

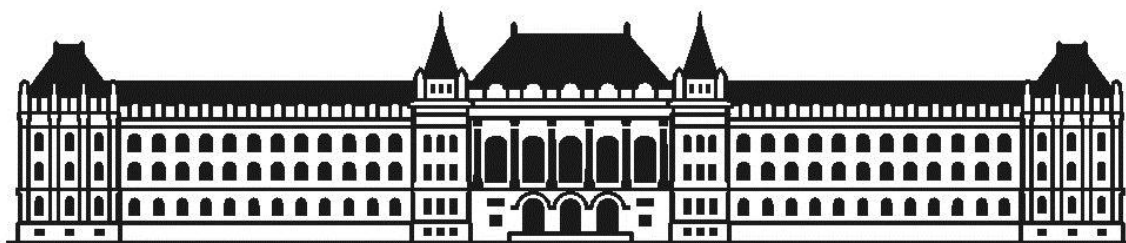
Kiss Gergő, Czinder Balázs

Konzulens: Czap Zoltán mestertanár

Tenger alatti alagutak

Tudományos Diákkonferencia, 2012

Geotechnika szekció



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Alagútépítési technológiák.....	4
2.1. Fúrt alagutak.....	4
2.1.1. A Csatorna-alagút	4
2.1.2. A Szeikan-alagút	6
2.1.3. A Gibraltár-alagút	8
2.2. Süllyesztett alagutak	9
2.2.1. A Marmaray alagút.....	9
2.2.2. A Busan-Geoje alagút	12
2.3. Elmerített úszó alagutak.....	13
2.3.1. A technológia jellemzése.....	13
2.3.2. A Transzatlanti alagút.....	15
3. Tervezés és építés közben felmerülő nehézségek	18
3.1. Tűzvédelmi megoldások, szellőzés	18
3.2. Földrengésteher	21
3.3. Egyéb nehézségek	22
3.3.1. Előregyártott elemek gyártása, szállítása.....	22
3.3.2. Vízhatalanság, vízelvezetés	23
3.3.3. A környezetvédelem.....	24
3.3.4. Régészeti leletek feltárása.....	25
4. A Bering-szoroson való átkelés lehetőségei	26
4.1. Gazdasági háttér	26
4.2. A terv történelmi áttekintése	27
4.3. Az összekötés lehetőségei	29
4.3.1. Híd a szoros felett.....	29
4.3.2. Süllyesztett vagy elmerített úszó alagút a szoros alatt	31
4.3.3. Fúrt alagút a szoros alatt	33
5. Összefoglalás.....	37
6. Források.....	38

Ábrajegyzék:

1. ábra: A Csalagút keresztmetszete ^[35]
2. ábra: A La Manche csatorna alatti talajviszonyok ^[35]
3. ábra: Az első alagútáttörés 1990. december 1-én ^[28]
4. ábra: A Szeikan-alagút vonalvezetése ^[34]
5. ábra: A Szeikan-alagút vonalai ^[34]
6. ábra: Az alagút vonalvezetése a vízmélységi viszonyokat is feltüntetve ^[18]
7. ábra: A Gibraltár-alagút tervezett keresztmetszete ^[18]
8. ábra: A Boszporusz alatti talajviszonyok ^[39]
9. ábra: Árokmélyítés kanalas markolóval ^[39]
10. ábra: Fúrt és süllyesztett szakasz kapcsolata ^[39]
11. ábra: A Marmaray alagút keresztmetszete ^[39]
12. ábra: Az alagút keresztmetszete ^[2]
13. ábra: SFT rögzítési módjai ^[4]
14. ábra: A Transzatlanti alagút iránya ^[14]
15. ábra: Egy lehetséges keresztmetszet kialakítása ^[31]
16. ábra: Tűzvédelmi tervezés folyamatábrája (Beard és Carvel alapján) ^[11]
17. ábra: Tűznek kitett vasbetonszerkezetek elméleti tönkremeneteli módjainak sematikus ábrája (Blennemann és Girnaui alapján) ^[11]
18. ábra: Tűznek kitett vasbetonszerkezetek elméleti tönkremeneteli módjainak sematikus ábrája (Blennemann és Girnaui alapján) ^[11]
19. ábra: Áruforgalom világszerte ^[17]
20. ábra: Tervezett útvonal ^[17]
21. ábra: Egy elképzelt keresztmetszet ^[14]
22. ábra: A híd lehetséges keresztmetszete
23. ábra: A tűzgyűrű ^[38]
24. ábra: A süllyesztett alagút lehetséges keresztmetszete
25. ábra: SFT lehetséges keresztmetszete
26. ábra: Bering szoros hossz-szelvénye ^[17]
27. ábra: Tervezett fúrt alagút nézete ^[35]
28. ábra: A vasúti alagút keresztmetszete
29. ábra: A fő járatok és a szervizalagút egymáshoz viszonyított helyzete

1. Bevezetés

Mára az egész Földet behálózó, összefüggő közlekedési hálózat épült ki a közúti, a vasúti, a vízi és a légi forgalom összehangolásával. A zavartalan utazást, áruszállítást csupán az ezek közti váltások akadályozzák. A váltások számának csökkentésére nyújthatnak megoldást a tenger alatti alagutak, melyek révén szárazföldi közlekedéssel eljuthatunk egy tenger egyik partjáról a másikra. Ezen létesítmények egy része csupán helyi érdekeket elégít ki, amikor egy város vagy térség fejlődését segíti elő, azonban épültek és fognak még épülni olyan alagutak is, melyek a nemzetek közti kapcsolatokat biztosítják.

Dolgozatunk első részében a tenger alatti alagutak esetében alkalmazható építési technológiákat mutatjuk be. Ezek a fúrásos, a süllyesztéses technológiák, illetve a máig még nem kipróbált elmerített úszó alagutakat megalkotó technológia. Ezeket az építési módszereket megépült alagutakon keresztül ismertetjük: fúrással készült a Csatorna-alagút és a Szeikan-alagút, süllyesztéssel a Marmaray és a Busan-Geoje alagutak. Szót ejtünk azokról az esetleges alagutakról, amiket a jövőben tervezik megépíteni, ezek a fúrt Gibraltar-alagút és az elmerített lebegő Transzatlanti alagút.

Az alagutak építése során minden részletre aprólékosan ügyelni kell, nagyon gondos tervezésnek kell megelőznie a kivitelezést, hiszen kiemelt fontosságú létesítményekről van szó. Sorba kell venni az esetlegesen felmerülő nehézségeket. Ezeket az akadályokat ismertetjük a következő fejezetben. Egy-egy ilyen probléma megoldásáról külön tanulmányokat lehetne írni, dolgozatunkban csak ezek bemutatására törekszünk. A tűzzel és a földrengéssel, mint potenciális veszélyforrásokkal azonban részletesebben foglalkozunk.

Az ezután következő részben egy, a jövőben nagy valószínűséggel megépülő kapcsolatot vizsgálunk meg közelebbről. Ez Oroszország és az Egyesült Államok kapcsolata a Bering-szoroson keresztül. Bemutatjuk az eddigi törekvéseket, döntéseket, amik az összeköttetés megvalósulásának irányába történtek, illetve a gazdasági oldaláról is megvizsgáljuk azt. Itt az összes szóba jövő lehetőséget megnézzük. A legkorábbi ötlet szerint híd építése lenne az ideális. Újabban alagút építésén is elkezdtek gondolkodni. Mind a három tenger alatt lehetséges alagútépítési módszert megnézzük, előnyeiket összevetjük hátrányaikkal és az egyéb hátráltató tényezőkkel.

A tenger alatti alagutak nagyszabású beruházások. A tengerek áthidalása alagúttal viszonylag új technológia, a 20. század második felében kezdték alkalmazni. Építésük azonban a jövőbe mutat, általuk építhető ki az egész Földet beszövő, összefüggő közlekedési hálózat.

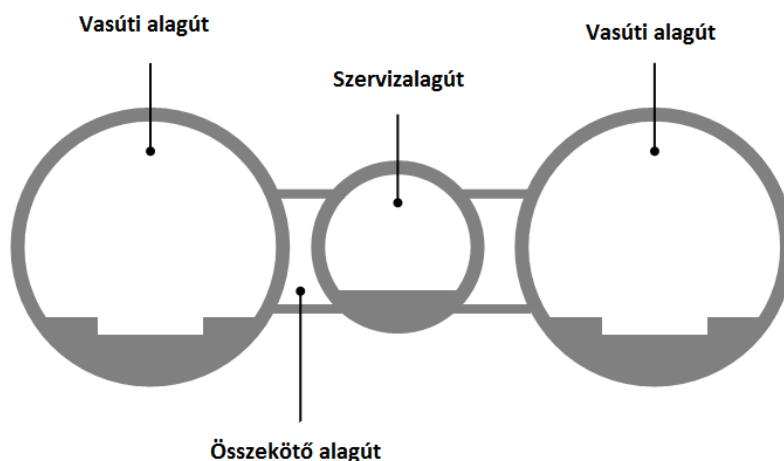
2. Alagútépítési technológiák

2.1. Fúrt alagutak

Tenger alatti alagutak készülhetnek hagyományos, fúrásos technológiával. Erre akkor van lehetőség, ha az vízmélység nem túl nagy, a tengerfenék alatti talaj, kőzet fúrható, és így ez a megvalósítási mód a leggazdaságosabb. Fúrt tenger alatti alagútra a legjobb példa a leghíresebb tengeralatti alagút, a Nagy-Britanniát Franciaországgal összekötő Csatorna-alagút, a Csalagút.

2.1.1. A Csatorna-alagút ^{[5] [20] [23] [28] [35] [36]}

A Csatorna-alagút a világ talán leghíresebb alagútja. Franciaország és Anglia összekötése nem új törekvés, már a római korban is, de 1802-ben, a napóleoni háborúk során a franciák is gondoltak rá. A történelem során többször nekifogtak az alagútépítésnek, azonban ezek politikai és gazdasági okok miatt nem fejeződhetek be. Végül a két ország közt 1986-ban jött létre a szerződés, melynek értelmében az építést a következő évben megkezdheték. Az 50,5 km hosszú Csalagutat 1994. május 6-án adták át a forgalomnak.

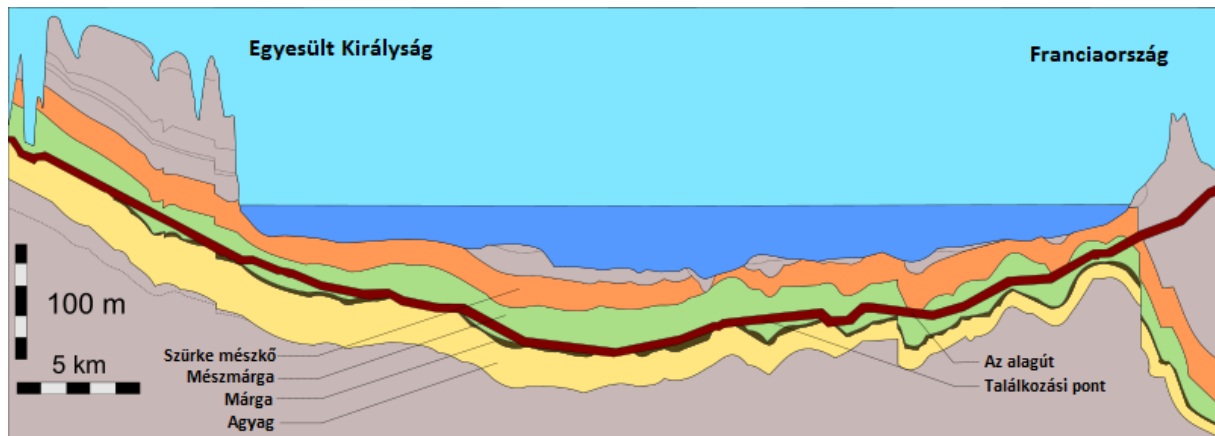


1. ábra: A Csalagút keresztmetszete

A Csatorna-alagút három összefüggő alagútból áll, ebből kettő biztosítja a kétirányú vasúti forgalmat, átmérőjük 7,6 méter (1. ábra). Közöttük helyezkedik el a 4,8 méter átmérőjű szervizalagút. A vasúti szerelvények okozta légnyomástöbblet, a huzat megszüntetésére 250 méterenként a fő járatokat a szervizjáratokkal 2 méter átmérőjű és 21 méter hosszú szellőzőalagutakkal kötötték össze. Ezeken kívül mindkét irányban 130 menekülőalagút vezet a középső járatba. Két keresztező műtárgyat is tartalmaz a rendszer, ezek az átterelhetőséget biztosítják.

Az alagutakat (a tenger alatt) fúrásos, illetve hagyományos bányászati módszerrel építették. Ez az angol oldalon egy gyakorlatilag vízáró mészmárga kőzetben történt, amely a fúrásra teljesen alkalmas volt, ezt a réteget követték az alagút vonalvezetésével (2. ábra). A réteget több vetőzóna keresztezi, és végül a francia part közelében alábukik. Az alagút itt egy ugyan erősebb, de töredezett,

mállott mészkő rétegben halad. A geológiai környezet különbözősége miatt más fúrési technológiát alkalmaztak a két oldalon.



2. ábra: A La Manche csatorna alatti talajviszonyok

A fúrást egyszerre kezdték Franciaország és Nagy-Britannia felől, egymástól 38 km távolságra, az alagutak a csatorna alatt találkoztak. A francia oldalon öt darab fúrópajzsot, TBM-et (Tunnel Boring Machine) használtak, kettőt a szárazföld alatt, három pajzsot, úgynevezett aktív földmegtámasztásos pajzsokat (EPB pajzs) a csatorna alatt. Ezeknél kétféle üzemmód létezik: egy nyitott, mellyel gyorsabban fúrhatnak száraz közegben, és egy zárt a nedves környezetben való előrehaladáshoz. Itt a homlok megtámasztása a kitermelt anyag és víz keverékével történik, ehhez kondicionáló anyagot (bentonit, habképző anyag) is adhatnak szükség esetén. Ezzel az építési móddal biztonságosan lehet haladni, azonban jóval lassabb építést tesz lehetővé. A hirtelen geológiai, hidrogeológiai változásokhoz való alkalmazkodás miatt a nyomáskiegyenlítés időt vesz igénybe. A Csalagút építésénél a törmeléket vonattal szállították a partra. Másik lehetőség, hogy a kitermelt anyagot vízzel keverik és zagyvezetékeken juttatják a felszínre.

Az angol oldalon a kedvezőbb geológiai viszonyok miatt egy jóval gyorsabb technológiát tudtak alkalmazni: nyitott, teleszkópos kettős pajzsot használtak. Ennek a lényege, hogy az első pajzs egy vágófejjel fejt ki a kőzetet, miközben a hátsó pajzs az előre elkészített falelemeket helyezi el. A pajzs mozgatása hidraulikus sajtókkal történik, melyek a már megépült szakaszhoz támaszkodva tolják előre a TBM-et. Itt hat pajzsral építkeztek: három a csatorna alatt, három a viszonylag hosszabb szárazföldi szakaszon dolgozott.

A falazat előregyártott elemekből készült, de kialakításuk a talajviszonyoktól függ, így itt is meg kell különböztetni az angol és a francia oldalon alkalmazott technológiákat. Mivel az angol oldalon a mészmárgának jó vízzáró tulajdonsága van, itt elegendő volt szigeteletlen, csavarkapcsolat nélküli, befeszített elemeket elhelyezni. A körgyűrű nyolc elemből és egy záró elemből áll, a szegmensek mögötti rést végül kiinjektálták. A francia oldalon a víznyomás néhol elérte a 100 bar értéket. Csavarozott elemeket építettek, a vízhatlanságot gumiprofil szigetelésekkel oldották meg.

A fúrás során végig valós idejű monitoring rendszerrel ellenőrizték az építést. Mérték a víznyomást, a földnyomást, a pajzs sebességét, a hidraulikus sajtók által kifejtett erőt, a motorok teljesítményét. A mérési eredmények azonnal hozzáférhetőek voltak, de későbbi felhasználásra is lehetőség volt.

A fúrópajzsok indításukkor 38 km-re voltak egymástól. Ennek a távolságnak a megtétele során mindössze 150 mm volt a megengedett pontatlanság: 40 mm a topográfiai pontatlanságokból, 55 mm a TBM-ek irányításából, 25 mm a szegmensek legyártásából és összeszereléséből, végül 30 mm a szomszédos elemek közti illeszkedés pontatlanságaiból eredhetett. A gépeket lézeres technológia segítségével irányították, így az építés során a pajzsok 25 mm-nél jobban sosem tértek el a kijelölt irányuktól. A szervizjárat áttörésére 1990. december 1-én került sor (3. ábra), az utoljára elkészült alagút áttörésére 1991. június 28-án, két nappal az 1985-ben kiírt dátum előtt.

