



Tudományos Diákköri Konferencia

Mérnökgeológia, geotechnika és közlekedésépítőmérnöki szekció

Az alagutak állékonyság-vizsgálata a kőzetkörnyezet geológiai szilárdsági
indexének és szeizmikus terhelésének viszonyában

Készítette: Füzesi Ferenc Ferdinánd
MSc, Építőmérnöki hallgató

Konzulens: Dr. Bögöly Gyula
Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, Adjunktus

Budapest, 2019

Tartalom

Tartalmi kivonat	2
1. Bevezetés.....	3
2. A földrengésekkel kapcsolatos tények áttekintése	3
2.1. A földrengések fizikai paraméterei.....	4
2.2. A földrengések veszélyei globális és Magyarországi viszonylatban.....	8
2.3. Az alagutak földrengés veszélyeztetettsége	10
2.3.1. Esettanulmányok	10
3. A számítások módszertana	12
3.1. Geológiai Szilárdsági Index.....	12
3.2. Módosított Hoek-Brown törési feltétel.....	12
3.3. Szeizmikus terhelés	13
3.4. Állékonyság számítása	14
3.5. Vonalmenti támasz elhelyezése.....	14
4. A vizsgált modell felépítése és eredményei	15
4.1. A modell bemenő adatai	16
4.2. A szeizmikus terhek felvétele.....	17
4.2.1. 0,15 g pozitív függőleges és negatív vízszintes gyorsulás.....	18
4.2.2. 0,15 g negatív függőleges és pozitív vízszintes gyorsulás.....	18
4.2.3. 0,2 g pozitív függőleges és negatív vízszintes gyorsulás.....	19
4.2.4. 0,2 g negatív függőleges és pozitív vízszintes gyorsulás.....	20
4.2.5. 0,3 g pozitív függőleges és negatív vízszintes gyorsulás.....	20
4.2.6. 0,3 g negatív függőleges és pozitív vízszintes gyorsulás.....	21
4.3. A kőzetkörnyezet szilárdsági jellemzőinek és a szeizmikus terheknek hatása az alagút állékonyságára	22
4.3.1. GSI = 80 eset.....	23
4.3.2. GSI = 55 eset.....	25
4.3.3. GSI = 30 eset.....	28
5. Eredmények kiértékelése.....	32
6. Összefoglalás és kitekintés.....	36
Irodalom jegyzék.....	38
Ábrajegyzék	39
Táblázatjegyzék.....	40

Tartalmi kivonat

Ezen értekezés egy specifikus mélyépítési műtárgy (alagút) vizsgálatáról szól. A vizsgálat tárgya egy fiktív alagút, és annak kőzetkörnyezeti tulajdonságainak hatása az alagút mechanikai viselkedésére. A vizsgálat során fő szerepet kap a XX. század végén hangsúlyossá vált kérdés; a földrengés, és ennek hatásai. A másik lényeges és elengedhetetlen elem a fent is említett kőzetkörnyezet anyagi tulajdonságai.

A dolgozat elkészítéséhez felhasználtam a rendelkezésre álló szakirodalmi és módszertani anyagokat, amely alapján egy végeselemes program (*Rocsience, RS2 - 2019*) segítségével modelleztem a fiktív alagutamat. A modellezés során meg kellett alkotnom a kitűzött két változónak (szeizmikus teher, és kőzetmechanikai tulajdonságok) megfelelő számú variációját, amely elegendő információhoz juttat abban a kérdésben, hogy:

egy alagút állékonysága hogyan változhat a kőzetkörnyezet tulajdonságai és a szeizmikus teher hatására?

A vizsgálat módszertani alapját egyik oldalról az alagutak állékonyságának vizsgálata a kőzetekben (statisztikai alapon), Dowding és Rozen 1978-as értekezésének eredményei, a másik oldalról a Geológiai Szilárdsági Index és ezen mérőszámnak a kőzetmechanikai összefüggései (Hoek 1994, 2001) képezik.

Eredményeim tükrözik azt a feltevést, hogy az alagutak - mint az már az évezredek során bebizonyosodott - bizonyos mértékben passzívan reagálnak a szeizmikus terhekre. De ez a konklúzió nem minden esetben helytálló, mivel vizsgálataimat elsősorban a magyarországi viszonylatok (gyorsulás, kőzetkörnyezet) között modelleztem. A földrengések összeségéről pedig kijelenthető, hogy a kipattanásuk bármikor, bárhol esedékes lehet, hiszen a földkéreg folyamatosan változik.

1. Bevezetés

A mai geofizikai ismereteink alapján egyre több olyan probléma merül fel, ami például egy több mint 2000 ezer évvel ezelőtt épült alagút, templom, vagy pusztán lakóház tervezésénél és kivitelezésénél még nem volt ismert. Az ókori görög filozófusok a földrengés tényét még a föld alatt süvítő szelekkel magyarázták. A katasztrófát, mint földrengés egy „vegyes áldásnak” tekintették, amely folyamatosan fejleszthette az építkezési módjukat. Így az összedőlt, vagy megrongálódott műtárgyaik helyet egy újat, jobbat tudtak építeni. A XXI. század egyre profit és tartósság orientáltabb világában erre nem csak idő, hanem pénz sincs. Egy „jó” tervezési procedúrának minden lehetséges hatással számolnia kell. Ezért a következő értekezésben, a mélyépítési műtárgy tervezés egyik legfontosabb feladatáról, az alagút tervezésről lesz szó. Az alagútjaink földrengéssel szembeni tartóssága címszó alatt.

2. A földrengésekkel kapcsolatos tények áttekintése

A következő fejezetekben Völgyesi L. által készített Mérnökseizmológia c. tárgyhoz készült Egyetemi jegyzetét használtam fel. A földünk legfelsőbb rétegét alkotó földkéreg, szilárd rugalmas anyagokból áll. Azért viselkednek rugalmasan a szilárd testek mert, ha külső erő hat rájuk, amely deformációt akar okozni a testen, akkor belső feszültségek ébrednek benne, amelyek ezt akarják kiegyenlíteni. A test akkor nyeri vissza az eredeti paramétereit, ha ezek a külső erők megszűnnek. A deformáció közben a belső feszültségek munkát végeznek, amiből az következik, hogy belső energia halmozódik fel a testben. Ha az anyagban ezek a belső feszültségek meghaladják az anyag ellenállását, akkor az anyagban az összetartó erők megszűnnek. Az anyag tönkremegy mert, új energia minimumra törekszik. Az energiavesztést csak úgy érheti el az anyag, hogyha a benne lévő felhalmozódott energia átalakul. Az energia nagyrésze mozgási (kinetikus) energiává válik, emellett kis mértékű hőenergia is felszabadul.

A Föld közeiben mechanikai és tektonikai folyamatok által létrejött ilyen rugalmas energia van jelen. A felhalmozódott nagy feszültségek által a rugalmas alakváltozás először az elemi részecskékben jelentkezik. Ezeknek az elemi részecskéknek együttes változása vezet a végső deformációhoz. A rugalmas alakváltozást, plasztikus követi. Ha az anyag plasztikus teherbírása kimerül, abban az esetben törési zónák keletkeznek. A töréskor felszabaduló kinetikus energiák a véges tér miatt hullámmozgássá alakulnak át. Ezeket a hullámokat, földrengéshullámként ismerjük. A Föld belsejében a mértékadó külső erők a tektonikus

mozgásokból származnak. Ezen tektonikus mozgások által keletkezik a földrengések nagyrésze.

A keletkezés helyét a rengés hipocentrumának, fészkének nevezzük. A hullámok kipattanásának pillanatában a hullámok egy helyen tartózkodnak. Ezt a pontot fókusznek is nevezhetjük. Ha a hipocentrum helyét függőlegesen felvetítjük a föld felszínére, megkapjuk a földrengés epicentrumát. A földrengés fészekmélységét az epicentrum és a hipocentrum közötti távolságból kaphatjuk meg.

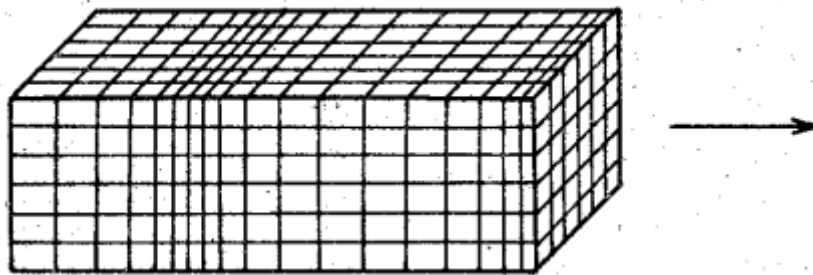
2.1. A földrengések fizikai paraméterei

A földrengések vizsgálatánál a legrelevánsabb paraméter a földrengés hullámokban keresendő. A földrengés hullámok terjedését az egyszerű hullámegyenlet írja le.

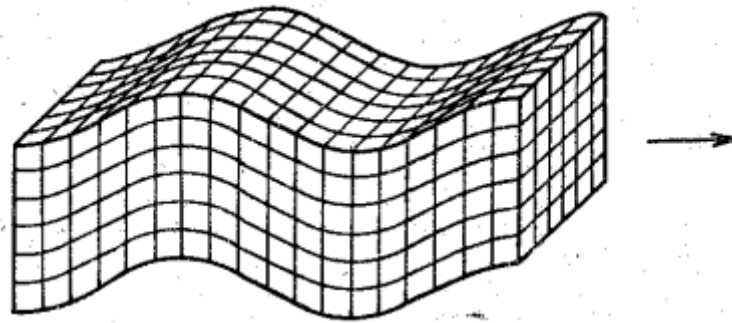
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

ahol, az u a hullámfüggvény, vagy elmozdulás-függvény, a v pedig a kérdéses rugalmas hullám terjedési sebessége az adott kőzetben.

A hullámegyenlet megoldásából az következik, hogy a kőzetben kétfajta térhullám terjedhet. Ezek lehetnek nyomási, azaz longitudinális vagy nyírási, transzverzális hullámok.



1. ábra Longitudinális hullámok (P) terjedése rugalmas szilárd kőzetben



2. ábra Transzverzális hullámok (S) terjedése rugalmas szilárd közetben

A longitudinális hullámok (1. ábra) esetén, a hullámot közvetítő közeg elemi részei a hullámterjedés irányában, míg a transzverzális hullámok (2. ábra) erre merőlegesen mozognak.

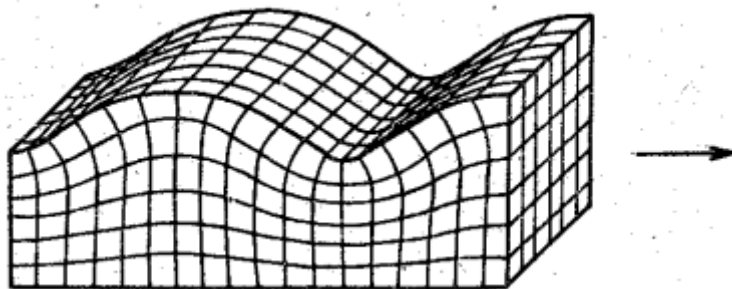
A két térhullám terjedési sebessége eltérő:

$$v_{long} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\varrho}} = v_p; \quad v_{tr} = \sqrt{\frac{\mu}{\varrho}} = v_s;$$

ahol, ϱ a közeg sűrűsége, λ és μ pedig a Lammé-féle rugalmassági állandók (nyírási - μ , rugalmassági - λ). A nyírási Lammé-féle rugalmassági állandó folyadékokban 0. Tehát a transzverzális hullám képletéből az következik, hogy abban a közegben a másodlagos (transzverzális) hullám nem terjed.

Nemcsak a rugalmas test belsejében terjednek a térhullámok, hanem a felszínén is. Ezt a hullámterjedési módot, felületi hullámnak nevezzük. A felületi hullámok által mozgásba hozott részecskék amplitúdója a mélység hatására (a Föld belseje felé), rohamosan csökken. Ezen hullámok kialakulhatnak bármely szeizmikus határfelületen (mechanikai tulajdonságváltás).

Rayleigh jegyezte le elsőként a hullámegyenlet alapján, a felületi hullámok jellemzőit.

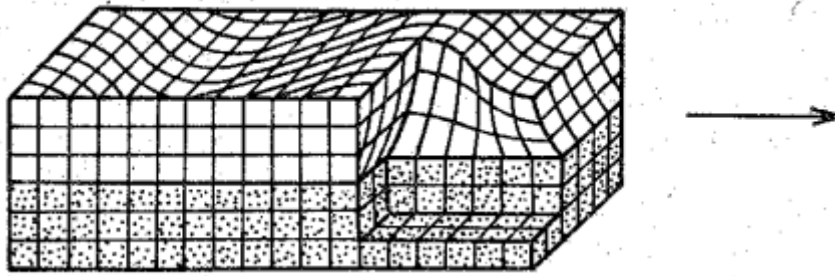


3. ábra Rayleigh hullámok terjedése rugalmas szilárd közetben

A szeizmikus határfelületeken a hullámok megtörnek és különböző interferenciák keletkeznek. Ezen a határfelületen kétfajta felületi hullám keletkezhet transzverzális hullámokból. Ezek a hullámok mozgásukat tekintve lehetnek vertikális (SV) illetve horizontális (SH) jellegűek. A Rayleigh-féle hullámok (3.ábra) a primer és az SV hullámok találkozásából keletkeznek.

A Rayleigh hullámok amplitúdója láthatóan nagyobb, mint az eddig vizsgált esetekben, azaz a hullámegyenlet alapján a nagy amplitúdóhoz kisebb terjedési sebesség tartozik.

Ha a felszínen két különböző rugalmasságú réteg van, abban az esetben jöhet létre az úgynevezett Love felületihullám (4. ábra). Love elmélete szerint, az ilyen típusú felületi hullámok az SH hullámok interferenciájából jönnek létre. A hullám amplitúdója és terjedése a mélység és a frekvencia függvényében csökken.



4. ábra Másodlagos (Love) hullámok terjedése kőzetekben

A kőzetek tulajdonságától függően a bennük terjedő hullámok sebessége is változik. A hullám terjedési sebességét legfőképpen az anyag sűrűsége és rugalmassági tényezői határozzák meg. Ezen a két tényezőn kívül a hullám terjedési sebességét még nagyban befolyásolja a hőmérséklet, a nyomás és a kőzet felépítése.

Nagyságrendi tájékoztatás céljából az alábbi táblázatban szeretném bemutatni néhány jellemző kőzet primer hullámának terjedési sebességét:

1. táblázat Kőzetek primer hullámainak terjedési sebessége

kőzet	sebesség [m/s]
száraz homok	100 - 600
nedves homok, kavics	200 - 2000
agyag	1200 - 2800
mészkö, dolomit	2000 - 6250
víz	1430 - 1590
gránit	5600
diorit	6400
gabbró	6800
bazalt	5400
peridotit	7400

A Föld belsejében lezajló energiafelszabadulást igen nehéz, szinte lehetetlen pontosan mérni. Ezen felszabaduló energia mértékének közelítésére Richter és Gutenberg kidolgozott egy helyettesítő mennyiséget. Richter a felszabaduló energiát ún. magnitúdóban mérte, ami egy mértékegység nélküli szám, amely az epicentrumban felszabaduló energia nagyságára jellemző.

A következő egyenlet segítségével minden szeizmológiai obszervatórium meg tudja ezt az energia mennyiség mérőszámot (magnitúdót) határozni.

$$M = \log \frac{A}{T} + B + C(\Delta, h)$$

ahol,

- A és T a P vagy S hullám első beütésének amplitúdója és periódusa,
- B a szeizmológiai obszervatóriumra jellemző konstans,
- $C(\Delta, h)$ pedig az epicentrális távolságtól és a fészekmélységtől függő érték.

