



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GEOTECHNIKAI TANSZÉK**

Kaposvári cukorgyári siló back analízis vizsgálata 3D végelelemes modellezéssel



Készítette:

Lődör Kristóf – IA27WE
MSc építőmérnök hallgató

Belső konzulensek:

Dr. Móczár Balázs egyetemi docens
Dr. Mahler András egyetemi docens

Budapest, 2015

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Tudományos Diákköri dolgozat témája	4
3. Kiindulási adatok.....	5
3.1 A tervezett szerkezet adatai	5
3.2 Rigid Inclusion alapozási rendszer ismertetése	7
3.3 Héjszerkezet ismertetése.....	9
3.4 Talajadottságok.....	11
3.5 Talajvízviszonyok.....	16
3.6 Szeizmicitás	16
3.7 Geotechnikai paraméterek	17
4. Plaxis 2D végelelemes modellezés	18
5. Plaxis 2D végelelemes modellt reprodukáló Plaxis 3D modell.....	23
6. Back analízis vizsgálat alapjául szolgáló Plaxis 3D modell	28
6.1 Modellezési tartomány kialakítása	28
6.1 Talajgeometria modellezése	29
6.2 Talajrétegek vizsgálatához alkalmazott anyagmodell	31
6.3 Talajfizikai paraméterek	33
6.3.1 Rugalmassági modulusok meghatározása.....	33
6.3.2 Kis alakváltozási paraméterek meghatározása.....	36
6.3.3 Talajfizikai paraméterek összegzése.....	39
6.4 Szerkezeti elemek modellstruktúrája.....	41
6.4.1 Cölöpök.....	41
6.4.2 Talpgerenda, lemez-, interface- és geogrid elemek	45
6.5 Töltőanyag modellezése	49
6.6 Vizsgálati eredmények	51
6.7 Paraméteranalízis, érzékenységvizsgálat.....	59
6.7.1 HS anyagmodell.....	59
6.7.2 Lineáris változású palástellenállás	60
6.7.3 3D cölöpök.....	62
6.7.4 Összegzés.....	64
7. Megállapítások	65
8. Köszönetnyilvánítás	66

Ábrajegyzék	67
Táblázatok jegyzéke	69
Irodalomjegyzék.....	70
Melléletek.....	71
Kompressziós görbék	72
CFA cölöpök talp- és palástellenállásainak számítása	75
Back analízis alapjául szolgáló Plaxis 3D modell eredményei	80
Monitoring rendszer eredményei	

1. Bevezetés

Manapság, a végeselemes szoftverek mindennapos alkalmazása lehetővé teszi a szerkezetek gyors és egyszerű elemzését. Ez megteremti az igényt, hogy minél szélesebb körű ismeretanyagra tegyünk szert a megtervezett szerkezetekről. Az elkészült építmények viselkedésének utólagos, hosszú távú vizsgálatának érdekében a különféle monitoring rendszerek kiépítése lassan mindennapossá válik, melyek folyamatos adatszolgáltatást nyújtanak. Fontossá vált ezen információk részletes kiértékelése, mivel nagyobb volumenű, szerkezetileg hasonló építmények tervezésénél, kivitelezésénél a projekt költségeinek mértéke csökkenhet, továbbá nem elhanyagolható az sem, hogy műszakilag pontos szerkezeti magatartást tudunk megvalósítani.

Kutatásom egyrészt arra irányult, hogy egy elkészült, cukor tárolására alkalmas silót képes legyek a lehető legréálisabban modellezni 3D végeselemes szoftver segítségével a rendelkezésemre bocsájtott tervdokumentációk alapján, valamint paramétervizsgálatokon keresztül pontos képet kapjak a talaj és szerkezet együttes viselkedésére. Kimutattam, hogy az egyes modellezési technológiák egymástól eltérő eredményt adnak, olykor túlbecsülik a ténylegesen kialakuló eredményeket és a gazdaság kárára tévednek. Továbbá megvizsgáltam, hogy a hazai gyakorlatban, geotechnikai tervezések során legtöbbször alkalmazott 2D végeselemes modellezéskor kapott eredmények, mennyiben térnek el, ha ugyanazokat a geometriai és talajfizikai paramétereket beépítjük egy 3D-s modellbe.

3D végeselemes szoftverrel készített back analízis során lehetőség van többféle modellezési technológia összehasonlítására, paramétervizsgálatokkal optimalizálni a bemeneti paramétereket, továbbá anyagmodellek segítségével az egyes elemek, valamint a teljes szerkezet valós viselkedését reprodukálhatjuk. Az így kapott tapasztalati információkat a későbbi tervezéseink során hasznosíthatjuk és továbbfejleszthetjük.

2. Tudományos DiákKöri dolgozat témája

Kaposváron, a Magyar Cukor Zrt. területén 2013-ban új ~60 m átmérőjű cukorsilót létesítettek (1. ábra). A siló kivitelezését az amerikai Dome Technology vállalat nyerte el, aki az aléptímeny kivitelezési tervdokumentációjának elkészítésére az MMérnöki Iroda Kft.-t, az alapozás kivitelezésére pedig a Strabag MML Kft.-t bízta meg. Geoplan Kft. ezt követően kapcsolódott be a tárgyi beruházás tervezésébe az MMérnöki Iroda Kft. felkérésére. Feladatuk az alapozás geotechnikai határállapotának számítása és ellenőrzése volt.



1. ábra: Megvalósult cukorgyári siló [www.trademagazin.hu]

A Tudományos DiákKöri dolgozatom (TDK) témája a már megépült szerkezet back analízis vizsgálata Plaxis 3D végeelemes modellezéssel. Az elemzés során törekedtem az elkészült építményt és a kialakult talajviszonyokat reprodukálni annak érdekében, hogy a keletkezett szerkezeti viselkedéseket a lehető legpontosabban vizsgálni tudjam. A megvalósulást követően monitoring rendszert, mérési pontokat létesítettek és a süllyedések mértékét geodéziai mérésekkel folyamatosan figyelemmel követik és rögzítik.