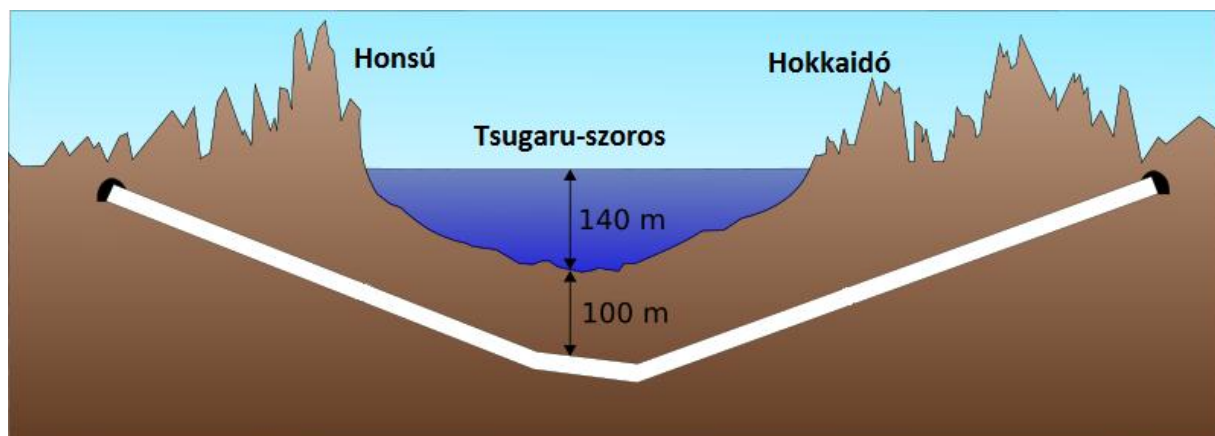


3. ábra: Az első alagútáttörés 1990. december 1-jén

A Csalagút biztosítja a szárazföldi összeköttetést az európai kontinens és a brit szigetek közt; ma már 3 óra alatt eljuthatunk vonattal Párizsból Londonba. Vasútvonalai mind áru-, mind személyszállításra szolgálnak. Megépülésekor ez volt a világ leghosszabb tenger alatti alagútja, a modern világ hét csodája közt tartják számon.

2.1.2. A Szeikan-alagút ^{[19] [34] [37]}

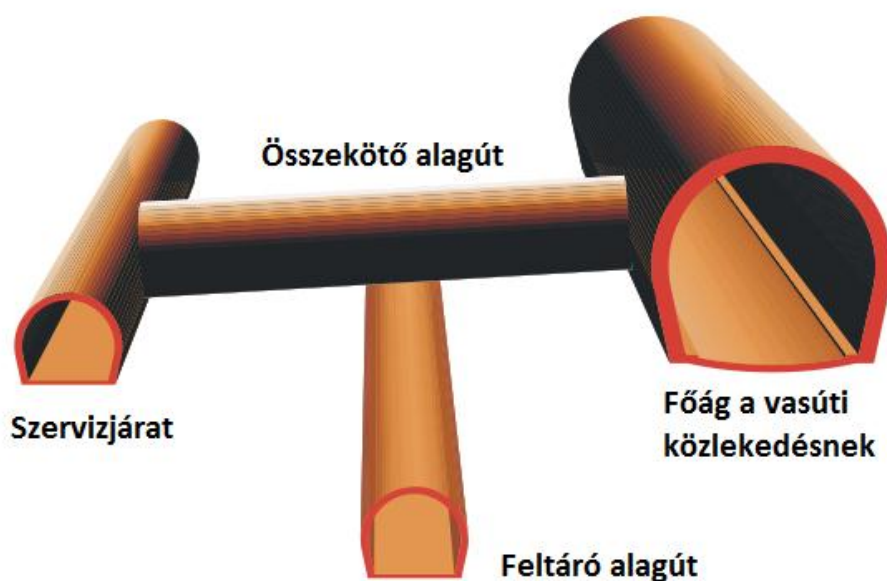
A Szeikan-alagút Japán négy nagy szigete közül Honsút köti össze Hokkaidóval. Az alagút 53,85 km hosszú, a tenger alatti szakasza 23,3 km hosszú. A Gotthard-bázisalagút megépüléséig (amit 2017-re datálnak) ez a világ leghosszabb vasúti alagútja, illetve a Csatorna-alagút átadásáig ez volt a leghosszabb tenger alatti alagút. A tengerszint alatt 240 méterrel megépítve ez a legmélyebben fekvő vasútvonal (4. ábra).



4. ábra: A Szeikan-alagút vonalvezetése

Az alagútépítés gondolata már az 1950-es években felmerült. Ekkor még komppal bonyolították le a forgalom nagy részét, azonban ezek közül öt 1954-ben egy tájfun következtében elsüllyedt 1400 ember halálát okozva. Ez nagymértékben hozzájárult az alagút támogatottságához, az ötlet pozitív megítéléséhez, hiszen egy biztonságos, időjárástól független útvonalat biztosít a szigetek közt. Megépítéséről 1971-ben döntöttek, átadására 1988. május 13-án került sor.

Az alagút alatt a Honsú felőli részen a kőzet vulkanikus eredetű (andezit és bazalt), a Hokkaidó felőli vége üledékes (agyagpala), a középső szakaszon pedig puha kőzetek vannak. A feltárásokat fúrásokkal, ultrahangos, szeizmikus és mágneses vizsgálatokkal végezték. A nagy víznyomás miatt a vízbetörések ellen a főte felett talajszilárdítást végeztek cementpép és vízüvegoldat keverékének injektálásával. A kőzetek állapota miatt a fúrópajzs elakadt, a fejtést kevesebb, mint 2 km után abbahagyták, ezután hagyományos bányászati fejtési módszert illetve robbantásos módszert alkalmaztak. Ezt 2800 tonna dinamittal végezték. A fejtés után a kőzetet horgonyzással erősítették, majd erre löttbeton réteg került 70 cm vastagságban. A gyengébb vagy rosszabb állapotú kőzetekben kétrétegű falazatot készítettek összesen 110 cm vastagban.



5. ábra: A Szeikan-alagút vonalai

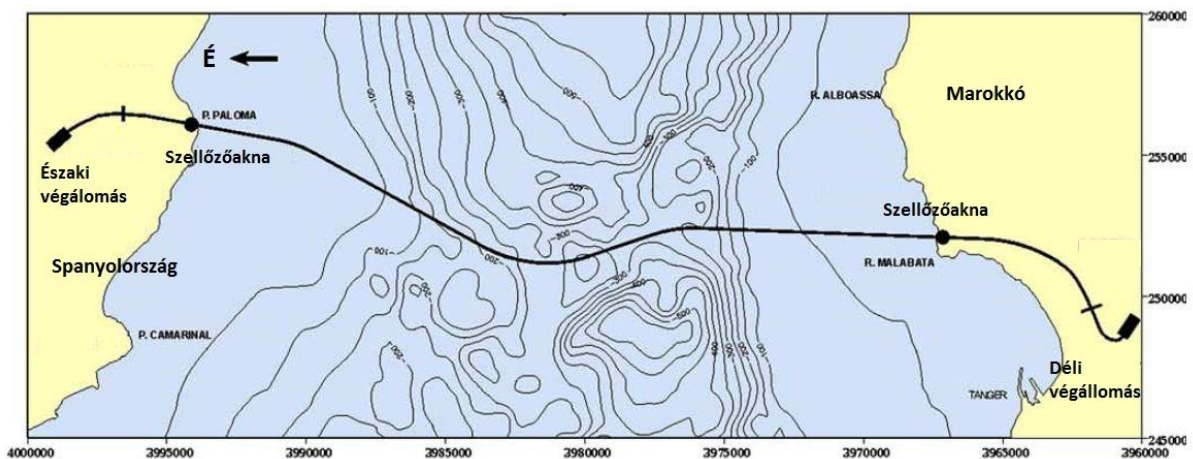
Az alagút 100 méterrel a tengerfenék alatt fekszik. Nem egy, hanem három külön járatból áll (5. ábra), melyek össze vannak kötve. Elsőként a feltáró alagút épült meg, mivel a nagy vízmélység miatt kevés próbafúrást tudtak csinálni. Ennek célja a kőzetviszonyok pontos feltárása és vizsgálata, és így a későbbi építés elősegítése. Ez az 4,1 méter magas, 5 méter széles járat a másik kettő alatt helyezkedik el, a kész rendszerben a vízvezetés és a szellőzés itt történik. A vasút a főágban közlekedik, mindkét irány egy járatban kapott helyet. Az alagút 7,85 méter magas, 9,7 méter széles. Tőle 30 méter távolságban fekszik a szervizjárat, melynek a méretei azonosak a feltáró alagút méreteivel. Ennek építése a főág építése előtt történt, itt szállították az alapanyagot és a kitermelt anyagot. A vasúti forgalom számára kialakított főággal 600-1000 méterenként össze van kötve. A vonalat két állomás szakítja meg, melyek egyedi módon a tenger alatt helyezkednek el.

A Szeikan-alagút átadásakor hatalmas technikai bravúrnak számított, komoly előrelépést jelentett a tenger alatti alagútépítés fejlődésében. Még üzembe helyezése előtt sikeresen átvészelt egy földrengést, ezzel is bizonyítva megfelelőségét. Megépülésével Japán két szigetét sikerült közelebb hozni egymáshoz, annak ellenére, hogy a viszonylag olcsó repülőjáratokkal nem vehette fel a versenyt, mivel a légi közlekedés gyorsaságában messze maga mögött hagyta az alagút kínálta lehetőségeket.

2.1.3. A Gibraltár-alagút ^{[18] [30]}

Európát Afrikától a Gibraltári-szoros választja el. Szélessége 14 km. A történelem során számos alkalommal szó volt róla, hogy itt érdemes lenne összekötni a két földrészt, felmerült híd és alagút építésének a gondolata is. Mára ez még nem valósult meg, de 1980-ban Marokkó és Spanyolország aláírt egy szerződést, melynek értelmében kapcsolatot létesítenek a jövőben a két ország közt.

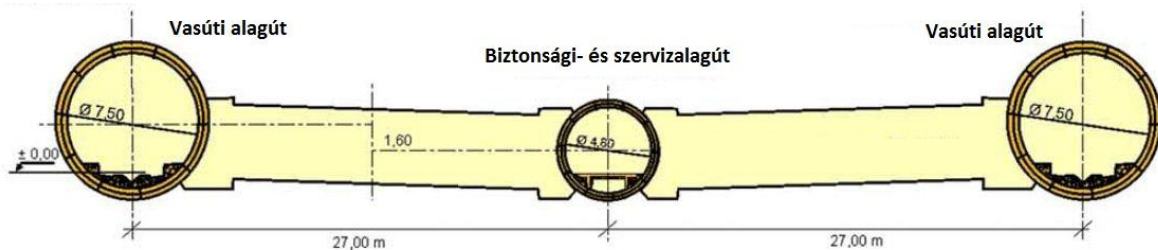
A híd ötletét végül elvetették, a pillérek építése igen költséges és nehéz lenne 300 méteres vízmélység esetében. Elmerített úszó alagút létesítése a szoros sűrű hajóforgalma miatt nem volna előnyös. A süllyesztett alagútépítést az erős tengeráramlások és az altalaj ilyen szempontból gyengébb minősége teszik lehetetlenné. A szoros alatti alagút így célszerűen a Csalagúthoz hasonló lenne, tehát fúrtnak tervezik.



6. ábra: Az alagút vonalvezetése a vízmélységi viszonyokat is feltüntetve

A talaj alapvetően agyag és márgás agyag, de tartalmaz kemény kőzetekből, homokkőből álló beágyazódásokat is. Fúrópajzsok alkalmazhatóak lennének a területen, így az alagút falazatát előre gyártott vasbeton elemekből állítanák elő.

Ha a legsekélyebben fekvő gerinc alatt vezetik a vonalat (6. ábra), annak hossza 37,7 km lesz (ebből tenger alatt 27,7 km fut) és a legnagyobb vízmélység 300 méter. Ezen kívül más útvonalak is felmerültek, melyek vizsgálata és elemzése ma is folyik. Ezek, bár mélyebben és meredekebben futnának, a gyengébb talajviszonyok miatt lehet, hogy előnyösebbek lennének. Az alagút keresztmetszete is a Csatorna-alagútéhoz hasonlítana: a kétirányú forgalmat két külön járatban vezetnék, melyek közt közepén egy szervizjárat helyezkedne el (7. ábra). Elsőként a feltáró alagutat készítenék el, ami a későbbiekben a szervizalagút szerepét töltené be. Az itt szerzett tapasztalatok és mérési eredmények alapján pontosítható lenne az ezt követő két alagút kifúrása, melyekben később a forgalom haladna.



7. ábra: A Gibraltár-alagút tervezett keresztmetszete

A tervezés során figyelembe kell venni, hogy az alagút földrengésveszélyes helyen fekszik: a Földközi-tenger alatt található az európai és az afrikai kőzetlemez. A legnagyobb problémát azonban nem ez, hanem a 300 méteres vízoszlop okozta nyomás okozza.

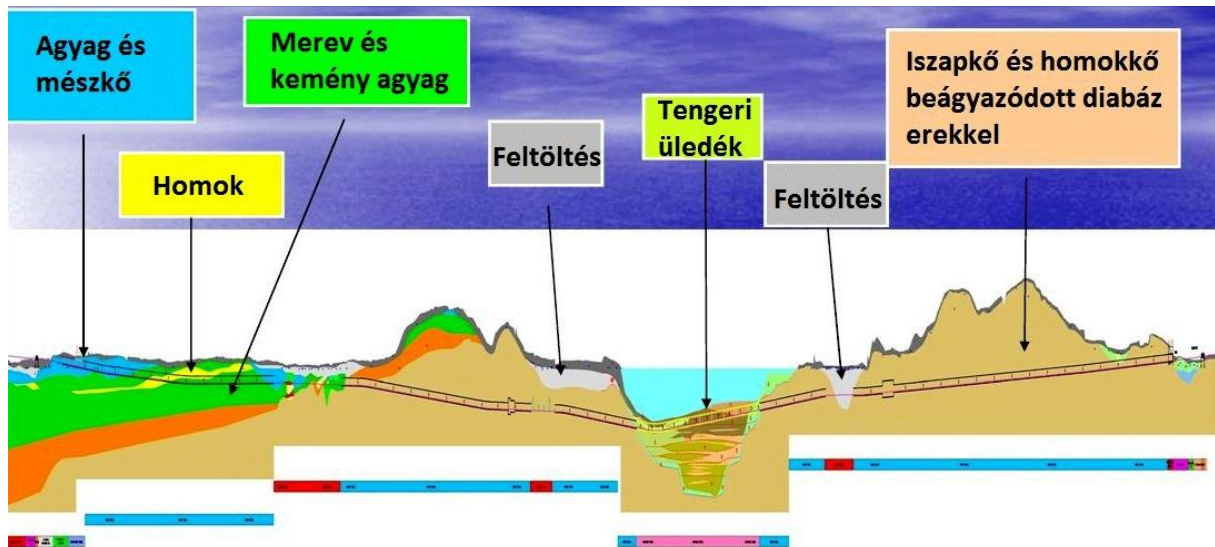
A Gibraltári-szoros alatti alagút tervezése még korai stádiumban van. Remélhetőleg a jövőben sor kerül a megépítésére és ezáltal a két kontinens vasúti összeköttetése biztosított lesz.

2.2. Süllyesztett alagutak

A süllyesztéses alagútépítési technológia lényege, hogy az alagút elemeket szárazdokban építik meg, majd azokat úsztatva vontatják a helyükre, és ott süllyesztik le őket. Az építési módszert a Boszporusz alatti Marmaray és a Busan-Geoje alagút révén mutatjuk be.

2.2.1. A Marmaray alagút ^{[16] [22] [25] [39]}

Isztambulban a Boszporusz alatt lévő Marmaray alagút része annak a vasúti rendszernek, mely az ott lakók és dolgozók ingázását hivatott biztosítani. A vonal 76 km hosszú, Halkalit köti össze Gebzével, ebből 14 km-nyi szakasz alagút. A projekt a Marmaray-project nevet kapta. Az építést 2004-ben kezdték, az átadást 2013. október 29-ére tervezik.



8. ábra: A Boszporusz alatti talajviszonyok

Az alagút két részre osztható az alkalmazott technológia alapján: a város alatt, szárazföldi részen fúrópajzsos módszerrel, a csatorna alatt süllyesztett módszerrel dolgoztak (8. ábra).

A süllyesztett alagútszakaszhoz kapcsolódva a város alatti szakaszt 15 méter átmérőjű TBM fúrópajzsral készítették. A kétirányú forgalmat két külön alagútban vezetik el, ezek kellő távolságban vannak egymástól. Köztük vész esetre rövid összekötő alagutakat terveztek. Azokon a helyeken, ahol az alagút nagyon közel fut a felszínhez, nyílt építési módszert vagy robbantásos technológiát alkalmaztak. Az állomások és az útvonal-kereszteződések is így készültek.

A Boszporusz alatti süllyesztett alagútszakasz megközelítőleg 1,4 km hosszú. A szárazdokkban elkészített alagútszegmenteket a csatorna fenekére fektetették egy kiásott vályúba.

A barázda mélyítése kétféleképpen történhet. Az egyik módszer szerint egy uszályról működtetett kanalas markolóval (9. ábra) egyszerre akár 25 m³ talajt is kiemelhetnek a tengerfenékről. Az eszköznek kettő vagy több teknője lehet, amit egy drórendszerrel süllyesztenek le. A markoló feje nagy súlya révén hatol át a tengerfenék talaján, majd az uszályra üríti tartalmát. Ez a megoldás puha és közepesen kemény talajok esetén alkalmazható, sziklában és homokkőben nem. További hátránya, hogy a barázda mélyégének növekedésével drasztikusan nő a munkaigény, és sok esetben a pontosság sem kielégítő. Előnye, hogy nagy vízmélység esetén is alkalmazható, illetve rendkívül megbízható technológiának számít. A Marmaray alagút építése során az árkot így mélyítették ki.



9. ábra: Árok mélyítés kanalas markolóval

A másik módszer az úgynevezett körszivattyús ásás. Ez egy speciálisan felszerelt hajóról történik, ami a talajt a tengerfenékről vízzel való hígítással felszivattyúzza. Az üledék ezután leülepszik, és a vizet visszaengedik a tengerbe. Miután a hajó megtelt, tartalmát kiüríti a lerakódóhelyre. Egy ciklus alatt

40000 tonna talajt termel ki akár 70 méteres mélységből. Puha és közepesen puha talajok esetén alkalmazható. További előnye a nagy kapacitáson kívül, hogy nem függ egy horgonyrendszerrel. Hátránya, hogy a tengerpart közelében nem használható és a pontossága sem nagy.

