (IX. 8.) Korm. rendelet** előírásainak megfelelően és köteles az elrendelt intézkedést megtenni illetve annak végrehajtásában közreműködni.

Az építés során a területre szállított, raktározott, felhasználásra kerülő tűzveszélyes anyagokkal az előírásoknak megfelelő óvóintézkedések szerint kell bánni. A szükséges tűzoltó berendezések, és eszközök készenlétéről gondoskodni kell, s megfelelő tűzjelzést is biztosítani kell.

Villámvédelem

Az objektum villámvédelmének tervezését az 54/2014. (XII. 5.) BM számú, az Országos Tűzvédelmi Szabályzat kiadásáról szóló rendelet valamint az MSZ EN 62305-1-4. szabványsorozat betartásával kell elvégezni.

A kockázatelemzést, a besorolást és a gyakorlati kialakítást a kiviteli terv fogja tartalmazni!



Számítási melléklet



Kőzet osztályba sorolása Q – index szerint:

Kőzettest szerkezete: $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$

Az $\frac{RQD}{J_n}$, azaz a tagoltság mérőszámának meghatározása:

RQD értékek: $RQD_1 = 80\%$ megfelelő

$RQD_2 = 75\%$ megfelelő

$RQD_3 = 50\%$ jó

A tagoltság mérőszámának meghatározása (J_n):

$J_{n1} = 3$ (Egy repedéscsoport+véletlen törés)

$J_{n2} = 9$ (három repedéscsoport)

$J_{n3} = 15$ (Négy vagy több repedéscsoport + véletlen törés)

A kőzettömbök nyírósilárdsága: $\frac{J_r}{J_a}$

A repedezettségi tényező (J_r):

$J_{r1} = 1,5$ (sima vagy egyenletesen hullámos felület)

$J_{r2} = 1,5$ (Durva vagy rendszertelen sík felület)

$J_{r3} = 1$ (Sima felület)

A tagoltság elmozdulási tényezőjének (J_a):

$J_{a1} = 1,5$ (Csak felületbevonat képződött)

$J_{a2} = 3$ (Iszapos vagy agyagos rétegek esetén)



$J_{a3} = 4$ (Lágyuló v. kevésbé súrlódó agyagrétegek)

Feszültség értékek: $\frac{J_w}{SRF}$

A repedés-víz redukciós tényező (J_w):

$J_{w1} = 1$ (Száras üreg vagy max. 5 l/perc vízszivárgás esetén)

$J_{w2} = 1$ (Száras üreg vagy max. 5 l/perc vízszivárgás esetén)

$J_{w3} = 1$ (Száras üreg vagy max. 5 l/perc vízszivárgás esetén)

A feszültségi redukciós tényező: (SRF):

$SRF_1 = 10$ Gyengült zóna, agyagos v. kémiaailag bontott kőzetekben (bármely mélységben)

$SRF_2 = 10$ Gyengült zóna, agyagos v. kémiaailag bontott kőzetekben (bármely mélységben)

$SRF_3 = 10$ Nagy kőzetnyomás esetén

Súlyozott Q-érték meghatározása

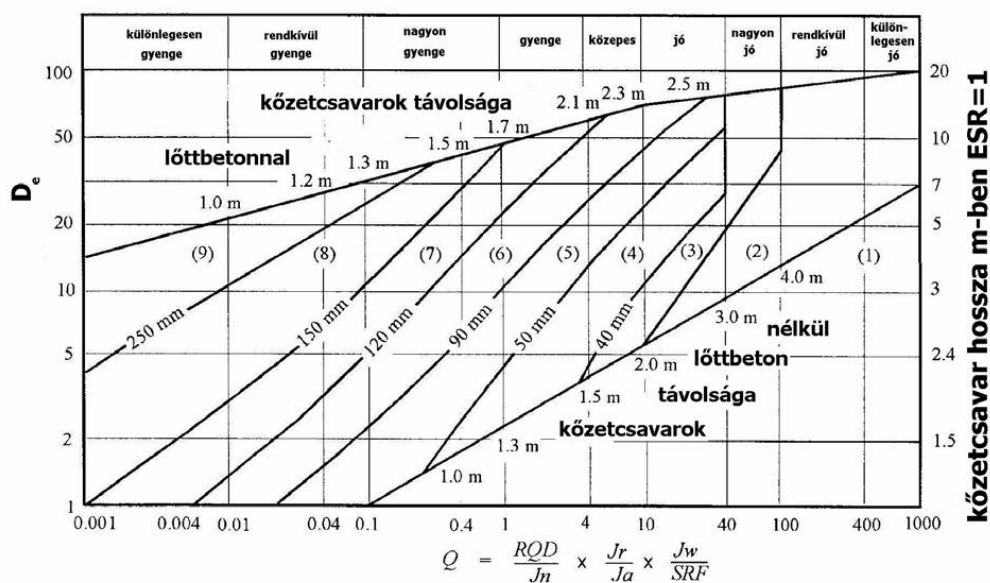
Q	legrosszabb (10%)	általános (60%)	max (30%)	súlyozott
RQD	80	70	50	74
J_n	15	9	3	7,8
J_r	1	1,5	1,5	1,35
J_a	4	3	1,5	2,65
J_w	1	1	1	1
SRF	10	10	10	10

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} = Q = \frac{74}{7,8} * \frac{1,35}{2,65} * \frac{1}{10} = 0,483309$$

Kőzettest osztályozása Q érték alapján

Osztály	érték	Leírás
I	0,001 – 0,01	különlegesen gyenge
II	0,01 – 0,04	rendkívül gyenge
III	0,04 – 0,4	nagyon gyenge
IV	0,4 – 4	gyenge
V	4 – 10	közepes
VI	10 – 40	jó
VII	40 – 100	nagyon jó
VIII	100 – 400	rendkívül jó
IX	400 – 1000	különlegesen jó

Táblázat alapján IV. osztályú (0,4 – 4) → gyenge kőzet



Az ábra alapján 90-120 mm lőtt beton alkalmazása indokolt.

Belső súrlódási szög és kohézió meghatározása:

Kezdeti adatok:

m_i , a kőzetre vonatkozó Hoek-Brown anyagállandó: 17

GSI – geológiai szilárdsági index: 50

γ , testsűrűség: $21,6 \text{ Kn/m}^3$

σ_{ci} , egyirányú nyomószilárdság: 17900 Kn/m^2

H, mélység: ~120 méter

A kőzettest Hoek – Brown állandójának képlete:

$$m_b = m_i \times e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}} = 17e^{\frac{50-100}{28}} = 2,850,$$

s és a a kőzet feltöredezettségétől függő állandók:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}} = e^{\frac{50-100}{9-3 \cdot 0}} = 0,0039$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = \frac{1}{2} \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-50}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = 0,506$$

Kőzettömbre vonatkozó egyirányú nyomószilárdság:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \times s^a = 17,9 \times 0,0039^{0,506} = 1081 \text{ Kn/m}^2$$

Húzószilárdság:

$$\sigma_t = -\frac{s \times \sigma_{ci}}{m_b} = \frac{0,0039 \times 17,9}{2,850} = -24,49 \text{ Kn/m}^2$$