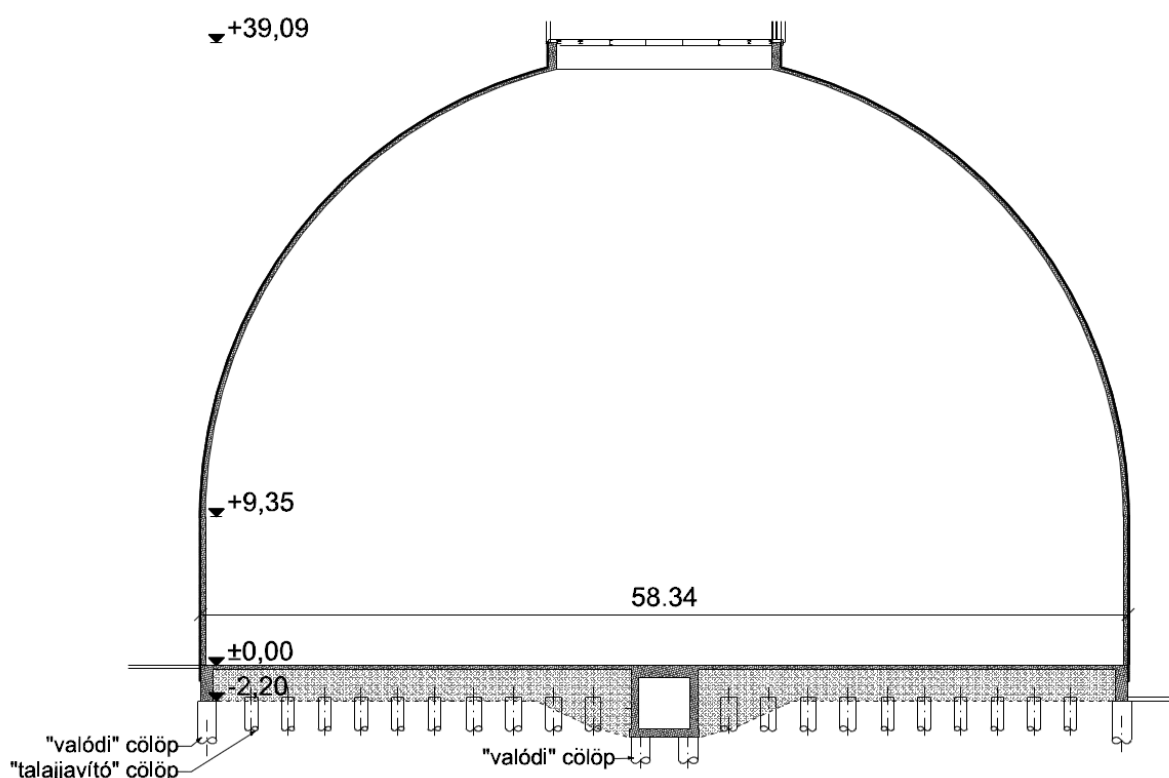
2. ábra: A vizsgált helyszín légifelvétele [Forrás: Google Maps]

3. Kiindulási adatok

3.1 A tervezett szerkezet adatai

A cukorgyár középső területén épült cukor tárolására alkalmas siló kapacitása 60.000 tonna. A forgáspárboid alakú felszerkezetet az alapokkal egy alacsony magasságú függőleges falszerkezet kapcsol össze. A szerkezet alatt létesített alagúton keresztül történik a töltőanyag leürítése, melynek padlószintje a teljes silóhoz képest 4 m mélységben helyezkedik el. A műtárgy főbb geometriai adatai (3. ábra):

- a létesítmény alappontja: $\pm 0,00 = 131,95$ mBf
- felszerkezet külső átmérője: $D = 58,39$ m
- szerkezet magassága: $H \approx 39$ m
- leürítő alagút padló síkja: $-4,00$ m = 127,95 mBf









3. ábra: Szerkezet geometriai kialakítása [2]

A vizsgált helyszín Magyarország DNY-i részén, Kaposvár területén, a Magyar Cukor Zrt. területén fekszik. Az üzem területén korábban létesített nagy terhelésű épületszerkezeteket mélyalapozással készítették, melyeknél átlagosan 16-20 m hosszúságú cölöpöket alkalmaztak. A korábbi 30 m átmérőjű cukorsiló cölöpökkel alátámasztott lemezen adja át a kb. 25.000 tonna terheit, mely az önsúlyból és a tárolt cukorból adódik össze. A létesítmény a rendelkezésre álló mérési adatok alapján a megvalósulás óta ~ 2 cm-t süllyedt.

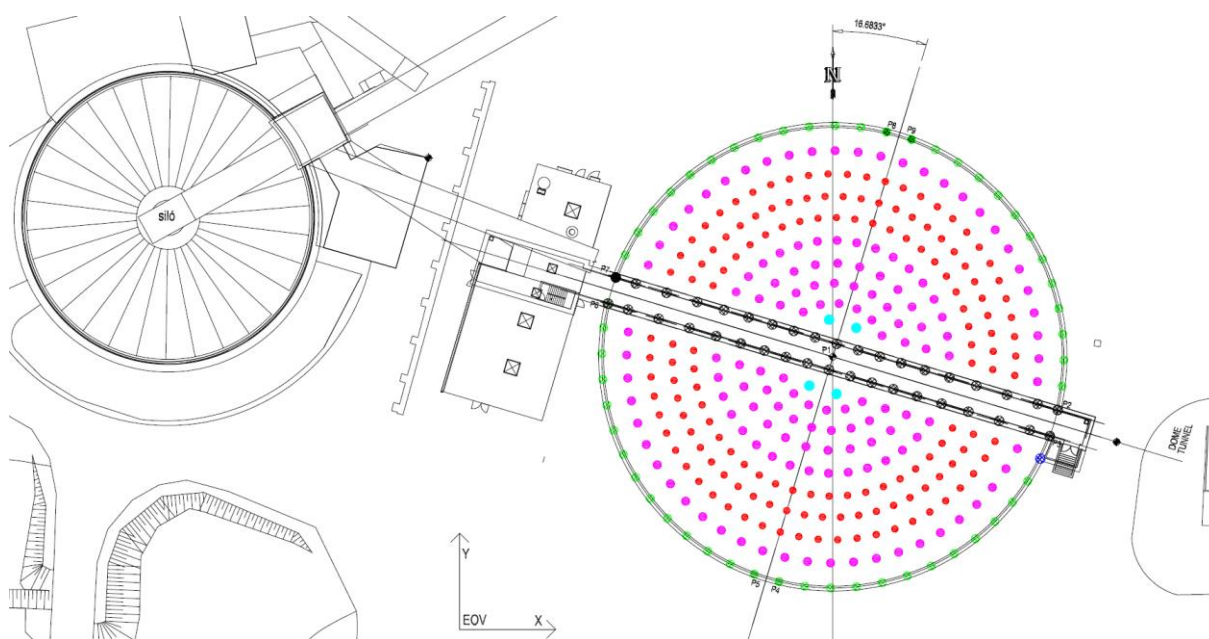
A tervezett siló alapozásának lehetséges kialakításáról részletes tervdokumentációkat készítettek a tervezők, melyek során több alternatívát is megvizsgáltak, többek között síkalapozás, talajjavítás és mélyalapozás. Az egyes változatokat kielemezve, a tartószerkezeti tervezőkkel egyeztetve, a lehető leggazdaságosabb és műszaki szempontokból legkedvezőbb megoldás került megépítésre. A felszíntől számított 10-12 méteres mélységig a talajrétegek

tulajdonságai gyengének minősültek, amely mélyalapozás, valamint talajjavítás igényét támasztotta alá.

A megvalósult szerkezet alatt 25 cm vastagságú vasbeton alaplemez készült. A teherátadást a felszerkezetről az altalajra a szélső peremgyűrű, illetve az alagút mentén a szerkezettel összekapcsolt vasalt cölöpök biztosítják. A szerkezet belső területén vasalatlan beton cölöpök továbbítják a terheket a mélyebben fekvő teherbíró talajrétegekre. Az alaplemez és a vasalatlan cölöpök közötti teherátadást, a terhek elosztását egy megfelelően jó minőségű, durva szemcsés ágyazati réteg biztosítja, mely georácscsal van megerősítve. Az alkalmazott cölöpök paramétereit, adatait az 1. táblázat tartalmazza.