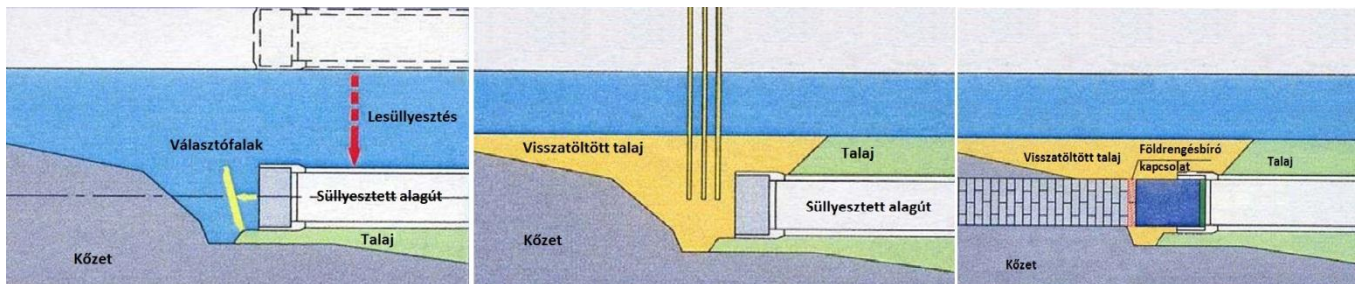
A keményebb talajok, kőzetek esetén sem a markolás, sem a körszivattyús módszer nem alkalmazható. Ilyenkor a kőzetet vagy tenger alatti ásással és robbantással, vagy speciális vésőszerkezetekkel törik össze. Ilyenkor a környezet és a környező épületek védelmére fokozottan ügyelni kell a keletkező dinamikus hatás miatt.

A Marmaray alagút e szakaszánál több mint egymillió köbméter puha talajt, homokot, kavicsot és sziklát ástak ki. Az Isztambuli-szoros legmélyebb pontja 44 méter mélyen helyezkedik el, a szükséges fedés legalább két méter és a keresztmetszet 9 méter magas. Így a markolónak 58 méteres mélységig is le kellett néhol hatolnia. Az elemek alatt a talajt cölöpökkel erősítették meg, amiket jet-grouting eljárással készítettek. Egymás mellett 12 helyezkedik el.

Az árok kiemelésével párhuzamosan megkezdhető az alagútszegmensek építése a szárazdokban. A dokk elárasztása után a 134 méter hosszúságú megerősített vasbeton elemeket hajókkal a helyükre vontatják, majd ballaszttartályok vízzel való megtöltésével lesüllyeszti a helyükre, és a már korábban elhelyezett elemekben lévő hidraulikus kar segítségével összekapcsolják. A vasbeton elemeket acél köpennyel is elláthatják. Egy másik módszer szerint a szárazdokban nem építik meg teljesen a zárt alagút szegmenseket, hanem azokat nyíltan hagyva, hajószerűen vontatják, és a végleges helyük közelében a vízen lebegve fejezik be az építést. Ennél a módszernél a lebegtetés könnyebben megoldható, azonban a legtöbb esetben az előző megoldást alkalmazzák.

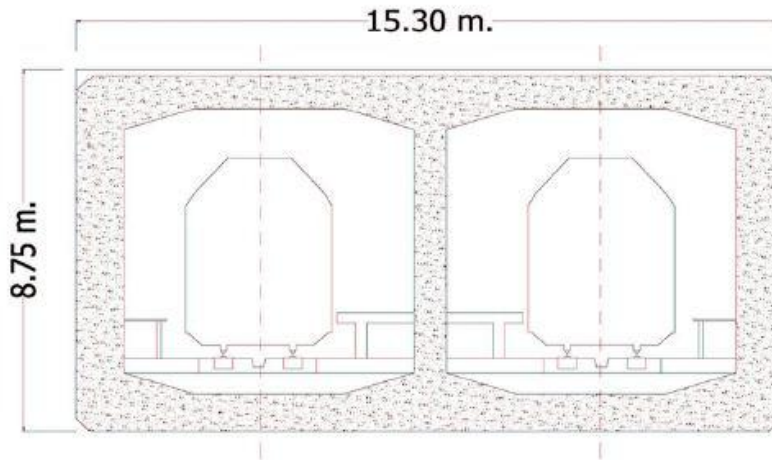
A különböző szakaszok közt lévő gumitömítések biztosítják a vízhatlanságot. A kapcsolatot bűvárokkal ellenőriztetik. A tömítéseket a külső víznyomás nyomja össze. A szegmensek végén acélból készült ideiglenes zárófalak vannak, ezeknek a víz nyomását el kell tudniuk viselni. A kapcsolat létrejöttkor ezeket elbontják, megteremtve ezzel az átjárhatóságot. Korábban ezeket a falakat is vasbetonból készítették, azonban itt gondot jelentett a bontás és a törmelék elszállítása, ráadásul nem lehetett őket többször felhasználni, újraolvasztani.

Az elemeknek kellően nehéznek kell lenniük ahhoz, hogy ne ússzanak fel, ezt kő leterheléssel is elősegítik. A Marmaray-project süllyesztett alagútszegmenseinek tömege 55000 tonna. Ezeket a lesüllyesztés után a barázda visszatöltésével és az elem lefedésével leterhelik és védik. Az utolsó elem elhelyezése után a közte és a szárazföldi rész közti rést feltöltik vízzáró vagy közel vízzáró anyaggal, hogy a TBM fúrópajzs kapcsolódni tudjon a süllyesztett szakaszhoz (10. ábra).



10. ábra: Fúrt és süllyesztett szakasz kapcsolata

A süllyesztett részen a két forgalmi irány közös vasbeton alagútban halad (11. ábra), azonban ezeket egy közbelső fal elválasztja egymástól. Előnye a süllyesztett technológiának, hogy a forgalmi igényhez könnyű méretezni az elemek méreteit, azok szabadon meghatározhatóak.



11. ábra: A Marmaray alagút keresztmetszete

A Marmaray-project elkészülésével Isztambul közlekedése nagymértékben javulni fog. A vasúti rendszer óránként 75000 utast szállít majd mindkét irányban. Ezzel az autóforgalmat csökkenti a városban, a dugókat megszünteti. A project a környezetre is kedvező hatással lesz: a széndioxid-kibocsátás töredéke lesz a mostaninak.

2.2.2. A Busan-Geoje alagút ^[15] ^[26]

A Busan-Geoje alagút Dél-Korea második legnagyobb városát, Busant köti össze Geoje szigetével. A népesség növekedésével a zsúfoltság egyre nagyobb. A problémára a megoldást a Geojén való terjeszkedés jelentette, azonban a sziget közúton való megközelítéssel 140 km távolságban van. Ezt az utazást rövidítette le egy, az öböl alatt fekvő, 8 km hosszú alagút-híd rendszer.

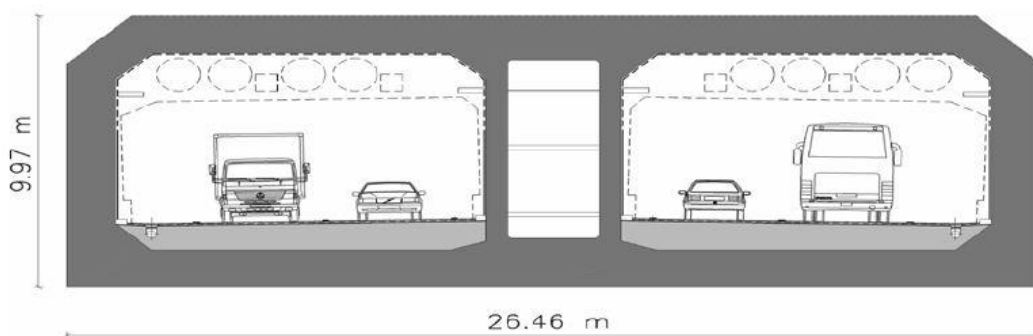
Az autópálya két részből tevődik össze: egy 48 méter mélyen fekvő alagútból és egy két részből álló kábelhídból, amit egy apró sziget szakít meg.

A ferdekábeles híd pilonjai 156 méterrel emelkednek a tenger szintje fölé. Az útpályát az úgynevezett szerelőhidas módszerrel építették. Az acélvázra előre gyártott vasbeton elemeket helyeztek el, majd utánfeszítették a tartókábeleket. A két híd körülbelül 2 km hosszú.

A 3,24 km hosszú alagútszakasz süllyesztéses technológiával épült. Az elemeket egy 15 méter mély árkokba fektették, amit uszályról működtetett markolóval termeltek ki. A 48 méter mélységű tengerfenék talaja 30 méter vastagságig tengeri agyag homok- és kavicsrétegekkel, alatta mállott kőzettel. Az agyag a vizsgálatok alapján nem jó teherviselő réteg: nagy kalciumtartalma miatt nagy a merevsége, de alacsony a szilárdsága. Az altalaj megerősítésére különböző módszereket alkalmaztak. Az alagút végeinél viszonylag vékonyabb volt az agyagréteg, így itt gazdaságos volt talajcserét alkalmazni: kőszórásra cserélték az agyagot. Az alagút többi részét cölöpökre alapozták. Kétféle cölöpözi módszert alkalmaztak: 90 cm átmérőjű CDM, azaz sima köpenyű csavart cölöpöket és 1,2-

1,8 méter átmérőjű talajkiszorító kavicscölöpöket készítettek. Egy sorban 10 cölöp található, ezeken az egyenletes felfekvés biztosítása végett kavicságyat alakítottak ki.

Az alagutat 18 darab 180 méter hosszú előregyártott vasbeton szegmensből állították össze (12. ábra). Ezeket 35 km-re a végleges helyüktől gyártották le. A szélességük 26,46 méter, mindkét irányban 2 sáv, köztük szervizjárat található bennük, tömegük 48000 tonna. Egyszerre 5 elemet készítettek el a szárazdokban. Az elárasztás 2 lépcsőben történt: egy részleges elárasztás során az esetleges hibákra fény derülhet, azokat kijavíthatják. A szegmensek szállítása 2 uszályal történt, ezekről eresztették helyükre őket, miközben az uszályok horgonyokkal rögzítve voltak a tengerfenékhez. Az elemekre ideiglenes szerelőtoronyt építettek, melyen keresztül a ballaszttartályok megközelíthetőek gond esetén.



12. ábra: Az alagút keresztmetszete

A szegmensek itt is acél zárófalakban végződnek. Az elemek hidraulikus munkahengerekkel való összekapcsolása után a köztük lévő vizet kiengedték. Ezáltal a külső víznyomás még jobban összeszorítja az alagútszakaszokat és a köztük lévő gumi szigetelőelemeket, így a víz nem jut be az alagútba. A zárófalak elbontása csak ezután történik meg.

Az alagutat 2010 decemberében adták át a forgalomnak. A Busan-Geoje alagút a világ legmélyebben fekvő közúti alagútja. Segítségével Busan városa a jövőben élhetőbbé válhat, a zsúfoltság csökkenhet, és a Geojéból Busanba ingázók utazása jelentősen lerövidült.

2.3. Elmerített úszó alagutak

2.3.1. A technológia jellemzése ^{[3] [4] [33]}

A korábban taglalt technológiákon kívül létezik még egy, a legújabb alagútépítési módszer. Ez az elmerített úszó alagútépítés (Submerged Floating Tunnels, SFT). Eddig még egy alagút sem épült meg így, azonban a jövőre nézve ígéretes megoldásnak tűnik. Nagy vízmélység esetén, ahol a pillérek nagy magassága miatt hídépítés nem jöhet szóba, illetve a víznyomás túl nagy lenne a süllyesztéses technológia alkalmazására, ott csak ez az alagútépítési mód lehetséges.

Az építési módszer leginkább a süllyesztéses eljáráshoz hasonlít. Mindkét esetben előregyártott elemeket helyeznek el a kijelölt helyükre, melyeket úsztatva mozgatnak. A különbség

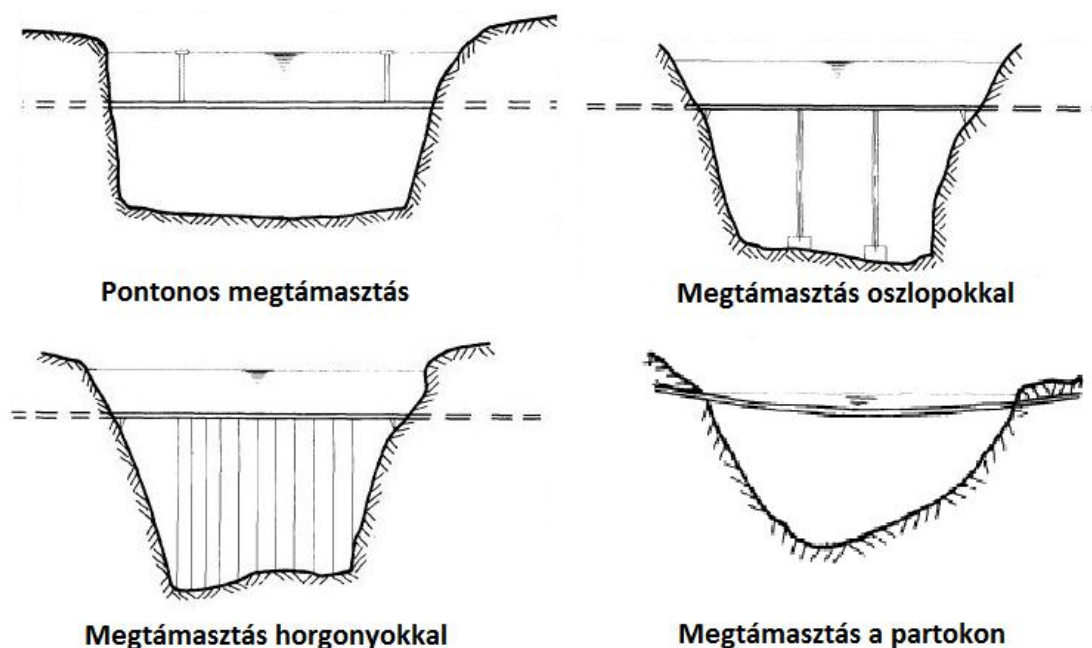
annyi, hogy míg süllyesztésnél leterheléssel a tengerfenéken rögzítették a szegmenseket, addig az SFT-nél az elemek lebegnek a vízben. Egyensúlyát az önsúly, a felhajtóerő és valamilyen rögzítési módszer adja. Ennek megfelelően beszélhetünk pozitív úszóképességről, amikor az alagút fölfelé mozdulna el, és negatív úszóképességről, amikor lesüllyedne.

Az úszó alagutak három fő szerkezeti elemre oszthatók szét: az alagútra, mint csőre, a rögzítésre és a parttal való kapcsolatot megteremtő szerkezeti részre. A cső méreteit a forgalmi igények határozzák meg. Alakja lehet kör, ellipszis vagy téglalap (bár ez a környező víz áramlási szempontjából és az elcsavarodást tekintve sem a legkedvezőbb), anyaga acél vagy vasbeton. Az elemek hossza 100 és 500 méter között mozoghat.

A parttal való kapcsolat kialakításában az okoz nehézséget, hogy a vízben úszó, rendkívül rugalmas csövet kell a föld alatt nyugvó, merev alagúttal összekötni. A kapcsolatnak el kell tudnia viselni és korlátoznia kell a lebegő elem mozgásait úgy, hogy mindvégig vízzáró marad.

Az alagút megtámasztása többféle módon történhet (13. ábra). Negatív úszóképesség esetén rögzíthetjük az elemeket a vízfelületen úszó pontonokhoz. A rendszer érzékeny a szél, a hullámok, az áramlás és az esetleges ütközés hatására. Tervezéskor egy ponton kiesését is figyelembe kell venni. Egy másik rögzítési módszer ebben az esetben, ha a szegmenseket oszlopokkal támasztjuk alá. Ilyenkor az alagút tulajdonképpen nem más, mint egy víz alatti híd. Míg az előző módszernél a vízmélység nem játszott szerepet, itt az oszlopok megépíthetősége szab határt a maximális mélységnek.

Amennyiben a felhajtóerő nagyobb a szerkezet önsúlyánál, az alagutat a tengerfenékhez kell rögzíteni horgonyokkal. Ez nagyobb vízmélység esetén is alkalmazható. A kábeleket függőlegesen és ferde szögben is vezethetjük. Előfordulhat olyan eset is, amikor nem szükséges az alagút közbenső rögzítése, elegendő a parttal való kapcsolati megtámasztás. Ekkor az alagút hossza nem haladhatja meg a 100-200 métert.



13. ábra: SFT rögzítési módjai

Az elmerített úszó alagutak építése számos előnnyel jár. A víz alatt 30 méterrel a SFT nem befolyásolja a táj arculatát, nem látható. Könnyedén megoldható, hogy két alagutat más mélységben úsztatunk, így azok nem zavarják egymást, ha vonalaik kereszteződnek. A vonalvezetése azért is kedvezőbb, mert a kis merülési mélysége miatt a pálya lejtése nem jelentős. A legnagyobb előnye talán, hogy ezzel a módszerrel földrengésveszélyes területeken is építhetőek alagutak.