Kőzetre vonatkozó nyomószilárdság:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \times \frac{(m_b + 4 \times s - a \times (m_b - 8 \times s)) \times (\frac{m_b}{4} + s)^{a-1}}{2 \times (1+a) \times (2+a)} =$$

$$17900 \frac{(2,8505 + 4 * 0,00387 - 0,506 * (2,8505 - 8 * 0,00387)) * (2,8505/4 + 0,00387)^{0,506-1}}{2 * (1 + 0,506) * (2 + 0,506)}$$

$$= 4024 \text{ Kn/m}^2$$

Minimális főfeszültség maximuma:

$$\sigma_{3max} = 0,47 \times \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\sigma_0} \right)^{-0,94} \times \sigma'_{cm} = 0,47 \times \left(\frac{4,024}{0,0216 \times 120} \right)^{-0,94} \times 4,024 =$$

$$= 1250 \text{ Kn/m}^2$$

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}} = \frac{1,250}{17,9} = 69,8 \text{ Kn/m}^2$$

A Hoek-Brown törési határgörbe ismeretében meghatározható a kőzettest Mohr-Coulomb anyagállandói is (φ és c). A $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ határok között a fenti anyagállandók (a, s, m_b) ismeretében ezek értékei:

Belső súrlódási szög:

$$\varphi = \sin^{-1} \times \frac{6 \times a \times m_b \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1}}{2 \times (1+a) \times (2+a) + 6 \times a \times m_b \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1}} =$$

$$\sin^{-1} \times \frac{6 \times 0,506 \times 0,00387 \times (s + 0,00387 \times 69,9)^{0,506-1}}{2 \times (1+0,506) \times (2+0,506) + 6 \times 0,506 \times 0,00387 \times (s + 0,00387 \times 69,9)^{0,506-1}} =$$

$$= 45,7334^\circ \cong 45^\circ$$

Kohézió:

$$c = \frac{\sigma_{ci} \times \{(1+2a) \times s + (1-a) \times m_b \times \sigma'_{3n}\} \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a) \times (2+a) \times \sqrt{\frac{1 + (6 \times a \times m_b \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1})}{(1+a) \times (2+a)}}} =$$



$$\frac{17900 \cdot [(1+2 \cdot 0,506) \cdot 0,00387 + (1-0,506) \cdot 2,8505 \cdot 69,9] \cdot (0,00387 + 2,8505 \cdot 69,9)^{0,506-1}}{(1+0,506) \cdot (2+0,506) \cdot \sqrt{\frac{1+(6 \cdot 0,506 \cdot 2,8505 \cdot (0,00387 + 2,8505 \cdot 69,9)^{0,506-1})}{(1+0,506) \cdot (2+0,506)}}} =$$

$$= 0,44999 \cong 0,45 = 450 \text{ Kn/m}^2$$

Protodjakonov módszer:

Kezdeti adatok:

Alagút szélesség: $b = 13 \text{ méter}$

Alagút magasság: $m = 9,7 \text{ méter}$

Homokkő egyirányú nyomószilárdsága: $\sigma_c = 17,9 \text{ MPa}$

Belső súrlódási szög: $\varphi = 45^\circ$

Mélységből adódó geosztatikai nyomás: $\sigma_z = \gamma \times H = 21,6 \frac{\text{Kn}}{\text{m}^3} \times 120 \text{ m} = 2592 \text{ Kn/m}^2$

Az alagút feletti parabola A – B pontjainak egymástól lévő távolsága a következő képletből számítható:

$$B = b + m \times \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = B = 13 + 9,7 \times \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{45^\circ}{2}\right) = 21 \text{ méter}$$

Protodjakonov féle közetszilárdsági osztály f értékének meghatározása:

$$f = \frac{\sigma_c}{10000} = \frac{17900}{10000} = 1,79; f < 2 \rightarrow \text{puha kőzet}, f > 2 \rightarrow \text{szilárd kőzet}$$

N vízszintes és V függőleges erők meghatározása:

$$N = V \times f, V = p \times \frac{b}{2} = 2592 \times \frac{21}{2} = 27216 \text{ Kn/m}$$

Visszahelyettesítve N -be:

$$N = 27216 \times 1,79 = 48717 \text{ Kn/m}$$

h parabola magasság számításának képlete, amelyre a következő összefüggésben lesz szükség, ahol a tartalék(τ) nagyságát állapítjuk meg.

$$h = \frac{b}{2tg\varphi} = \frac{b}{2f} = \frac{21}{2 \times 1,79} = 5,866 \text{ m}$$

$$N = p \times \frac{b}{2} \times f - \tau \times h, \text{ behelyettesítjük } x = \frac{b}{2}, y = h \text{ és } T = N$$

$$\tau = p \times \frac{b}{2} \times \frac{4 \times f \times h - b}{4 \times h^2} = 2592 \times \frac{21}{2} \times \frac{4 \times 1,79 \times 5,866 - 21}{4 \times 5,866^2} = 4152,69 \text{ Kn/m}$$

Parabola egyenletének meghatározása:

$$T = N = p \times \frac{b}{2} \times f - \tau \times h \rightarrow T = p \times \frac{b}{2} \times f - p \times \frac{b \times f}{4} \rightarrow p \times \frac{b \times f}{4},$$

Parabola egyenlete végeredményben

$$\frac{p \times x^2}{2} = T \times y = \frac{p \times f \times b}{4} y, y = \frac{2x^2}{b \times f}.$$

A kihajtott üregre ható nyomás a parabolán belül eső terület súlya lesz, mivel a külső terület már nem nehezedik az üregre. A parabola területe:

$$F = \frac{2}{3} \times b \times h = \frac{2}{3} \times 21 \times 5,866 = 82,12 \text{ m}^2$$

Megállapíthatjuk, hogy az átboltozódás kialakul. Ezért a *plaxis*ba bevitt modellünk méreteit csökkenthetjük, annak érdekében, hogy több számítási pont maradjon a „hasznos” területen. Csökkentés mértéke az alagút feletti régióban az eddigi helyett, csupán a Protodjakonov számítás során kapott h parabola magasság kétszerese. A szelvény alatt $2D - 2,5D$, ahol a D a tervezett műtárgyunk átmérője.

Lőttbeton falazat felhordási idejének meghatározása:

Kiinduló adatok 0,15 méteres lőttbeton falazat kialakítása esetén:

Alagút sugara: 6,5 méter

Belső súrlódási szög: φ°

Kohézió: $c = 450 \text{ Kn/m}^2$

E modulus: $E = 1400 \text{ MPa} = 1400000 \text{ Kn/m}^2$

P_0 ~in situ teher: $P_0 = 2592 \text{ Kn/m}^2$

P_i belső támasz, P_0 -al szemben működő: 15 cm-es lőttbeton falazat teherbírása: 550 Kn/m^2

σ_{cm} nyomószilárdság értéke, korábbi számításból: 17900 Kn/m^2

σ_3 hatékony törőfeszültség értéke, korábbi számításból: 1250 Kn/m^2

ν , a homokkőre vonatkozó Poisson-tényező: 0,20

Képlékeny törési feltétel meghatározása Mohr – Coulomb kritérium szerint:

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \times \sigma_3$$

Ehhez először meg kell határozni a k – meredekséget

$$k = \frac{(1 + \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)} = \frac{(1 + \sin 45^\circ)}{(1 - \sin 45^\circ)} = 5,8282,$$

σ_1 képletébe, a vissza helyettesítés:

$$\sigma_1 = 2172 + 5,8284 \times 1250 = 9457,5 \text{ Kn/m}^2$$

Az alagút viselkedésére vonatkozó képletek:

Kritikus megtámasztó erő:

$$p_{cr} = \frac{2 \times P_0 - \sigma_c}{1 + k} = \frac{2 \times 2592 - 2172}{1 + 5,8284} = 440,38 \text{ Kn/m}^2$$

Az alagút kölcsönhatás elemzése:

Két feltételt kell megvizsgálnunk.