Ha a magnitúdó kisebb mint 6 akkor kisméretű, 6 és 7 között közepes, a 7-nél nagyobb értékűeket pedig nagyméretű rengésnek nevezzük. Az évek során, az eddigi legnagyobb regisztrált földrengés sem haladta meg a 10-es magnitúdót. A szeizmológiai obszervatóriumok előtti idők földrengéseire csak következtetni tudunk. A magnitúdó alapján vissza számolt energiákat az alábbi kapcsolat jellemzi.

$$\begin{array}{ll} M = 3 & E = 10^9 \text{ J} \\ M = 5 & E = 10^{12} \text{ J} \\ M = 7 & E = 10^{15} \text{ J} \\ M = 9 & E = 10^{18} \text{ J} \end{array}$$

2.2. A földrengések veszélyei globális és Magyarországi viszonylatban

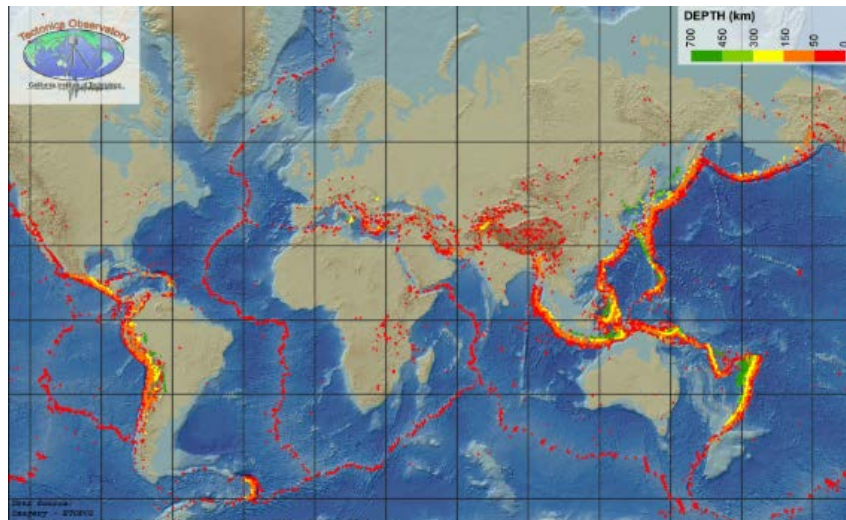
A földrengések jellemzően a szeizmikusan aktív területeken pattannak ki. A Földön a szeizmikusan aktív területek a teljes bolygóra vetítve viszonylag kis kiterjedéssel rendelkeznek. A kisméretű ($M < 6$) földrengések az aszeizmikus területeken is előfordulhatnak, azonban ezek valószínűsége kicsi. A földrengések időbeli gyakorisága a földrengéskor felszabaduló energia mértéke szerint nem egyenletes. A kisebb földrengések nagyobb valószínűséggel pattannak ki, mint a nagy volumenű rengések. A Földön évente előforduló földrengések összenergiája kb. 10^{18} Joule. Ennek az energiának nagy részét az évente kipattanó 1-2 db erős földrengés adja. A következő táblázatban (2. táblázat) bemutatom a földrengések során felszabaduló energia mennyiségét és azok gyakoriságát.

2. táblázat A földrengések osztályozása elfordulás és energia felszabadulás alapján

Energia [J]	Rengések száma /év	Összenergia [J]
$10^{17} - 10^{18}$	1	10^{18}
$10^{15} - 10^{17}$	10	10^{17}
$10^{13} - 10^{15}$	100	10^{16}
$10^{11} - 10^{13}$	1000	10^{15}
$10^9 - 10^{11}$	10000	10^{14}
$10^7 - 10^9$	100000	10^{13}

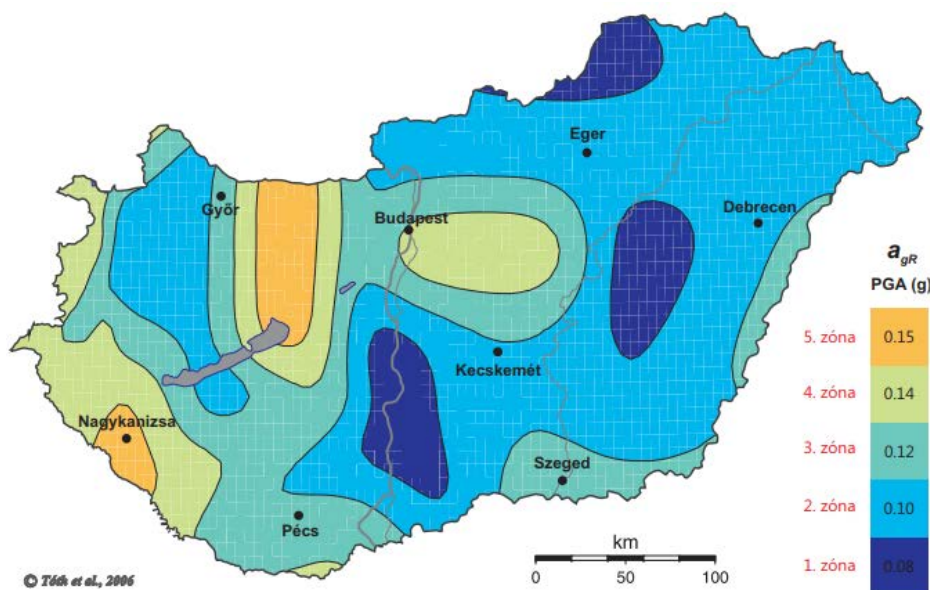
A Földön a legaktívabb szeizmikus zónák, a tektonikai lemezek találkozásánál alakulnak ki. A legnagyobb földrengések a Csendes-óceáni-lemez peremén alakulnak ki, mikor az a kontinentális lemezek alá bukik. Ezen tektonikai lemez peremét hívjuk Tűzgyűrűnek. A Tűzgyűrűben kipattanó földrengések az alábbi országokat érintik leginkább: Kína, Chile, Peru, Japán és az Indonéz szigetvilág. Az erős földrengések ezen kívül még bármely nagyobb és kisebb tektonikai lemez találkozásánál alakulhatnak ki pl.: Himalája környéke (Indiai lemez – Eurázsiai lemez), Olaszország és a Balkán (Afrikai lemez – Eurázsiai lemez).

Érdekes képet kapunk a rengések földrajzi eloszlásáról, ha hosszabb időn keresztül meghatározzuk valamennyi jelentősebb földrengés epicentrumát és ezeket térképen ábrázoljuk.



5. ábra Globális földrengés eloszlás térképe

Magyarország területe aszeizmikusnak tekinthető, miután a legnagyobb eddig előfordult rengés Richter-magnitúdója sem haladta meg a 6-os értéket. Ámbár Magyarországon az elmúlt évszázadban 10 olyan földrengés is volt, amely nagyobb felszíni kárt okozott.



6. ábra Magyarország szeizmikus zónatérképe EUROCODE 8 szerint

A térképen (6.ábra) az azonos szeizmikus intenzitású helyeket ún. *izoszeiszta* vonalak kötik össze. Az izoszeiszta vonalak elhelyezkedését a hazánkban előfordult nagyobb földrengések határozzák meg pl. az 1851. július 1.-i komáromi, az 1911. július 8.-i kecskeméti, az 1925. január 31.-i egrri, vagy az 1956. január 12.-i dunaharaszti rengések. A térképből az is kiderül, hogy Magyarországon a legnagyobb gyorsulás amire műtárgyainkat tervezni kell $0,15$ g. A dolgozatom további részében a tervezéshez ezt az értéket kiemelten fogom figyelembe venni.

Irodalmi összefoglalásként kimondhatjuk azt, hogy Magyarország bármennyire is aszeizmikus zónában fekszik, minden eshetőségre fel kell készülnünk. Mert ahol egyszer kipattant egy bizonyos nagyságú földrengés ott egy ugyanakkora várható, csak nem tudni mikor.

2.3. Az alagutak földrengés veszélyeztetettsége

A modern alagútépítési technológiák kialakulása a XX. század második felére datálható (NATM - Rabcewicz, 1964). Az építőipar az alagutakat hosszú időn keresztül földrengéssel szemben ellenállónak tekintette. Ez adódhatott a történelmi alagutak időtállóságából, és földrengés okozta problémák helyspecifikus mivoltából.

Ezen földalatti műtárgyak kockázatelemzése során az alagút tönkremenetele esetén igen magas humán, anyagi károkkal és negatív következményekkel kell számolni. A kőzetben elhelyezkedő alagutak szeizmikus vizsgálatát először Dowding és Rozen (1978) kezdte el. Összesen 71 alagút információjára tettek szert. A begyűjtött információk között a legfontosabbak a függőleges, és vízszintes gyorsulási értékek. Az eredményeik alapján: $\sim 0,2 g$ gyorsulás alatt az alagutakban nem keletkezik károsodás; egy alagút tönkremeneteléhez szükséges alakváltozás nagy valószínűséggel a nyomatéki maximumok és a kőzetkörnyezet tagoltságainak metszetében fog végbe menni.

Azóta több tudományos kutatás célzottan ezt a problémát akarja megfogni, numerikus és analitikus módszerekkel egyaránt. Ezen módszerekből legnevesebbként a Hashash (2001) és a Hashash et al. (2005), amely módszert a Nemzetközi Alagútépítő Szövetség (ITA) is akkreditált.

2.3.1. Esettanulmányok

A dolgozatomhoz két esettanulmányt is csatolok. A bemutatott valóságos példák kialakításban, méreteiben és technológiában is hasonlóak az általam modellezett alagúthoz.

Sanyi vasúti alagút – Ji-Ji földrengés 1999, Taiwan

1999. szeptember 21. kedd, hajnali 1:47 perc. A Richter magnitúdó szerinti 7.3-as földrengés pattant ki Ji-Ji városának közelében. 2 415 halott, 11 305 sérült, és több mint 100 ezer ember kényszerült utcára. Az anyagi károk körülbelül 300 millió új tajvani dollár volt (1 új tajvani dollár mai árfolyamon 9,71 magyar forint). A földrengés kb. 33 km mélyen pattant ki, ez sekély földrengésnek nevezhető. A földrengést jól dokumentálták, ekkorra a tajvani szeizmikus obszervatórium rendszer már jól ki volt építve.

A majdnem 7 km hosszú Sanyi vasúti alagút NATM (Új Osztrák Módszer) elveit követve épült meg. Az alagutat löttbetonos erősítéssel látták el. Az alagutat borító közettömeg magassága 20-150 méter között változott a hossz mentén. Az alagút palás homokköves kőzetben helyezkedik el. A földrengés okozta maximális gyorsulás, egy közeli szeizmológiai obszervatórium mérései alapján 0,14g nagyságú volt. A földrengés utáni vizsgálatokat követően megállapították, hogy az alagút szerkezete súlyosan megrongálódott. Főként a vonalmenti erősítés rétegek mentek tönkre a földrengés okozta többletterhelés hatására.

Bolu közúti alagút – Kocaeli-Duzce (Izmit) földrengés 1999, Törökország

A műtárgy egy két-két sávós ikeralagút, amely 3,3 km hosszan vezet át a föld alatt. A technológiáját tekintve ez is NATM módszerrel készült, és ezt az alagutat is löttbetonos vonalmenti erősítéssel látták el. Az alagutak egyenként 14,0 méter szélesek és 8,6 méter magasak voltak. Az alagút geológiáját tekintve, egy erős, kristályos és metamorf kőzetekkel szabdaltnak területen helyezkedett el.

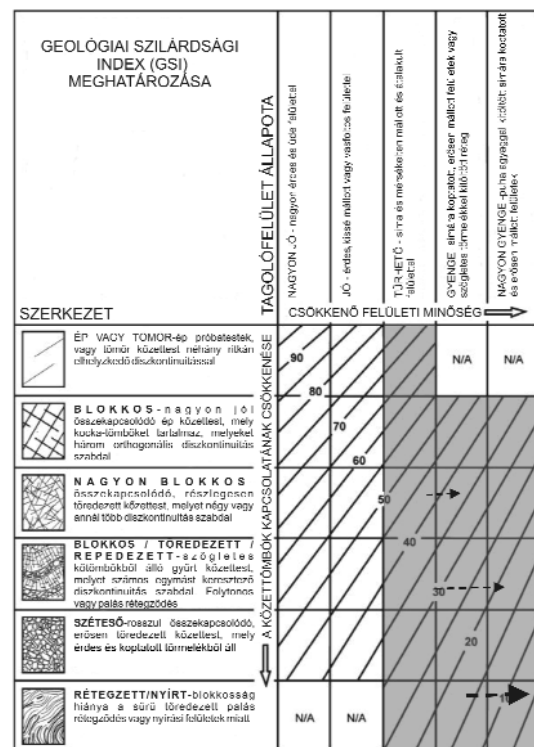
Az első földrengés, ami az alagút környezetében kipattant a Richter-skála szerinti 7,4-es magnitúdójú Kocaeli földrengés volt, amely 0,25-0,35g-s szeizmikus gyorsulásokat idézett elő az alagút környezetében. Az alagút ekkor még építés alatt állt. A vizsgálatok után a mélyépítési műtárgyat biztonságosnak ítélték meg, szerkezetében nem keletkezett számottevő károsodás. Három hónappal az első földrengés után, a 7,2 magnitúdójú Duzce földrengés az északi parttól mindössze 20 km-re lévő epicentrummal csapott le. Ez a földrengés maximális gyorsulását tekintve már többszöröse az előzőnek 0,81g-s volt. Az alagút még mindig építés alatt állt. Ekkor a földrengés okozta többletterhelés hatására az alagút több helyen is beomlott. A pár hónap múlva tervezett átadás pár évre módosult pillanatok alatt.

3. A számítások módszertana

3.1. Geológiai Szilárdsági Index

A Geológiai Szilárdsági Index először Hoek (1994) által kifejlesztett, illetve publikált mérnöki kőzettest-értékelő szám, aminek segítségével kőzettestek kőzetmechanikai tulajdonságait tudjuk megállapítani. A módszert először nagy szilárdságú homogén, majd inhomogén kőzettestekre is kifejlesztették. A módszert az évek során több specifikus mérnöki problémára, kőzetre is átdolgozták (Marinos, 2007 – heterogén flis kőzettest). Hazai használhatóságra először Vásárhelyi (2001), majd részletesen budai márgára Görög (2010) dolgozta át.

A GSI-módszer, a klasszikus kőzettest-osztályozási módszerekkel ellentétben, nem közvetlen az alagút vagy más műtárgy jövesztési és megtámasztási paramétereit határozza meg. A GSI mérőszám magába foglalja a kőzettestek litológiai, szerkezeti jellegét és a természetes (zavartalan) környezetében elhelyezkedő kőzettest tagoltságait, azoknak sűrűségét és állapotát. A GSI-módszer a kőzettestek komplex, anizotrop, tagoltságokkal tarkított és analitikusan és numerikusan is nehezen leírható viselkedéséből képez a mérnöki szemmel jobban megfogható mérőszámot, amelyet a számításaink során könnyebben tudunk használni.



7. ábra A Geológiai Szilárdsági Index meghatározása

A GSI mérőszám önmagában nem jellemzi a kőzet szilárdságának nagyságát, de fontos bemenő adatot szolgál a Hoek-Brown-féle törési határállapotnak. Ebből a mérőszámból már következtethetünk a kőzet mechanikai viselkedésére.

3.2. Módosított Hoek-Brown törési feltétel

Ezen anyagmodell (Hoek és Brown 1980) két tudományos eredményből tevődött össze Hoek (1968) által kutatott üde, ridegtörésű kőzetek viselkedéséből és a Brown (1970) által kifejlesztett tagolt kőzettestek modelljéből. A törési feltétel figyelembe veszi az üde anyag

kőzetmechanikai tulajdonságait, emellett redukciós tényezőket alkalmaz a kőzettest tagoltságából és az egész test viselkedéséből adódóan.

A módosított Hoek-Brown törési feltétel a következő egyenleten alapul:

$$F_s = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_c} + s \right)^a = 0$$

ahol,

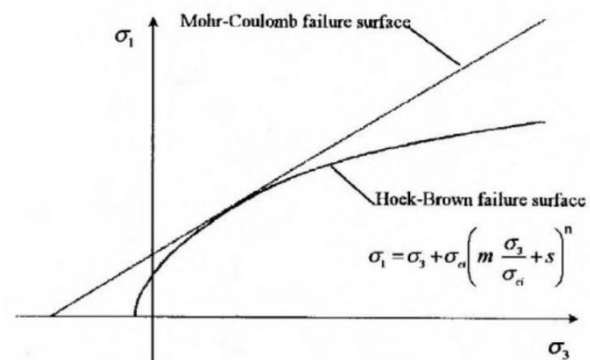
- $\sigma_{1,3}$ főfeszültségek
- σ_c egyirányú nyomószilárdság
- m_b a kőzet Hoek-Brown állandója, az egyirányú nyomószilárdság csökkentő tényezője, triaxiális vizsgálatokból származtatható
- s, a anyagállandók, amik a kőzetet üdeségét jellemzik

A tervezési esetek többségében nem áll rendelkezésre megfelelő számú minta, hogy ezeket az anyagra vonatkozó tényezőket és állandókat kellőképpen meghatározzuk. A törési feltétel relevanciáját mutatja, hogy a különböző esetek összeségéből, tapasztalati úton meghatározott képletekkel csökkenthető a mintaszám (Hoek, Carranza-Torres és Corkum – 2002).

$$m_b = m_{ép} \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$



8. ábra A Hoek-Brown törési feltétel ábrázolása a Mohr-Coulomb feltétel mellett

ahol, a D a kőzetkörnyezet feszültségállapotának zavartságát adja meg; 0 a zavartalan 1 nagyon zavart (robbantásos fejtés).