Cölöp jele	Jelölés	Típus	Darabszám	Átmérő [cm]	Hossz [m]
C1		Vasalt beton	51	100	14,70
C2		Vasalt beton	1	100	12,52
C3		Vasalt beton	38	120	12,52
C4		Beton	4	120	14,95
C5		Beton	136	100	14,95
C6		Beton	146	80	14,95

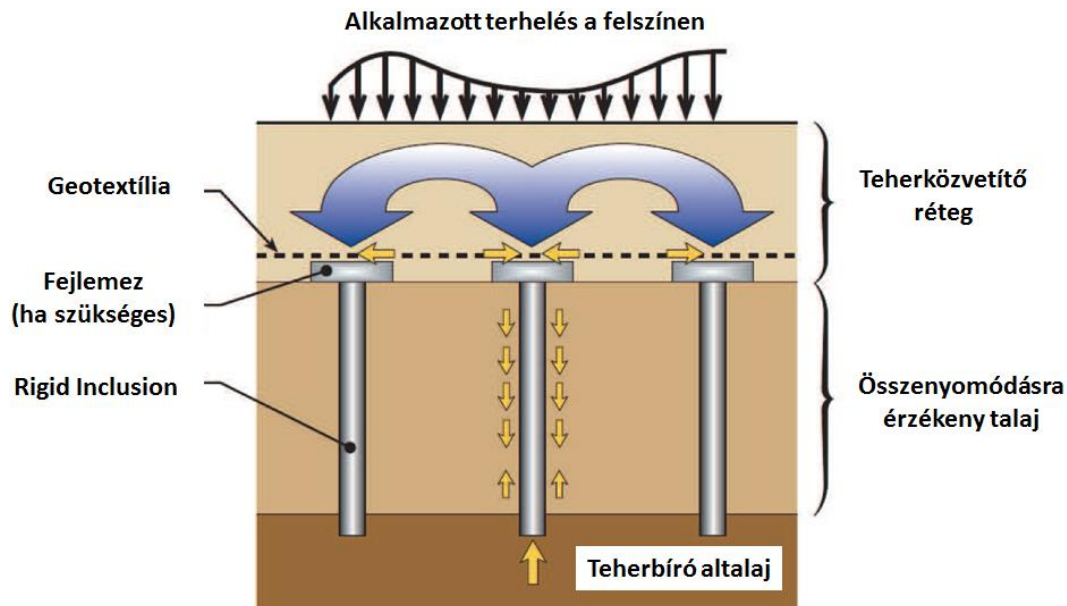
1. táblázat: Alkalmazott cölöpök paramétereit



4. ábra: Cölöpök elhelyezkedése

3.2 Rigid Inclusion alapozási rendszer ismertetése

A Rigid Inclusion rendszer egy olyan komplex alapozási technológia, melynek működési mechanizmusa elsősorban a cölöpökkel gyámolt lemezalpra hasonlít, azonban számos sarkalatos különbség mutatkozik a két eljárás között. A Rigid Inclusion rendszerben alkalmazott merevítő cölöpökre kizárólag tengelyirányú nyomó igénybevétel hat, ebből kifolyólag nincs szükség azok vasalására. Következő fontos különbség a két technológia között, hogy míg a cölöpökkel gyámolt lemezalaprak esetén van közvetlen kapcsolat a merevítő elemek és a lemez között, addig a Rigid Inclusion alapozási rendszerénél nincs, a teherátadást egy megfelelően jól tömörített és kellő vastagságú ágyazati réteg biztosítja.



5. ábra: Rigid Inclusion rendszer működése [5]

A merevítő elemek funkciója kettős:

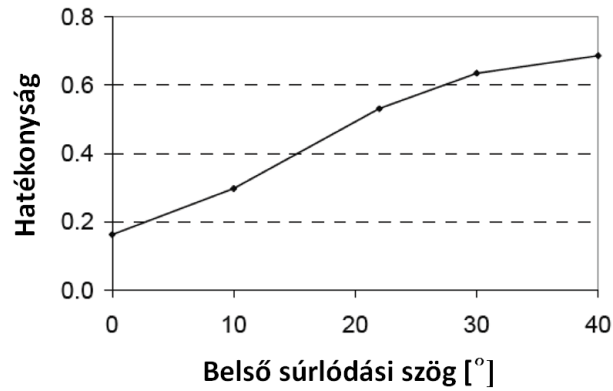
- a gyenge altalaj teherbírásának és süllyedésérzékenységének javítása;
- terhek továbbítása a teherviselő talajrétegreig.

A cölöpök kialakítása különféle cölöpözési technológiák segítségével történhet, melyeknek más és más az előnye. Napjainkban egyre inkább elterjedt talajkiszorításos építési technológiával készített cölöpök műszakilag és gazdaságilag is nagyon kedvező tulajdonságúak, ugyanis eredményesen tömörítik az altalajt az elemek környezetében, kitermelt anyag nélkül.

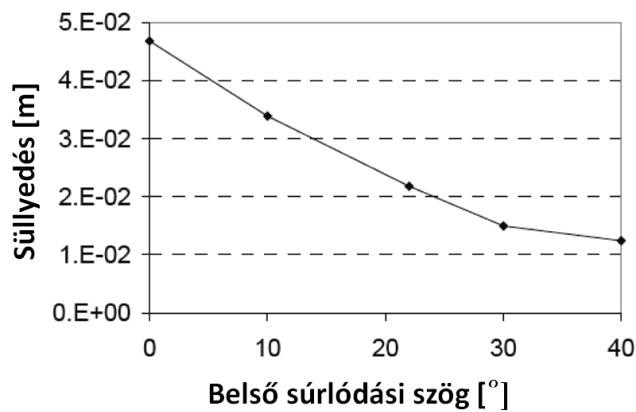
A teherátadó réteg szerepe:

- terhek továbbítása;
- terhek eloszlása.

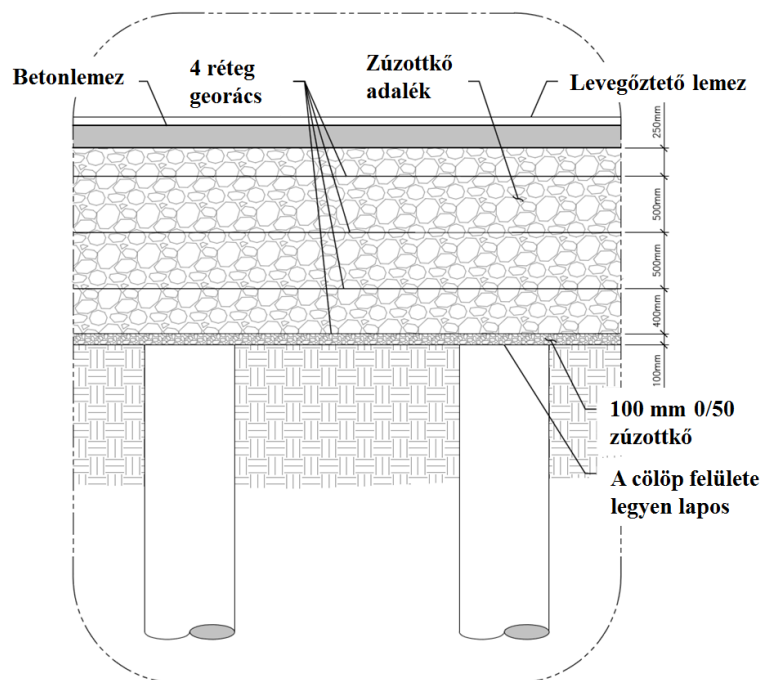
Az ágyazati réteg akkor működik megfelelően, ha kellő vastagsággal, tömörséggel és belső súrlódási szöggel rendelkezik. Ezek együttes elérésével átboltozódás alakulhat ki a rétegben, melynek köszönhetően a merevítő elemek jóval nagyobb terhelést kapnak, így az eredetileg gyenge minőségű altalaj kevésbé lesz süllyedésre érzékeny. Minél nagyobb a teherátadó réteg vastagsága és belső súrlódási szöge, valamint minél kisebb a cölöpök közötti távolság, annál hatékonyabb az átboltozódás hatása.