Az első, amikor azt feltételezzük, hogy a p_i megtámasztó erőt nagyobbak feltételezzük, mint a ráható p_{cr} kritikus erőt, vizsgálat rugalmasan.

$$u_{ie} = \frac{r_0(1+\nu)}{E} \times (p_0 - p_i) = \frac{6,5(1+0,2)}{1400000} (2592 - 550) = 0,01137$$

A másik eset, amikor a p_i megtámasztó erőt kisebbnek feltételezzük, mint a vele szemben ható p_{cr} kritikus erőt. Vizsgálat, közet fellazulásának meghatározása.

$$r_p = \left(\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_c)}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_c)} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$= \left(\frac{2(2592(5,8284-1) + 2172,79)}{(1+5,8284)((5,8284-1)400 + 2172,79)} \right)^{\frac{1}{5,8284-1}} = 6,3465 \text{ m}$$

Az üreg falának elmozdulása:

$$u_{ip} = u_{im} = \frac{r_0(1+\nu)}{E} \left[2(1-\nu)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1-2\nu)(p_0 - p_i) \right] =$$

$$= \frac{6,5(1+0,2)}{1400000} \left[2(1-0,2)(2592 - 169,878) \left(\frac{6,228}{6,5} \right)^2 - (1-2 \times 0,2)(2592 - 0) \right] = 0,01677$$

Az alagút homlokfala előtt és után keletkező mozgások:

A legnagyobb méretű plasztikus zónaarány számítása, megtámasztás nélkül $p_i = 0$.

$$\frac{r_{pm}}{r_0} = \left(\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_c)}{(1+k)\sigma_c} \right)^{\frac{1}{(k-1)}}$$

$$\frac{r_{pm}}{r_0} = \left(\frac{2(2592(5,8284-1) + 2172)}{(1+5,8284)2172} \right)^{\frac{1}{(5,8284-1)}} = 1,15188$$

A homloknál keletkező elmozdulás a következő formulából számítható:

$$u_{if} = \left(\frac{u_{im}}{3} \right) e^{-0,15 \left(\frac{r_{pm}}{r_0} \right)} =$$

$$\left(\frac{0,01677}{3} \right) e^{-0,15(1,15188)} = 0,004702$$

Az alagútban lévő feszültségek leépülésének mértéke a homlokfal előtt, az angolból ahead of the face ($x < 0$).

$$u_i = \frac{u_{if}}{u_{im}} e^{\frac{x}{r_0}}$$

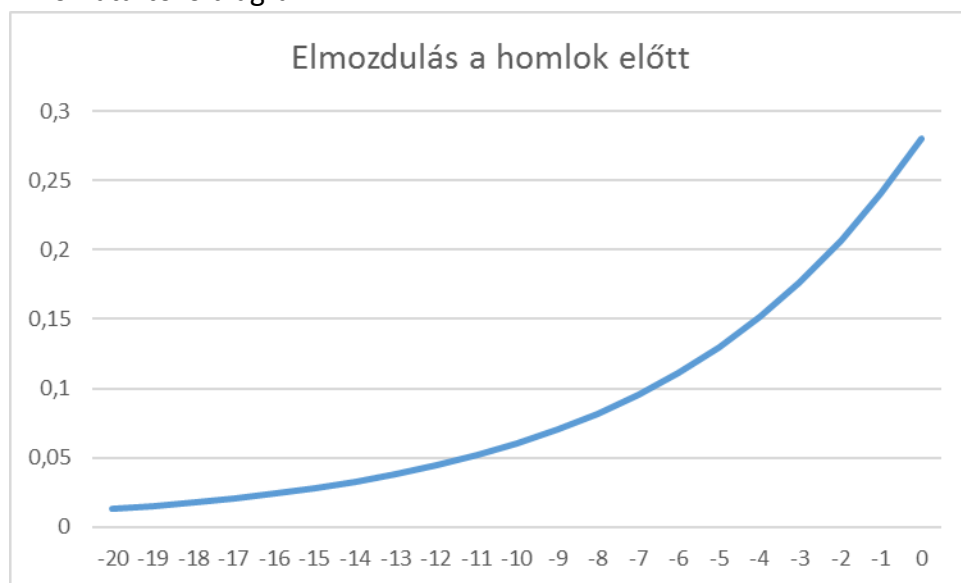
Képletből a számítás, Excelben:

A feszültség csökkenése/mozgása a homlokfal előtt ($X < 0$).

Méter a fal előtt:	Feszültség csökk. mértéke
-20	0,012925842

-19	0,015075558
-18	0,017582795
-17	0,020507015
-16	0,023917567
-15	0,027895332
-14	0,032534644
-13	0,037945528
-12	0,044256303
-11	0,051616633
-10	0,060201069
-9	0,070213196
-8	0,081890454
-7	0,095509773
-6	0,111394141
-5	0,129920261
-4	0,151527487
-3	0,176728241
-2	0,206120169
-1	0,240400312
0	0,280381634

A hozzátartozó diagram:

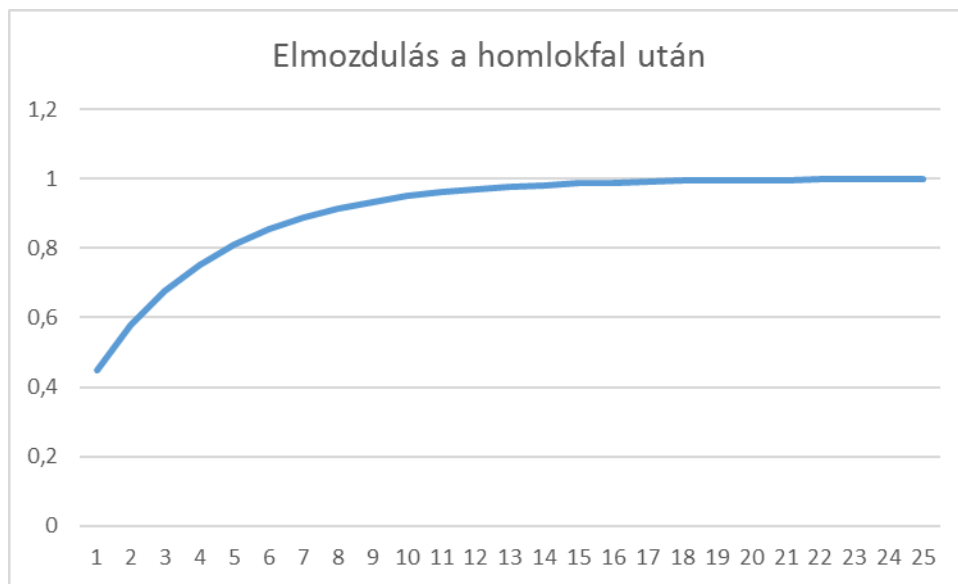




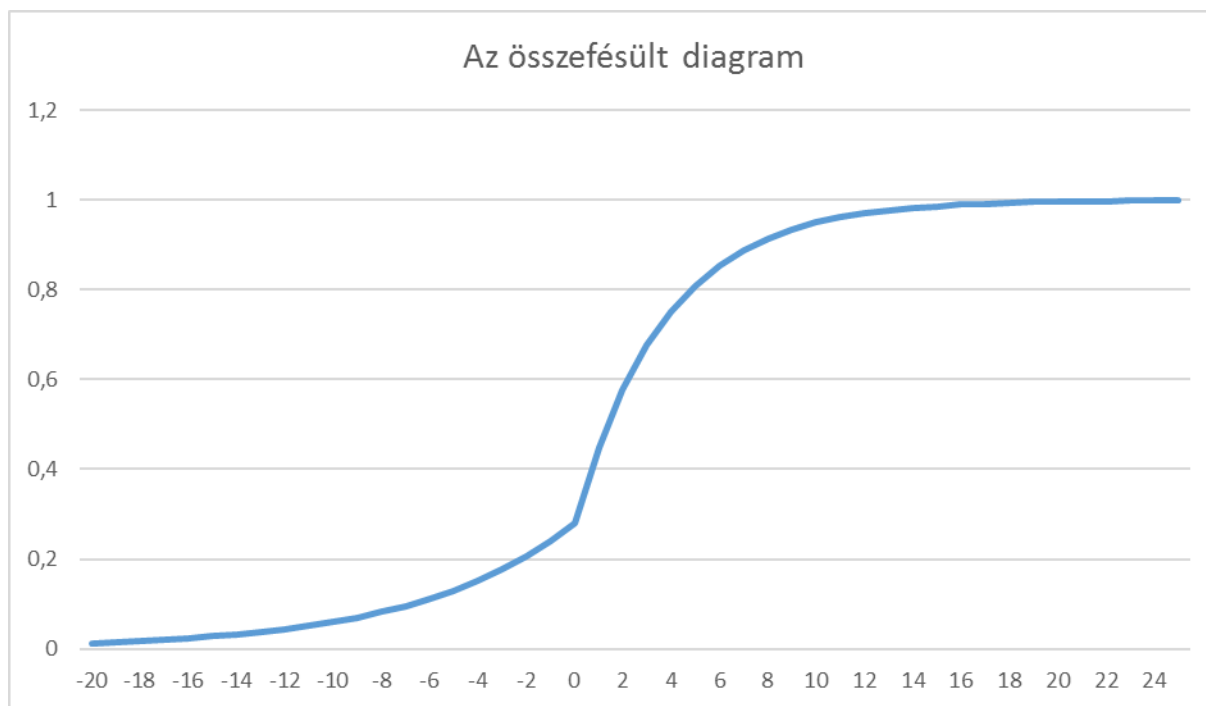
A feszültség csökkenése/mozgása a homlokfal mögött ($X > 0$).

Méter a fal előtt:	Feszültség csökk. mértéke
1	0,448356192
2	0,577121839
3	0,675830788
4	0,751498923
5	0,809504472
6	0,853970266
7	0,888056778
8	0,914186758
9	0,934217433
10	0,949572513
11	0,961343384
12	0,970366678
13	0,977283739
14	0,982586208
15	0,986650965
16	0,98976692
17	0,992155543
18	0,99398661
19	0,995390266
20	0,996466278
21	0,997291125
22	0,997923435
23	0,998408151
24	0,998779723
25	0,999064562

A hozzátartozó diagram:



Összefésülve:



A megtámasztás maximum teherbírása:

$$p_{smax} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(r_0 - t_c)^2}{r_0^2} \right] =$$

$$\frac{25000}{2} \left[1 - \frac{(6,5 - 0,2)^2}{6,5^2} \right] = 757,396 \text{ Kn/m}^2$$

A lőttbeton merevsége:

$$K_{sc} = \frac{E_c(r_0^2 - (r_0 - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2)(r_0 - t_c)r_0^2} =$$

$$\frac{31000000(6,5^2 - (6,5 - 0,2)^2)}{2(1 - 0,2^2)(6,5 - 0,2)6,5^2} = 155286,309$$

A megtámasztás mozgásának képlete, ahol az u_{io} értéke az elkészített alagútmozgásokat mutató grafikonról történik. Leolvasásának folyamata: Megkeressük a homlokfal távolságát jelző skálán a tízes értéket, majd az ebből vetített egyenest a görbe találkozási pontjánál levetítjük, az így kapott értéket. Tehát a behelyettesítés a következő:

$$u_{iy} = u_{io} + \frac{p_{smax}}{K_s} =$$

$$0,0132 + \frac{570,26}{115999,04} = 0,018077 \text{ m}$$

Repedéstágasság számítás:

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$A_{s1} = 1131 \text{ mm} \rightarrow 9\Phi 12$$

$$A_{s2} = 1131 \text{ mm} \rightarrow 9\Phi 12$$

$$d_1 = 334 \text{ mm}$$

$$d_2 = 66 \text{ mm}$$

$$E_s = 200000$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{9,3} = 21,50$$

$$x = \frac{1}{2} \times x_{II}^2 \times b + \alpha_e(x_{II} - d_2) \times A_{s2} + \alpha_e(x_{II} - d_1) \times A_{s1} = 0$$

$$x = \frac{1}{2} \times x_{II}^2 \times 1000 + 21,50(x_{II} - 66) \times 1131 + 21,50(x_{II} - 334) \times 1131$$

$$= 0$$

$$\frac{1}{2}x_{II}^2 + 48,64x_{II} - 9728,39 = 0$$

$$x = 99,088 \text{ mm}$$

$$|2,5 \times (h - d) = 2,5 \times (400 - 334) = 165 \text{ mm}$$

$$h_{c,eff} = \min \left| \frac{(h - x)}{3} = \frac{(400 - 99,088)}{3} = \mathbf{100,304 \text{ mm}} \right.$$

$$\left| \frac{h}{2} = \frac{400}{2} = 200 \text{ mm} \right.$$

$$A_{c,eff} = h_{c,eff} \times b = 100,304 \times 1000 = 100304 \text{ mm}^2$$

$$S_{r,max} = 3,4 \times c + 0,425 \times k_1 \times k_2 \times \Phi \times \frac{A_{c,eff}}{A_s}$$

$$S_{r,max} = 3,4 \times 66 + 0,425 \times 0,8 \times 0,5 \times 12 \times \frac{100304}{1131} = 405,139 \text{ mm}$$

$$M_{Ed} = 70 \text{ kNm} \rightarrow \text{Plaxisból kapott érték}$$

$$M_{Rd} = 350 \text{ kNm} \rightarrow \text{Axisből kapott érték}$$

$$\sigma_s = f_{yd} \times \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = 435 \times \frac{70}{350} = 87 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - 0,4 \times f_{ctd} \times \frac{A_{c,eff}}{A_s}}{E_s} = \frac{87 - 0,4 \times 1,2 \times \frac{100304}{1131}}{200000} = 0,00022215$$

$$\varepsilon_{cm} = \frac{0,4 \times f_{ctd}}{E_c} = \frac{0,4 \times 1,2}{9300} = 0,0000516129$$

$$|S_{r,max} \times (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0,06 \text{ mm}$$

$$W_{k,max} = \max$$

$$|0,6 \times S_{r,max} \frac{\sigma_s}{E_s} = 0,1057 \text{ mm}$$

$$W_{k,max} = 0,1057 \text{ mm} < W_{k,eng} = 0,2 \text{ mm}$$

Szerkesztési szabályok:

Legkisebb oldalméret: $\rightarrow$ fekvő oszlop: $b_{min} \geq 120 \text{ mm}$,

$$b = 400 \text{ mm} > b_{min} = 120 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!}$$

Legkisebb hosszvas átmérő: $\rightarrow \Phi 12 > \Phi 8 \rightarrow \text{OK!}$

Kengyel átmérő: $\rightarrow$ **minimum, $\Phi 6$**

Kengyel távolság: $15 \times \Phi \rightarrow 15 \times 12 = 180 \text{ mm}$
 $h_{min} = 400 \text{ mm}$
 400 mm

Idő és Költségek becslés

A projekt időbeli becslése, szakaszonként, és összesen:

Fejtés:

Átlagos haladás naponta (m/nap), (három fogás naponta, 1,5 méteres fogásokkal): 4,5 m