3.3. Szeizmikus terhelés

A dolgozatomban bemutatott modellben pszeudo-statikusszeizmikus, azaz földrengés terhet működtetnek a végelemekre. Ennek anatómiáját áttekintve bemutatom a teher megfelelő felvételéhez szükséges paramétereket.

A végeselemes programban felvett földrengési együtthatók dimenzió mentesek. A földrengés során előforduló legnagyobb gyorsulási értékek adják meg a gravitációs gyorsulás hányadát (pl. $0,15g = 1,4715 \text{ m/s}^2$).

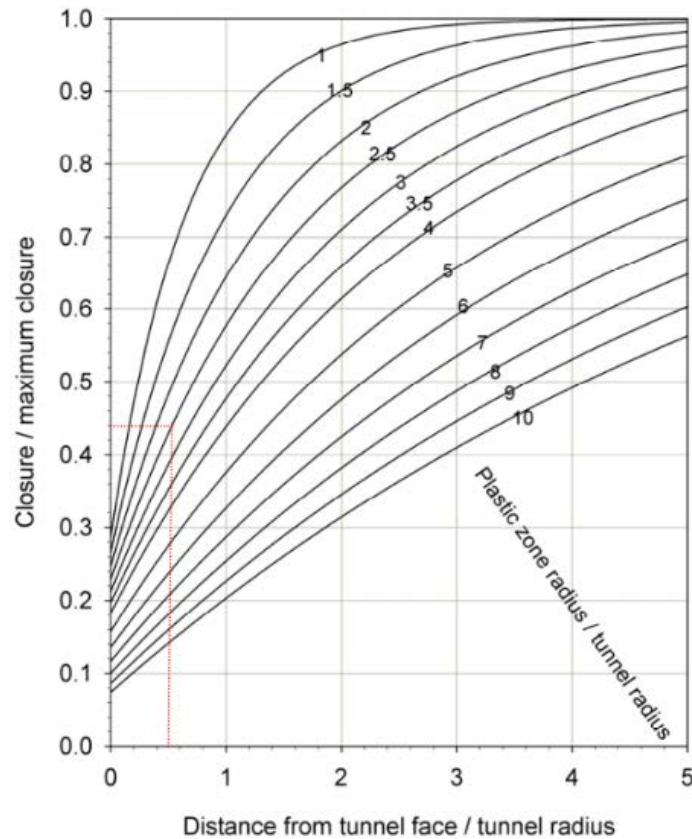
A szeizmikus erő definiálható az egyes végeselemekre ható gravitációból származó erő (önsúly) és a földrengési együtthatók szorzataként. A szeizmikus teher vektoriálisan összeadódik a modellben működő önsúlyteherrel.

3.4. Állékonyság számítása

A számításaim során megvizsgáltam az alagút globális állékonyságát. A végeselemes program egy nyírószilárdság redukciós eljárást alkalmazva egy kvázi globális biztonsági tényezőt is meg tud állapítani a modell egészére. Adott terhelési fázisban csökkenti a modell bemenő nyírószilárdsági paramétereit addig, ameddig a szerkezet az állékonyságát elveszíti. Ez hasonló eljárás, mint a $\varphi - c$ redukció rézsúk biztonsági tényezőjének számításánál. Az alagútnak akkor van megfelelő biztonsági tartaléka, ha ez a globális redukciós tényező 1,00 felett van.

3.5. Vonalmenti támasz elhelyezése

A modellezés során figyelembe vettem az alagút relaxációjának idejét. A relaxáció tíz fázisból állt. Az egyes fázisokban az alagút feszültségterének hányadosát működtettem az alagút falára, ellenkező előjellel. Ez a metódus azért volt szükséges, hogy a megerősítés pontos elhelyezését a Vlachopoulos és Diederichs módszer segítségével meg tudjam határozni. Ez a módszer az erősítés helye és az alagút átmérőjének hányadosából, a plasztikus zóna átmérője/alagút átmérője függvényre vetítve, megkaphatjuk a maximális deformáció nagyságát. Ott kell az erősítést beépíteni.



9. ábra Vlachopoulos és Diederichs módszer

A vonalmenti támaszokat a számítás során bizonyos vastagságú (20-30 cm) löttbetonként értelmeztem. A program ezt a löttbeton réteget vonalmenti z irányú rúdként értelmezi. A célszoftver az erősítéseket Timoshenko rúd modellként értelmezi, amely rudak végtelen közel helyezkednek el egymáshoz képest.

4. A vizsgált modell felépítése és eredményei

A következő fejezetben az *Rocsience* szoftvercsalád *RS2 2019* végeselemes módszerén alapuló programjának segítségével fogok modellezni egy fiktív, kétsávos autótú közlekedési úrszelvényét lekövető alagutat. A műtárgy egy elméleti homokkőre hasonlító kőzetkörnyezetben található. Az alagút modelljét az azt körülvevő kőzetkörnyezet és az alagútra ható szeizmikus terhek függvényében, három-három csoportra bontottam. Így megfelelő képet kaphatunk a tervezendő alagút tényleges alakváltozásairól és feszültségeiről. A dolgozatom fő témája, annak vizsgálata, hogy a kőzetkörnyezet szerkezete és mállottsága hogyan hat az alagutakra a magyarországi szeizmikus viszonyok közötti földrengésterhek működtetése mellett.

4.1. A modell bemenő adatai

A számításaim során módosított Hoek-Brown törési feltételt (3.2. pontban taglalt) használtam anyagmodell gyanánt. A modellezett alagút mélyfekvésűnek tekinthető, hiszen a főte legfelsőbb pontja a felszín alatt 71,5 méter mélyen található, emellett átmérője 6,5 méter ($3D <$ alagút fedése). A kőzet fizikai-paramétereit szakirodalmi javaslatok alapján vettem fel (*Rocscience RocProp* - adatbázis). Az adatbázis szerint a kőzet megfeleltethető egy erősebb mechanikai paraméterekkel bíró homokkőnek, mészkőnek vagy egy átlagos márványnak. A kőzetkörnyezet geológiai szilárdsági indexének változásának alapján a kőzet főbb szilárdsági és Hoek-Brown paraméteri is megváltoznak. A program a kellő metódust, redukciót alkalmazva ezt kiszámolja (Hoek, 2006). Ha az anyagmodell szerint egyes elemek elérik a törési feltételt, képlékeny feszültség állapotba kerülnek. Ezen képlékeny feszültségállapotban lévő végelemek fizikai paramétereit reziduális értékkel vettem figyelembe. A csökkentés mértéke 10 és 15 GSI ponttal történt. A szoftver ezen végelemek viselkedését a csökkentett GSI alapján felvett paraméterekkel számolja.

3. táblázat A kőzetkörnyezet mechanikai paramétereit, a módosított Hoek-Brown anyagmodell és a szakirodalmi ajánlások alapján

Kőzetmechanikai paraméterek						
Nyomószilárdság [MPa]	Poisson tényező [-]	Rugalmasági modulus [GPa]	GSI = 30 eset			
			Reziduális rug. mod. [MPa]	m_b	a	s
100	0,3	20	1627,7	0,821	0,52	$4,1 \times 10^{-4}$
			Képlékeny állapotban lévő elemek paramétereit (GSI=20)			
			913,4	0,574	0,54	$1,3 \times 10^{-4}$
			GSI = 55 eset			
			8165,6	2,005	0,50	$6,7 \times 10^{-3}$
			Képlékeny állapotban lévő elemek paramétereit (GSI=40)			
			3193,0	1,173	0,51	$1,2 \times 10^{-3}$
			GSI = 80 eset			
			17607,0	4,895	0,50	0,108
			Képlékeny állapotban lévő elemek paramétereit (GSI=65)			
			12634,4	2,865		0,021

Az alagutak relaxációs folyamatát egy már kiemelt alagútszelvényen működtetett csökkenő az alagút falán megoszló ellenerőpárral modelleztem. Az alagút relaxációját figyelembe véve és a Vlachopoulos és Diederichs módszer (Vlachopoulos és Diederichs, 2009) segítségével meg tudtam határozni a relaxációs folyamat végét és az esetleges erősítések szükségességét. Erősítésre csupán a GSI = 30-as esetben volt szükség, amelyet a 4.3.3. pontban részletezek.

A földrengés terheket a 3.3. pontban taglalt pszeudo-statikussal módszerrel határoztam meg. A terhek működése a modellen kompatibilis az EUROCODE 8: Tartószerkezetek tervezése földrengésre, ide vonatkozó alapelveivel. Mint fent is említettem a program bemenő adataként földrengés tényezőt adunk meg, amely a nehézségi gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$) hányada. Ez az érték jellemzően 0,1-0,3 között van. Ezen terhek erő mivoltukból vektorosan összegződnek az alagútra ható gravitációs erőből származtatott erővel. Mivel ezen gyorsulásoknak az iránya is lényeges változó, ezért különböző kőzetkörnyezetként 6 db irányultságot modelleztem. Az alagút csak egyszeresen szimmetrikus (függőleges tengelyre) ezért a mértékadó teherkombinációt a gyorsulások vektorát változtatva kaphatjuk meg. Ezen vektor nagyságát változtatva és minél több irányt és kombinációt megpróbálva, pontosabb képet kaphatunk az alagút potenciális tönkremeneteli pontjairól.

A modell kezdeti stádiumában a gyorsulás nagyságát az érvényességben lévő szabványban szereplő legnagyobb érték szerint vettem fel, amely $0,15g$. Ezen gyorsulás hatására az alagút keresztmetszetében nem jelentkezett oly mértékű deformáció, amely releváns lenne. Így a gyorsulás értékét, mind függőleges, mind vízszintes értelemben, lépcsőzetesen, külön modell fázisokban emeltem, elsőként $0,20g$, majd extrém esetet vizsgálva $0,30g$ nagyságúra. Az eredmények, mindhárom esetre, a kellő pontokban, táblázatosan kigyűjtve találhatóak.

4.2. A szeizmikus terhek felvétele

A számításaim során a földrengés terheket a módszertani fejezetben bemutatott fizikai értelmezés alapján vettem figyelembe. A célszoftver a számítás során két különböző irányú és nagyságú szeizmikus gyorsulást tud figyelembe venni. Egy függőleges tengelyen működő és egy vízszintes tengelyen működő vektoriális értéket. A földrengés terhet adó gyorsulás ennek a két vektoriális értéknek az összege.

A következő fejezetekben (4.2.1. - 4.2.6.) megvizsgálom azt, hogy az alagút keresztmetszetére hogyan hatnak a különböző irányú és mértékű gyorsulások. A fejezetekben szereplő ábrák (9.-14. ábra) a GSI=30-as kőzetkörnyezetben lévő alagútra vonatkoznak. Mivel ebben a kvázi *gyenge* kőzetkörnyezetben reprezentatíván be lehet mutatni a szeizmikus terhelések hatására fellépő mozgásokat.

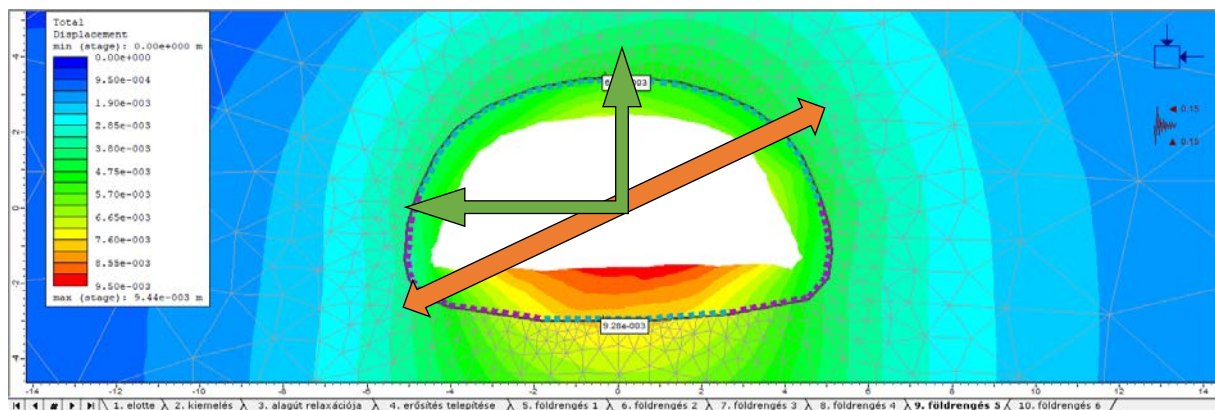
A globális koordináta rendszerben pozitív iránynak a jobbra és felfelé mutató vektorokat vettem fel, a negatív iránynak a balra és lefelé mutatókat.

A következőkben az egyes gyorsulás variánsokat gyűjtöttem össze. Az ábrákon (9-14. ábra) látható *zöld nyíl* a földrengésből származó többletgyorsulás vektorjait adja meg. A

naranccsárga kettősnyíl a szeizmikus teher által okozott várható térrövidülés irányát mutatja. Az ábrákon a deformációk szemléltetés gyanánt fel vannak nagyítva. Az ábrák jobb felső sarkában látható idő-gyorsulás diagram ikon a szeizmikus gyorsulások irányait és értékeit mutatja meg. A bal oldalán lévő színskála explicit módon jeleníti meg a modellben fellépő elmozdulások értékét. A piros szín a legnagyobb elmozdulást jelöli. A skálán felfelé haladva, a hidegebb árnyalatok irányába, a színek egyre kisebb elmozdulásokat jelölnek a sötétkélig, ami a nulla elmozdulásnak felel meg.

4.2.1. 0,15 g pozitív függőleges és negatív vízszintes gyorsulás

A definiált gyorsulási eset az egyik mérvadó tehereset, hiszen Magyarországon életben lévő szabvány szerint erre az értékre kell tervezni egy mélyépítési műtárgyat.



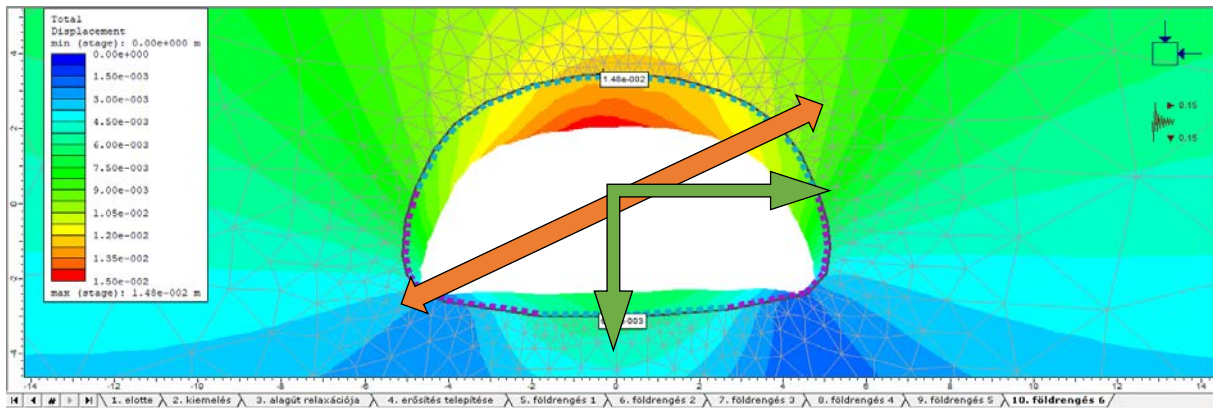
10. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstehertel (a) ($GSI=30$)

Az ábrán megjelenő elmozdulásokból látható, hogy az alagút talpa megemelkedik. A főteher ható feszültségek kisebbek, mint a talpra ható feszültségek. A keresztmetszet középpontja a belseje felé tolódik. A legnagyobb elmozdulás a talp középpontján alakul ki.