6. ábra: Ágyzat belső súrlódási szögének és hatékonyságának kapcsolata [5]

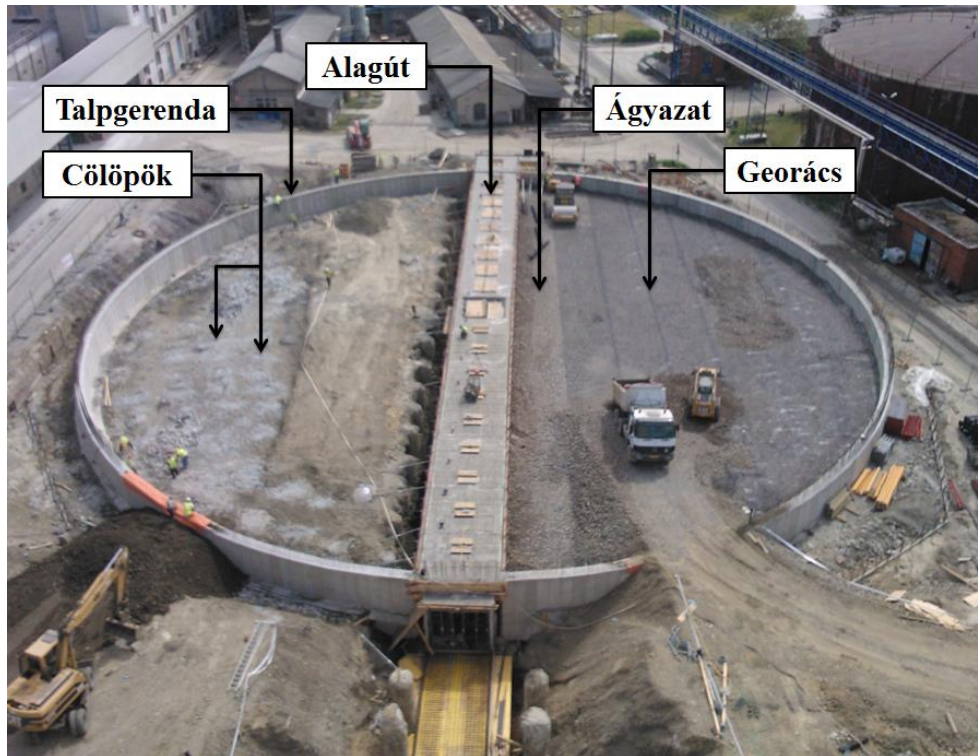


7. ábra: Ágyzat belső súrlódási szögének és a süllyedés viszonya [5]



8. ábra: Ágyazati réteg kialakítása

Lehetőség van a teherközvetítő réteg geoműanyagokkal (geotextília, georács) történő erősítésére. Ezen rétegek szerepe az ágyazaton belüli elhelyezkedésüktől függ. Amennyiben a geoműanyag a teher továbbítását biztosító réteg alsó síkján helyezkedik el, abban az esetben érvényesül a membránhatás, mely elősegíti a teher, oszlopokra történő továbbítását. Merevítő gerendához hasonló merevség érhető el azzal a kialakítással, ha a réteg belsejében helyezkednek el a geoműanyagok.



9. ábra: Siló szerkezeti elemek (építés közbeni állapot)

3.3 Héjszerkezet ismertetése

A felszerkezet tervezését és kivitelezését az amerikai Dome Technology végezte, mely vállalat rendelkezett az építéshez szükséges megfelelő technológiával. A héjszerkezet elkészítéséhez műanyag fóliából készült, belülről levegő túlnyomással kifeszített membránt alkalmaztak, mely a magyar építőiparban ez idáig nem terjed még el széleskörűen. Ennek a kivitelezési módszernek az alapját a Bini-shell technológiával épített épületek szolgáltatták. Héjszerkezetek tervezése során legtöbbször felmerülő probléma a hég alakjának kialakításához szükséges zsaluzatrendszer időigényes és gazdaságtalan felállítása. Dr. Dante Bini ezt forradalmasította azzal az ötlettel, hogy az alapgyűrű elkészülte után, a sík zsaluzaton megcsinálják a vasszerelési munkákat, melyre friss betonréteget hordanak, majd ellenzsaluzatot szerelnek fel. Ezután a zsaluzatot felpumpálják és megfelelő nyomás alatt tartják. A beton megszilárdulása után a szükséges nyílásokat kivágják.

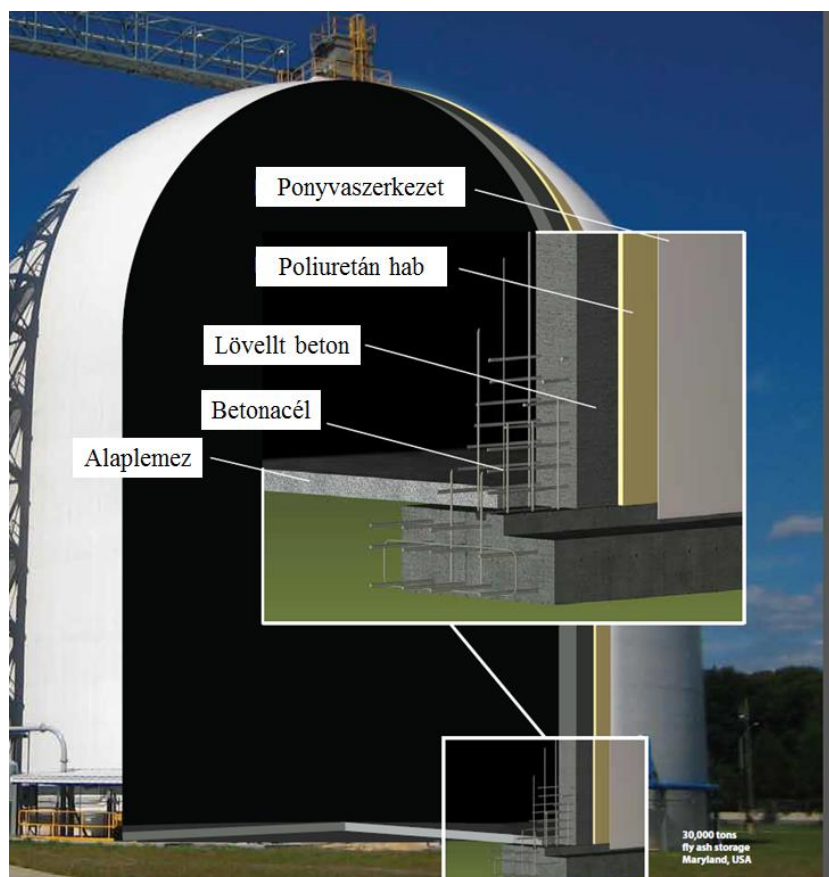
Bini-shell épületek kivitelezésénél felmerülő problémák:

- építés alatti rossz nyomásszabályozás miatt a hég behorpadhat → rossz alak, rossz szilárdság;
- túl- vagy alulnyomás miatt helyenként eltérő görbületek;
- a hégjál rétegek szétválása (pl. hőmérséklet hatására) → különböző szilárdulás.