Támadási oldalak száma: 6

A hosszabb alagút támadási oldalainak száma: 4

A rövidebb alagút támadási oldalainak száma: 2

$$(H)osszabb: \frac{L-alagút\ hosszúság}{fejtési\ hossz/nap} = \frac{1600}{4,5} = 355\ nap = 11,8\ hónap$$

$$(R)övidebb: \frac{L-alagút\ hosszúság}{fejtési\ hossz/nap} = \frac{2000}{4,5} = 445\ nap = 14,8\ hónap$$

A 2-3 hónapos előkészítési munkákat is beleszámolva:

$$\sum Fejtés^H = 14\ hónap$$

$$\sum Fejtés^R = 17\ hónap$$

Végleges szerkezet:

Beépítésének haladása naponta (m/nap) (egy fogás naponta, 10,0 méteres fogással): 10,0 m

A 3,2 km-es alagútban 2 zsaluzó kocsi

A 2,0 km-es, rövidebb alagútban szintén 2 zsaluzó kocsi

$$Hosszabb: \frac{L-alagút\ hosszúság}{fejtési\ hossz/nap} = \frac{3200}{10} = 320\ nap = 10,6\ hónap$$



$$\text{Rövidebb: } \frac{L - \text{alagút hosszúság}}{\text{fejtési hossz/nap}} = \frac{2000}{10} = 200 \text{ nap} = 6,6 \text{ hónap}$$

A fejtés után a végleges szerkezet beépítésének azonnali megkezdése.

$$\sum Zsaluzás^H = 11 \text{ hónap}$$

$$\sum Zsaluzás^R = 7 \text{ hónap}$$

A két munkafolyamat időigénye összesen:

$$\sum Idő^H = 25 \text{ hónap}$$

$$\sum Idő^R = 24 \text{ hónap}$$

A projekt költségbeli becslése, teljes projektre nézve:

Fejtés tekintetében a produktív személyzet és produktív gép(ek):

$$200\,000 \text{ €/hó} \times 12 \times 4 = 9\,600\,000 \text{ €}$$

$$200\,000 \text{ €/hó} \times 15 \times 2 = 6\,000\,000 \text{ €}$$

A folyamathoz szükséges kiszolgáló egységek és személyzet:

$$250\,000 \text{ €/hó} \times 15 = 3\,750\,000 \text{ €}$$

A végleges szerkezet kialakításához szükséges produktív gép(ek) és produktív személyzet:

Meg kell vásárolni:



- 4 darab zsaluzó kocsi
- 4 darab vasszerelő kocsi
- 4 szigetelő kocsi

Megvásárlás szettekben lehetséges, mivel a zsaluzó kocsit egyedileg a szelvényhez készítik (ár/szett): 500 000€/szett

$$4 \times 1 \text{ szett} = 4 \times 500\,000\text{€} = 2\,000\,000\text{€}$$

A személyzet és a gép(ek):

$$100\,000\text{ €/hó} \times 11 \times 2 = 2\,200\,000\text{€}$$

$$100\,000\text{ €/hó} \times 7 \times 2 = 1\,400\,000\text{€}$$

A végleges szerkezet megépítéséhez szükséges kiszolgáló egységek és személyzet:

$$250\,000\text{ €/hó} \times 11 = 2\,750\,000\text{€}$$

Anyag szükségletek:

A lőttbeton felhordásához:

- Lőttbeton
- Acél háló és támívek

$$1\,500\text{€/méter} \times 10\,400\text{ méter} = 15\,600\,000\text{€}$$

Belső héj:

- Beton
- Betonacél
- Szigetelés



$$1\,200\text{€}/\text{méter} \times 10\,400\text{ méter} = 12\,480\,000\text{€}$$

Unproduktív személyzet:

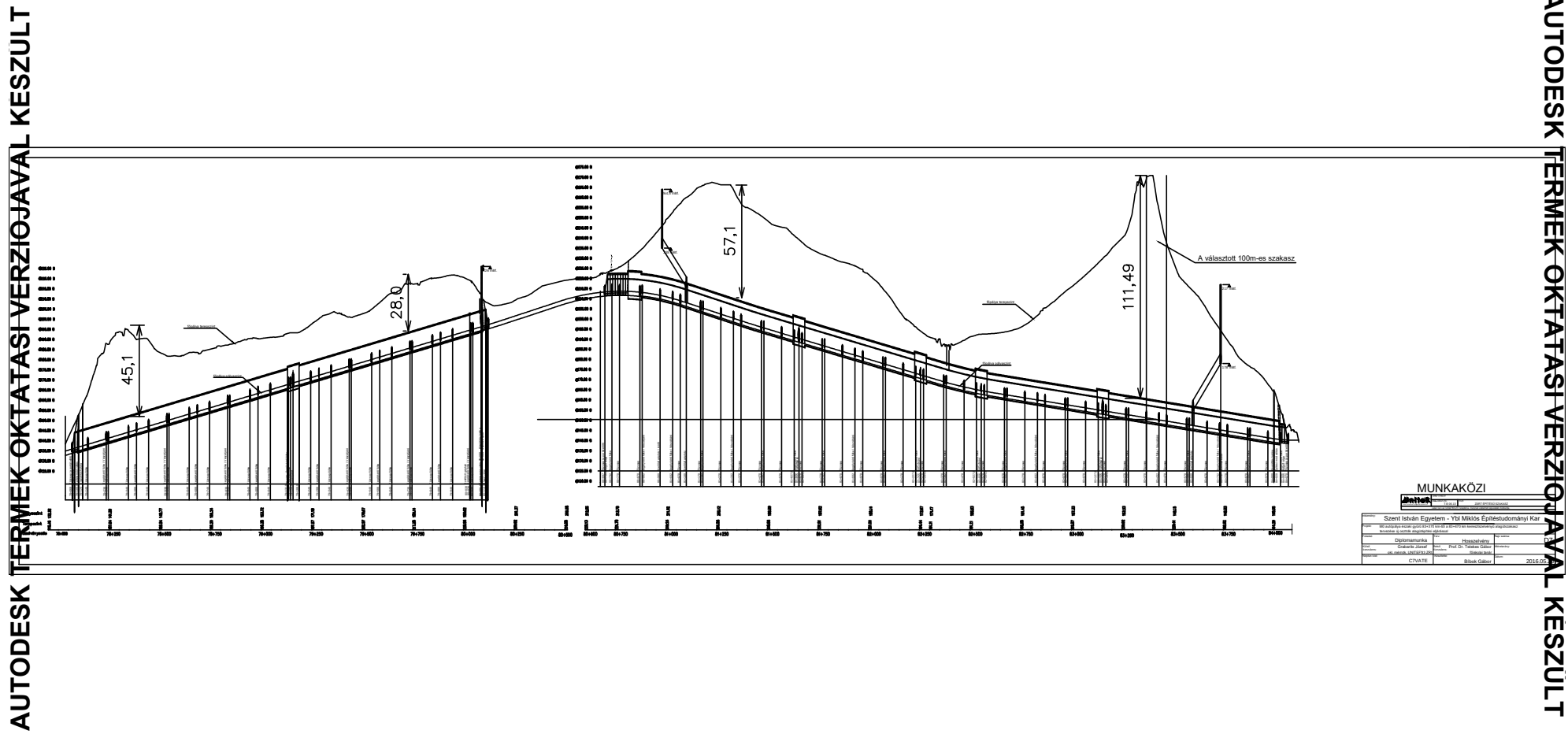
$$7\,000\text{€}/\text{hó} \times 20\text{ fő} \times 25\text{ hó} = 3\,500\,000\text{€}$$