A további fejezetekben a) teheresetként hivatkozok erre a gyorsulási variánsra.

4.2.2. 0,15 g negatív függőleges és pozitív vízszintes gyorsulás

Ebben az esetben a szeizmikus teher vektorok (zöld), épp az ellenkező irányba mutatnak. Itt az elmozdulások nagyságrenddel nagyobbak lesznek, hiszen a gravitációs gyorsulásból származó erők iránya azonos a többlet teherből (földrengéstehertel) származó erőkkel. Ez a tehereset lesz a szabvány szerinti igazi mérvadó, az elmozdulások mértékéből és a szeizmikus teherirányából adódóan. A maximális elmozdulás a főte középen alakult ki. A keresztmetszet deformációja markánsabban változik meg a főte nagyobb elmozdulásai miatt.

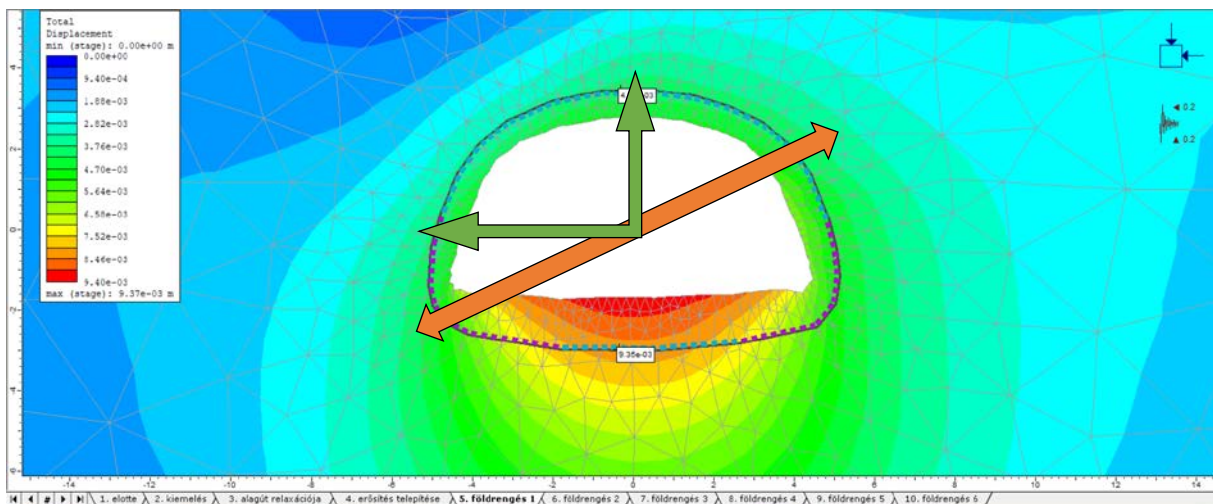


11. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengésteher mellett (b) (GSI=30)

A további fejezetekben b) teheresetként hivatkozok erre a gyorsulási variánsra.

4.2.3. 0,2 g pozitív függőleges és negatív vízszintes gyorsulás

Mint azt már a 4.1. pontban is említettem a vizsgálatokat nem csak a magyarországi szabványban szereplő gyorsulási értékekre végeztem el, hanem annál 3/2-del és 2-szer nagyobb gyorsulási értékekkel. A 0,15g gyorsulás esetén a deformációk nem haladták meg a megengedettet. A függőleges többletgyorsulás vektor fölfele mutat, a vízszintes balra.



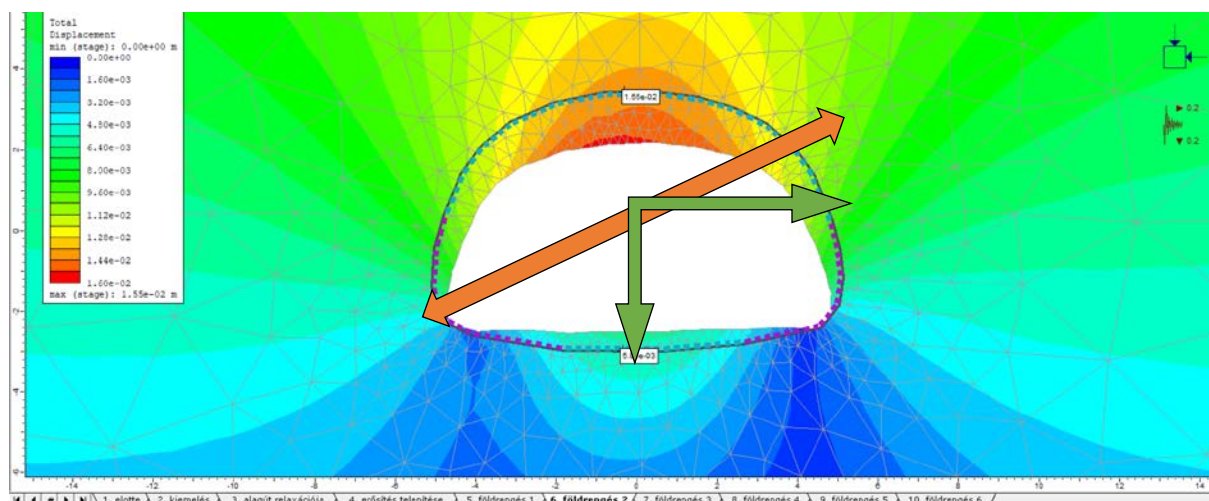
12. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengésteher mellett (c) (GSI=30)

Az ábra elmozdulásai hasonlóak az a) tehereset elmozdulásaihoz. A maximális elmozdulás a talpon alakul ki. A keresztmetszet deformációinak nagysága folytonos az alagút főtéjén és két falszakaszán.

A további fejezetekben c) teheresetként hivatkozok erre a gyorsulási variánsra.

4.2.4. 0,2 g negatív függőleges és pozitív vízszintes gyorsulás

Az ábrán a nyilak értelmezése megegyezik az előzőkkel. A legnagyobb elmozdulás érhető módon a főtén alakul ki, ami egy nagyságrenddel nagyobb, mint a *c*) eset legnagyobb elmozdulása. Viszont az elmozdulás nagyságának növekedése csak 5 mm a 0,15g-s hasonló gyorsulási orientációjú *b*) esethez képest (pontos eredmények a 4.2.;4.3. és 4.4.-es pontban vannak felsorolva).



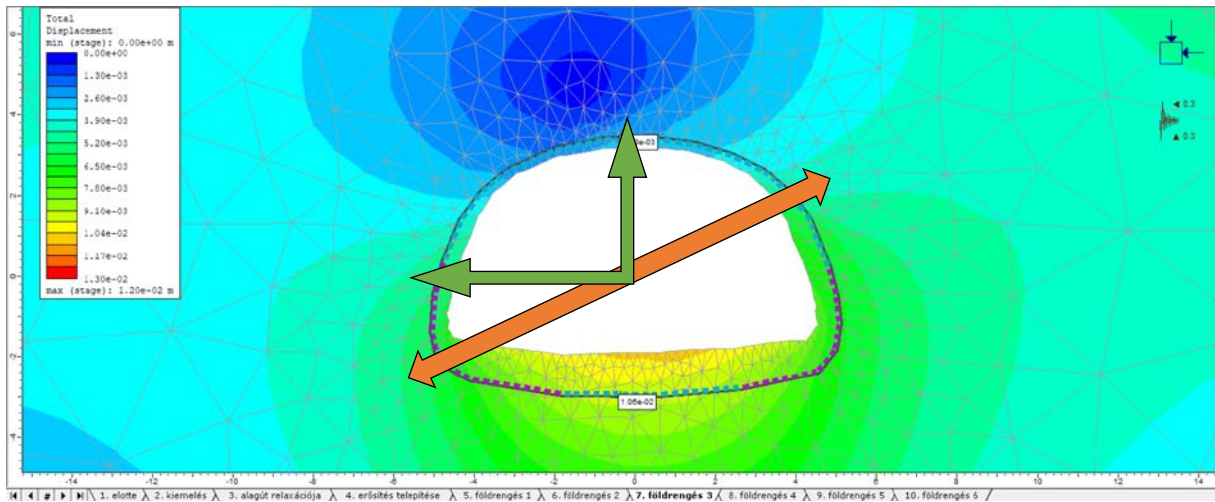
13. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengésteher mellett (*d*) ($GSI=30$)

A deformációk irányultsága, és maximális helye hasonló az *b*) teheresetéhez. A talp elmozdulásai már minimálisak, hiszen a talpra ható feszültségteret egyre jobban kiegyensúlyozza a lefelé (negatív irányba) mutató gyorsulásból származó erő.

A további fejezetekben *d*) teheresetként hivatkozok erre a gyorsulási variánsra.

4.2.5. 0,3 g pozitív függőleges és negatív vízszintes gyorsulás

Ez a legnagyobb gyorsulás (extrém eset), amit működtettem az alagutamra, ezért itt látszik a legjobban, hogy a felnagyított deformációk miben térnek el egymástól (bal felső irány, jobb alsó irány). Ez a tehereset Magyarországon szinte elképzelhetetlen, de más szeizmicitás terén aktív országokban egy átlagos esetnek tételezhető fel. Már a legközelebbi déli szomszédunknál, Horvátországban is 0,38g-s maximum gyorsulásra terveznek az ország egyes részein.



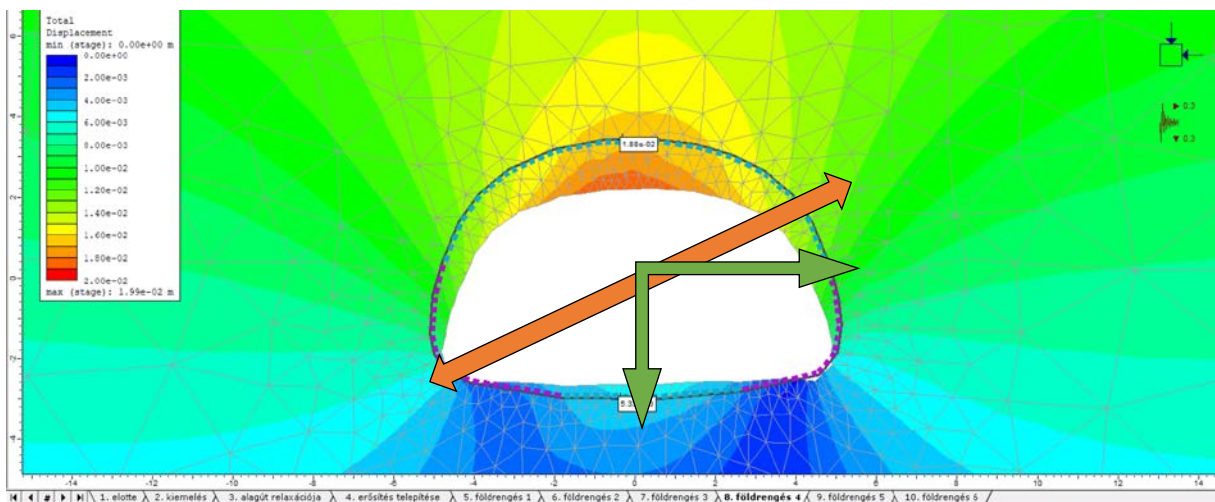
14. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrendésteher mellett (e) (GSI=30)

Ebben a variációban egy igen érdekes helyzet áll elő a főte szempontjából, hiszen a főte elmozdulásai korrelálnak a nullához. Azaz a gravitációs erőből származó erőket szinte kioltja a földrendésből származó felfelé mutató erő.

A további fejezetekben e) teheresetként hivatkozok erre a gyorsulási variánsra.

4.2.6. 0,3 g negatív függőleges és pozitív vízszintes gyorsulás

Az utolsó vizsgált tehereset a magyarországi viszonylatokban is extrém gyorsulásokhoz tartozik. Ebben az esetben keletkeztek a legnagyobb elmozdulások. Az ábra (14. ábra) alakja, maximuma hasonló az a) és c) teheresetben látottakhoz. Az alagút talpán a gyorsulásból származó lefelé irányuló erők, az alagutat körülvevő feszültségtérből származó erőkkel szinte egyensúlyban vannak, hasonlóan az e) eset főtétéhez.



15. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrendésteher mellett (f) (GSI=30)

A további fejezetekben f) teheresetként hivatkozok erre a gyorsulási variánsra.

Az alagút modellezése során megvizsgáltam ennél több esetet is pl., ha csak függőleges, vagy csak vízszintes irányú gyorsulás van, de ezen teher kombinációk deformációja nagyságrendekkel kisebbek, mint a fent említett komplexebb esetek. Azt az esetet is figyelembe vettem, ha a két gyorsulás vektor nagysága egymástól eltérő, azonban ott is kisebb elmozdulások keletkeztek. Ezen kívül, érthető módon, a jobb felső, bal alsó irány váltakozásánál pontosan ugyanilyen eredményeket kaptam, mint a fent említett hat esetben (egyszeresen szimmetrikus keresztmetszet).

A gyorsulási variációkat megvizsgálva arra jutottam, hogy a legnagyobb elmozdulásokat az *f)* teheresetnél számítottam. Ezt a teheresetet fogom a továbbiakban ábrával is kiemelni. Ezen a tehereseten kívül a másik kiemelt variáns a *b)* - jelű. Azért ezt választottam ki, mert magyarországi elhelyezkedés esetén ez lenne a tervezési viszonyítás.

4.3. A kőzetkörnyezet szilárdsági jellemzőinek és a szeizmikus terheknek hatása az alagút állékonyságára

A dolgozatomban nem csak a szeizmikus terheket vizsgálom, hanem a kőzetkörnyezet változását is és ezek együttes hatását az alagút állékonyságára. A következő fejezetrészekben (4.3.1 - 4.3.3.) ezek duális hatásait vizsgálom.

A modellek felépítése a következő: három különböző GSI értékkel rendelkező kőzetkörnyezetben működtettem az *a) – f)* tehereseteket. A számítás eredményeképp megkaptam a modellterben fellépő főfeszültségeket, elmozdulásokat és plasztikus alakváltozásokat. A számítás során egyes végelemek rugalmas teherbíróképessége kimerült, ezek képlékeny alakváltozást szenvedtek. Ezen végelemek pontfelhőjét is meg lehet határozni a számítási eredményeiből. Ahol a kőzetkörnyezetben ilyen képlékeny alakváltozó elemek jelentek meg, ott a módszertani fejezetben részletezett metódussal az alagutat vonalmenti támaszokkal erősítettem meg.

A számításom eredményeképp megkapom az egyes teher, - és kőzetkörnyezeti esetek elmozdulás értékeit és globális állékonysági „biztonság” nagyságát. Az *a) - f)* jelű teheresetek közül a *b)* és *f)* jelű elmozdulások ábráit ki is emelem, hiszen ezek a modellek mérvadó esetei a fenti szempontok (4.2. fejezetben elhangzottak) szerint.

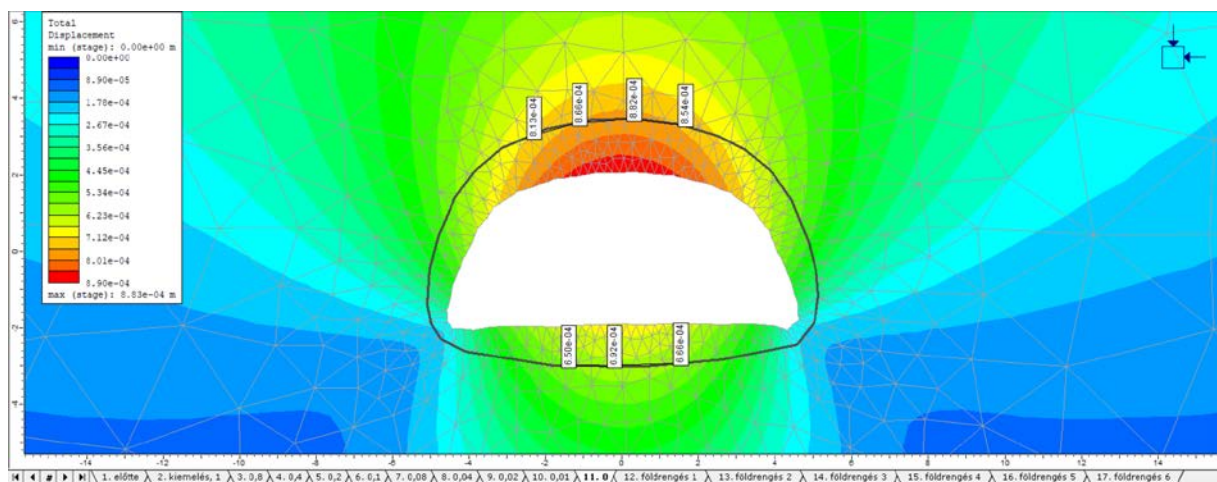
Az alagút állékonyságának vizsgálatánál kiszámítottam a földrengés teher nélküli, 0,15g-s gyorsulás melletti, illetve a 0,30g-s gyorsulás melletti biztonsági tényezőit. Ezek eredményét a kiértékelés fejezetben taglalom tüzetesebben. Ebben az alfejezetben az egyes GSI értékű

közvetkörnyezeti esetekhez tartozó legkisebb biztonsági tényező redukált nyírószilárdsági ábráját mutatom be.