A manapság készülő héjszerkezetek építéstechnológiája számos helyen eltér a kezdeti Bini-shell építményekétől, azonban az alap gondolat, miszerint a zsaluzatot felfújható fóliával helyettesítik, nem változott.

Dome Technolgy által készített siló szerkezetek építéstechnológiájának főbb elemei:

- Körgyűrű talpgerenda
 - A talpgerendát a talajadottságok, geotechnikai jelentések és a kapcsolódó szerkezetek (héjszerkezet, alagút) ismeretében tervezték meg.
- Fólia
 - A fóliából készült membránhéj zsaluzatot, mely egyben a vízszigetelés is, a talpgerenda széléhez rögzítik. Felfújása után, a siló további szerkezeti elemeinek az elkészítése a felfújott fólián belül történik. Ez azért is kedvező, mert az időjárási viszonyok nem befolyásolják az építés menetét.
- Hőszigetelés
 - A fólia belső felületére poliuretánhab hőszigetelő réteget hordanak fel, mely kezdeti merevséget biztosít, továbbá a külső extrém hőmérsékleti hatásoktól is megvédi a betonszerkezeteket.
- Vasszerelés
 - A betonacélok a poliuretánhab szigetelőréteghez vannak rögzítve, amely további merevséget biztosít a ponyvaszerkezetnek.
- Lövellt beton
 - A betonacélok megfelelő rögzítése után lövellt betonréteget alakítanak ki a megfelelő vastagság eléréséig.



10. ábra: Általános szerkezeti kialakítás [7]



11. ábra: Fólia felfújása

3.4 Talajadottságok

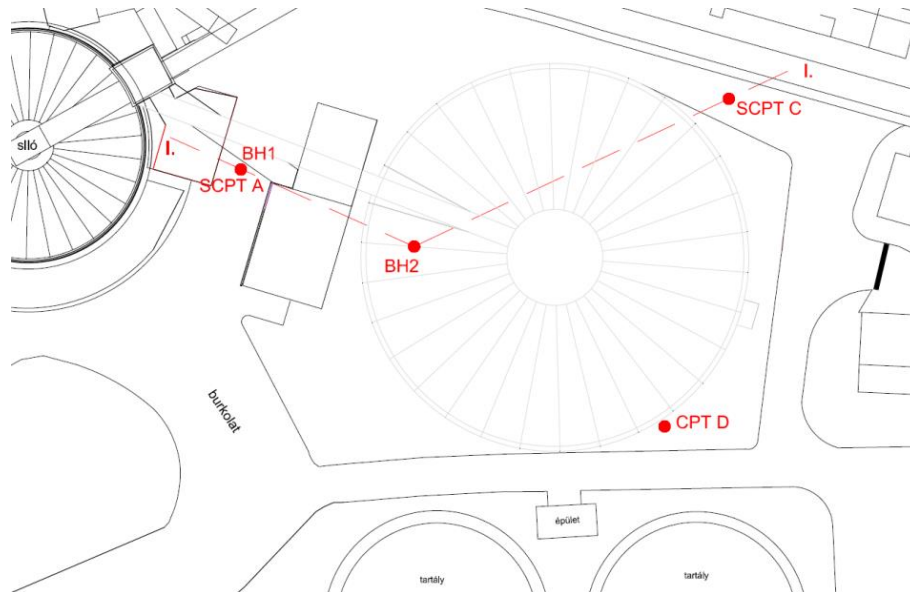
Az elvégzett feltárásokat a Fugro Consult Kft. végezte el, melyek főbb geometriai adatait a 2. táblázat, helyszínrajzot a 12. ábra tartalmazza. A feltárási helyek EOY koordináta-rendszerben és Balti magassági rendszerben kerültek bemérésre.

Feltárás jele	EOV X koordináta	EOV Y koordináta	Terepszint [mBf]	Feltárás időpontja	Feltárás mélysége [m]
BH1	113 009	554 790	130,03	2012.11.12-16	50,00
BH2	207 422	746 638	129,74	2012.11.17-19	50,00
SCPT A	113 097	554 792	130,03	2012.11.20-21	34,75
SCPT C	113 108	554 868	131,65	2012.11.19-20	37,41
CPT D	113 057	554 848	129,79	2012.11.16	37,45

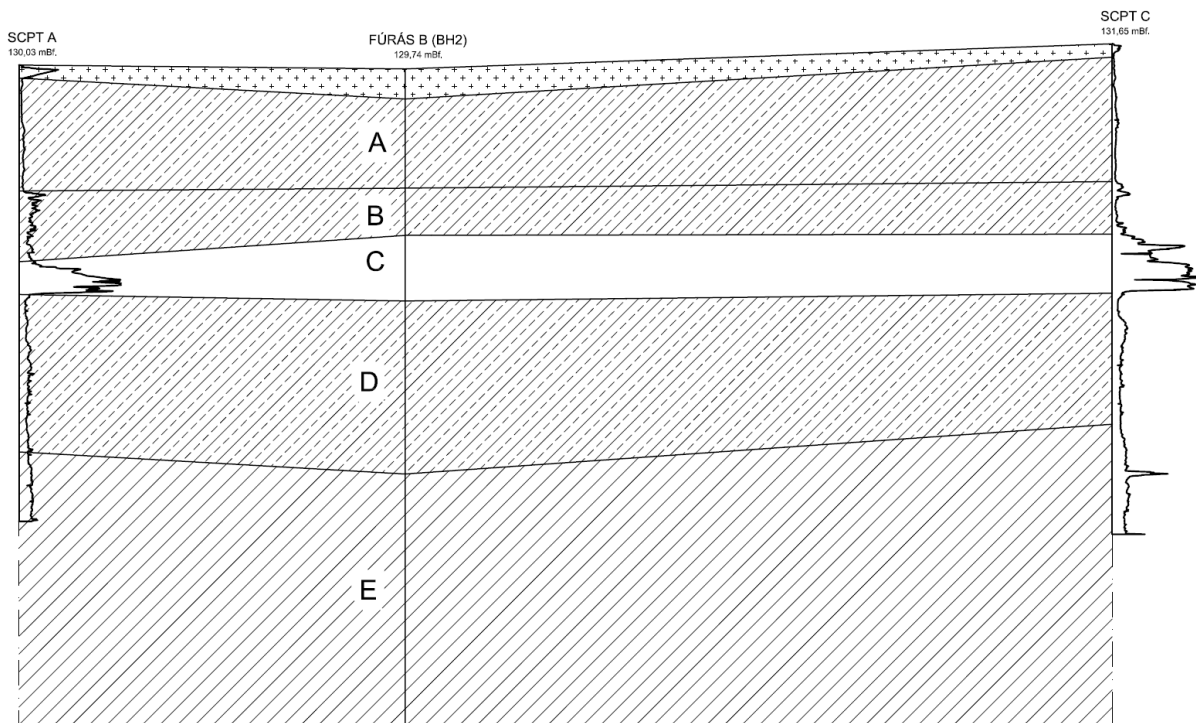
2. táblázat: Feltárások geometriai adatai

A vizsgálat területén 2 db 50 méter mélységű fúrást készítettek 180 mm átmérőjű spirálfúrással, a magminták duplafalú magvevővel kerültek kiemelésre. A geotechnikai fúrások mellett kiegészítő vizsgálatként CPTu szondázások készültek. Összesen 3 db statikus szondázás került lemélyítésre. A szondázások során rögzítésre került a csúcscellenállás, a köpenysúrlódás és a pórúsvíznyomás változásának értékei. Szeizmikus vizsgálatokat (2 db) is készítettek, melyeket 2 méterenként végeztek el, a statikus nyomószondázásokkal egy időben. A talajfeltárások alapján készített réteg- és fúrászelvények azt mutatták, hogy a talajrétegződések közel vízszintesek. A talajvizsgálati jelentés elkészítése során, az egyes talajmintákon részletes laboratóriumi vizsgálatokat hajtottak végre. A nyírószilárdsági

paramétereket közvetlen nyíróvizsgálattal, illetve triaxiális vizsgálattal, az összenyomódási jellemzőket ödométeres vizsgálat eredményei alapján határozták meg.