Közvetlen költségek:

$$\sum \text{Költség}^{\text{közvetlen}} = 60\,000\,000\text{€}$$

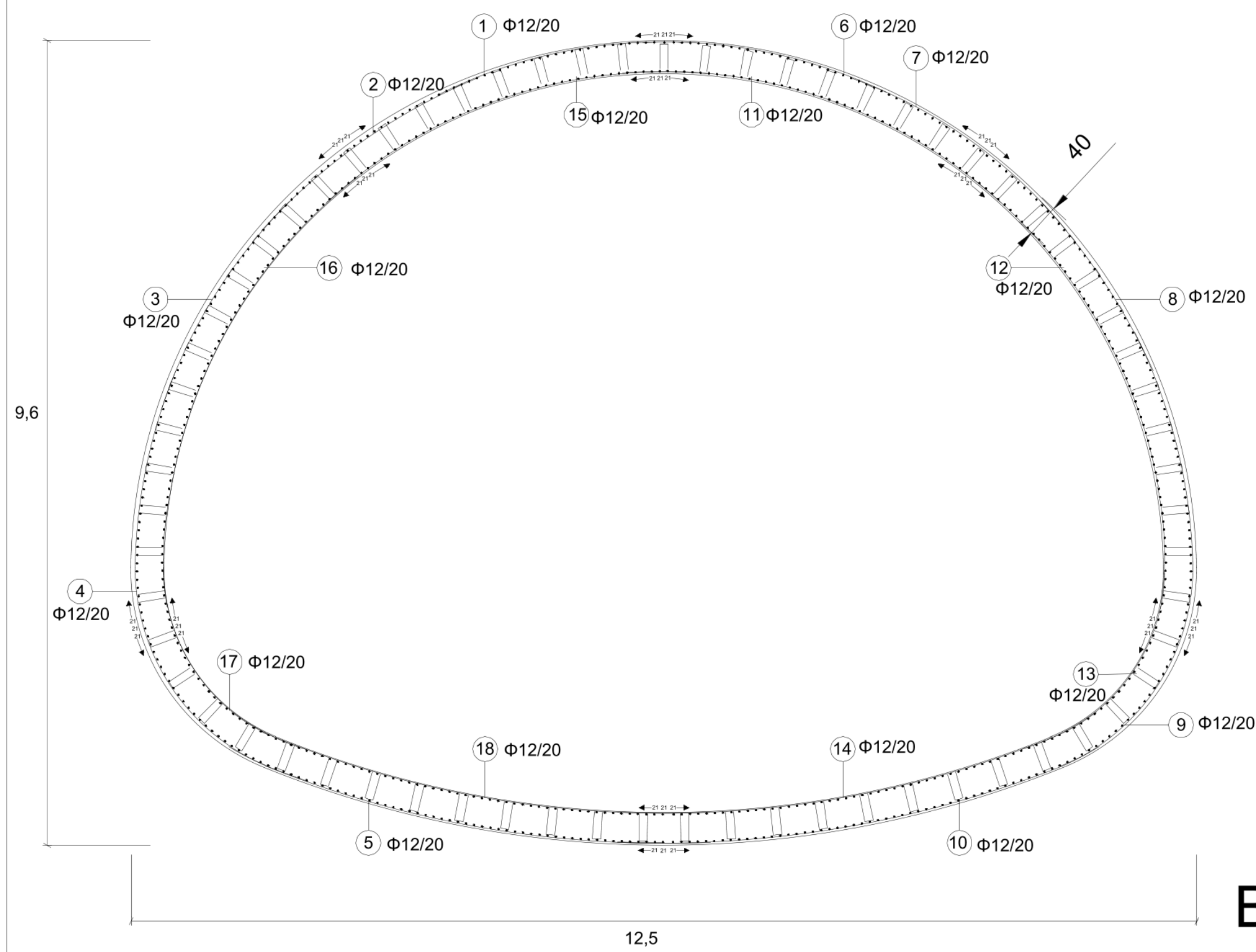
Teljes költség, amely tartalmazza az egyéb költségeket is:

$$\sum \text{Költség}^{\text{összesen}} = 60\,000\,000 \times 1,25 \times 1,05 = 78\,000\,000\text{€} = 23\,400\,000\,000\text{ Ft}$$