4.3.1. $GSI = 80$ eset

Az első vizsgált esetem egy erős közetkörnyezetben épülő alagútra vonatkozik. A Geológiai Szilárdsági Index nagysága 80 egységpont. Ez egy blokkos közettömbre jellemző, kevés tagoltsággal. A tagoltsági felület üde és érdes.

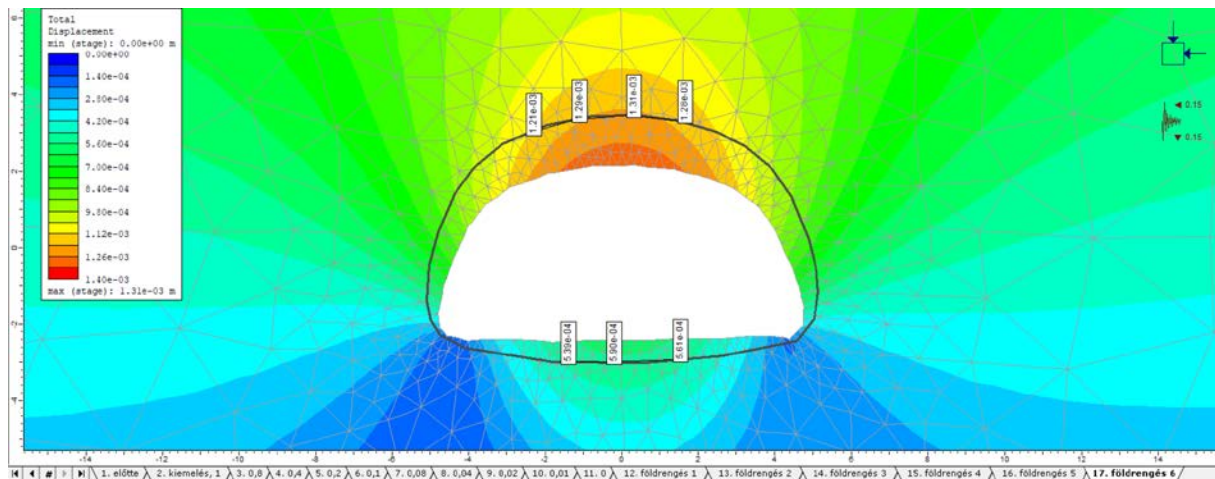
A közetkörnyezet jellemzően jó szilárdági paraméteriből kifolyólag plasztikus zóna nem alakult ki az alagút keresztmetszetének közelében. Ezért vonalmenti erősítésre nem volt szükség.



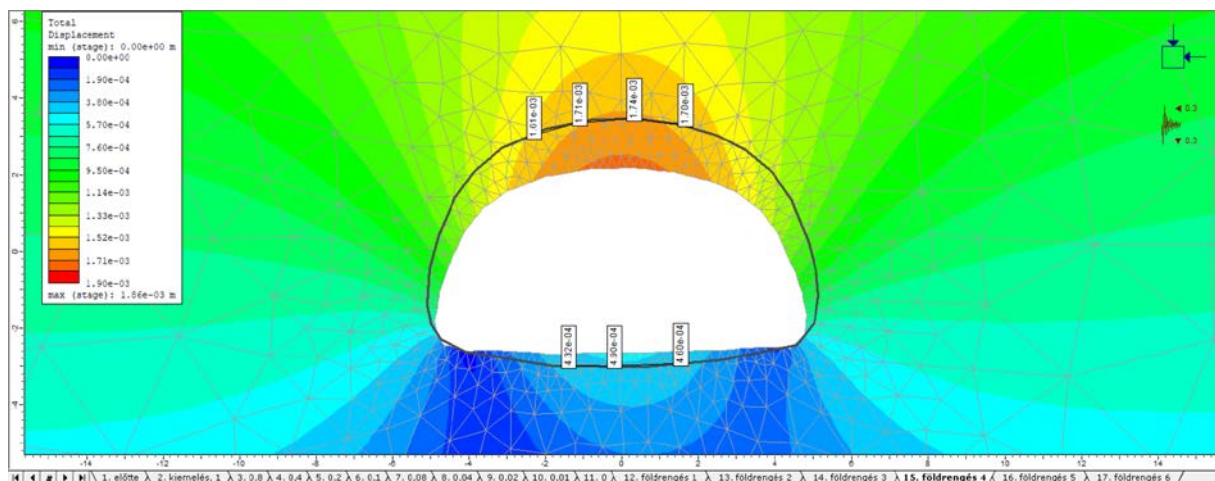
16. ábra A $GSI = 80$ -as eset földrengés nélküli abszolút elmozdulás ábrája

Az alagút maximális elmozdulása földrengés teher nélkül $0,88 \text{ mm}$ volt. Az elmozdulás helye a főté középső szakaszán található. A keresztmetszet főként a függőleges tengely mentén deformálódott, mind negatív mind pozitív irányból.

A földrengés terheket működtetve a modellen az alakváltozások értelemszerűen megnőnek. A két általam választott legfontosabb elmozdulás ábráját itt is megmutatom. Az egyik a magyarországi legnagyobb gyorsulás mérvadó ábrája (*b*) a másik az extrém eset mérvadó ábrája (*f*). Ezt a két ábrát minden közetkörnyezet esetére be fogom mutatni.



17. ábra GSI= 80, magyarországi mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája
[b) tehereset]



18. ábra GSI= 80, extrém esetben mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája
[f) tehereset]

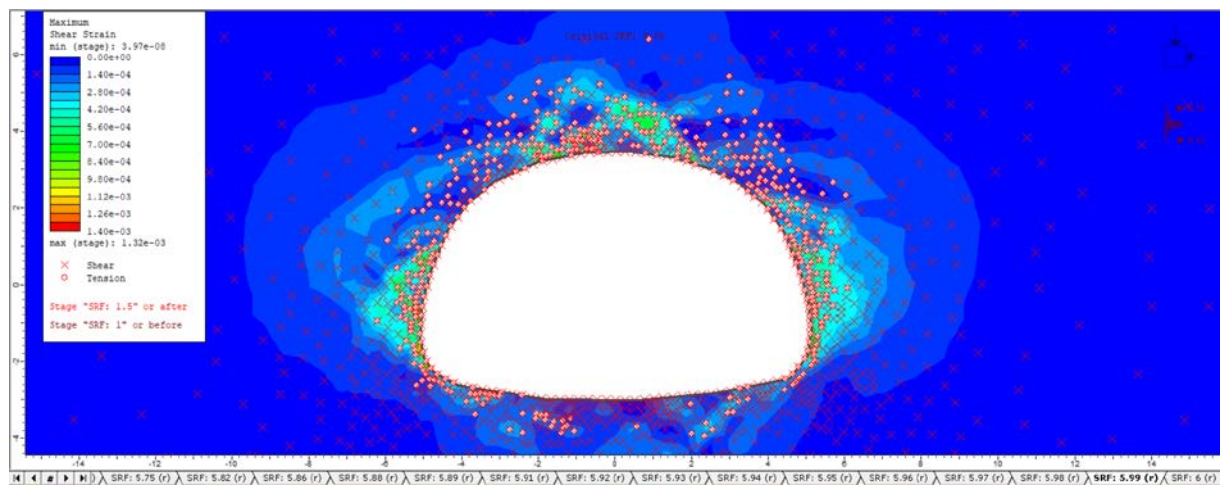
Az ábrákon (17. és 18. ábra) látható, hogy az elmozdulás jellege hasonló. Főleg a főte alakváltozásának formája. A legnagyobb elmozdulás a b) esetben $1,31 \text{ mm}$, míg az f) esetben $1,46 \text{ mm}$. Az elmozdulás helye a főte középvonalában található.

A különböző teheresetekre vonatkozó eredményeket táblázatosan itt foglalom össze:

4. táblázat GSI =80 esethez tározó elmozdulások

GSI 80						
eset	a (0,15g)	b (0,15g)	c (0,20g)	d (0,20g)	e (0,30g)	f (0,30g)
maximum elmozdulás [m]	$7,97 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$8,32 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$9,01 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$
elmozd. helye	talp	főte	talp	főte	talp	főte

A vizsgálat során a célszoftver által kiszámított biztonsági tényező az *b)* tehereset mellett 5,59-re adódott (legrosszabb érték). A földrengés teher nélküli keresztmetszetben a globális biztonsági tényező a számítás alapján 7,40. A globális biztonság abszolút változása 1,41. Az *f)* tehereset mellett a biztonsági tényező értéke magasabb volt (6,14), ez az anomália, a kőzet kvázi felkeményedése miatt történhet. A 0,15g-s gyorsulás mellett kevesebb képlékenyen alakváltozó elem jelent meg az alagút kőzetkörnyezetében, míg a keresztmetszethez közel tartózkodó végelemeknek kimerült a szilárdsága, a távolabb lévő elemek nem tudták felvenni a maximális feszültségeket.



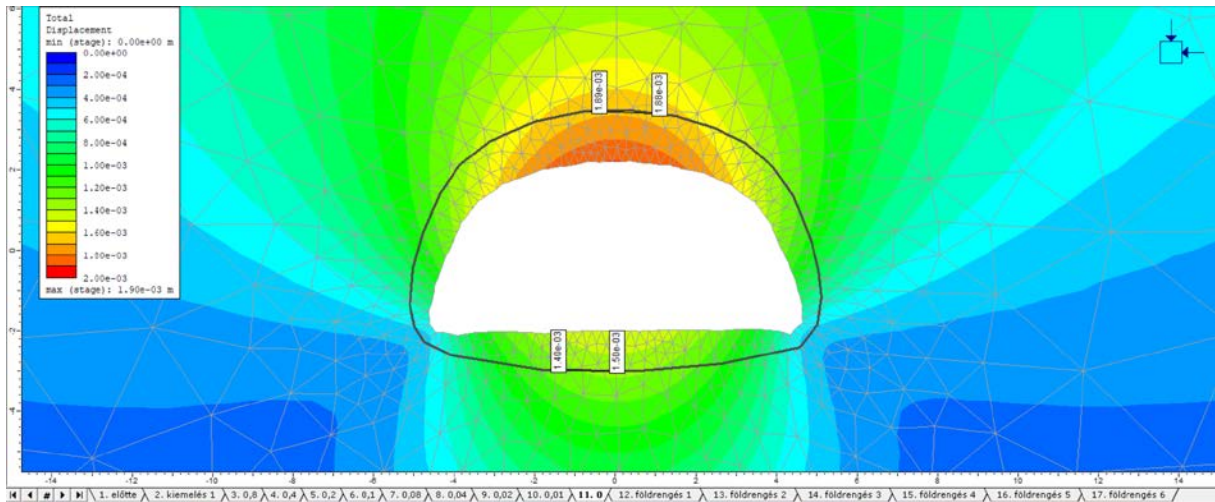
19. ábra GSI = 80, Kritikus nyírószilárdsági csökkentéshez tartozó nyírási deformációs ábra
[*b)* tehereset]

A nyírási deformációs ábrán (19.ábra) az látható, hogy az alagút kétoldali falszakasza deformálódott a legjobban. a tönkrementtel a bal alsó falszakaszon történt. Az ábrán látható kör és kereszt jelek jelentik a megfolyt végelemeket.

4.3.2. GSI = 55 eset

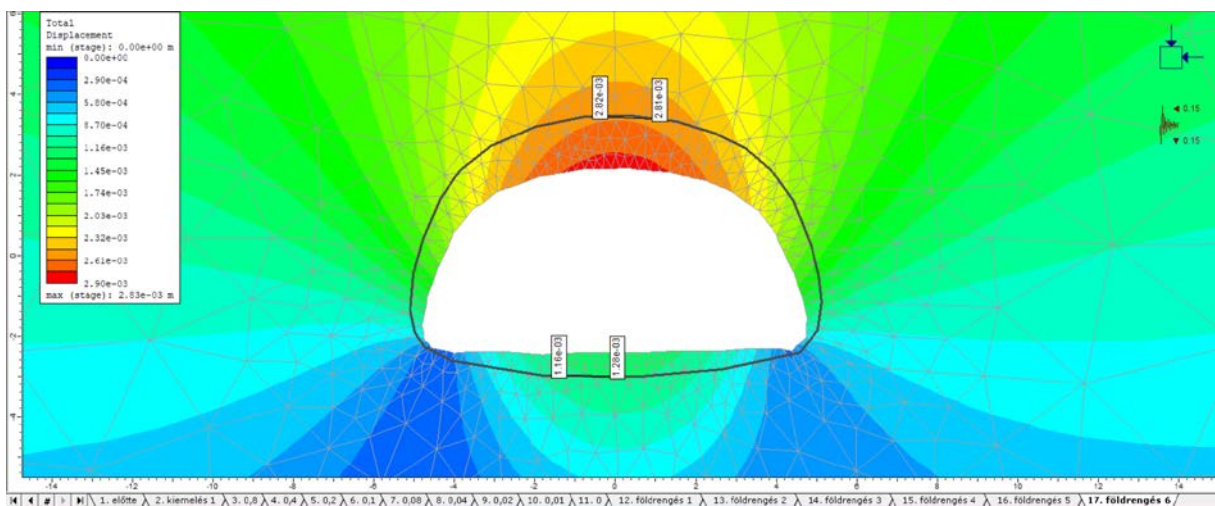
A második vizsgált kőzetkörnyezet egy átlagos szerkezeti, tagoltsági és mállottsági állapotban van. Az alagút a program szerint plusz vonalmenti erősítés nélkül is megáll. Nem alakult ki plasztikus zóna, ahol a kőzet veszített volna az állékonyságából. A végső fázisban, relaxációs folyamatot követően, ismét a földrengés terhe nélkül, a maximális elmozdulás 1,90 mm volt.

A maximális elmozdulás a főtén keletkezett. A keresztmetszet deformációi nagyobbak lettek a GSI=80-as esetnél. Az alagút talpa jobban bemozdult a középpont felé. Ez a kőzet szilárdságnak csökkenése miatt történt, ezáltal nagyobb elmozdulások keletkeztek a külső feszültségek hatására.