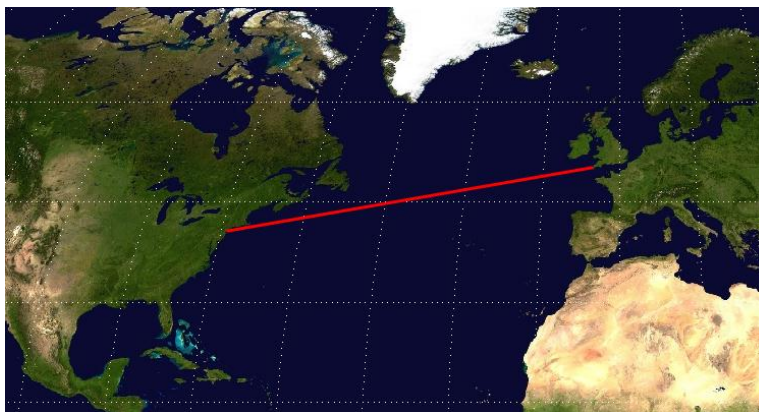
Hátrányai, hogy az alagút hajók és tengeralattjárók által sebezhetővé válik, a tengeri közlekedés kifinomult koordinálására van szükség. Ebben az esetben az alagút tervezésekor figyelembe kell venni a dinamikus hatásokat, így az ár-apály ingadozását, a hullámzást vagy egy esetleges szökőár hatását is.

Bár a süllyesztett alagútépítési módszer egyelőre még csak álom, bizonyos helyeken csak így tudunk majd alagutat építeni, hogy szárazföldi összeköttetést létesítsünk az SFT két vége közt. Norvégiában a fjordok, például a Høgsfjord áthidalása, vagy az Amerikát Európával összekötő, monumentális méretű Transzatlanti alagút építése csak ezzel a technológiával történhet.

2.3.2. A Transzatlanti alagút ^[6]

A Transzatlanti alagút egy 5000 km hosszú vasúti alagút Amerika és Nagy-Britannia között, mely talán megépül majd a jövőben. Az alagút ötlete nem új dolog, bár sokáig csak science-fiction regények találmánya volt és nem volt több, mint egy merész gondolat. Sok mérnök szerint ma, vagy a közeli jövőben azonban kivitelezhető lenne, a szükséges technológiák lassan már adottá válnak a megépítéshez.

Az útvonal kijelölésének kell majd az első lépésnek lennie. A víz alatti alagútszakaszok hosszának csökkentése érdekében egyesek szerint az ideális útvonal Kanadából indulna és Grönlandon át Skóciába, illetve Norvégiába tartana. Bár erre haladva az építési költségek becslések szerint fele akkora lennének, mint más vonalon haladva, a grönlandi időjárás megnehezítené, sőt ellehetetlenítené az építést. Ezért újabban egy másik, sokkal drágábban kivitelezhető javaslatot preferálnak, mely szerint az alagút New Yorkot kötné össze Londonon át Párizssal, és az alagút végig víz alatt futna (14. ábra).



14. ábra: A Transzatlanti alagút iránya

Az útvonal kijelölése után egy újabb alapvető kérdésben kell majd dönteni, nevezetesen az alagútépítési technológiában. A ma talán a leginkább közismert építési módszer, a fúrás semmiképp nem lenne kivitelezhető. Bár a pajzsok haladását sok minden befolyásolja, a megközelítőleg 50 km hosszú Csalagút kifúrásának 3 éves időtartama szerint a Transzatlanti alagút fúrása akár 300 évig is eltarthatna. Az eljárást a térség szeizmikusan aktív mivolta is kizárja, az alagút egy nagyobb földrengés során tönkremenne.

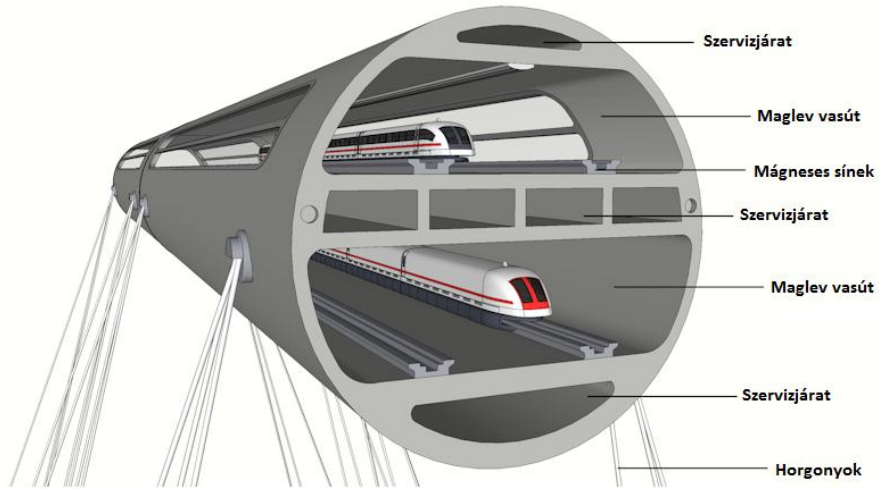
A süllyesztéses technológia sem jöhet szóba, hiszen az Atlanti-óceán mélysége néhol eléri a 8 km-t is. Itt az alagút egyszerűen nem lenne képes elviselni a kialakuló víznyomást. Ezzel az építési módszerrel több mint 50000 darab száz méter hosszú elemet kéne legyártani több évtized alatt, és az elemek szállítási idejével és lesüllyesztésével is gond lenne.

A Transzatlanti alagút megépítése a mai tudásunk szerint egyedül az elmerített úszó alagút technológiájával készülhet el (15. ábra). A nagy vízmélység kizárja az alagút oszlopokra való állítását. Az időjárási körülmények, a Golf-áramlás és a hajózás pedig a pontonokra való felfüggesztést teszik lehetetlenné. A hatalmas hosszúság miatt természetesen szükség van rögzítésre; ezt kihorgonyzással lehetne biztosítani. A rugalmas kábelek révén az alagút képes lenne a földrengésből, az áramlásokból, vagy az ütközésből adódó rezgések elnyelésére.

Az ideális úszási mélység a tengerfelszín alatt 100 méterrel van a mérnökök szerint. Itt a víznyomást a szegmensek még el tudnák viselni, és sem a hajóforgalom, sem az időjárás nem volna hatással rájuk. Az alagút 50000 előre gyártott elemből állna. A keresztmetszete igazodna a forgalmi igényekhez, a technológiából adódóan célszerűen kör alakú lenne. A kétirányú forgalmat külön alagútban vezetnék, felettük és alattuk szervizjáratok helyezkednének el.

A Transzatlanti alagút létrehozásának azonban nemcsak az építési nehézségek szabnak határt, hanem a benne alkalmazott technológiák is. Akkor lenne érdemes megépíteni az alagutakat, ha az utazási idő fel tudná venni a versenyt az alternatív közlekedési mód, a repülés által szükséges idővel, ami csupán 6-7 óra. Ehhez 8000 km/h csúcssebességre lenne szükség, ami csak mágnesvasúttal érhető elméletileg el (ma a sebességrekord 486,1 km/h). Ennek a levegő közegellenállása is határt szab, ezért az alagútban tökéletes vákuumot kéne létrehozni, amihez hatalmas teljesítményű légszivattyúk szükségesek. Ilyen feltételek mellett az utazási idő körülbelül egy óra lenne.

Ha a technikai jellegű problémákat mind le is tudjuk küzdeni, rendkívüli erőforrások szükségesek a kivitelezéshez. Az alagút ára akár több trillió dollár is lehet. Az építés során rengeteg embert kell alkalmazni, és az építés még így is évtizedekig, akár száz évig is eltarthat, mely során végig szélsőséges természeti körülmények közt kell dolgozniuk. A szükséges alapanyagok mennyiségét csak nagy nehézségek árán lehetne biztosítani.



15. ábra: Egy lehetséges keresztmetszet kialakítása

Tagadhatatlan, hogy a Transzatlanti alagút terve hatalmas előrelépést jelentene az alagútépítés történetében. Átala Európa és Amerika könnyedén megközelíthetővé válna. Azonban a felmerülő akadályok, anyagi korlátok miatt erősen kétséges, hogy valaha is meg fog épülni.

3. Tervezés és építés közben felmerülő nehézségek

Az alagutak kiemelt szerepű, stratégiaileg fontos létesítmények. Tervezésük során ezért minden eshetőségre, minden esetleges problémára ügyelni kell, legyen az akár a vízvezetés megoldása, vagy egy esetleges földrengésre való méretezés. A teljes tervezés magában foglalja a kivitelezés során felmerülő problémák kezelését is. Ebben a fejezetben ezeket a nehézségeket mutatjuk be tömören, a tűzvédelemre (ami az alagutak esetében a legkomolyabb problémát jelenti) és a földrengésre való tervezésre nagyobb hangsúlyt fektetve.

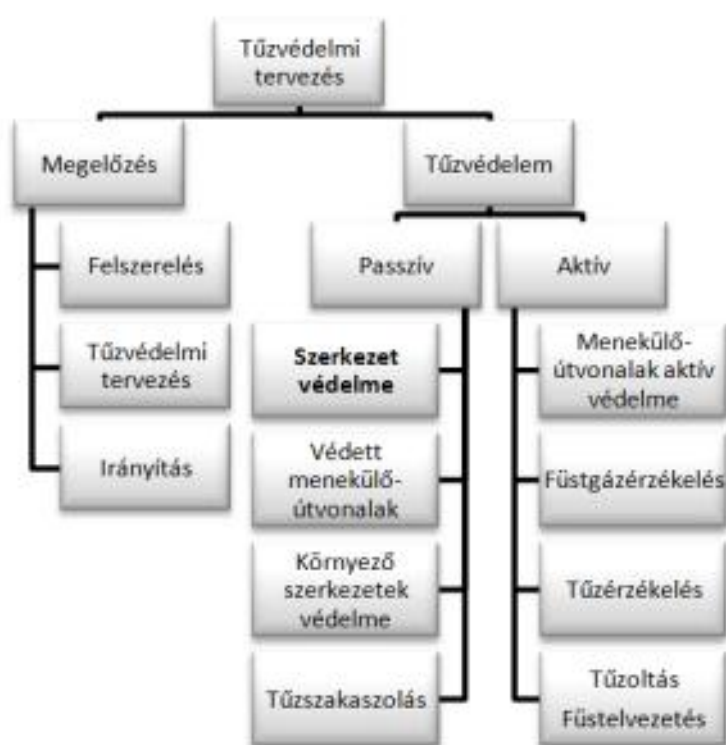
3.1. Tűzvédelmi megoldások, szellőzés ^{[11] [12] [13]}

Az elmúlt évtizedekben az alagutakban bekövetkezett balesetek száma a forgalmi terheléssel közel arányosan növekedett. A balesetek nagy részében tűz is keletkezett, mely a speciális körülmények miatt nehezen oltható. Erre hívta fel a figyelmet az 1996. november 18-án történt súlyos baleset a Csatorna-alagútban. A legmodernebb jelző- és oltóberendezésekkel felszerelve, a tűz indulásától kezdve a teljes oltás 5 órát vett igénybe, majd még további 2 napot a teljes szellőztetés és hűtés. Hála a tűzoltóknak és a gondosan tervezett menekülőútvonalaknak, haláleset nem történt. Ezután kezdték el a mérnökök az alagút állapotát felmérni. Ott, ahol a tűzfészek volt, az átlagos tűbbing vastagság 450 mm-ről 170 mm-re csökkent a réteges leválás következtében. A tűz a külső és a belső vashálót egyaránt megolvasztotta. Itt az alagutat azonnal meg kellett erősíteni. Mindemellett megállapították, hogy az alagútfalazat károsodásának ellenére az alagút globális stabilitását a tűz nem veszélyeztette. Ez után az eset után döntöttek úgy a mérnökök, hogy a tűz hatásának kitett falazatokat jobban meg kell ismerni.

Ha a közlekedést, legyen az teherszállítás vagy személyszállítás, alagútba, tehát zárt térbe szorítjuk, a szükséges biztonsági követelmények jelentősen megnőnek, beleértve ebbe az életvédelmi és a szerkezetvédelmi követelményeket egyaránt. Az üzemszerű működéstől eltérő esetek során veszélyességi szempontból egyértelműen az alagúttüzek jelentik az egyik legnagyobb problémát. Az alagutakban előírt rendkívül szigorú biztonsági követelmények ellenére a balesetek száma nő, aminek több oka is van. Ezek közül az egyik legfontosabb a már említett forgalmi terhelés növekedése, a másik a sebességek növekedése, mellyel négyzetesen arányosan nő az ütközés során felszabaduló mozgási energia mennyisége. Utóbbi a nagysebességű vasúti alagutaknál jelenthet különösen nagy problémát. Megállapítható, hogy a balesetek fajlagos előfordulási valószínűsége alacsonyabb alagútban vezetett közlekedés esetén, továbbá átlagosan két nagyságrenddel kisebb vasúti pálya kialakításával. Ennek legfőbb oka a kötött pálya, a szigorú biztonsági ellenőrzések elvégzése, és a komoly biztonsági berendezések beépítése. Azonban egy alagútban bekövetkezett vasúti baleset hatalmas nemzetgazdasági károkat tud okozni, több nagyságrenddel nagyobb, mint közúti balesetek esetén. A zárt térben keletkező tűz esetében a hő- és füstképződés jelentősen veszélyezteti az alagútban tartózkodó személyek épségét, és magára az alagút teherhordó szerkezetére is hatással van. A tűzteher speciális jellege abból adódik, hogy zárt térben jön létre, és az éghető anyagok

fajlagos mennyisége magasan meghaladja a más szerkezetek környezetében lévő mennyiséget. A vastag keresztmetszet és az azt körülvevő kőzetkörnyezet rendkívül lassan képes a keletkező hőt elvezetni, így gyorsan nagy hőmérséklet kialakulására van lehetőség. Egy jármű égésekor a keletkező hőenergia egyértelműen számítható. Az igazi tűzvédelem már itt elkezdődik, ha lehetőség van rá. Például a metrószerelvények esetén a lehető legkisebb mennyiségű éghető anyagot építik be, továbbá az robbanásveszélyes, különösen éghető anyagokat szállító járműveket nem engedik be az alagútba. Nehéz kérdés, hogy milyen anyagokat lehet szállítani. Nagyon körültekintően kell kialakítani ezeket a szabályokat. 1999-ben a Mont-Blanc alagútban egy margarint és lisztet szállító kamion robbant fel, ez a baleset 39 halálos áldozatot követelt.

Egy alagút megépítése ma már elképzelhetetlen megfelelően átgondolt tűzvédelmi rendszer tervezése nélkül. Ennek a folyamatábrája látható a 16. ábrán:

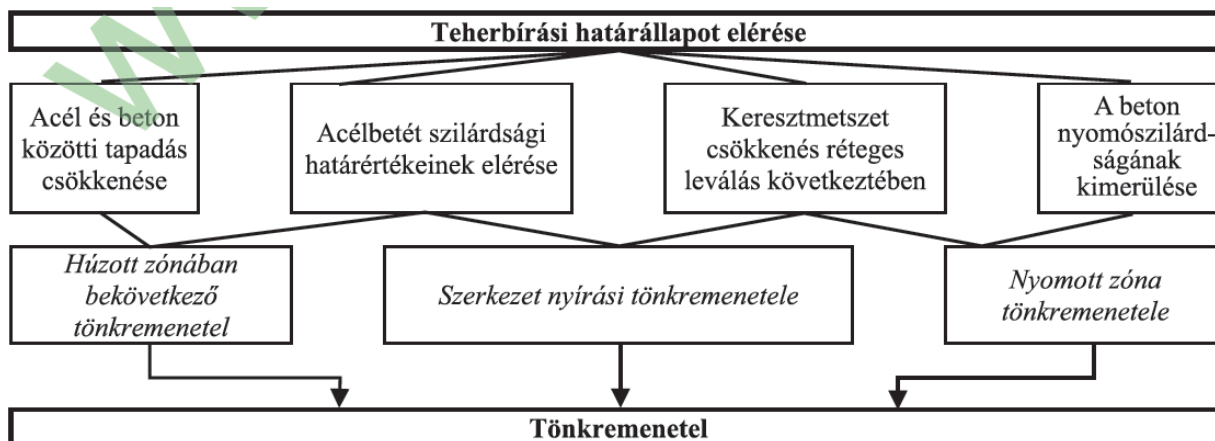


16. ábra: Tűzvédelmi tervezés folyamatábrája (Beard és Carvel alapján)

Megelőzésen az átgondolt tervezésről, biztosító rendszerek beépítéséről van szó. Tűz bekövetkezése esetén lépnek be az aktív és a passzív védelmi rendszerek. Ezeknek a rendszereknek a feladata az emberéletek és a szerkezet védelme. Ide tartozik a megfelelő tűzjelző rendszerek, füstjelző berendezések, kamerák elhelyezése. Az emberélet védelme érdekében a legfontosabb feladat a mérgező füstgázok megfelelő elvezetése a szellőző rendszerek segítségével. További nagyon fontos teendő a megfelelő menekülő útvonalak biztosítása. Hosszú alagutak esetén biztosítani kell megfelelő tűzvédelemmel ellátott, friss levegővel biztosított óvóhelyeket, ahová az emberek baleset esetén menekülhetnek, és itt kivárhatják, amíg kimentik őket. Ilyeneket találhatunk a már megépült Csalagútban, az épülő Gotthard alagútban, és a Mont-Blanc alagútban is kiépítésre kerültek a súlyos baleset bekövetkezése után.

A tűzterherre történő méretezés különböző tűzgörbék alapján történik, melyek eltérőek a magasépítési szerkezeteknél alkalmazottaknál. Ezen görbék alapján a szerkezetnek meghatározott ideig károsodás nélkül kell elviselnie egy adott hőmérsékletet. Alagutak esetén ez a hőmérséklet 1350°C.