12. ábra: Feltárások helyszínrajza [1]



13. ábra: Rétegszelvény a feltárások alapján [1]

CPTu D

A feltárás 129,75 mBf szintről került lemélyítésre. A szonda mérési adatai alapján 1,00 m mélységig köves iszapos feltöltés fekszik, ezt 9,10 mélységig iszap réteg követi. 9,10 m-től 15,00 m-ig iszapos homokrég terül el. 15,00 m-től 17,30 m között tömör homok, majd 30,50 m mélységig iszapos agyag réteg húzódik.

SCPTu C

A feltárás 131,65 mBf-ről indult. A mérőszonda lemélyítését követően megállapítható volt, hogy 0,80 m-ig köves iszapos feltöltés, 10,60 m mélységig iszap réteg, 10,60 m-től 14,80 m-ig iszapos homokrég, 14,80 m és 19,80 m között tömör homok, majd 19,80 m-től 30,30 m-ig iszapos agyag réteg húzódik.

SCPTu A

A szonda 130,03 mBf szintről került indításra. A feltárás alapján 1,00 m mélységig köves iszapos feltöltés, 1,00 m-től 9,60 m-ig iszap réteg, 15,40 m-ig iszapos homokrég, 15,30 m és 17,40 m között homok, 17,40 m-től kezdődően 30,10 m-ig iszapos agyag, végül 34,75 m mélységig agyag réteg húzódik.

BH1 jelű fúrás

A feltárás felső síkja 130,03 mBf. A fúrás során elsőként 1,80 m mélységig barna laza iszap feltöltést találtak, melyet 10,60 m-ig sárga (7,40 m-től szürke), gyúrható iszap követett. Az iszapréteg alatt 3,70 m vastagságban barnásszürke iszapos homok található. 18,20 m-ig világosbarna tömör homok, 27,60 m-ig szürke, barna iszapos agyag fekszik. Ezt követően a fúrás talpáig barna-vörösbarna közepes-kövér agyag található, ezt a réteget 35,70 m és 35,90 m között egy kemény homokkőpad szakít meg.

BH2 jelű fúrás

A feltárás 129,74 mBf szintről indult. A felső 2,30 m vastagságú rétegben barna laza köves iszapos feltöltést határoztak meg. A feltöltés alatt 9,10 m-ig szürke illetve sárga, gyúrható iszap fekszik. 9,10 m és 12,70 m között szürke homokos iszap, 12,70 m-től 17,70 m-ig szürke (16,40 m-től sárga illetve szürkésbarna) tömör agyagos homok, 30,90 m-ig szürke, gyúrható sovány - közepes iszapos agyag található. Ezt követően a furat talpáig (50,00 m) vörösbarna kövér agyag kerül el.

A helyszíni tapasztalatok, valamint részletes laboratóriumi vizsgálatok alapján az alábbi jól elkülöníthető talajrétegek definiálhatóak:

- Mg: Vegyes anyagú FELTÖLTÉS
- A: Gyúrható konzisztenciájú ISZAP / HOMOKOS ISZAP
- B: Merev konzisztenciájú HOMOKOS ISZAP / ISZAPOS HOMOK
- C: Közepesen tömör - tömör állapotú HOMOK
- D: Merev konzisztenciájú ISZAPOS AGYAG / AGYAG
- E: Kemény konzisztenciájú pannon AGYAG

„A” jelű réteg: Gyúrható konzisztenciájú ISZAP / HOMOKOS ISZAP

A legfiatalabb, holocén kori réteg, mely lepusztult löszhátak és a Kapos folyó aktivitása révén alakult ki. Gyakorlatilag teljesen víz alatti, telített réteg, mely gyúrható konzisztenciájú és

terhelés hatására az alakváltozások kialakulása szempontjából érzékeny. Síkalapozási módok alkalmazása kizárható ezen rétegben.

„B” jelű réteg: Merev konzisztenciájú HOMOKOS ISZAP / ISZAPOS HOMOK

Keveredett, átmeneti réteg, mely lényegesen kedvezőbb nyírószilárdsági paraméterekkel rendelkezik, mint a fedőréteg, azonban az összenyomódási modulus szempontjából hasonlóak.

„C” jelű réteg: Közepesen tömör – tömör állapotú HOMOK

Pleisztocén korú, jó teherbírású víz alatti talajréteg. Vízvezetőképesség szempontjából kedvező tulajdonságú.

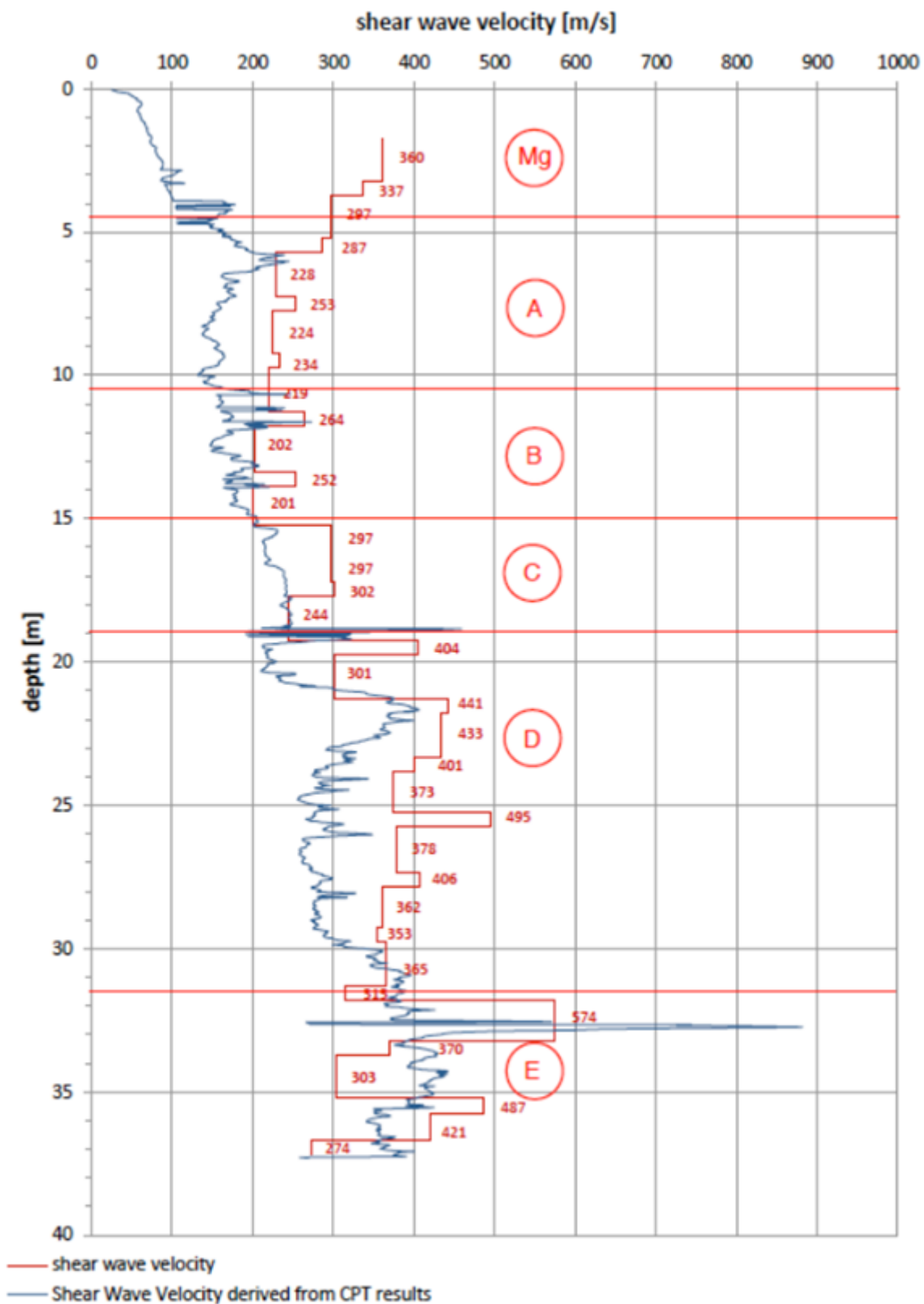
„D” jelű réteg: Merev konzisztenciájú ISZAPOS AGYAG / AGYAG