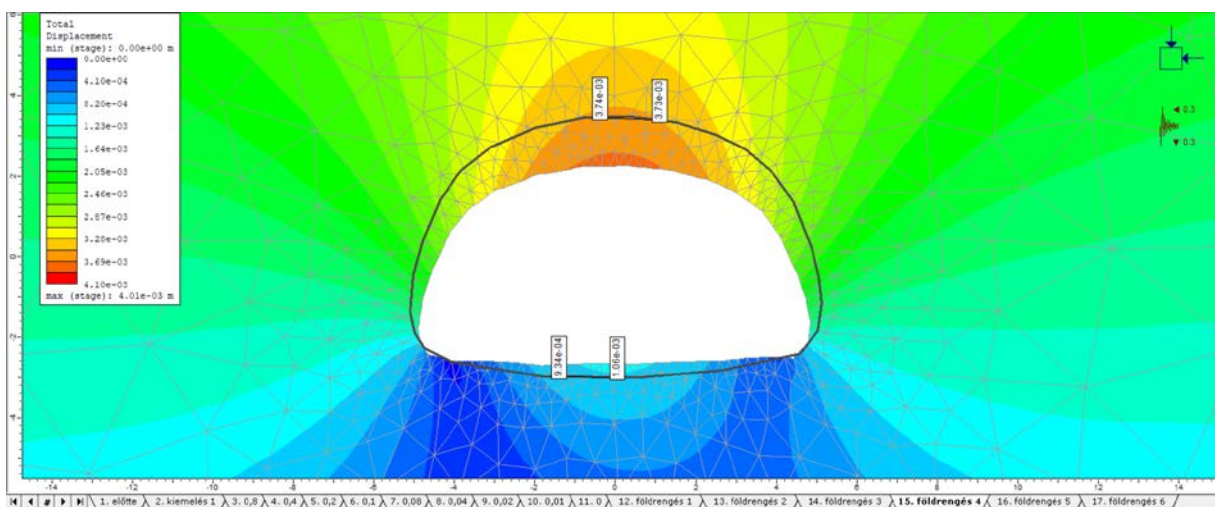


20. ábra A GSI = 55 eset, földrengés nélküli abszolút elmozdulás ábrája

Az b) és az f) teheresetek elmozdulás ábjái:



21. ábra GSI= 55, magyarországi mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája
[b) tehereset]



22. ábra GSI= 55, extrém esetben mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája

[f) tehereset]

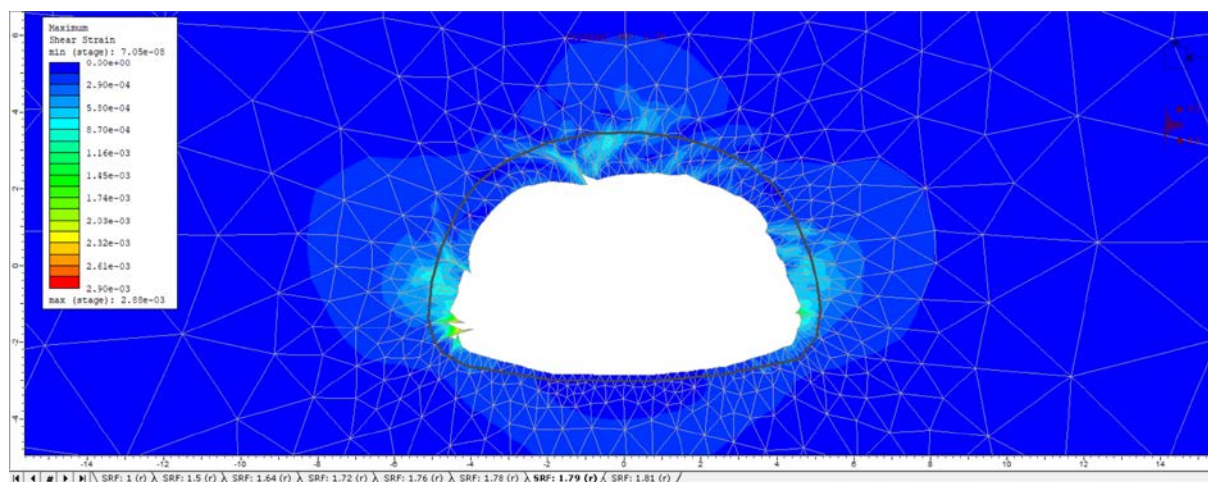
Az 21-22. es ábrát értékelve: Az b) teheresetben 2,83 mm-t, az f) teheresetben 4,01 mm-t mozdult be a főte. Itt is megfigyelhető, hogy a talp elmozdulásai az f) esetben kisebbek, mint a b) esetben. A kifejtett keresztmetszet alatti földtömeg kisebb sugárban mobilizálódott.

Ugyanúgy táblázatosan összefoglalva az eredményeket:

5. táblázat GSI =55 esethez tározó elmozdulások

GSI 55						
eset	a (0,15g)	b (0,15g)	c (0,20g)	d (0,20g)	e (0,30g)	f (0,30g)
maximum elmozdulás [m]	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$4,01 \cdot 10^{-3}$
elmozd. helye	talp	főte	talp	főte	talp	főte

A számításból az adódott, hogy a GSI=55-ös esetben, földrengés teher nélkül az alagút biztonsági tényezője 2,69. A legrosszabb biztonsági tényezőt az f) tehereset alapján kaptuk, ami 1,79. Ez mutatja, hogy biztos, hogy megáll az alagút, de már egy jóval kisebb biztonsági tényezővel, mint jobb kőzetkörnyezetben lévő, vagy egy rosszabb kőzetkörnyezetben lévő erősített társa (4.3.3. pont). A modellben a nyírószilárdsági redukciós faktor változása, tehernélküli és legrosszabb teheresett között, 0,90 volt.



23. ábra GSI = 55, Kritikus nyírószilárdsági csökkentéshez tartozó nyírási deformációs ábra

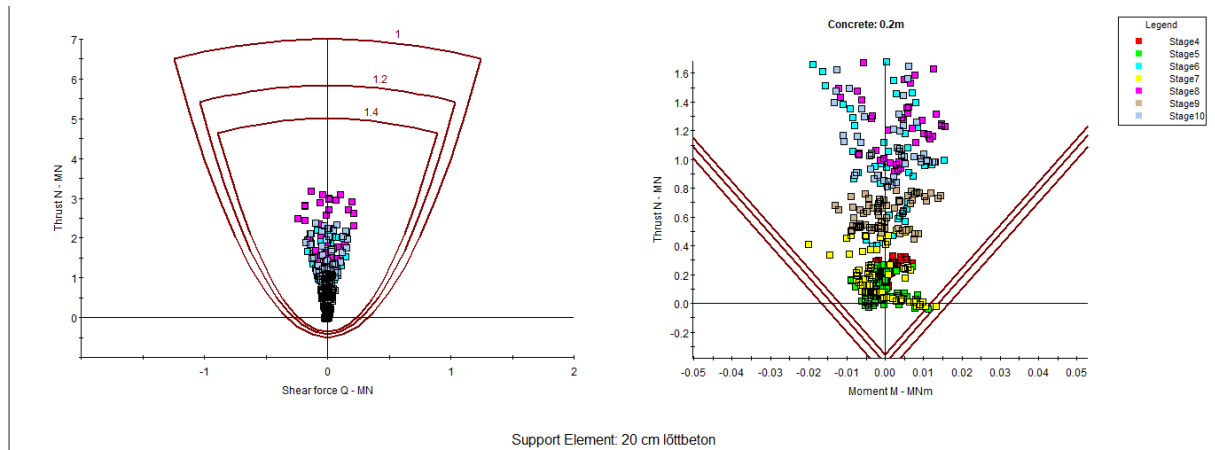
[f) tehereset]

A 23. ábrán látható, hogy a legnagyobb nyírási deformáció ismét az alagút főtéjén és az oldalain keletkezik. A kőzet teherbírása a bal fal alsó részén merül ki először, a redukált nyírószilárdsági paraméterek következtében.

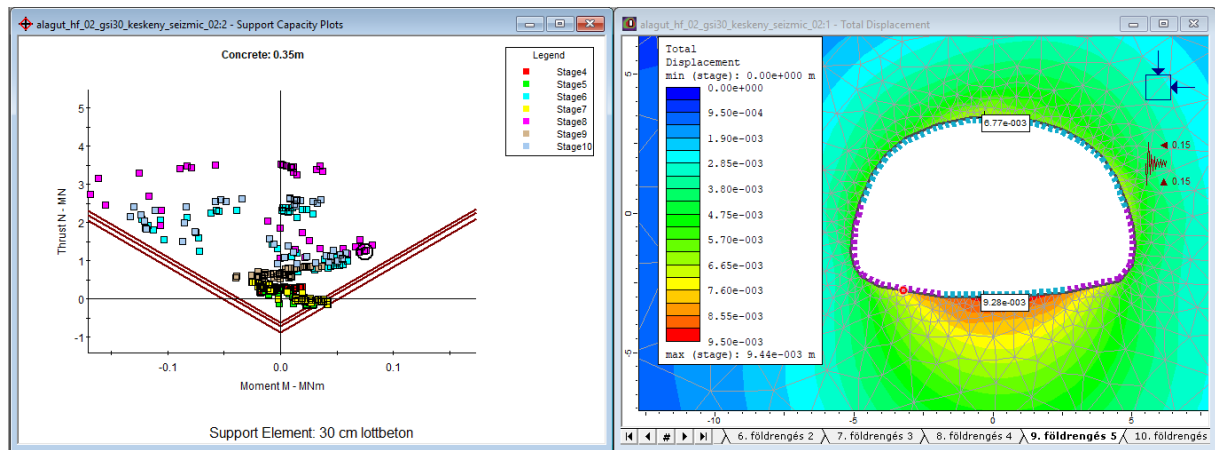
4.3.3. $GSI = 30$ eset

Ez a kőzetkörnyezeti eset a leggyengébb a vizsgáltak közül. A 30-as GSI érték egy széles skálán mozog, attól függően, hogy a kőzettest szerkezete a töredezettebb, vagy a tagoltságok határfelületei mállottak. Megfeleltethető egy széteső, erősen töredezett kőzettestnek tűrhető tagolófelületekkel, vagy egy blokkos kőzettesttel, melynek tagoltságai rossz állapotban vannak és mállottak. Az alagút önmagában állékony (1,24-es globális biztonsági tényező). Azonban a keresztmetszetet körülvevő kőzettestben kialakult plasztikus zóna, ezért szükséges a vonalmenti megerősítés. Ebben az esetben a relaxációs lépések kiszámítása különösen fontos volt, hiszen ezekből a lépésekből lehet pontosan megállapítani a vonalmenti támasz behelyezésének kellő időpontját a Vlachopoulos és Diederichs módszer segítségével. A módszerhez bemenő adatként szükséges maximális deformáció (a vonalmenti telepítés pillanatában) az én esetemben $9,56 \text{ mm}$ lett, ami a 8.- 9. fázisom közé esett. Itt, mint vonal menti támasz, 20 cm löttbetont alkalmaztam, amely erősítés nélkül (acélháló nélkül), megfelelő elmozdulást produkált a végső (földrengés teher nélküli) fázisban. Ezután következnek a földrengés terhek variációi.

Az erősítés ellenőrzésére a programba egy beépített modul is található, amely a beton biztonságát határozza meg. Ezt grafikus úton meg is tudja jeleníteni, különböző biztonsági tényezőkhöz tartozó határvonalakkal. A 24. ábrán látható, hogy bizonyos 20 cm -es löttbeton szakaszok nem megfelelőek. Ezek a $0,3 \text{ g}$ -s gyorsulásból adódnak, azaz esetünkben nem tekinthetjük mérvadónak. Viszont a modellezés során az alagút két talphoz csatlakozó oldalfalán már a kisebb gyorsulásoknak sem felelt meg a 20 cm -es löttbeton, ezért azokon a helyeken 30 cm -re növeltem a vonalmenti támasz vastagságát. A 25. ábrán látható, hogy így már megfelel az igénybevételekre (ugye a $0,3 \text{ g}$ -s gyorsulásra nem, de az csak extrém eset). Az ábrán az is látszik, hogy a legjobban igénybe vett elemek az oldalfal és a talp csatlakozásánál vannak, hiszen az alagút keresztmetszete itt akar legjobban elmozdulni.

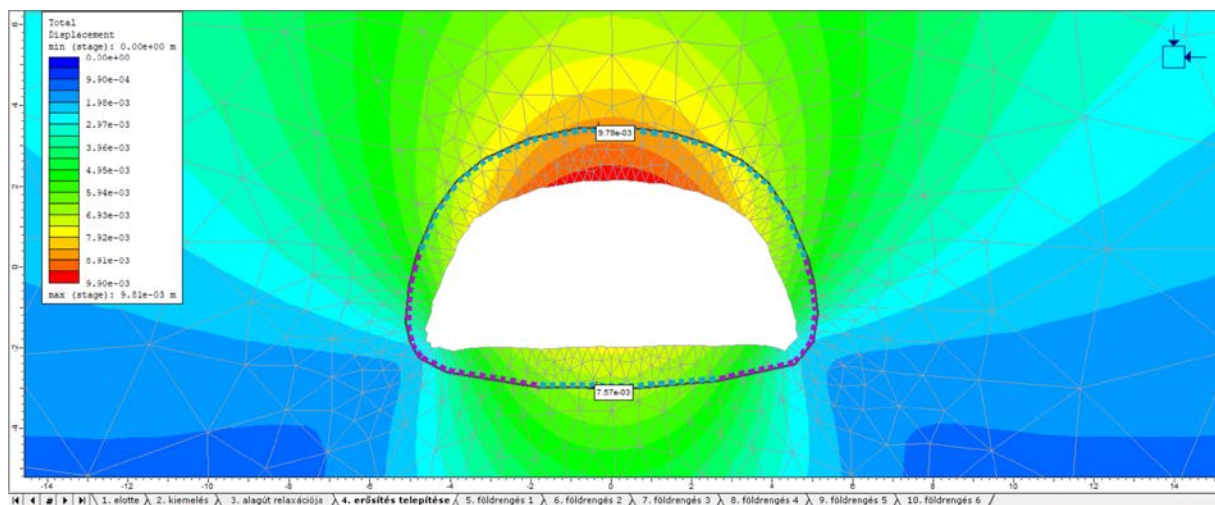


24. ábra Vonalmenti támasz (20 cm löttbeton) igénybevételi grafikonja biztonsági tényezőkkal (GSI=30)



25. ábra Vonalmenti támasz (30 cm löttbeton) igénybevételi grafikonja, kritikus pont jelöléssel (GSI=30)

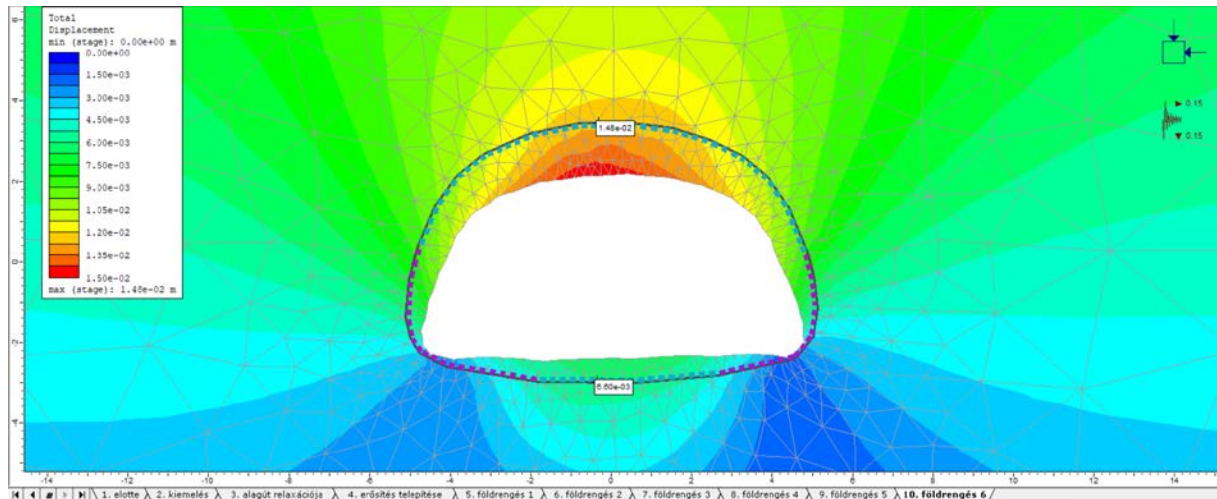
A földrengés terhek nélküli maximális elmozdulás a már kétszeresen megerősített alagútkeresztmetszetben 9,9 mm. Elmozdulás ábrája itt látható:



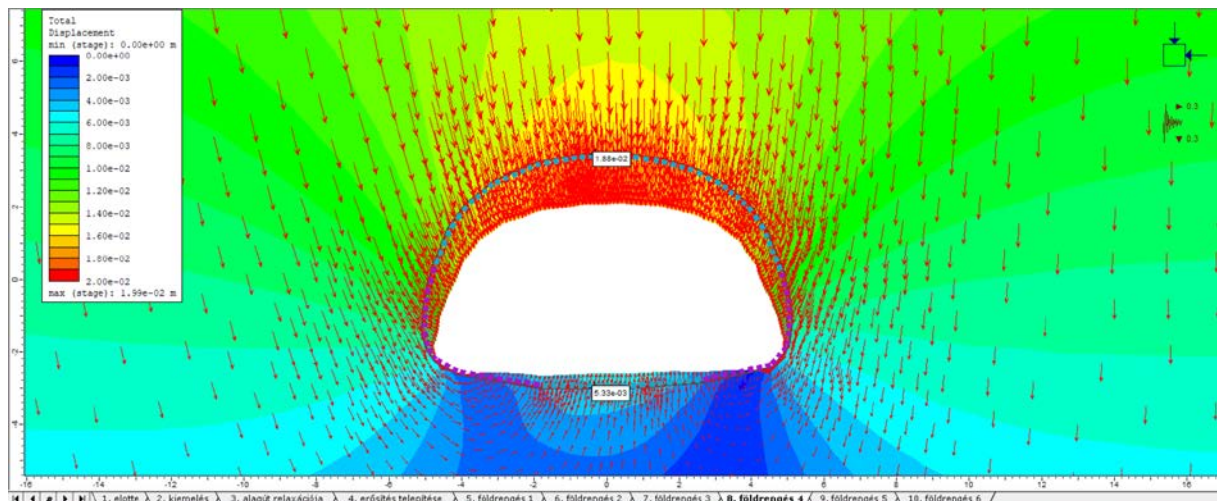
26. ábra A GSI = 30-as eset földrengés nélküli abszolút elmozdulás ábrája

Az alagút keresztmetszetére ugyanazok elmondhatók, mind a GSI=55-ös esetre, azzal a módosítással, hogy itt az alagút talp részén még nagyobb elmozdulások alakultak ki. Az elmozdulni kívánó kőzettömeg még nagyobb sugárban mobilizálódik.