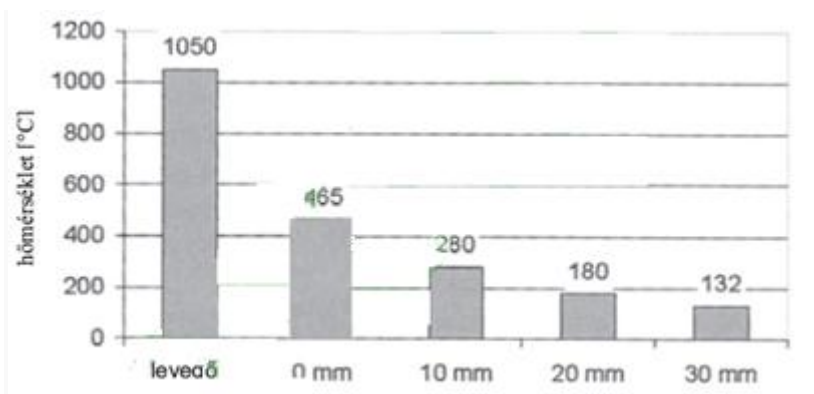
Tűzterhernek kitett vasbetonszerkezeteknek négy nagy tönkremeneteli csoportját különböztetünk meg. Ennek a szemantikus ábrája itt látható a 17. ábrán:



17. ábra: Tűznek kitett vasbetonszerkezetek elméleti tönkremeneteli módjainak szemantikus ábrája (Blennemann és Girnau alapján)

A betonacél 400 °C hőmérsékletig nem szenved szilárdságvesztést, de a tapadás már jelentősen lecsökken, míg 600 °C teljesen megszűnik. A beton 400 °C felett kezd dehidratálódni. 575 °C felett a kvarcok szerkezeti átalakuláson mennek keresztül, mely folyamat térfogat növekedéssel jár, míg 900 °C-on már a hidrátvizek is felszabadulnak. Ezek után látszik, hogy a problémák 400 °C felett kezdődnek.

A réteges leválás már 400 °C-on elkezdődik, amikor a víz vízgőzzé alakul, és a nyomás kimeríti a beton húzószilárdságát. Nagyon veszélyes, mivel a mentést nehezítik a leváló betondarabok, továbbá, ami még fontosabb, csökken a betontakarás. Ez ahhoz vezet, hogy az acélbetétek hamar elveszítik a szilárdságukat. A beton nagyon jó szigetelő anyag, már néhány centiméter képes komolyan megváltoztatni a belső betonacél hőmérsékletét. Ezt mutatja a következő ábra, különböző betontakarások esetén (18. ábra):



18. ábra: Tűznek kitett vasbetonszerkezetek elméleti tönkremeneteli módjainak szemantikus ábrája (Blennemann és Girnau alapján)

Látszik, hogy 1050 °C levegőhőmérséklet és 3 centiméteres betonfedés esetén a betonacél hőmérséklete már csak 132 °C. Ebből következik, hogy már meglévő tűz esetén a legfontosabb feladat az, hogy megakadályozzuk a réteges leválást.

Ma már léteznek speciális tűzálló betonok (kémények, kohászati létesítmények), melynek adalékanyaga samottzúzalék. Elkészítéséhez aluminátcementet használnak. Ezt sajnos alagútépítés esetén nem lehet alkalmazni, mivel az aluminátcement keramikus kötéseinek kialakításához 1000 °C-os hőmérsékletre lassú felfűtés, majd lehűtés szükséges.

Belátható, hogy tűzvédelem szempontjából a legfontosabb feladat a megfelelő betontakarás biztosítása és későbbi megtartása.

Ezt a védelmet pusztán a betonösszetevők helyes megválasztásával még nem lehet teljesen biztosítani. A leggyakrabban alkalmazott technológia tűzteherre méretezett tűzvédő habarcs felhordása a tűznek kitett felületre. Hatásosan védi a betont a 300 °C feletti hőmérséklettől, és ebből eredően a betonacélokat is. Összetevői a beton egyéb tulajdonságait nem befolyásolják, ezért minden alagútnál lehet alkalmazni. Jól végrehajtott kivitelezés esetén hosszú élettartamú, a falazott szerkezettel megegyező ideig megfelelő.

3.2. Földrengésteher ^[27]

Az alagutak kiemelt jelentőségű műtárgyak, méretezésüknél és tervezésüknél minden hatást figyelembe kell venni. Így nem szabad figyelmen kívül hagyni a szeizmikus terheket sem, különösen azokon a helyeken, ahol ezek előfordulási valószínűsége nagyobb, mert aktív zónákban vannak. Ilyen alagút például a Marmaray alagút Isztambulban, vagy a tervezett alagút a Bering-szoros alatt.

Az alagút vizsgálatokor megkülönböztetjük a hosszirányú és a keresztirányú viselkedést. Számos empirikus és analitikus módszert fejlesztettek ki mára az alagutak analizésére. Újabban a numerikus vizsgálatokat, a végeselemes modellezést és a véges differenciák módszerét alkalmazzuk.

A földrengéssel szembeni ellenállás meghatározásának három módszerét szokás használni. A szeizmikus tényezők módszerénél a szerkezet és a talajtömeg saját súlyát szorozzuk meg egy szorzóval, vízszintes és függőleges irányú tehetetlenségi erőket kapva ezáltal. A talajdeformációs módszer esetében a szerkezetben kialakuló normálfeszültségeket és hajlítónyomatékokat határozzuk meg a szerkezet, a talajkörnyezet és a kialakítás tulajdonságaitól függő paraméterek függvényében. A harmadik megoldás a dinamikus ellenállás módszere. Itt rugalmas alátámasztásúnak modellezzük az alagutakat, így végezzük el a számítást. Ezeknél a módszereknél a következő terheket kell figyelembe venni: önsúly, földnyomás, víznyomás, felhajtóerő, az alagút hasznos terhe, hőmérsékletváltozásból adódó terhek.

A fúrt alagutak kedvezőbben viselkednek szeizmikus terhekkel szemben, mint a föld feletti szerkezetek. Ennek oka, hogy mozgásukat az őket körbevevő talaj korlátozza, és így nincsenek kitéve tehetetlenségi hatásoknak. A pajzsos építési módszerrel készült alagutak előregyártott elemekből

épülnek fel, ezeknél a kör alak és a szimmetria is előnyösen befolyásolja a viselkedésüket földrengés esetén.

Süllyesztett technológiánál az alagút szeizmikus teherre való reakciója az elemek közti kapcsolattól függ. Ezek egy nemlineáris rugóhoz hasonlíthatóak, melyek nyomóerőt fel tudnak venni, de húzóerőt nem. Az elemek közti elmozdulások a földrengésből, a hőmérsékleti hatásokból, illetve az elemek összeillesztésének pontosságából tevődnek össze. A kapcsolatoknak így képeseknek kell lenniük arra, hogy valamennyire elmozduljanak egymástól. Ez hosszirányban akár ± 8 cm, függőleges sík mentén akár ± 15 cm is lehet. A szegmensek közti mozgást a gumitömítések biztosítják. A szegmensek nem közvetlenül a tengerfenéken fekszenek. Az őket alátámasztó cölöpalapok pár méterrel följebb emelik őket, így a kőzetlaptól függetlenné válva az alagút rugalmassága nagyobb lesz. A teherbírás növelése érdekében elemeket megerősített vasbetonból építik. Szálerősítéses technológia révén a szerkezet által felvehető húzószilárdságot és a szívósságot is növelni tudjuk.

Az elmerített úszó alagutak szeizmikus teherrel szembeni viselkedése a rögzítési módtól függ. Ha oszlopokon áll az SFT, akkor a viselkedése a hidakéhoz hasonló, azonban a tengerfenékhez való kihorgonyzás és a pontonokra való felfüggesztés esetében az alagút szinte nem is érzékeli a földrengést. A legnagyobb problémát itt a közbenső lebegő szakasz és a parti fix szakasz találkozása jelenti (ez a süllyesztett alagutaknál is kényes pont). Ide mozgásra képes kapcsolatokat kell tervezni. Földrengés szempontjából ezek az úszó alagutak a legbiztonságosabbak.

A különböző kőzetek, talajok közti váltás is gondot jelent. Ez abból fakad, hogy a szeizmikus hullámok terjedése a közvetítő közegtől függ, így a különböző talajok másképp viselkednek földrengés esetén, és ez hirtelen közegeváltásnál az alagútra nagyobb terheket fejt ki. Ilyen helyeken a kőzetkörnyezet valamilyen szintű homogenizálásával, például injektálással ez a kellemetlen hatás csökkenthető.

3.3. Egyéb nehézségek

3.3.1. Előregyártott elemek gyártása, szállítása ^{[25] [26]}

Süllyesztett és elmerített úszó alagutaknál az őket alkotó szegmenseket egy szárazdokkban építik meg és innen szállítják a helyükre később. Az építési helyszín kijelölése ilyenkor sok esetben nem egyszerű. A Busan-Geoje alagút tervezésénél is gondot jelentett, hogy a terület beépítettsége nagy, így az elemeket a végleges helyüktől 35 km-re kellett megépíteni.

A szegmensek vasbetonból készülnek. Teljesen vízzáró anyag nincsen, de törekedni kell a vízzárás maximalizálására. A munkahézagoknál megindulhat a szivárgás, ezért az elemeket folyamatos betonozással kell megépíteni. A szegmensek így egy összefüggő, megszakítás nélküli szerkezetet alkotnak. Dilatációk nélkül viszont a beton utólagos alakváltozásai okozhatnak problémát (például a zsugorodás), azonban ezek mértéke a megfelelő betontechnológia kiválasztásával csökkenthető, megszüntethető.

Az elkészült elemeket a szárazdokkból úsztatással juttatják végleges helyükre. A vontatást nagyon lassan tudják csak végrehajtani, mivel a dokk kijáratánál általában csak néhány méterrel hagynak több helyet az elemek szélességénél. A dokkból való kiúsztatás és a lemerítés során a legkorszerűbb geodéziai eljárásokkal, például lézervezérléssel irányítják a szegmensek mozgását. Ezen folyamatok során az időjárás is nehézségeket okozhat. Az elemeket már egy 30 cm-es hullámvész is beroppanthatja, károsíthatja. Emiatt az időjárás és a hullámok méretének pontos előrejelzése szükséges.

3.3.2. Vízhatlanság, vízelvezetés ^[5]

Az alagút belsejében a víz jelenléte nem okozhat gondot. Ezt hatékony vízzárással, illetve a már bejutott víz elvezetésével, alagúton kívülre juttatásával kell biztosítani.

A különböző építési technológiák esetében más jelent a víz elleni védekezés. A süllyesztéses és elmerített lebegő technológiáknál a szegmensek folytonos betonozása miatt nem alakul ki munkahézag, ahol bejutna a víz a szerkezetbe: itt az elemek vízzáróak. A gondot a kapcsolatok jelentik. Ezek vízzáróságát az elemek közé elhelyezett gumitömítésekkel biztosítják. A tömítés megfelelése miatt is fontos a pontos illesztés, ennek meglétét minden elem süllyesztése után ipari búvárokkal ellenőrzik.

Fúrt alagutaknál teljesen más a helyzet, sőt különbséget kell tennünk a pajzsos és a hagyományos építési módszerrel készített alagutak közt, illetve a vízzáró és nem vízzáró talajba fúrt alagutak közt is. Vízzáró talajba fúrt alagutaknál kedvezőbb a helyzet az alagút vízzel való viselkedése szempontjából, mivel itt nincs, vagy sokkal kisebb a hidrosztatikus nyomás, mint az ellenkező esetben. A vízáteresztő talajok esetében a teljes vízoszlop nyomása terheli a szerkezetet. Ilyenkor vastagabb falazat és megfelelő szigetelés alkalmazása szükséges.

Pajzsos építésnél az alagút fúrása és az előregyártott körgyűrűelemek elhelyezése egyszerre történik. Ennél a technológiánál az előregyártott elemek kapcsolatánál történhet szivárgás. A kedvező környezetben épülő alagutak esetében nem szükséges az elemek közt csavarozott kapcsolatot létrehozni, míg kedvezőtlen körülmények közt, tehát mállottabb, kevésbé vízzáró kőzetben ez nem mondható el. Mindkét esetben a szegmensek és a talaj közé betont injektálva növelik a vízzáróságot.

Hagyományos építési technológia alkalmazásánál a falazat készítése általában nem előregyártott elemekkel, hanem helyszíni betonozással történik. Ilyenkor a kritikus pontok, a munkahézagok az építés ütemétől függően kerülnek kialakításra, sűrűségük ettől függ. Ennél az építésnél nagyobb falvastagság szükséges a vízzáróság követelményeinek kielégítése végett is. A Szeikan-alagút esetében ez néhol elérte a 110 cm-es értéket.

Az alagutak vízzárósági követelményei szigorúak, azonban nem célunk vízhatlanná tenni őket, szándékosan engedjük egy bizonyos mennyiség beszivárgását. Ennek oka, hogy így az alagutat terhelő víznyomás sokkal kisebb. A bejutott vizet ezután a vágányok alatt kialakított csatornáknak vezetik el, majd az alagút mélypontjain összegyűjtve szivattyúkkal juttatják ki a szerkezetből. A

Csalagútból naponta 400000 liter, a Szeikan-alagút esetében még ennél is több vizet szivattyúznak ki a műtárgyból.

3.3.3. A környezetvédelem ^[2]

Mára a környezetvédelem az építkezések során kiemelt figyelemhez jutott, így komoly szempont, hogy a környezetterhelés ne fokozódjon egy bizonyos szint fölé. Sok fontos építőipari projectet azért vétőztak meg, mert nem feleltek meg a modern követelményeknek. Alagutak esetében a természet leginkább az építés során károsodik, a kész szerkezet sok esetben a környezeti körülmények javulását eredményezi.

A környezet terhelése sok elemből tevődik össze, melyeket figyelembe kell venni és törekedni kell a minimalizálásukra. Már az alapanyag előállítása és szállítása során is jelentkeznek problémák: ezek a tevékenységek növelik a levegő szennyezettségét. Általában ezzel párhuzamosan megkezdik az alagút fúrását vagy – süllyesztett technológia esetén – a fogadó árok mélyítését. Ennek során rengeteg talajt, kőzetet hoznak felszínre, melynek elhelyezéséről gondoskodni kell. Célszerű ilyenkor az alagútépítést valamilyen más építéssel (például töltésépítéssel) összekapcsolni, így a kitermelt anyagot hasznosítani tudják. A Gotthard-bázisalagút építésekor például a kitermelt kőzetet felaprítva fel tudták használni az alagútban épített beton adalékanyagaként. A Marmaray alagút esetében a 1,3 millió köbméter földet termeltek ki, aminek az elhelyezése egy tengeri lerakóhelyen történt. A Csatorna-alagút esetében ez az érték megközelíti a 6 millió köbméteres értéket.

Süllyesztéses technológiánál az építéssel megzavarjuk a tengeri élővilágot. A legnagyobb problémát a fogadó árok kialakításánál, az alagútelemek lesüllyesztésénél és a kavicsréteg kialakításánál a víz zavarossá tétele jelenti. Emiatt szerencsés, ha az építés területén van némi áramlás, ez azonban az építést nehezíti meg. Ügyelni kell, hogy az itt élő élőlények aktív időszakában a lehető legkisebb mértékben zavarjuk meg őket.

Végül a zajszennyezés is problémákhoz vezethet. Ez már az előkészületi munkák, az alapanyag előállításakor is jelentkeznek. Fúrásos technológiánál zajszennyezés csak az alagút kijáratainál történik, süllyesztéses technológiánál azonban ez minden szakaszon érezhető és hatással van az élővilágra.

Bár vitathatatlan, hogy a természet védelme rendkívül fontos és minden esetben számolni kell a különböző építkezések károsító hatásaival, nem szabad elfelednünk, hogy egy-egy építmény megalkotása milyen előnyökkel jár, és az áldozatok idővel megtérülnek. A városi környezetben épült alagutak (Marmaray alagút, Busan-Geoje alagút) a forgalom csökkentésével hozzájárulnak a levegő minőségének javulásához és a zajszint csökkentéséhez.

3.3.4. Régészeti leletek feltárása ^[2]

Földalatti építkezések során sokszor olyan területeken végzünk „ásatást”, ahol korábban senki nem sejtette volna, hogy értékek vannak eltemetve. A Marmaray alagút építése során az állomások munkálatainál jelentős régészeti leleteket fedtek fel. Ez az építést jelentősen lelassította, az átadást évekkel eltolta.

Az állomás építése során egy római kori kikötő, a negyedik század legnagyobb kikötőjének maradványait találták meg az alagútépítők. A felfedezés nagyon jelentős, több ezer leletet tártak itt fel. Több tucat hajóroncsot találtak, és a kikötő alatt egy település romjait tárták fel. Becslések szerint a lelet 8000 éves, így a tudósok számára kiderült, hogy a területen már jóval korábban létesítettek települést, mint azt idáig sejtették. Abból, hogy ez több méterrel a mai felszín alá került, arra lehet következtetni, hogy nagyon komoly geológiai folyamatok játszódtak le a térségben. Ez az alagút építésének szempontjából is fontos, hiszen az Isztambul alatti földrengészóna ma is aktív.