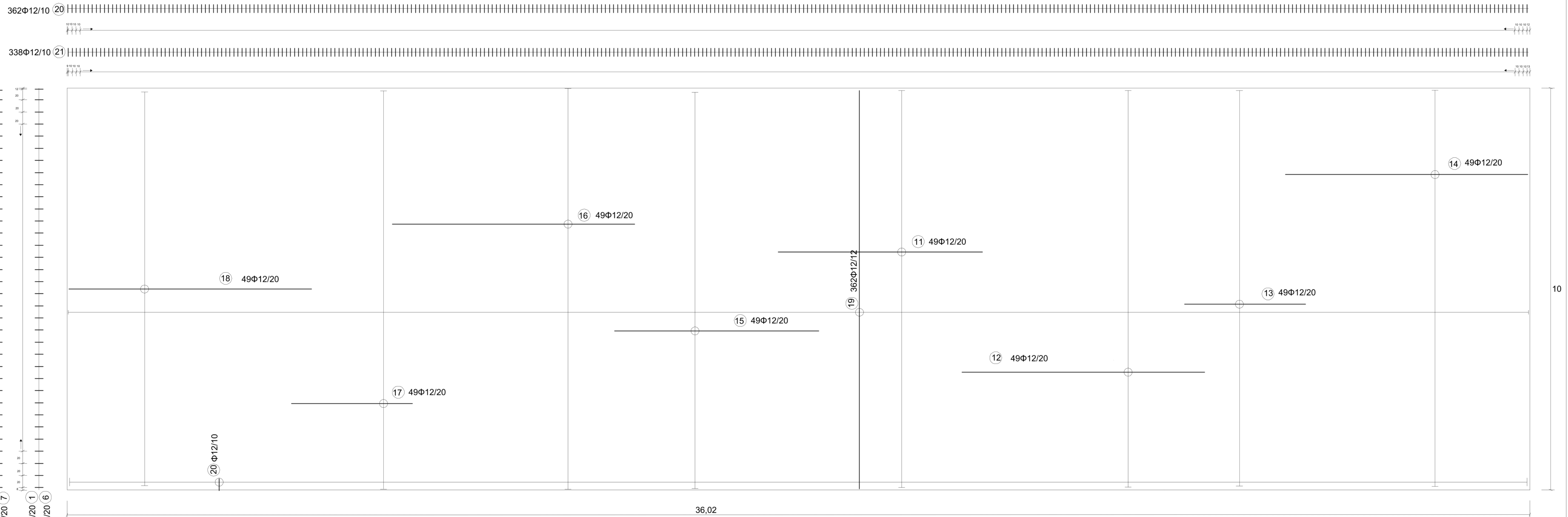
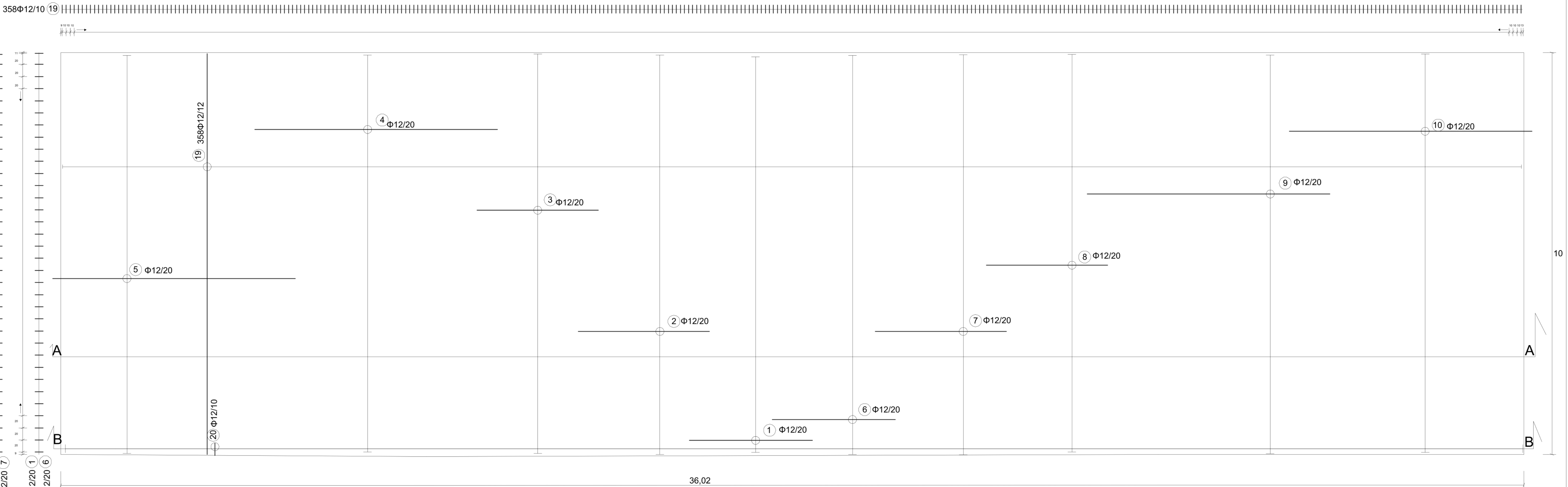
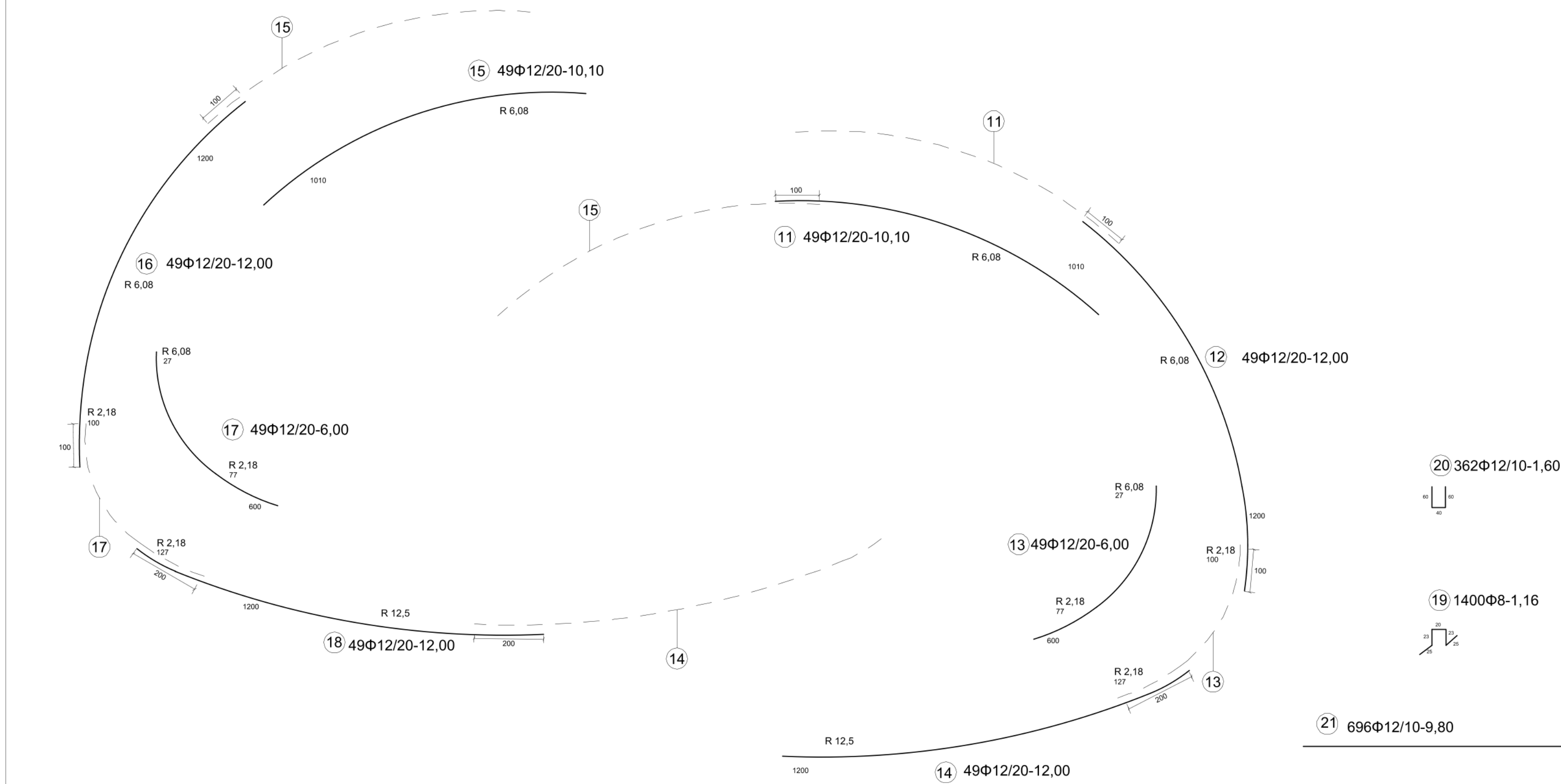
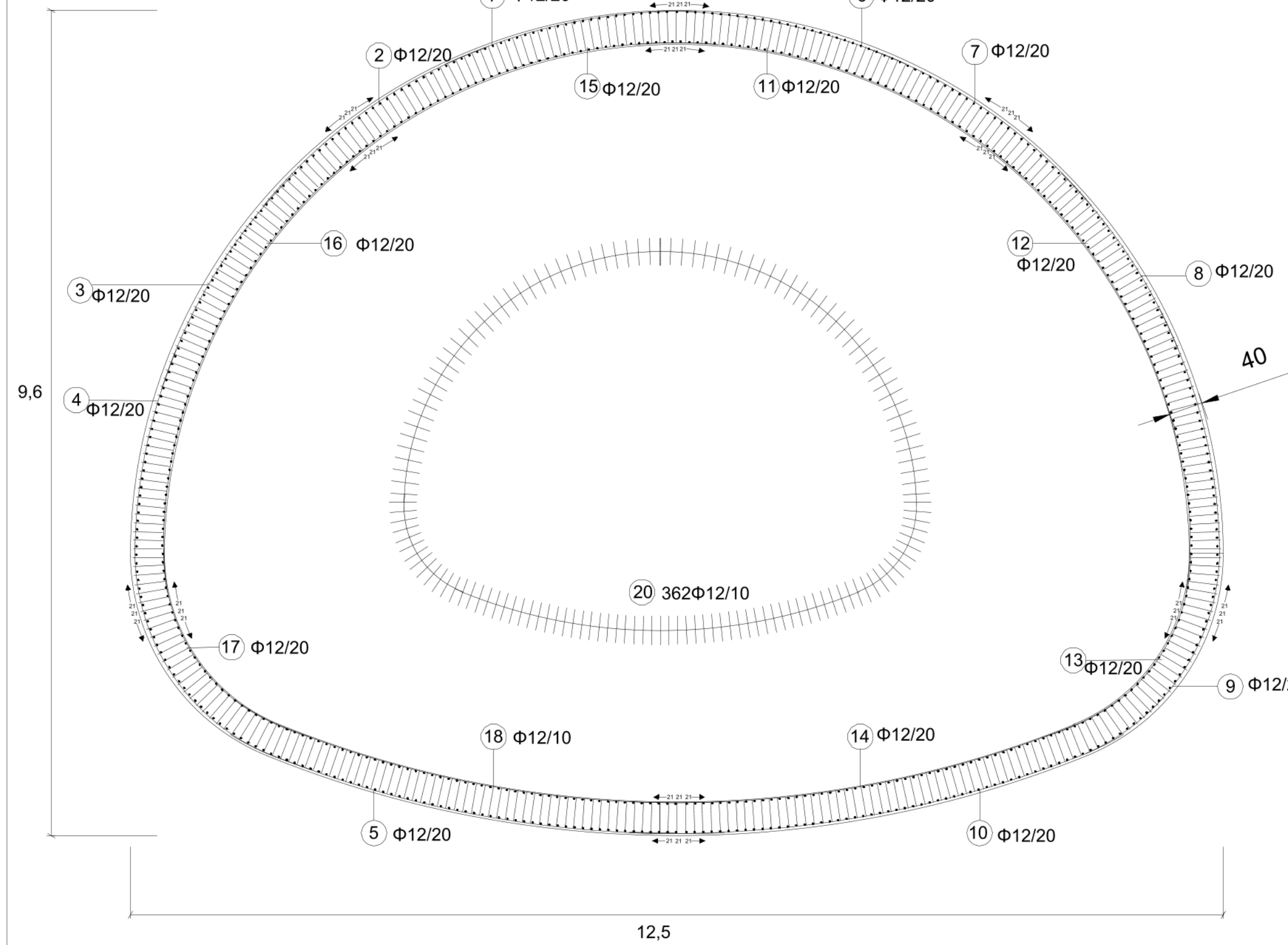
Külső vasalás:

A-A metszet



Belső vasalás:

B-B metszet



BETONACÉL KIMUTATÁS						
Elem megnevezése	Acél jele	Méret	Összesen	Hossza	B500	
		mm			Φ8	Φ12
Alagút	1	12	49	6,1		298,9
	2	12	49	6,5		318,5
	3	12	49	6		294
	4	12	49	12		588
Szelvény	5	12	49	12		588
	6	12	49	6,1		298,9
	7	12	49	6,5		318,5
	8	12	49	6		294
	9	12	49	12		588
	10	12	49	12		588
	11	12	49	10,1		494,9
	12	12	49	12		588
	13	12	49	6		294
	14	12	49	12		588
	15	12	49	10,1		494,9
	16	12	49	12		588
Vas kimutatás	17	12	49	6		294
	18	12	49	12		588
	19	8	1400	1,15	1596	
	20	12	362	1,6		597,2
	21	12	696	9,8		6820
	Összes hossz (m):				1596	9136,6
	Tömeg (kg/m):				0,394	0,887
Tömeg átmérőnként				628,8	14153	
Összes betonacél szükséglet (kg)						14780

Megjegyzések:

Végleges Monolit Vasbeton szerkezet
Szerkezet vastagság: 40 centiméter

Anyagminőségek: Beton: C25/30
Betonacél: B500

Betontakarás: 60 mm

Felhasznált betonacél átmérők: Φ8,Φ12

Egyéb:

A 19-es jelű távtartó vasak a 21-es jelű vasakhoz kerüljenek felszerelésre. Négyzetméterenként 4 db

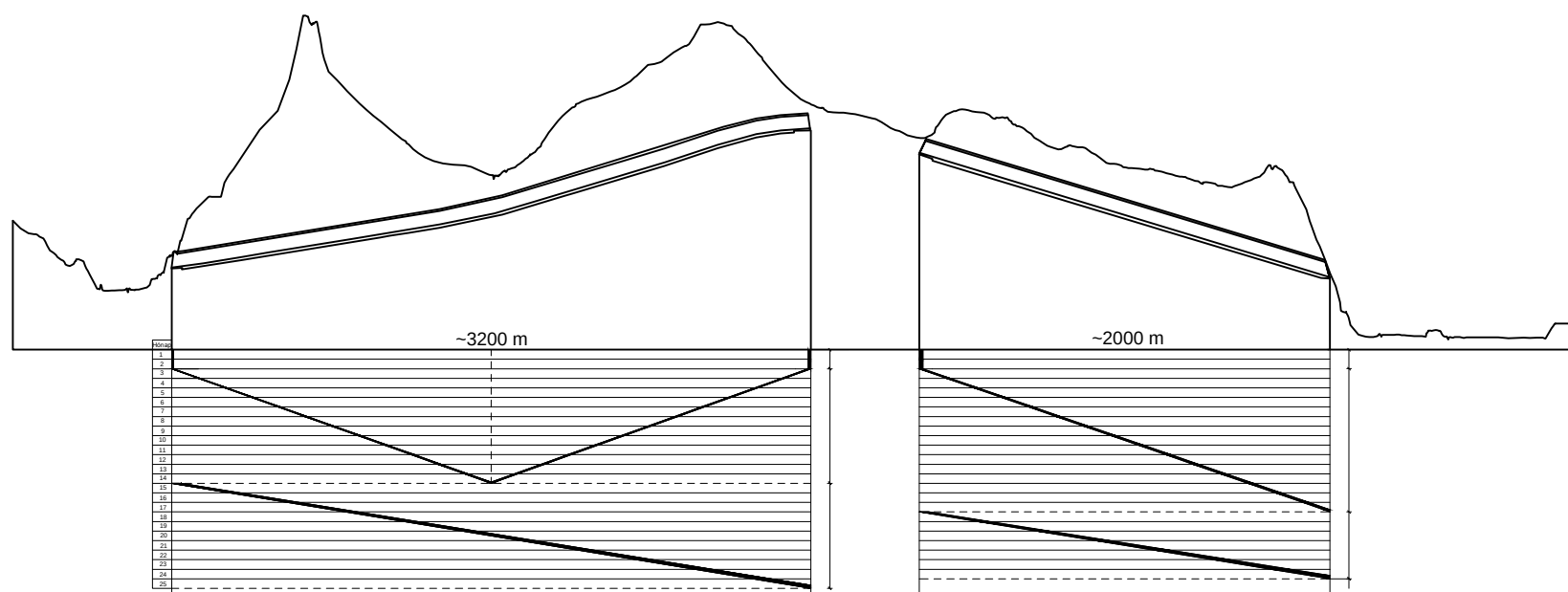
Az olyan betonacéloknál, ahol többszöri hajlítás szükséges a megadott hosszt az R - sugár alatt adtam meg.

Például: Alkalmazandó sugár: R 2,25 ~ 2,25 méteres sugár
Hossza: 100 ~ 100 centiméteres hossz

A hajlításhoz megadott hosszak a betonacélok végétől számolandóak! Ahol nem került megadásra több R - sugár ott az az egy érvényes!

Intézmény:	Szent István Egyetem - Ybl Miklós Építéstudományi Kar		
Projekt:	M0 autópálya északi gyűrtől B3+370 km-ől a B3+470 km keresztiszelvényű alagútszakasz tervezése új osztrák alagútépítési eljárással		
Feladat:	Diplomamunka	Terv:	Vasalási terv
Küldő konzultans:	Grabarits József	Beszó konzultans:	Prof. Dr. Telekes Gábor
Neptun kód:	okl. mérnök - INITEPBA 720	Készítette:	Bibok Gábor
		Méretarány:	D6
		Dátum:	2016.05.26

A alagút készítésének egyszerűsített ciklogramja



Mozgások 0,2 m vastag lőttbetonnál