Az általam választott két főinformációt hordozó elmozdulás ábra földrengés teher esetén a következő:



27. ábra GSI= 30, magyarországi mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája
[b) tehereset]



28. ábra GSI= 30, extrém esetben mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája
[f) tehereset]

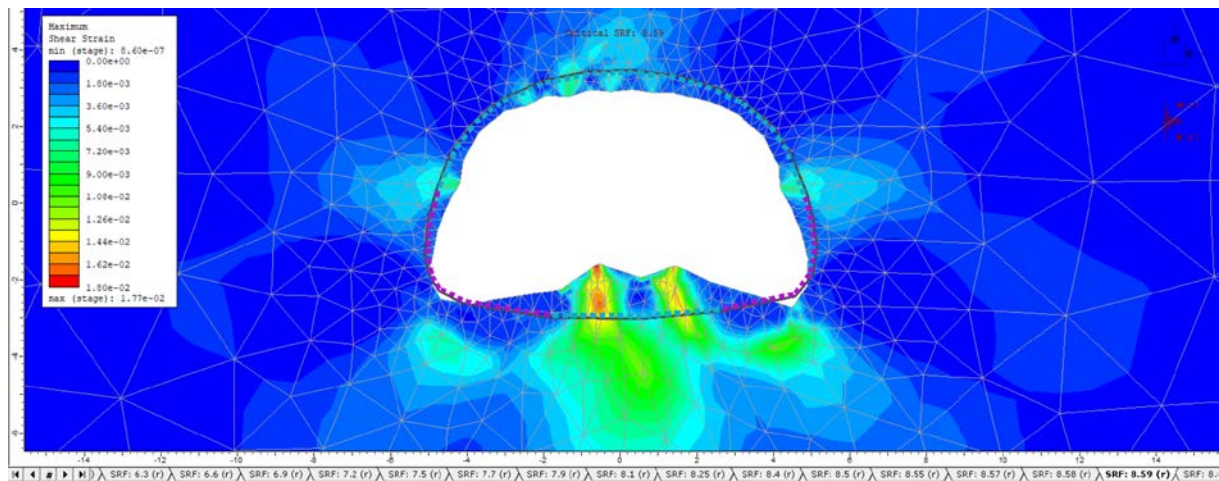
A 27-28.as ábrán látható elmozdulás ábrák alakilag hasonlóak az előző két esethez. A b) teheresetben 14,8 mm-t, az f) esetben 19,9 mm-t mozdult be maximálisan a főte. Látható, hogy az alagútát 1-1,5D-nyi távolságban körülvevő kőzettest bemozdul. Az elmozdulás irányát a 28. ábrán látható piros nyilakkal mutatom meg. Amelyek nem csak az elmozdulás irányát, hanem az elmozdulásnak egy fajlagos nagyságát is megadja.

A következő táblázatban felsorolom a maximális elmozdulásokat az adott földrengésetekre, amiket az előző alfejezetben (4.2.) részleteztem (a-f):

6. táblázat GSI = 30 esethez tartozó elmozdulások

GSI 30						
<i>eset</i>	<i>a (0,15g)</i>	<i>b (0,15g)</i>	<i>c (0,20g)</i>	<i>d (0,20g)</i>	<i>e (0,30g)</i>	<i>f (0,30g)</i>
<i>maximum elmozdulás [m]</i>	$9,28 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$9,35 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$
<i>elmozd. helye</i>	talp	főte	talp	főte	talp	főte

A számításaim alapján az alagút teljes biztonsága (vonalmenti megerősítéssel), a legrosszabb vizsgált kőzetkörnyezetre, földrengés teher nélkül 10,84 volt. A legkisebb biztonsági tényezőt az f) tehereset adta, amikor az 8,59 volt. A teljes földrengés okozta biztonsági tényező csökkenés 2,25 volt.

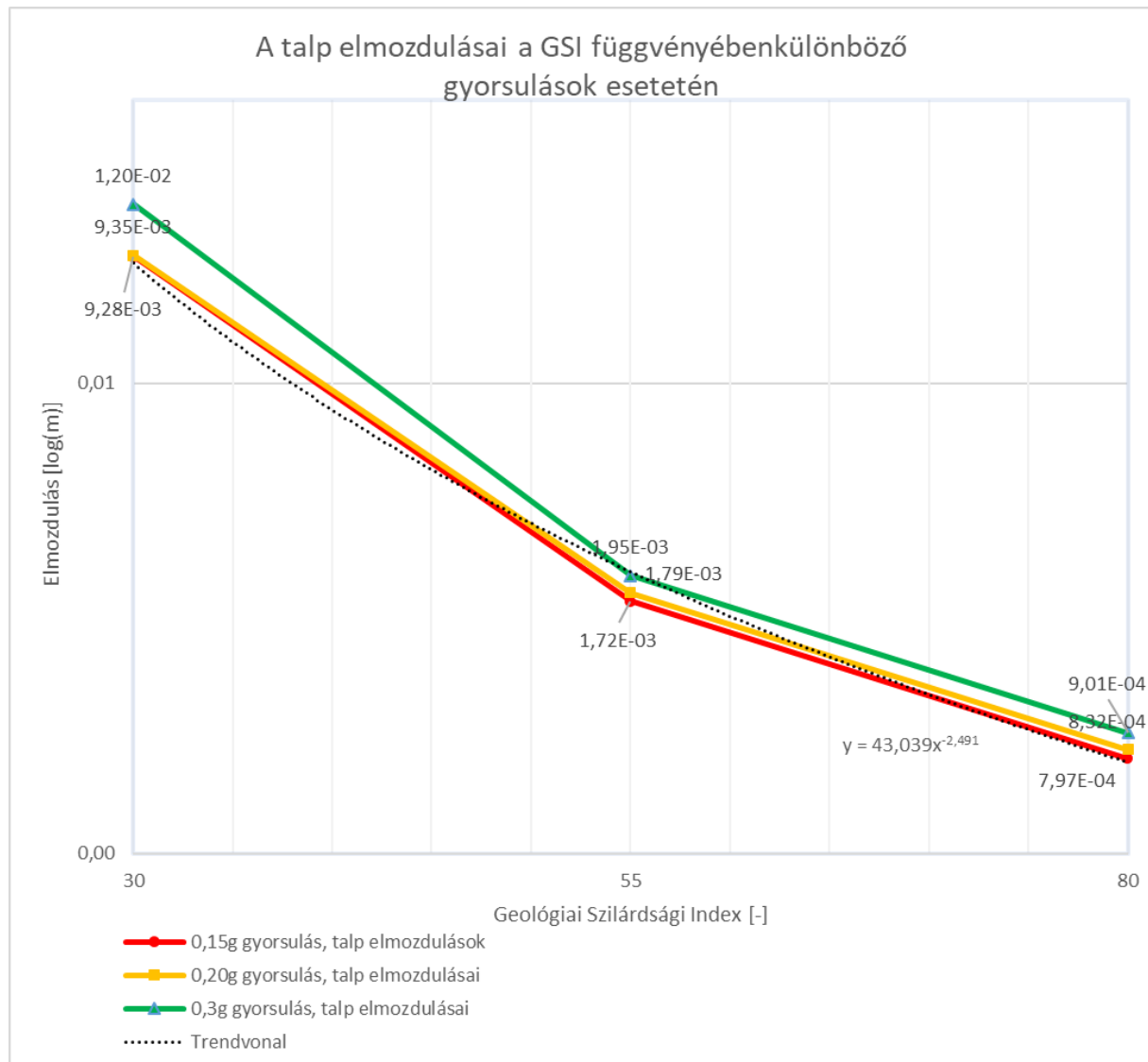


29. ábra 30. ábra GSI = 30, Kritikus nyírószilárdsági csökkentéshez tartozó nyírási deformációs ábra [f) tehereset]

Az ábrán (29. ábra) látható, hogy ellentétben a GSI=55, és a GSI=80 esettel a legnagyobb deformáció nem az alagút oldalfalain történt, hanem az alagút talpán. Itt is merült ki az alagút ellenállása. Ennek az egyik lehetséges oka a 30 cm-es löttbeton vonalmenti erősítés csak lokális használata, ami így merevség különbséget okozott az alagút sarkai és a talp többi része között. Másik lehetséges ok, hogy a gyengébb szilárdságú (képlékenyebben alakváltozó) kőzetkörnyezetben az alagút a nagy függőleges terheket ezzel a mechanikai viselkedéssel tudta felvenni.

5. Eredmények kiértékelése

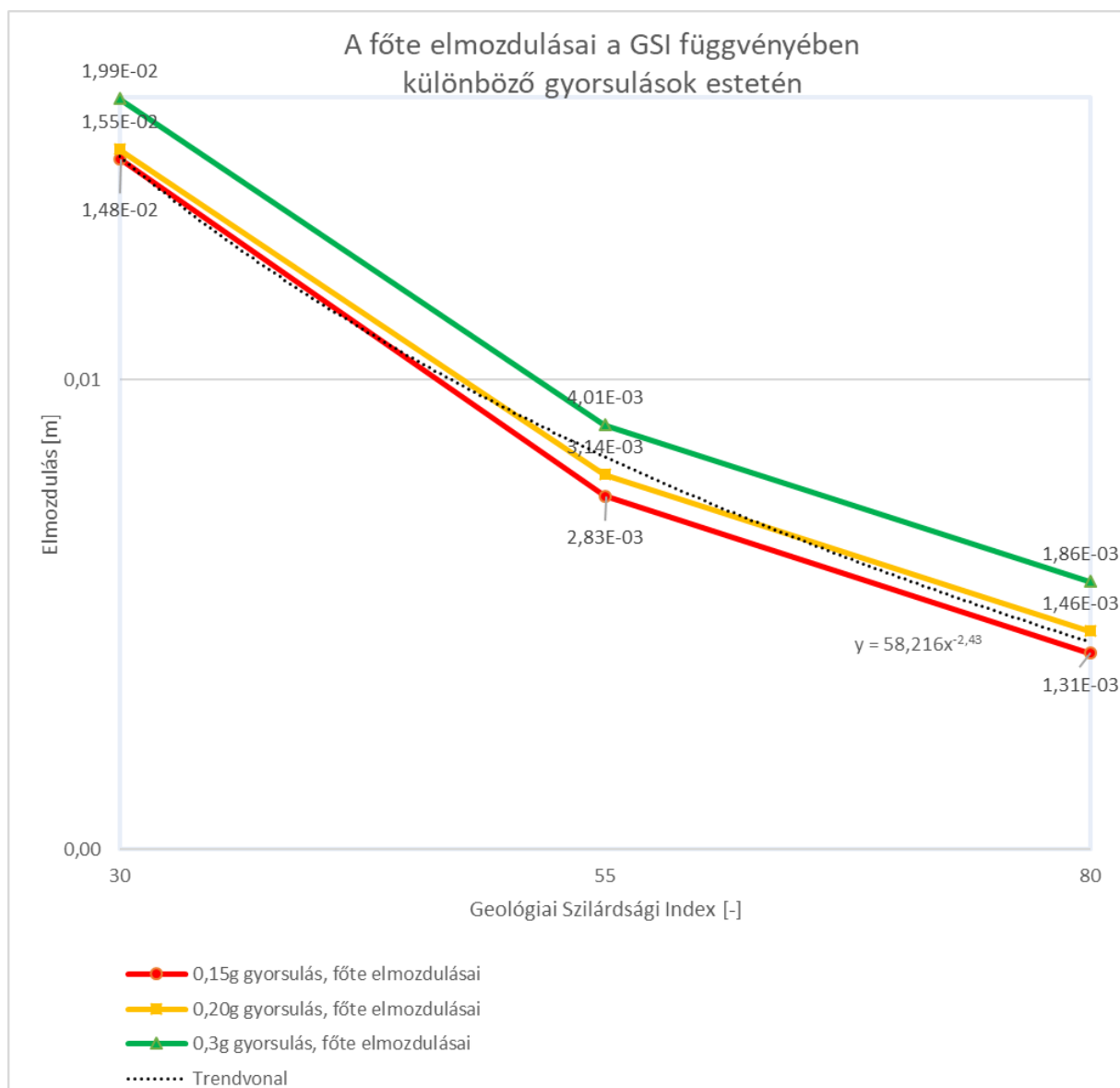
Az elkészített modellek eredményei alapján összeállítottam három diagrammot. A diagrammokkal szeretném szemléltetni a modellben szereplő alagút viselkedését, mind a szeizmikus, mind a kőzetkörnyezet változásának hatásaira.



31. ábra A talp elmozdulásai a GSI függvényében különböző gyorsulási esetetén

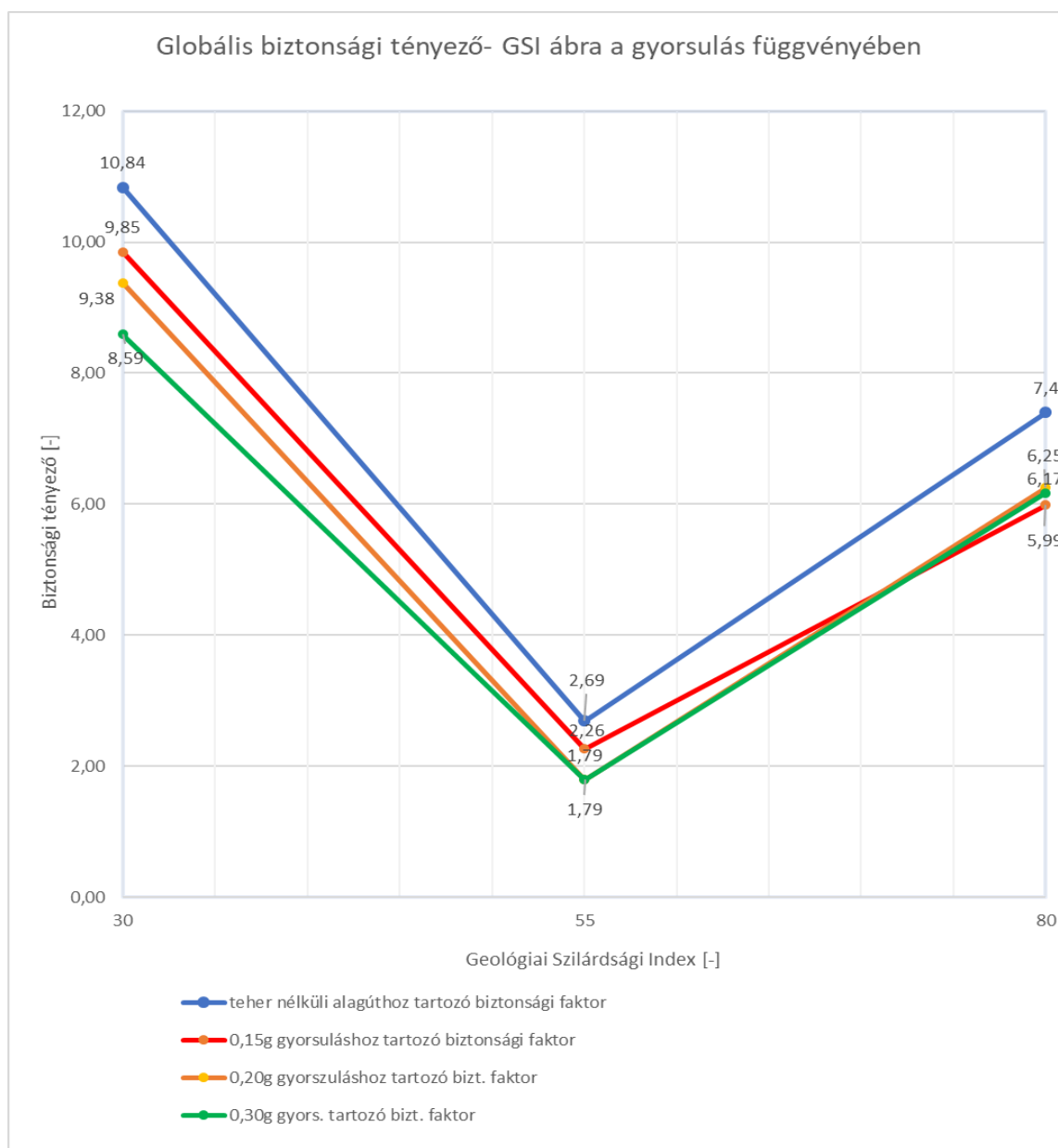
A fenti ábrán (31. ábra) a vízszintes tengelyen a három vizsgált GSI érték található. A függőleges tengelyen az alagút talpán keletkező elmozdulások szerepelnek logaritmikus skálán, mivel az egyes alakváltozások között nagyságrendi különbségek voltak. Így szemléletesebben láthatók a görbék adta trendek. Az egyes görbékhez különböző gyorsulás értékek tartoznak, a jelmagyarázatban ezek különböző színekkel vannak feltüntetve. A görbék által mutatott elmozdulás értékek az a), c) és e) terhesethez tartoznak.