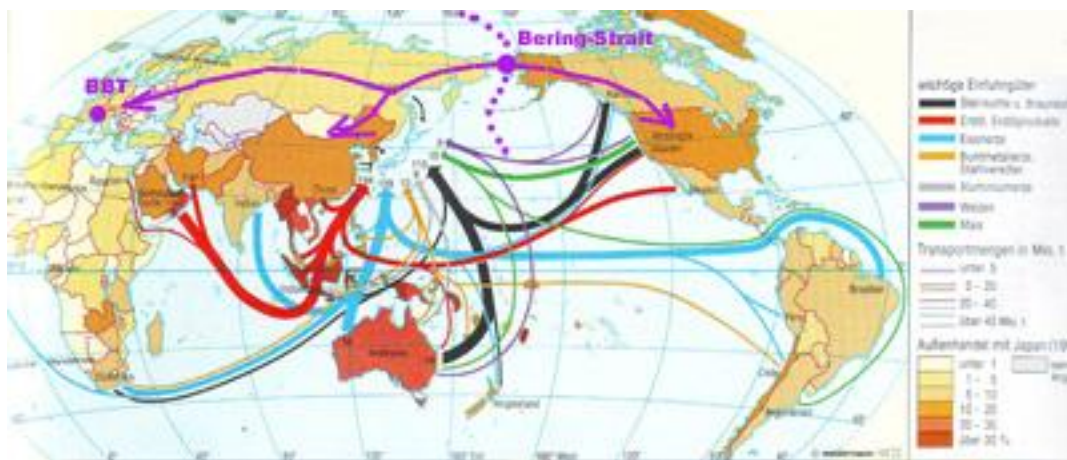
A régészek figyelmét az is felkeltette, hogy a hajók termékekkel megrakodva pusztultak el, és egyszerre több süllyedt el. Ezt nagy valószínűséggel egy cunami okozhatta, amit tenger alatti földrengés idézhetett elő.

A régészeti eredmények így nemcsak történelmi szempontból fontosak, de közvetve az alagút tervezését is segítették rávilágítva arra, hogy a térséget milyen természeti katasztrófák fenyegethetik. Egy esetleges cunami és földrengés pusztítására is fel kellett az alagút tervezőinek készülniük.

4. A Bering-szoroson való átkelés lehetőségei

4.1. Gazdasági háttér ^[1] ^[21]

2012-ben, napjainkban a legtöbb áru szállítása közúton valósul meg. Azokban az esetekben, amikor a vasút versenyképesebb lenne, akkor is a közutat választják a nagy fuvarozó cégek. Ez itt, Európában a leggyakoribb. Azonban ha egy kicsit nagyobb távlatokból nézzük a világot, akkor rájövünk arra, hogy a világ áruforgalmának (19. ábra) közel 70 %-a tengeren valósul meg.



19. ábra: Áruforgalom világszerte

Ennek az egyik fő oka, hogy még azok a nagy amerikai cégek is Kínába helyezték át a gyártókapacitásuk legnagyobb részét, amelyek az amerikai gazdaság mintapéldányai. Elég csak az Apple-re gondolnunk. De nem csak műszaki cikkek jönnek szóba, ilyen az összes élelmiszer, ruhanemű, energiahordozó. Csaknem minden, amit el tudunk képzelni, tőlünk valószínűleg több ezer kilométerre készült. A tengeri szállítás ma a leggazdaságosabb: igaz, lassabb, mint a repülő, de viszonylag nagy tömegű árut tudunk így megmozgatni. Ha Magyarországról szeretnénk egy konténernyi árut eljuttatni az USA-ba, az körülbelül három hétbe kerülne.

Napjaink egyik legfontosabb tengeren szállított anyaga a kőolaj. A tengeri olajfúró tornyokból és a közel-keleti országokból a kitermelt olaj nagy része az európai és észak amerikai finomítóba kerül. A világ két, de ma inkább már három vezető hatalma az USA, Oroszország és Kína. Oroszország és az USA már 1869-ben kezdeményezett egy olyan gazdasági együttműködést, melynek révén vasúton akarták összekötni a két országot. Lincoln nagy víziója egy transzkontinentális vasúti kapcsolat volt. A gazdasági kapcsolatok erősítése végett már mintegy 150 évvel ezelőtt össze akarták kötni az akkori Oroszországot és Amerikát. Ma ez az ötlet újból felszínre került - bár igazából soha nem volt elveszve - és a mai viszonyok között egyre nagyobb létjogosultságot kap. Oroszország és az USA egyre szorosabb gazdasági viszonyt ápolnak, melyre Amerikának a rengeteg orosz kőolaj és

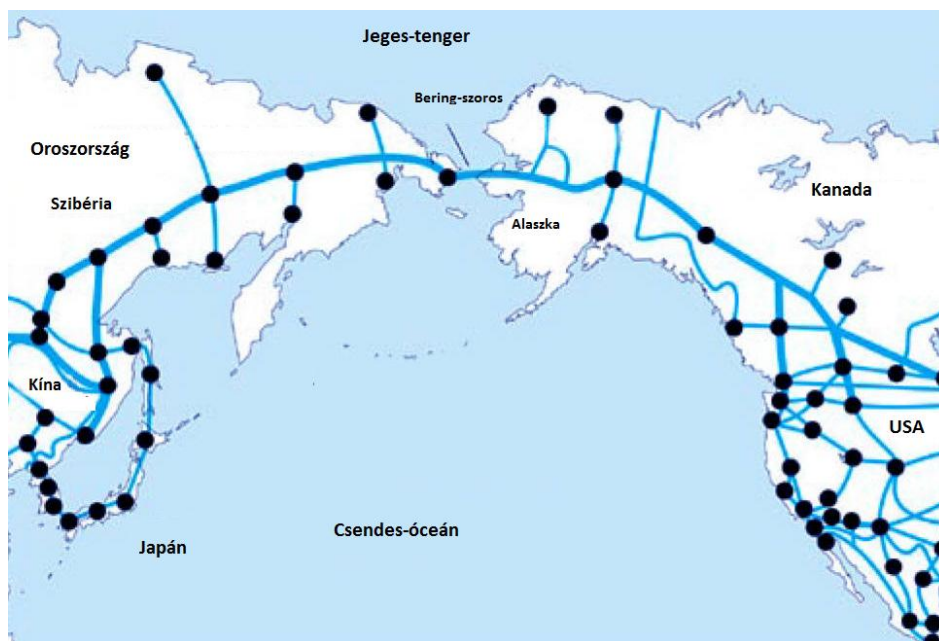
földgáz miatt van szüksége. Ha 2008-ban az amerikai bankrendszer nem omlott volna össze, akkor körülbelül 2017-re lett volna vasúti összeköttetés a három nagyhatalom között.

A XIX. század végén Lincoln gondolata egy megvalósíthatatlan álomnak tűnt, de ma már olyan technikai tudással rendelkezünk, hogy ha valamit meg akarunk valósítani, akkor annak csak a költsége szab határt. Ez az akadály jelen helyzetben egyre inkább megoldódni látszik, hiszen Amerika és Oroszország ma már nagyon jó gazdasági viszonyt ápol egymással. A mai helyzetben, mikor Líbiából, Irakból, Iránból és Szaúd-Arábiából egyre nagyobb áldozatok árán tudják csak a szükséges kőolajat megszerezni, ez a kapcsolat felértékelődik.

A következőkben szeretnénk bemutatni, hogy miképp lehetne megvalósítani ma a világ egyik legnagyobb mérnöki kihívását, Észak-Amerika és Oroszország összekötését szárazföldi közlekedéssel.

4.2. A terv történelmi áttekintése [7] [8] [9] [10] [24]

Az elgondolás, hogy a két nagyhatalom, a két földrész összeköttetésben legyen, nem új keletű. Már 1861-ban William Gilpin, Colorado első kormányzója javasolta Lincolnnak, hogy a világ nagyvárosait vasúttal kössék össze. Ennek a tervnek legfontosabb része a Bering-szoroson való átkelésnek a megoldása volt.



20. ábra: Tervezett útvonal

Az útvonal (20. ábra) az oroszországi Yakutsból indulna, mivel eddig megoldott a vasúti közlekedés. Innen Szibérián keresztül vezetne az út Uelen-ig. Uelen a Bering-szoros partján lévő kis orosz település. Innen indulna a két kontinens összekötése az alaszkaiai Wales városáig. Itt ugyanúgy, mint az oroszországi partoknál, nincs korrekt infrastruktúra kiépítve. Ebbe a két városba legegyszerűbben repülővel tudunk eljutni. A legközelebbi város az amerikai oldalon, ahol már

megoldott a vasúti közlekedés, Fairbanks. A cél ennek a négy városnak az összekötése, melynek igen „apró” része a szoros áthidalása. Ez a vonal Oroszországban 3500 km, míg Alaszkában több mint 2000 km vasúti pálya megépítését jelentené, a szoros 102 km-es hosszával szemben. Óvatos becslések szerint a teljes projekt megvalósítása 80-100 milliárd dollárba kerülne. Igen nagy szám, azonban ha megnézzük az amerikai költségvetés 2009-es, vagy 2010-es hiányát, mely 1420, illetve 1294 milliárd dollár, egyből nem tűnik olyan nagynak. Amerika már a 70-es évek közepén belekezdett egy hasonló nehézségi körülményekkel bíró építkezésbe, mely a még északabbra lévő Prudhoe öbölből vezetett Valdez kikötővárosáig Fairbanksen keresztül a kőolajat és földgázt. Ekkor bebizonyosodott, hogy ilyen zord körülmények között nagyon nehéz, de nem lehetetlen az építkezés.

Be kell látnunk, hogy ezen az útvonalon a személyszállítás háttérbe szorulna, a teherszállítás lenne a legfőbb profil. Ennek megfelelően lenne kialakítva az alagút, mely emiatt nagy valószínűséggel vasúti alagút lesz. A szárazföldi útvonalon keresztül az alagút segítségével az árucseré sokkal hatékonyabb és gyorsabb lenne. Michael Prachensky osztrák mérnök egy olyan új közlekedési rendszer kidolgozásán dolgozik, amelynek elméleti éves kapacitása elérheti a 150 millió tonnát. Ennek a rendszernek az a lényege, hogy 10 másodpercenként indulnának olyan platformok, melyek nem is a síneken gurulnának, hanem a mágnes vasutakhoz hasonlóan lebegnének a sínek fölött, ezáltal jelentősen csökkenne a kocsik ellenállása (ECO-Trans). Ennek a technikának a továbbfejlesztése fűződik az osztrák mérnök nevéhez, hiszen különleges nehéz rakományok szállításra is alkalmasak lennének (akár 100-200 tonna). Ehhez mind az amerikai, mind az orosz oldalon megfelelő logisztikai központokat kellene létesíteni, melyek biztosítanák a teljes automatizálást. Ilyen logisztikai központokkal találkozhatunk a világ legnagyobb kikötőiben is.

2007 áprilisában Moszkvában az egyik konferencia témája a következő volt: a világnak szüksége van a Bering-alagútra. A résztvevők között volt több magas rangú képviselő az orosz Szövetségi Hatóságtól, az érintett régiók kormányzói, az Orosz Tudományos Akadémia professzorai, japán és koreai mérnökök. Alexander Granberg, az Akadémia egyik professzora a projekt előnyei között megemlítette, hogy a jelenlegi teljes vasúti forgalom, fölgáz- és kőolajszállítás 5%-át tudnák ezen a vonalon lebonyolítani. Óvatos becslések szerint ez a szám éveken belül elérheti akár a 40%-ot is. Bizonyításképpen az orosz Állami Vasút elnöke, Vladimir Jakunin 2007. április 10-én Putyin elnök jelenlétében bejelentette, hogy kiemelt prioritású feladatként kezelik a Yakutsktól a Bering-szorosig húzódó 3500 kilométer hosszú vasúthálózat megépítését.

Figyelemre méltó Dr. Jonathan Tennebaum 1996-ban készített tanulmánya, melynek címe: *Die Eurasische Landbrücke: Die Neue Seidenstraße als Motor weltweiter wirtschaftlicher Entwicklung* – tükörfordítása: Az eurázsiai szárazföldi híd: Az új selyemút, ami a motorja a világszerte létrejövő gazdasági fejlődésnek. A fejlődés egyik mozgatórugójának az Oroszország területén lévő, eddig még fel nem tárható nehézfém, kőolaj és földgázkészleteket látja. Szibéria kiemelkedő mennyiségű vasérc-, gyémánt- és aranykészletekkel rendelkezik, melyeket eddig nem tudtak megfelelő mértékben hasznosítani. Mivel jelenleg az orosz GDP fele 6 régióból származik, és ebben Szibéria nincs benne, ez egyenetlen területi fejlődéshez és egészségtelen gazdasági környezet kialakulásához vezet. Ezt a területnek a gazdaságba való bevonásával kívánják megakadályozni. Ez a vasútvonal építésével igen hamar megvalósulhatna, mivel az arany és gyémánt bányászatához rengeteg földet kell megmozgatni, és a vasút megépítésével nem kellene minden lelőhelyen feldolgozóegységeket létesíteni, csupán a bányát kellene működtetni.

A projekt komolyságát mi sem bizonyítja jobban, minthogy Maxim Bystrow, az Orosz Szövetségi Hatóság egyik fő tisztviselője biztosította a jelenlévőket, hogy a projektnek vonzó privát engedményeket adnak, és egyúttal bejelentette, hogy 120 millió dollárt bocsát a megvalósítási tanulmány elkészítésére.

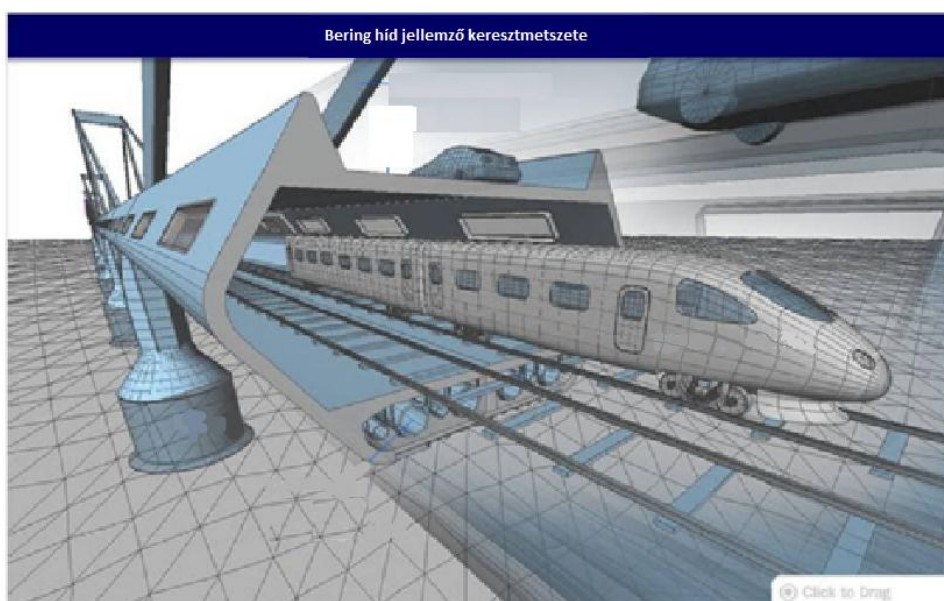
Ezt a hosszú bevezetést azért tartottuk célszerűnek, hogy világos legyen a számunkra az, hogy nem egy utópiáról beszélünk, hanem közgazdasági értelemben vett gazdaságos befektetésről, mely mind Amerika, mind Oroszország és Kína számára jelentős gazdasági növekedéssel járna.

4.3. Az összekötés lehetőségei

4.3.1. Híd a szoros felett ^[32]

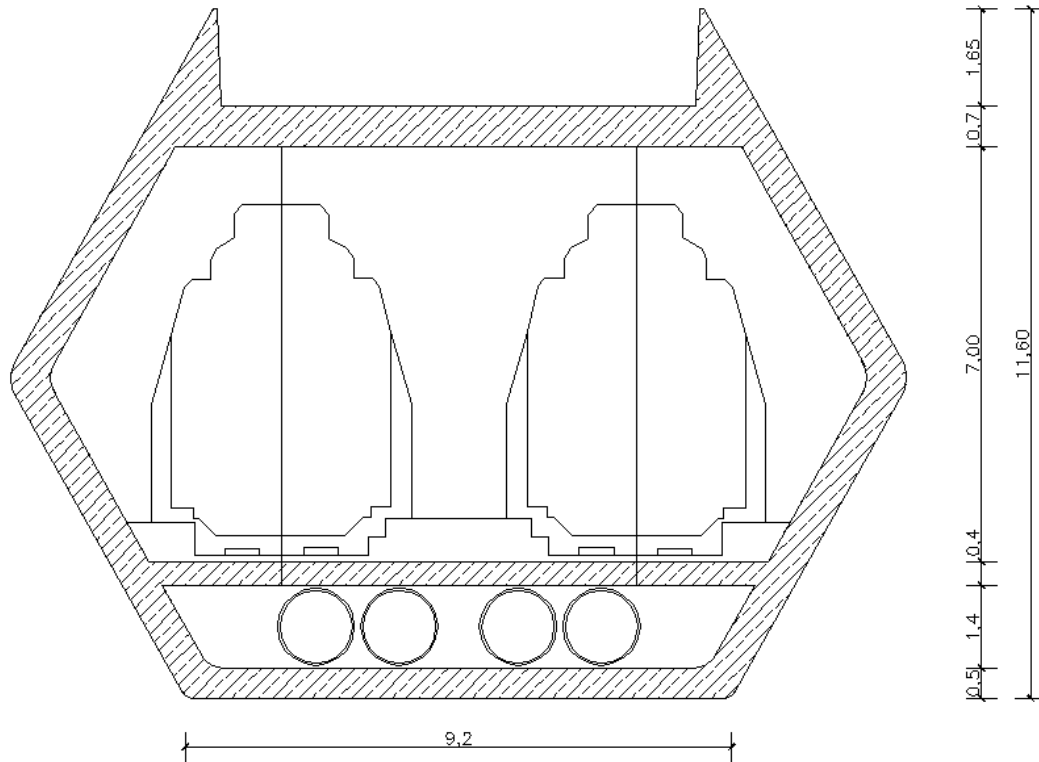
A legrövidebb szakasz Oroszország és Alaszka között 92 km. Ennek a távolságnak az áthidalása a legfontosabb része a tervezett vasúti projektnek. Ez többféleképpen megoldható, alagút- és hídépítéssel egyaránt.