A réteg tekinthető a pannon agyagréteg felső, közel 10-15 m vastagágú zónájának, melynek a homokréteg alatti felső 3 méteres zónája gyúrható-merev konzisztenciájú iszapként definiálható, majd plaszticitása fokozatosan növekedve sovány-közepes agyagba vált át. A felső zónáját tekintve gyakorlatilag vízzárónak tekinthető.

„E” jelű réteg: Kemény konzisztenciájú pannon AGYAG

A terület alapkőzetének tekinthető pannon rétegek több száz méter vastagságúak. Kemény állapotú, száraz, vízzáró réteg. Több helyütt murvás, apróköves szemcséket tartalmaz.

A szeizmikus CPT vizsgálatokból jól meghatározhatóak a talajrétegekben jellemző nyíróhullám terjedési sebességek. A meghatározott nyíróhullám terjedési sebességeket a [14. ábra](#) tartalmazza. Az ábrán látható, hogy a gyúrható iszap (A) és a homokos iszap / iszapos homok (B) rétegek között lényegében nincs eltérés, a nyíróhullám terjedési sebessége ezekben a talajrétegekben 210 m/s. A C jelű homok rétegben a nyíróhullám terjedési sebessége 300 m/s, míg a D és E jelű iszapos agyag és agyag rétegek között nincs érdemi eltérés, a rétegekben 400 m/s átlagérték vehető fel.



14. ábra: Nyíróhullám terjedési sebességek [1]

3.5 Talajvízviszonyok

A feltárások során mind a két fúrásnál tapasztalták a talajvíz megjelenését. A megütött és a nyugalmi talajvízszint adatait a 3. táblázat tartalmazza.

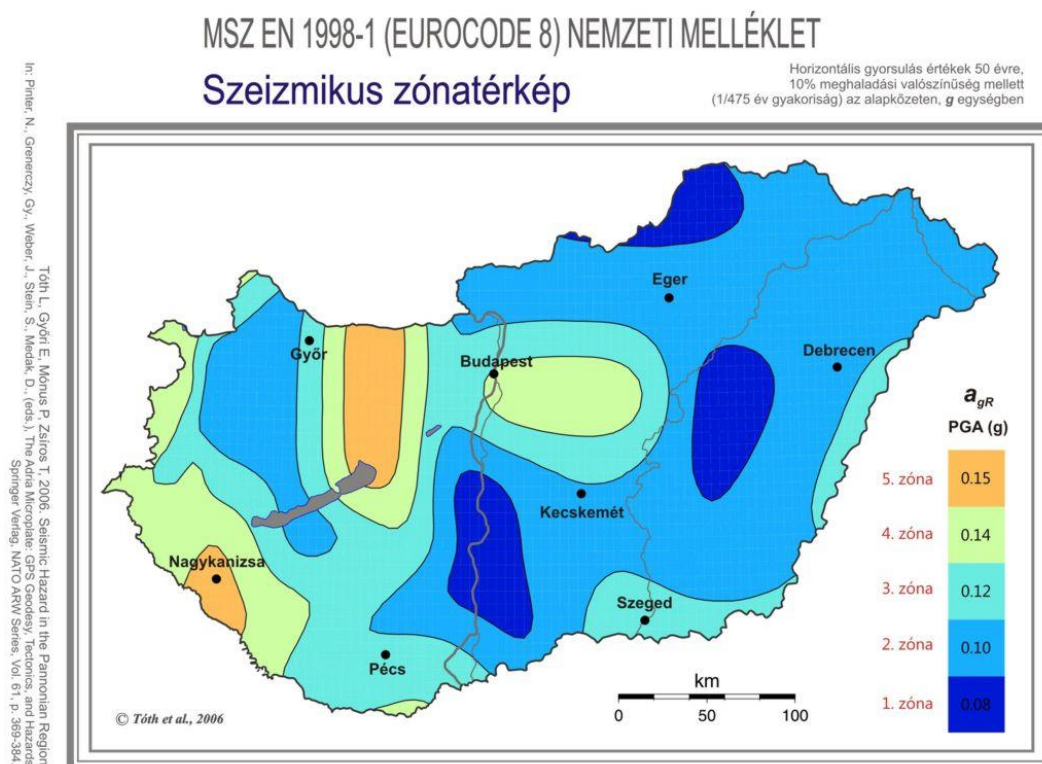
Feltárás		Megütött talajvízszint		Nyugalmi talajvízszint	
Jel	mBf.	mR.	mBf.	mR.	mBf.
BH 1	130,03	0,40	129,63	0,30	129,73
BH 2	129,74	1,40	128,34	1,20	128,54
Átlagérték		0,90	128,98	0,75	129,13
Maximális érték		0,40	128,34	0,30	128,54
Minimális érték		1,40	129,62	1,20	129,72

3. táblázat: Talajvízviszony adatok

A talajvíz agresszivitása a laboratóriumi vizsgálati kimutatások alapján az XA0 - XA1 kitéti osztályok között mozog.

3.6 Szeizmicitás

A vizsgált építési terület és a megvalósított építmény Kaposvár belterületén helyezkedik el, mely a 3. tervezési zónába esik a 15. ábra alapján. Ezek alapján a figyelembe veendő horizontális gyorsulási érték $T_{NCR}=475$ évre, $P_{NCR}=10\%$ meghaladási valószínűség mellett: $a_{gr}=0,12$ g.



15. ábra: Szeizmikus zónatérkép [www.foldrenes.hu]

A területen megtalálható talajrétegek szeizmikus hatás szempontjából (MSZ EN 1998-1/2008) „D” alosztályba sorolandóak (4. táblázat).