Az ábra görbéiből kiderül, hogy a Geológiai Szilárdsági Index változása erősen befolyásolja az alagút elmozdulásainak mértékét. A gyorsulások kismértékű növekedésének hatása az alacsonyabb 0,15-0,20g-s tartományában nem keletkezik számottevő elmozdulás növekmény. Viszont a 0,20g és 0,30g növekedésre jellemzően magasabb elmozdulások vonatkoznak. Ezek a nagyobb elmozdulási növekmények főképp a GSI=30, azaz a gyengébb, hamarabb képlékenyedő kőzetkörnyezetre jellemző. Az erős blokkos kőzettestben (GSI=80) elhelyezkedő alagút a gyorsulás növekedésére kevésbé reagál. A kvázi középértéknek számító, 0,20g-s gyorsulási görbére trendvonalat illesztettem, amelynek egyenlete az ábrán látható. A közepes GSI értékekre ez a trendvonal eltér az eredményeimtől. Pontosabb trendvonalat akkor lehetne készíteni, ha növelnénk a mintaszámot, és ezzel jobban közelítenénk a valós eredményeket.



32. ábra A főtte elmozdulásai – GSI ábra, a gyorsulások függvényében

A második diagrammon (32. ábra) látható főte elmozdulásokat azért kezeltem külön a talptól, mert itt az elmozdulás értékek az egyes GSI értékekhez nagyságrenddel nagyobbak lettek, és így külön ábrán tisztábban áttekinthetők. A vízszintes tengelyen ismét a GSI értékek, a függőleges tengelyen pedig az elmozdulások logaritmikus skálája látható. A görbék színe és jelzése is azonos. A görbék ebben az esetben a *b)*, *d)* és az *f)* tehereset elmozdulásait mutatják. Az elmozdulások értéke csökken a GSI érték növelésével. Ezen az ábrán látható, hogy a főtén keletkezett elmozdulási növekmények a gyorsulás növelésére szinte konstansok az egyes GSI esetekben. Ezen a diagramon is megállapítható, hogy a gyorsulást növelve kezdetben kis, később egyre nagyobb elmozdulásokat kapunk. A trendvonal jobban megközelíti a görbét még közepes GSI értékek esetén is.



33. ábra Globális biztonsági tényező – GSI ábra, a gyorsulások függvényében

A harmadik diagramm (33. ábra) a globális biztonsági tényező változását taglalja a GSI növelésére. A vízszintes tengelyen hasonlóan az előzőkhöz a Geológiai Szilárdsági Index vizsgált esetei helyezkednek el. A függőleges tengelyen a kritikus nyírási redukciós tényező, azaz az alagút globális biztonsága áll. A görbék itt is az egyes gyorsulásokhoz tartoznak, a mérvadó teheresetet figyelembe véve, amikor a gyorsulás vektorok lefelé mutattak *b)*, *d)* és *f)*. Ezen kívül a kék (legfelső) görbe a terhelés nélküli alagút biztonsági tényezőjét mutatja. A GSI=30-as értékek a megerősített alagútra vonatkoznak.

A megerősítetlen alagút értékei, amelyek nem szerepelnek a diagrammon a következők:

7. táblázat GSI =30 megerősítés nélküli alagút biztonsági tényezői

	Tehereset			
	<i>terhelés nélkül</i>	<i>b) 0,15 g</i>	<i>d) 0,2 g</i>	<i>f) 0,3 g</i>
Biztonsági tényező [-]	1,24	1,21	1,23	1,13

A diagrammon egy anomália látható, hiszen a GSI=30-hoz tartozó biztonsági tényezők a legmagasabbak, holott ezeket a jobb GSI értékekre várnánk. Ez azért lehetséges, mivel a vonalmenti erősítés jelen van. A löttbeton rugalmassági modulusa jóval nagyobb (24GPa), mint a GSI által redukált kőzetkörnyezeté (1,6GPa). Ezért is tartottam fontosnak az erősítés nélküli biztonsági tényezők eredményeinek bemutatását. Amiből az látszik, hogy a biztonsági tényezők követik azt a trendet, hogy a GSI értékkel együtt nőnek.

A GSI=30-as megerősített esetben az is látszik, hogy a gyorsulás növekedésére a biztonsági tényező rohamosan csökken, jóval nagyobb mértékben, mint az erősebb kőzetkörnyezetben lévő alagúté. A magas GSI értékkel rendelkező sávban az is látszik, hogy a biztonsági tényező értéke kisebb mértékben változik a gyorsulás értékeire. Sőt a biztonsági tényező nem is csökken a gyorsulás növelésére, mint az várható lenne, hanem nő (4.3.1. fejezetben kifejtve). Egy közepes GSI értéknél szépen megfigyelhető a biztonsági érték csökkenése a gyorsulás növekedésére, viszont itt is látszik, hogy a gyorsulás növekmény nem egyenesen arányos a biztonság romlásával.

6. Összefoglalás és kitekintés

Az dolgozat fő kérdésére választ keresve komplex modelleket készítettem, melyekben nem csak egy földrengés teherre vonatkoztatható tervezési feladatot akartam megoldani. A modellek felépítése során megállapítottam egy nyolc lehetséges teheresetet magába foglaló csoportot. A kőzetkörnyezet változtatása során három esetet vettem figyelembe. Ezeknek a variációiból akartam megállapítani az alagutak viselkedését.

A számításaimból levonható következtetések az alábbiak:

- A Geológiai Szilárdsági Index változásainak hatása a földrengés-teher által okozott elmozdulásokra, nem lineáris összefüggés, hanem hatványfüggvénnyel írható le. Ennek a függvénynek a pontos meghatározásához növelni kell a vizsgálati mintaszámot.
- A földrengés-terhek gyorsulás növekményei (földrengés nagysága) nagyobb elmozdulás különbségeket okoznak egy repedezettebb, mállottabb kőzetkörnyezetben.
- A kisebb GSI értékű kőzetkörnyezetben elhelyezkedő alagút vonalmenti megtámasztása nagyban befolyásolja a globális biztonsági tényezőt.
- Az erős kőzetkörnyezeti esetet vizsgálva az alagút állékonysága fordítottan viselkedett a teher nagyságának növelésére. Azaz kisebb teherre kisebb volt az állékonysága, mint nagyobb teherre. Ez a kőzettest ridegségéből is adódhat.
- A szeizmikus terhek nagy mértékben csökkentik az alagút állékonyságát mind kis, mind nagy GSI értékek esetén.

Az eredményeket szummázva, elmondható az, hogy 0,15g-s, azaz magyarországi szeizmikus viszonyok között fellépő, terhelések hatása elhanyagolható az alagutakra nézve. De az ennél nagyobb szeizmikus aktivitással rendelkező országokban, hogy közeli példát említsek Horvátország, Románia, akár 0,4g-s gyorsulással is számolni kell. Ezekben az esetekben pedig igen fontos, hogy megfelelő körültekintéssel járjunk el egy kiemelt mélyépítési műtárgy megtervezésénél. A jelenlegi számításommal, és a jövőbeli számításaimmal ennek a tervezési folyamatnak a megkönnyebbítését szeretném elérni.

A kitekintés részben el szeretném mondani azt, hogy az elképzelésemet, hogyan lehet továbbfejleszteni. Amely lehetőségeket itt össze is gyűjtöttem:

- A modellek számának bővítése; a vizsgált eseteken kívül lehet változtatni mind a gyorsulás értékeit, mind a kőzetkörnyezet GSI-jének nagyságát, ezzel nagyobb számú mintát előállítva.
- Az eddig használt kőzet fizikai paramétereit szakirodalmi javaslatok alapján vettem fel, ezt lehetne módosítani széleskörben előforduló több konkrét anyag bemenő paramétereire. Ezzel is növelve a gyakorlatba való átviteli lehetőséget.
- A GSI módszer helyett a kőzettest valós tagoltságait figyelembe venni, nem folytonos, folytonos tagoltságokat elkülöníteni, anizotróp tulajdonságú kőzetet vizsgálni.
- A pszeudo-statikusszeizmikus terhek helyett megfelelő dinamikus terhek hatásait is meg lehetne vizsgálni a modelleken. Akár egy megtörtént földrengés idő – gyorsulás diagramja alapján is lehetne számítani.
- A modelleket felépíteni egy másik végeselemes program segítségével (FLAC, Plaxis)
- A modellt 3D-ben is felépíteni ezzel is jobban megértve a térbeli viselkedését.

A felsorolást tovább is folytathatnám, de a lehetőségek tárháza szinte végtelen, ezek az általam legfontosabbnak vélt változtatások. A jövőbeli tervem továbbfejleszteni ezt az elképzelést diplomamunka vagy jövőbeli TDK dolgozat formájában.

Irodalom jegyzék

- Asheghabadi, M.S., Matinmanesh, H. (2011) - Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils with Consideration of Soil-Tunnel Interaction. *Procedia Engineering* 14, 3162-3169 pp.
- Dowding, C.H., Rozan, A. (1978) - Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *ASCE J Geotech Eng Div* 104/2, 175-191 pp.
- Görög P., Vámos M., Török Á., Vásárhelyi B. (2010) - A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) magyarországi alkalmazhatósága. *Földtani Közlöny* 140(1): 89-96 pp.
- Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.C. (2001) - Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16/4, pp. 247-293
- Hashash, Y.M.A., Park, D., Yao, J.C. (2005) - Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20/5, 435-441 pp.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980) - Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div. ASCE* 106 (GT9), 1013-1035 pp.
- Hoek, E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002) - Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac 1*, 267-273 pp.
- Hoek, E., Diederichs, M.S. (2006) - Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215 pp.
- Jaramillo, C.A. (2017) - Impact of seismic design on tunnels in rock – Case histories. *Underground Spaces* 2, 106-114 pp.
- Kampas, G., Knappett, J.A., Brown, M.J., Anastasopoulos, I., Nikitas, N., Fuentes, R. (2019) – The effect of tunnel lining modelling approaches on the seismic response of sprayed concrete tunnels in coarse-grained soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 117, 122-137 pp.
- Karakuş, M., Fowell, R.J. (2004) - An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). *ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*, 1-3 pp.
- Marinos, P.G., Marinos, V., Hoek, E. (2007) – The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. *Underground works under special conditions*, 13-21 pp.
- Törös E. (2006) - A szeizmikus módszer geotechnikai alkalmazásainak kritikai vizsgálata. *Értekezés doktori (PhD)* 10-18 pp.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. (2009) - Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mech Rock Engng* 42 131–146 pp.
- Vásárhelyi B. (2003) - A módosított Hoek-Brown törési kritérium. *Bányászat* 136(5), 276-280 pp.
- Völgyesi L. (2019) – Mérnökseizmológia. *Egyetemi jegyzet*, <http://volgyesi.hotserver.hu/>,

Ábrajegyzék

1. ábra Longitudinális hullámok (P) terjedése rugalmas szilárd kőzetben.....	4
2. ábra Transzverzális hullámok (S) terjedése rugalmas szilárd kőzetben.....	5
3. ábra Rayleigh hullámok terjedése rugalmas szilárd kőzetben	5
4. ábra Másodlagos (Love) hullámok terjedése kőzetekben	6
5. ábra Globális földrengés eloszlás térképe	9
6. ábra Magyarország szeizmikus zónatérképe EUROCODE 8 szerint.....	9
7. ábra A Geológiai Szilárdsági Index meghatározása.....	12
8. ábra A Hoek-Brown törési feltétel ábrázolása a Mohr-Coulomb feltétel mellett	13
9. ábra Vlachopoulos és Diederichs módszer.....	15
10. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstéher mellett (a) (GSI=30).....	18
11. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstéher mellett (b) (GSI=30).....	19
12. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstéher mellett (c) (GSI=30).....	19
13. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstéher mellett (d) (GSI=30).....	20
14. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstéher mellett (e) (GSI=30).....	21
15. ábra Végeselemes program, abszolút elmozdulások ábrája földrengéstéher mellett (f) (GSI=30).....	21
16. ábra A GSI = 80-as eset földrengés nélküli abszolút elmozdulás ábrája	23
17. ábra GSI= 80, magyarországi mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája	24
18. ábra GSI= 80, extrém esetben mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája	24
19. ábra GSI = 80, Kritikus nyírószilárdsági csökkentéshez tartozó nyírási deformációs ábra	25
20. ábra A GSI = 55 eset, földrengés nélküli abszolút elmozdulás ábrája.....	26
21. ábra GSI= 55, magyarországi mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája	26
22. ábra GSI= 55, extrém esetben mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája	26
23. ábra GSI = 55, Kritikus nyírószilárdsági csökkentéshez tartozó nyírási deformációs ábra	27
24. ábra Vonalmenti támasz (20 cm löttbeton) igénybevételi grafikonja biztonsági tényezőkkel (GSI=30).....	29
25. ábra Vonalmenti támasz (30 cm löttbeton) igénybevételi grafikonja, kritikus pont jelöléssel (GSI=30).....	29
26. ábra A GSI = 30-as eset földrengés nélküli abszolút elmozdulás ábrája	29
27. ábra GSI= 30, magyarországi mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája	30
28. ábra GSI= 30, extrém esetben mérvadó gyorsulás mellett az abszolút elmozdulások ábrája	30

29. ábra 30. ábra GSI = 30, Kritikus nyírósilárdsági csökkentéshez tartozó nyírási deformációs ábra [f) tehereset]	31
31. ábra A talp elmozdulásai - GSI ábra a gyorsulások függvényében.....	32
32. ábra A főte elmozdulásai – GSI ábra, a gyorsulások függvényében.....	33
33. ábra Globális biztonsági tényező – GSI ábra, a gyorsulások függvényében.....	34

Táblázatjegyzék

1. táblázat Kőzetek primer hullámainak terjedési sebessége	7
2. táblázat A földrengések osztályozása elfordulás és energia felszabadulás alapján.....	8
3. táblázat A kőzetkörnyezet mechanikai paraméterei, a módosított Hoek-Brown anyagmodell és a szakirodalmi ajánlások alapján	16
4. táblázat GSI =80 esethez tározó elmozdulások.....	24
5. táblázat GSI =55 esethez tározó elmozdulások.....	27
6. táblázat GSI =30 esethez tározó elmozdulások.....	31
7. táblázat GSI =30 megerősítés nélküli alagút biztonsági tényezői.....	35