A hídépítésről csak érintőlegesen beszélünk, mivel ennek a létjogosultsága az adott körülmények között igen csekély. Az egyik legnagyobb problémát az Északi-tengeren uralkodó időjárás okozza: az év nagy részében hatalmas tengeri viharok dúlnak a területen, az északi területekről betolódó jég romboló hatású és a hőmérséklet is nagyon alacsony. Ennek ellenére néhány merész mérnök egy monumentális hidat álmodott meg a szoroson való átjutásra. Azonban ez csak egy elképzelés, a megvalósítása valószínűleg teljesen lehetetlen. Hiába rendelkezünk minden olyan ismerettel, amellyel megépíthetnénk a hidat, az építési körülmények ezt lehetetlenné teszik. Elég csak a hídpillérek alapozására gondolni, melyeket a viharos Északi-tengeren kellene nagy pontossággal megépíteni mintegy 80 méteres mélységben. Ma erre még nincs lehetőség.



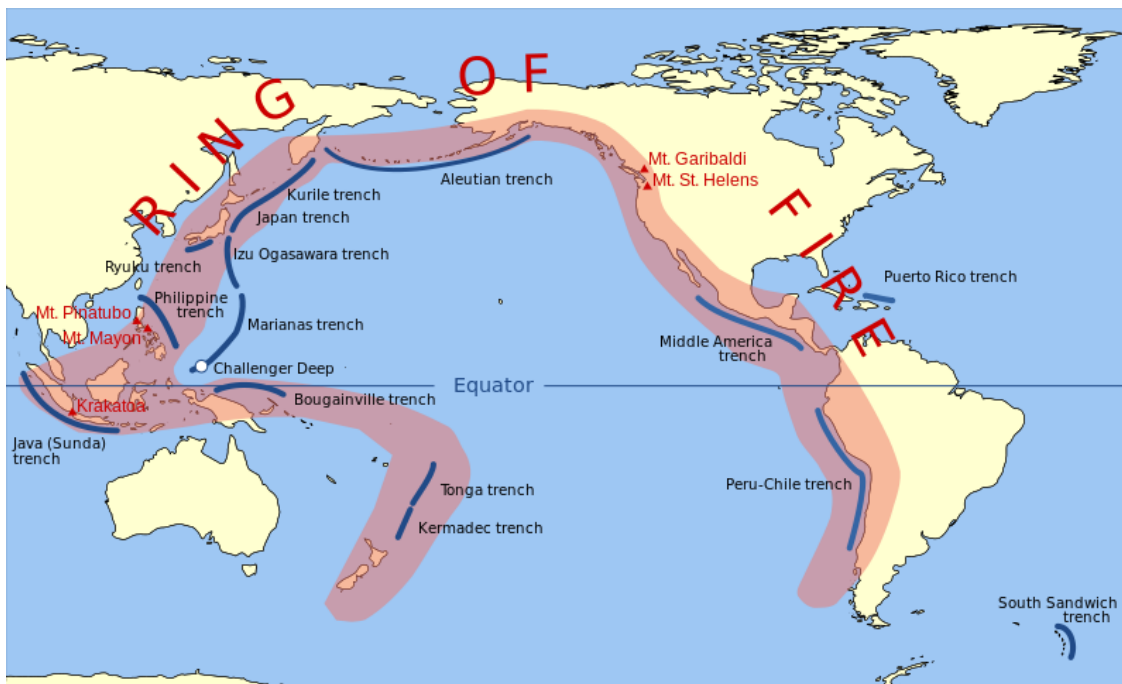
21. ábra: Egy elképzelt keresztmetszet

A tervezett keresztmetszet figyelemreméltó (21. ábra, 22. ábra). Három különböző szintből állna a híd. A legalsó szinten futnának a kőolaj- és földgátvezetékek, fölötté, a második szinten a vasúti közlekedés zajlana teljesen elzárva a vezetékektől, míg a harmadik, egyben legfelső szinten közúti közlekedés valósulhatna meg, ha az időjárás engedi.



22. ábra: A híd lehetséges keresztmetszete

Tekintettel arra, hogy a szoros a Tűzgyűrű (azaz egy szeizmikusan aktív zóna) közvetlen közelében helyezkedik el (23. ábra), komolyan számolni kell a földrengések kialakulásával. Hidakat ma már jól tudunk méretezni földrengésre, de a szeizmikus tevékenység jóval kedvezőtlenebb hatással van a felszín feletti létesítményekre, mint az alagutakra. Ennek oka, hogy hidak esetében sokkal nagyobb kilengést okoznak ezek a folyamatok. A szerkezet kialakításánál lehetőségünk van arra, hogy olyan duktilis és rugalmas szerkezeteket készítsünk, amelyek a földrengéseknek ellenállnak. A műtárgy nem dőlhet össze, de károsodása megengedett olyan földrengés hatására, melynek túllépési valószínűsége 50 év alatt 10%, illetve a szerkezet nem károsodhat jelentősen, ha a túllépési valószínűség 10 év alatt 10%.



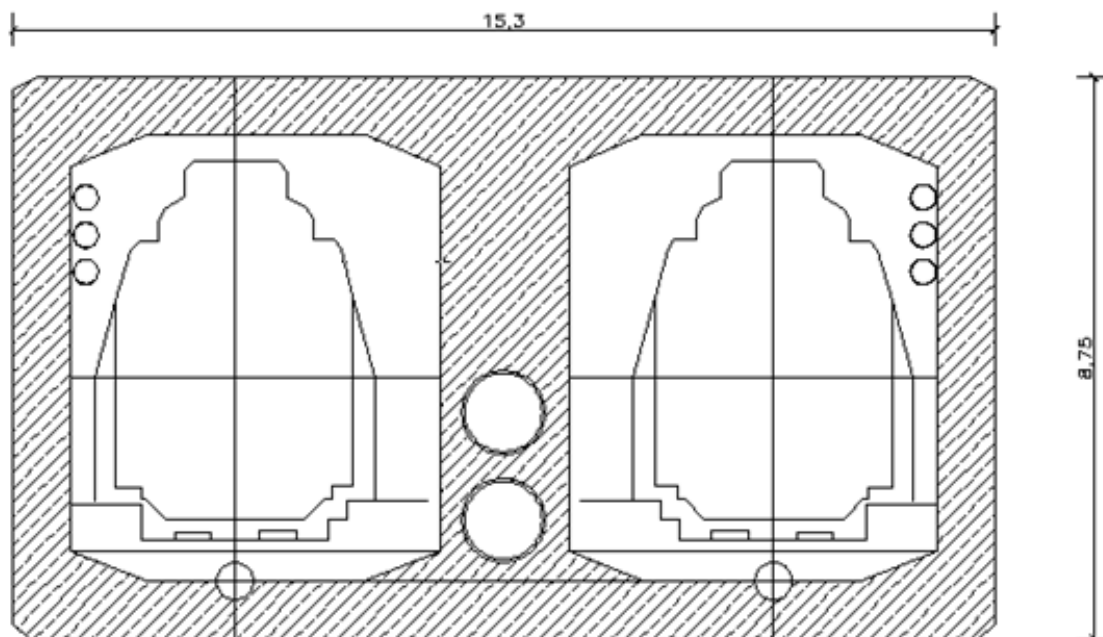
23. ábra: A tűzgyűrű

A szükségesség alapozás szempontjából ez a megoldás kedvezőbb. Híd építése esetén a feltárási munkák a majdani hídpillérek alatti területekre korlátozódnának, így ezt pontosabban és gazdaságosabban létre lehetne hozni. A különbség a híd és egy alagút feltárási munkái közt jelentős lenne.

4.3.2. Süllyesztett vagy elmerített úszó alagút a szoros alatt

Tenger alatti alagútépítés esetén három különböző építési módszer áll a rendelkezésünkre. Ezek a Törökországban is használt süllyesztett alagútépítési módszer, a Csatorna-alagút esetében alkalmazott fúrásos módszer és egy új, máig nem alkalmazott megoldás, az elmerített úszó alagutat telepítő módszer.

A szoros alatt nemcsak vasúti alagutakat, hanem közúti alagutakat is ki lehetne alakítani, ez azonban megkérdőjelezhető, hiszen így komoly szellőztető rendszert kell kiépíteni, és a hosszú alagútszakaszok a vezetőkre kedvezőtlen pszichológiai hatással lennének. A süllyesztéses módszert azokon a területeken gazdaságos és érdemes használni, ahol az alapkőzet nem alkalmas arra, hogy biztonságosan fúrásokat lehessen végezni a tengerek alatt. A technológia bemutatása az előző fejezetben már megtörtént, azonban néhány részletre szeretnénk kitérni az itteni alkalmazásával kapcsolatban.



24. ábra: A süllyesztett alagút lehetséges keresztmetszete

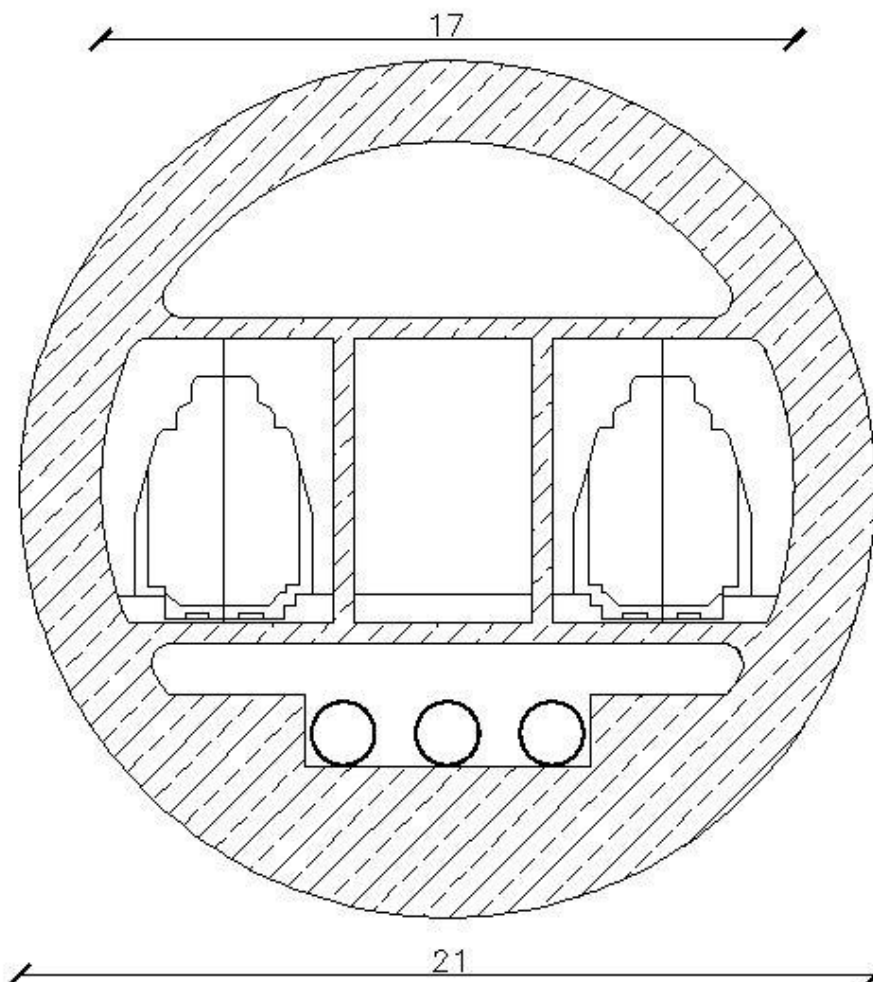
A süllyesztéses technológiát Hollandiában fejlesztették ki, ahol leggyakrabban zárt öblökben süllyesztették az alagút elemeit (24. ábra). Ma már nyílt tengeren is képesek akár 60 méter mélyre szegmenseket süllyeszteni, és ott pontosan összeilleszteni azokat, de napjainkig leggyakrabban olyan helyeken alkalmazták ezt az építési módszert, ahol az időjárási körülmények jobbak, mint a Bering-szorosnál. Ugyanazzal a problémával néznének szembe a kivitelezők, mint a hídpillérek alapozásánál. A Busan-Geoje alagút építésénél egy új időjárás-előrejelző algoritmus kidolgozására volt szükség, mely akár három nappal előre képes megjósolni az alig néhány centiméteres hullámokat. Végiggondolva azt, hogy az ilyen alacsony hullámok is komoly problémákat okozhatnak, ha hirtelen, előjelek nélkül érkeznek, akkor beláthatjuk, hogy a Jeges-tengeren még ilyen előrejelzések birtokában sem lehetünk maradéktalanul biztosak a dolgunkban. Ráadásul igen rövid építési idő állna a rendelkezésünkre, körülbelül 3 hónap évente, amikor nem jellemzőek az állandó viharok.

Látható, hogy az időjárási körülmények mind a szegmensek vontatását, mind azok lesüllyesztését roppantul megnehezítik, talán lehetetlenné is teszik. Mindazonáltal elképzelhető, hogy a jövőben birtokunkban lesz egy olyan technológiai tudás, hogy a szárazdokkban elkészült elemeket kellő mélységben, ahol a felszíni időjárás és a jégtakaró kedvezőtlen hatása már nem érezhető, víz alatti vontatással szállítják és engedik le a helyükre.

Ezen felül alkalmas helyet kell találni a szárazdokk telepítésére is, ahol az elemeket le fogják gyártani. Fontos szempont, hogy ez az alagút végleges helyétől ne legyen túl nagy távolságban, így a szállítás ne tartson túl sokáig, és az időjárási körülmények megfelelőek legyenek a gyártásra, akár a dokk fedetté tétele által is (bár az elemek mérete miatt ez hatalmas területet érint).

Lesüllyesztés után az elemek a tengerfenékre fekszenek fel. A megfelelő tervezéshez így elkerülhetetlen, hogy az alagút tengelye alatt végig pontos ismereteink legyenek az ágyazat talaját és az alatta lévő kőzeteket illetően. Ezt ultrahangos, szeizmikus és mágneses elven működő eljárásokkal vizsgálhatjuk, de feltétlenül szükségesek a fúrások, mintavételek is. Ezt a vízmélység és az alagút hosszúsága megnehezítik.

Az elmerített úszó alagutak hasonlóak a süllyesztett alagutakhoz (25. ábra). Az elemek ugyancsak egy szárazdokkban épülnek meg, aminek a korábban taglalt követelményeket kell kielégítenie. A vontatás lehetősége itt is függ az időjárástól. A különbség az előző módszertől, hogy itt az alagút nem folytonosan fekszik fel a tengerfenékre, hanem horgonyokkal van rögzítve hozzá. Így, a hídépítéssel megoldáshoz hasonlóan elegendő a horgonyok rögzítési helyein pontosan ismerni az altalajviszonyokat, azonban a pilléreknél sűrűbb beosztásban helyezkednek el a pászmák.



25. ábra: SFT lehetséges keresztmetszete

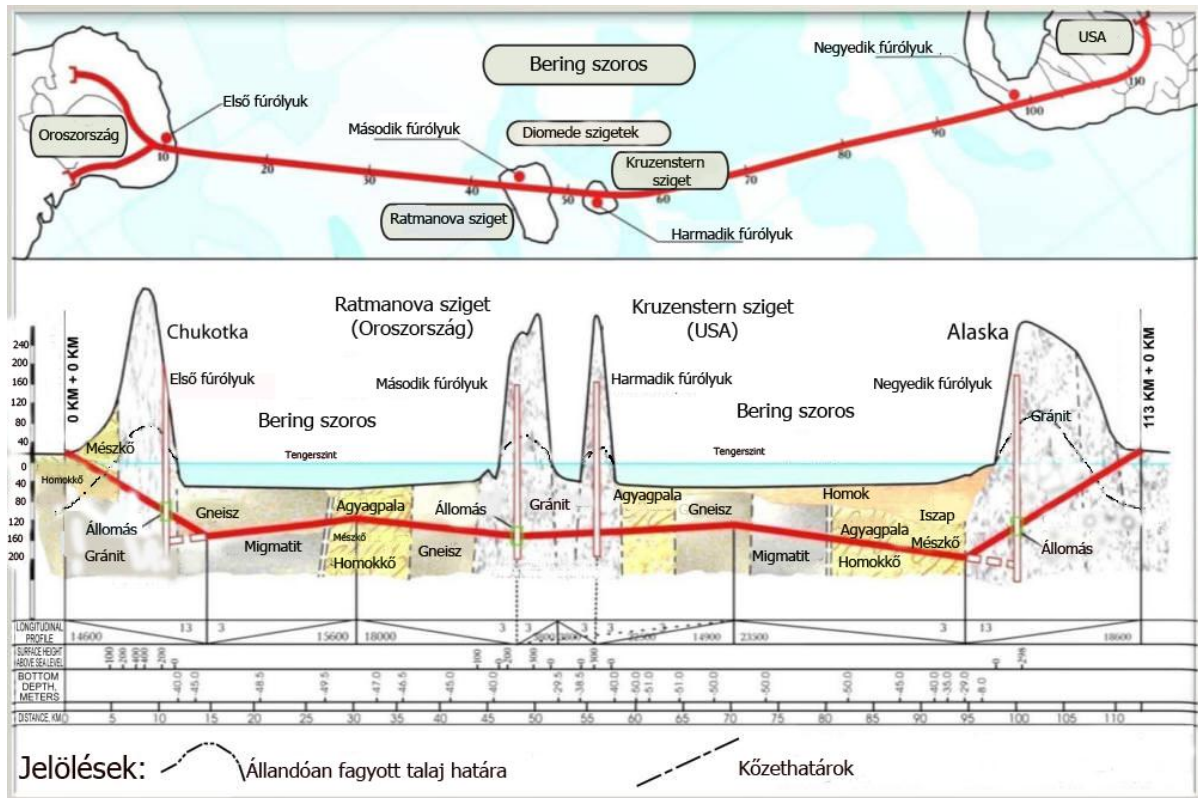
Itt a vasúti forgalom egy alagútban futna, az irányokat azonban elválasztanák egymástól. Az alagút kör alakú szegmensekből épülne fel. A holtterekben vezetnék az olaj- és gázvezetékeket, illetve a szervizjárat és a gépészeti berendezések is itt helyezkednének el.

4.3.3. Fúrt alagút a szoros alatt ^[29]

A második alagútépítési módszer a már ismert és gyakran alkalmazott pajzsos építési mód. Ezt alkalmazták a Csalagút és a Szeikan-alagút esetében is.

Ha megnézzük a szoros hossz-szelvényét (26. ábra), akkor láthatjuk, hogy ez talán a legcélszerűbb megoldás. Az alkotó kőzetek, a gránit, a mészkő, a gneisz, és az agyagpala. Ezek

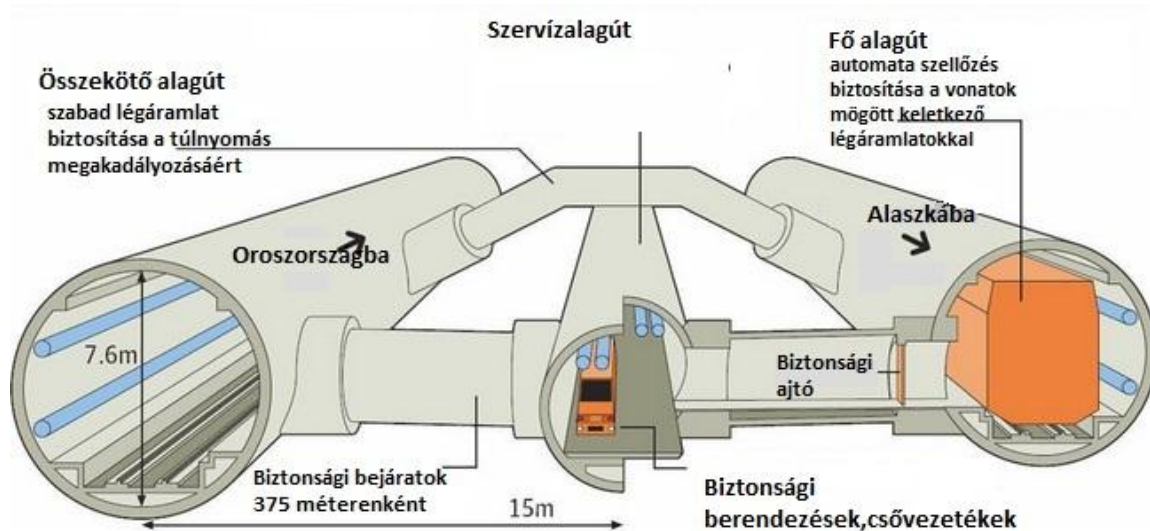
többnyire meglehetősen kemény, nehezen fúrható kőzetek, azonban nagy részük vízzáró. A keménységük hátrány és előny is egyszerre. Előny, mert megtámasztás nélküli fejtésre van lehetőség, és a víznyomással sem kell számottevően foglalkozni, hátrány viszont abból a szempontból, hogy nagyon nehezen fúrhatóak, inkább csak robbantással fejthetőek.



26. ábra: Bering-szoros hossz-szelvénye

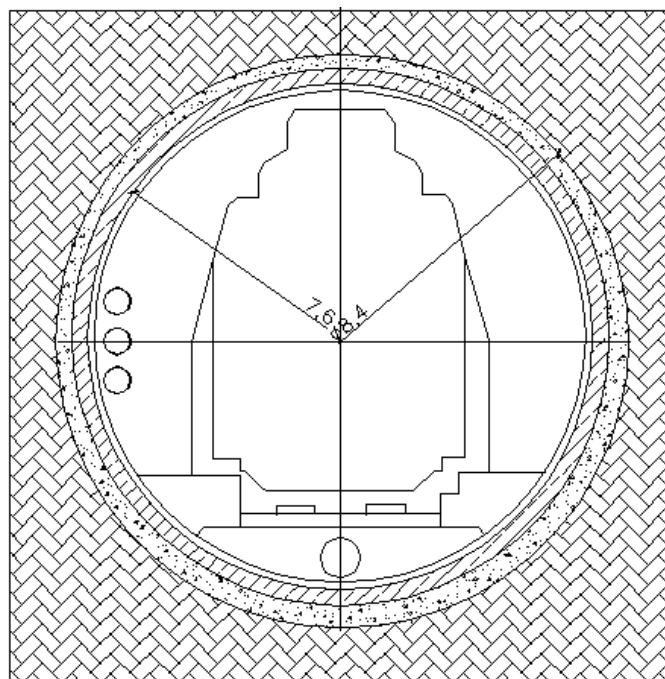
A lehető legpontosabban előzetes geológiai és hidrogeológiai feltárásokat kell végezni, hogy a lehető leggazdaságosabb technológiát, vagy technológiák keverékét lehessen alkalmazni. A nyomvonal megfelelő kijelöléséhez pontosan kell ismerni a rendelkezésre álló kőzetkörnyezetet. A pontos kőzetkörnyezet ismerete nélkül már egy japán cég ajánlatot is tett, melyben 60 millió \$/km-es áron kifúrná az alagutat, bár ez így elég merész kijelentésnek tűnhet. A gneiszben és gránitban jelentős problémát okozhat a magas abrazivitás. Ez a vésőkre, fúrófejekre és felszedőkre olyan jelentős hatással lehet, hogy akár naponta kell javítani, vagy szükség esetén cserélni őket. Ilyen kőzetekben lehet sikeresen alkalmazni a robbantásos vágathajtást, azonban a lehetséges vízbetörésekre ebben az esetben is kellő figyelmet kell fordítani, és ha szükséges előinjektálást alkalmazni. Ez azt jelenti, hogy a töredezett kőzetekbe előre meghatározott kis átmérőjű fúrásokon keresztül nagy nyomáson cementet juttatnak be, ezáltal megszilárdítják és homogenizálják a kőzetkörnyezetet.

A lehető leggyorsabb építés érdekében a fejtést négy fúrólukból kezdenék el. Az első az oroszországi oldalon Uelen mellett, a második és harmadik a Ratmanova és Kruzenstern szigeteken, míg a negyedik az alaszki Wales-ben lenne. A négy fúrólukra a kitermelt anyag minél gyorsabb elszállítása miatt van szükség. Amennyiben TBM-mel történhetne az építés, a munkálatok becsülve tíz évet vennének igénybe. Hagyományos, bányászati módszerrel ez nagyon megnövekedne, akár több évtizedig is eltarthatna.

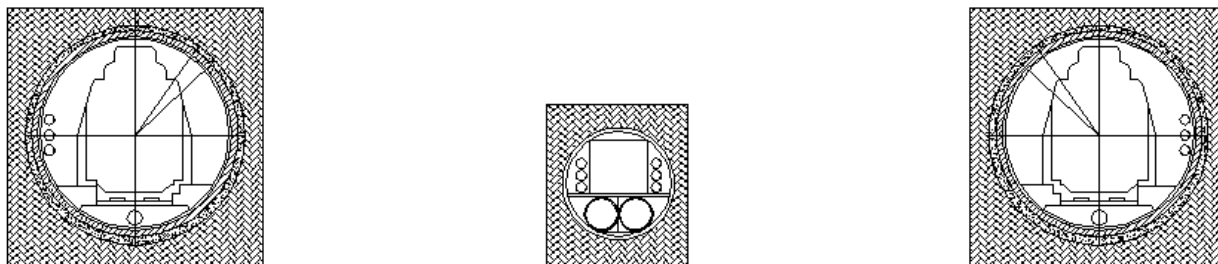


27. ábra: Tervezett fűrt alagút nézete

Terv szerint először egy feltáró alagutat fűrnak (27. ábra), mellyel a pontos geológiai kőzetkörnyezetet térképeznék fel, hiszen a már korábban leírtak miatt fűrés nehezen végezhető. Ennek az alagútnak az átmérője előreláthatólag négy méter lesz, mely később a szervízalagút szerepét is betöltené. Ebben az alagútban lenne elhelyezhető az 1,22 méter átmérőjű csővezetékpár, melyekben kőolajat és földgázt szállítanának. Ezeknek a főalagutaktól (28. ábra) való elkülönítésére a minél nagyobb biztonság elérése miatt van szükség. A pontos információk birtokában a szervízalagúttal párhuzamosan a két főalagút fejtését is elkezdenék (29. ábra). Ezen alagutakban alakítanák ki az irányonként elválasztott vasúti forgalmat. Átmérőjük körülbelül 8 méter lenne a megfelelő űrszelvény biztosítása végett. Az így elkészített alagút teljes hossza 113 km. A szellőzést összekötő alagutakkal biztosítanák, melyek a három állomásnál a felszínnel összeköttetésben vannak a friss levegő biztosítása miatt.



28. ábra: A vasúti alagút keresztmetszete



29. ábra: A fő járatok és a szervizalagút egymáshoz viszonyított helyzete

Három tervezett mélyponttal rendelkezik az alagút, melyekből biztosítani kell a bekerült víz elszállítását, kiszivattyúzását. Mint már említettük, a kőzetek nagy része vízzáró, azonban az eltérő kőzetek találkozásánál és a különböző tagoltságoknál víz juthat az alagút keresztmetszetébe. Azért, hogy a szerkezetet ne a teljes vízoszlop víznyomása terhelje, megengedhető némi víz bejutása az alagútba. Emiatt egy szivárgó rendszer kiépítése szükséges, mely a mélypontokon összegyűjti a bekerült vizet, és onnan szivattyúk segítségével elvezetik azt.

Az előző két megoldást, a híd létrehozását és a süllyesztéses alagútépítést leginkább az időjárási tényező veszélyeztette. A fúrásos módszer legnagyobb előnye, hogy az időjárástól függetlenül is lehetőség van az alagutak építésére, hiszen mélyen a tengerfenék alatt folya a munka. Emiatt nagy valószínűséggel ezzel a megoldással hozzák létre a Bering-szoroson átívelő, kontinensek közti kapcsolatot.

5. Összefoglalás

Dolgozatunkban a tenger alatti alagutakkal foglalkoztunk, melyek révén addig távolinak számító pontokat kapcsoltunk össze. Megnéztünk helyi érdekelttségű és nemzetközi érdekeket kiszolgáló alagutakat is.

Az első fejezetben bemutattuk az alkalmazható technológiákat, melyek a fúrásos és a süllyesztéses módszerek, illetve a lebegő alagút építése. Ezeket eddig megépült, illetve tervezett létesítményeken keresztül mutattuk be. Fúrásos technológiával épült a Csatorna-alagút és a Szeikan-alagút, és így tervezik a Gibraltári-szoros alatti alagút megépítését is. Süllyesztéssel készítették a Marmaray és a Busant Geojeval összekötő alagutakat. Ezidáig elmerített úsztatott alagút létrehozására még nem került sor, de a jövőben esetlegesen megépülő Transzatlanti alagút így készülne.

A tervezést és a kivitelezést befolyásoló nehézségekkel is foglalkoztunk, azonban ezeket csak érintőlegesen vizsgáltuk, kivéve a tüzesetek és a földrengés okozta problémákat.

Dolgozatunk zárásaként korunk egyik lehetséges építési vállalkozását, az Oroszországot az USA-val összekötő, Bering-szoroson átívelő kapcsolattal foglalkoztunk. Sorba vettük és előnyeik, illetve hátrányaik szerint vizsgáltuk egy híd építésének és a három alagúttípus építésének lehetőségét. Ennek eredményeként arra a nézőpontra jutottunk, hogy híd nagy valószínűséggel nem fog épülni, és a különböző alagutak közül a fúrt alagút tűnik legkönnyebben kivitelezhetőnek. A Bering-alagút megépülésével a két nagyhatalom gazdaságilag kedvezőbb kapcsolatot tud majd kialakítani, egy vasútvonal kiépítésével pedig a közlekedés is drasztikusan leegyszerűsödik a két kontinens között.

Látható, hogy a tenger alatti alagutak révén a Földet átszövő közlekedési hálózat komplexitását tovább növelhetjük. Ezek a létesítmények rendkívül költséges beruházások révén születnek meg, azonban a befektetett pénz és munka idővel megtérül. Remélhetőleg a jövőben ezeknek az alagutaknak gyarapodik a számuk és a társadalom is beismeri fontosságukat.

6. Források

- [1] Anatol Johansen - *Dieser Zug schwebt auf einem Kissen*
- [2] Casper Paludan-Müller, Jørgen Kampmann, Michael Tonnesen, Inger Birgitte Kroon - *Design of the Busan Geoje immersed tunnel for accidental events and extreme loads*
- [3] Christian Ingerslev - *Immersed and floating tunnels*
- [4] Civil Engineering Seminar – *Submerged Floating Tunnels*
(<http://civilenggseminar.blogspot.hu/2011/09/submerged-floating-tunnels.html>)
- [5] Discovery Channel - *A Csalagút*
- [6] Discovery Channel - *A Transzatlanti alagút*
- [7] Dr. Helmut Böttiger - *Die Neue Seidenstrasse*
- [8] Dr. Jonathan Tennenbaum - *Eurasische Landbrücke*
- [9] E. I. R. - *Die eurasische Landbrücke* (<http://www.eirna.com/html/reports/eurasiad.htm>)
- [10] E. I. R. (www.solidaritaet.com)
- [11] Fehérvári Sándor, Dr. - *Alagúttüzek hatása a beton falazatra* (Vasbetonszerkezetek magazin 2007/2)
- [12] Fehérvári Sándor, Dr. - *Az alagúttüzek természetéről* (Vasbetonszerkezetek magazin 2007/1)
- [13] Fehérvári Sándor, Dr. - *Betonösszetevők hatása az alagútfalazatok hőtűrésére* (PhD értekezés)
- [14] Future Timeline - *Transport & Infrastructure* (<http://www.futuretimeline.net/subject/transport-infrastructure.htm>)
- [15] G. Meinhardt ir., R. M. W. G. Heijmans ir. - *The off-shore immersed tunnel in the Busan-Geoje Fixed Link project in South Korea*
- [16] H. Belkaya, Dr. I. H. Ozmen, Dr. I. Karamut - *The Marmaray Project: Managing a Large Scale Project with Various Stake Holders*
- [17] InterBering (www.interbering.com)
- [18] Jose´ Mari´a Pliego - *The Gibraltar Strait tunnel. An overview of the study process*
- [19] JR-Hokkaido Hakodate Branch – *Seikan Tunnel Knowledge*
(http://jr.hakodate.jp/global/english/train/tunnel/tunnel_omosiro.htm)
- [20] Klados Gusztáv - *A La Manche-alagút építése magyar szemmel*

- [21] M.P. Barry - *Advancing the Bering Strait Tunnel Project in the United States and Canada*
- [22] Marmaray (<http://marmaray.com/>)
- [23] Metró 4 – *Az alagútépítés* (http://www.metro4.hu/hogyanepul_alagutepites.php)
- [24] Michael Prachensky - *Neuestes intelligentes Transportsystem für die Bering-Straße verbindet die Kontinente Sibirien und Alaska*
- [25] National Geographic - *Alagút egy elveszett világba*
- [26] National Geographic - *Autópálya tenger alatt*
- [27] O. Kiyomiya - *Earthquake-resistant Design Features of Immersed Tunnels in Japan*
- [28] Pierre-Jean Pompée - *Channel Tunnel: Tunnels construction*
- [29] Posgay György - *Pajzsos alagútépítés*
- [30] RitchieWiki – *Gibraltar Tunnel* (http://www.ritchiewiki.com/wiki/index.php/Gibraltar_Tunnel)
- [31] SketchUkation - *T.A.T (TransAtlantic tunnel)*
(<http://sketchucation.com/forums/viewtopic.php?f=81&t=34440#wrap>)
- [32] Tom Ricci - *The ultimate engineering challenge*
- [33] Tunneling and Underground Space Technology - *Submerged Floating Tunnels* (1993, 8. kötet, 2. szám)
- [34] Web Japan – *Seikan Submarine Tunnel* (<http://web-japan.org/atlas/architecture/arc02.html>)
- [35] Wikipedia – *Channel Tunnel* (http://en.wikipedia.org/wiki/Channel_Tunnel)
- [36] Wikipedia – *Csatorna-alagút* (<http://hu.wikipedia.org/wiki/Csatorna-alag%C3%BAt>)
- [37] Wikipedia – *Seikan Tunnel* (http://en.wikipedia.org/wiki/Seikan_Tunnel)
- [38] Wikipedia – *Tűzgyűrű* (<http://hu.wikipedia.org/wiki/T%C5%B1zgy%C5%B1r%C5%B1>)
- [39] Zeynep Buket, Dr. - *Marmaray Project*