Altalaj- osztály	A rétegszelvény leírása	Paraméterek		
		$v_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT} [ütés/30 cm]	c_u [kPa]
D	Laza vagy közepesen tömör, kohézió nélküli talaj (némi puha kötött réteggel vagy anélkül), vagy túlnyomóan puha - gyúrható kötött talaj	< 180	< 15	< 70

4. táblázat: Talajosztály az MSZ EN 1998-1 szerint

3.7 Geotechnikai paraméterek

A rendelkezésemre bocsájtott talajvizsgálati jelentésben a főbb talajrétegek geotechnikai paramétereinek tervezési értékeit az 5. táblázat tartalmazza, melyeket az elvégzett laboratóriumi, illetve tapasztalati ismeretek alapján határoztak meg.

Talajréteg jele	Térfogsúly γ [kN/m ³]	Belső súrlódási szög φ [°]	Kohézió c [kPa]	Összenyomódási modulus E_{oed} [MPa]	Vízáteresztő -képességi együttható k [m/sec]
Mg	20	20,00	1,00	10,00	$1,00 \cdot 10^{-5}$
A	19-20	23,90	12,50	5,50	$1,40 \cdot 10^{-9}$
B	18-20	29,30	6,00	6,10	$1,90 \cdot 10^{-9}$
C	17-19	31,80	2,70	19,50	$2,30 \cdot 10^{-6}$
D	20-22	13,50	35,30	5,20	$8,80 \cdot 10^{-10}$
E	21-22	15,50	66,80	19,00	$4,10 \cdot 10^{-11}$

5. táblázat: Talajfizikai paraméterek tervezési értékei

4. Plaxis 2D végeelemes modellezés

2D végeelemes modellezés Plaxis 2D 2012 szoftver segítségével történt, melyet a Geoplan Kft. készített el. A vizsgálat során kialakított talajgeometriát a program háromszög elemekre bontva számolja az altalajban és a szerkezetben kialakuló alakváltozásokat és feszültségeket. A talajmodell geometriája, illetve a talajfizikai paraméterek a 6. táblázat alapján lettek felvéve.

Talaj	Mélység [m]	Modell	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	φ [°]	c [kPa]	E_{oed} [MPa]	E_{ur} [MPa]
Iszap – Sovány agyag	0-12	HS-UD	18	19	20	15	7	21
Iszap – Iszapos homok	12-16	HS-UD	18	19	26	5	10	30
Homok	16-18	HS-D	19	20	32	0 (1)	20	60
Agyag	18-30	HS-UD	19	20	31,80	50	17**	45
Ágyazat	20-22	MC-D	20	20	13,50	10	100	-

6. táblázat: 2D végeelemes talajmodell

Ahol,

MC - Mohr-Coulomb anyagmodell;

HS - Felkeményedő (Hardening Soil) anyagmodell;

D - drénezett (Drained);

UD - drénezetlen (Undrained);

γ_{unsat} - nedves térfogatsúly;

γ_{sat} - telített térfogatsúly;

c - kohézió;

φ - belső súrlódási szög;

E_{oed} - ödométeres modulus;

E_{ur} - újratelhelési modulus;

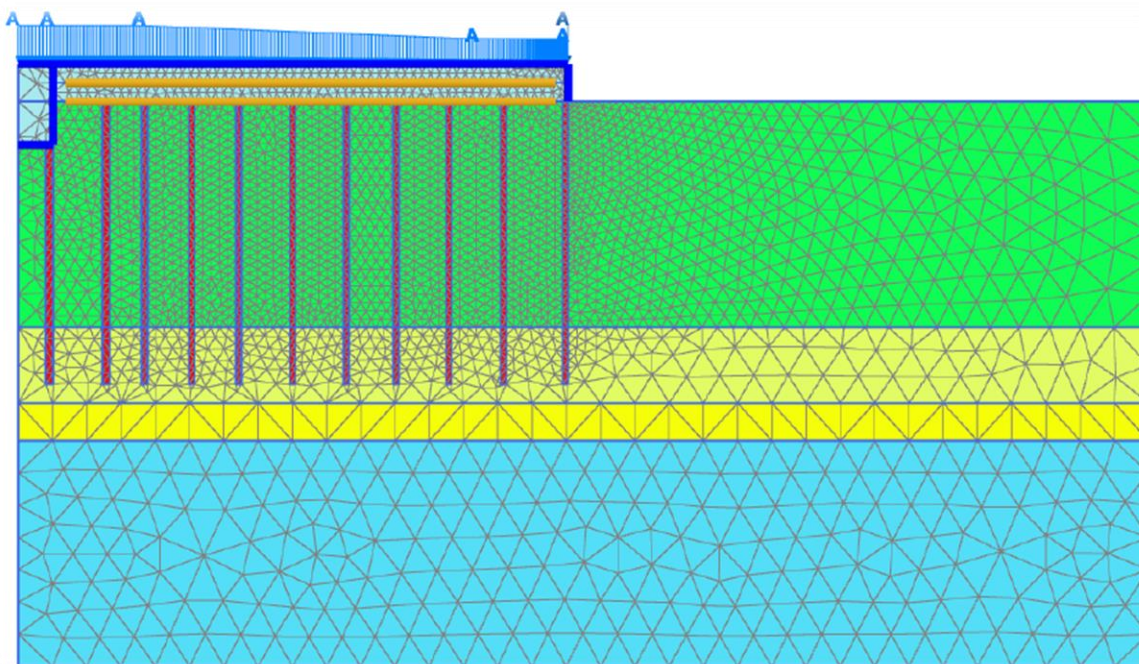
** - a program automatikusan növelte az alakváltozási- és egyéb (nyírószilárdság, tömörség) paraméterek alapján.

Az analízist tengelyszimmetrikus modellgeometria felépítésével végezték el, mely során a modellter kiterjedésének nagyságát úgy határozták meg, hogy a kialakuló feszültségállapotokat ne befolyásolja a „doboz” mérete. Ennek megfelelően vízszintes értelemben a cukorsiló szélétől 30 méterrel növelték a modellméretet, függőleges értelemben a modell alsó határa 30 méter.

A körgyűrűk mentén elhelyezkedő cölöpök anyagmodellje lineárisan rugalmas, valamint felületelemként lettek modellezve, ugyanis így a függőleges terhelés esetén realisabb eredményt kaptak a tervezők a függőleges befürödés révén. Az elemek szélességét úgy határozták meg, hogy az 1 folyóméterre jutó talpfelület a cölöpökével közel azonos legyen. Ennek a modellezési technikának a hátránya az volt, hogy a cölöpök igénybevételeire nem adott információt, azonban a szerkezet komplex együttes viselkedésére valósabb értéket szolgáltat.

A modellben az ágyazatot két rétegben vették számításba, ennek legfőbb oka az volt, hogy a túlzott mértékben lecsökkenő elemméretnek köszönhetően több réteggént nem tudták figyelembe venni a modellezés során. Ebből kifolyólag az ágyazat merevségét a szokásosnál nagyobbra vették, $EA=1000$ kN/m.

Az alaplemezt és a függőleges szerkezeti egységeket lemez elemként modellezték, melyhez a hajlítási és normálmerevséget a szerkezeti vastagságból (alaplemez: 25 cm, függőleges falak 50 cm) és a beton rugalmassági modulusából kiindulva számították. Az így kialakított modellgeometriát a 16. ábra szemlélteti.



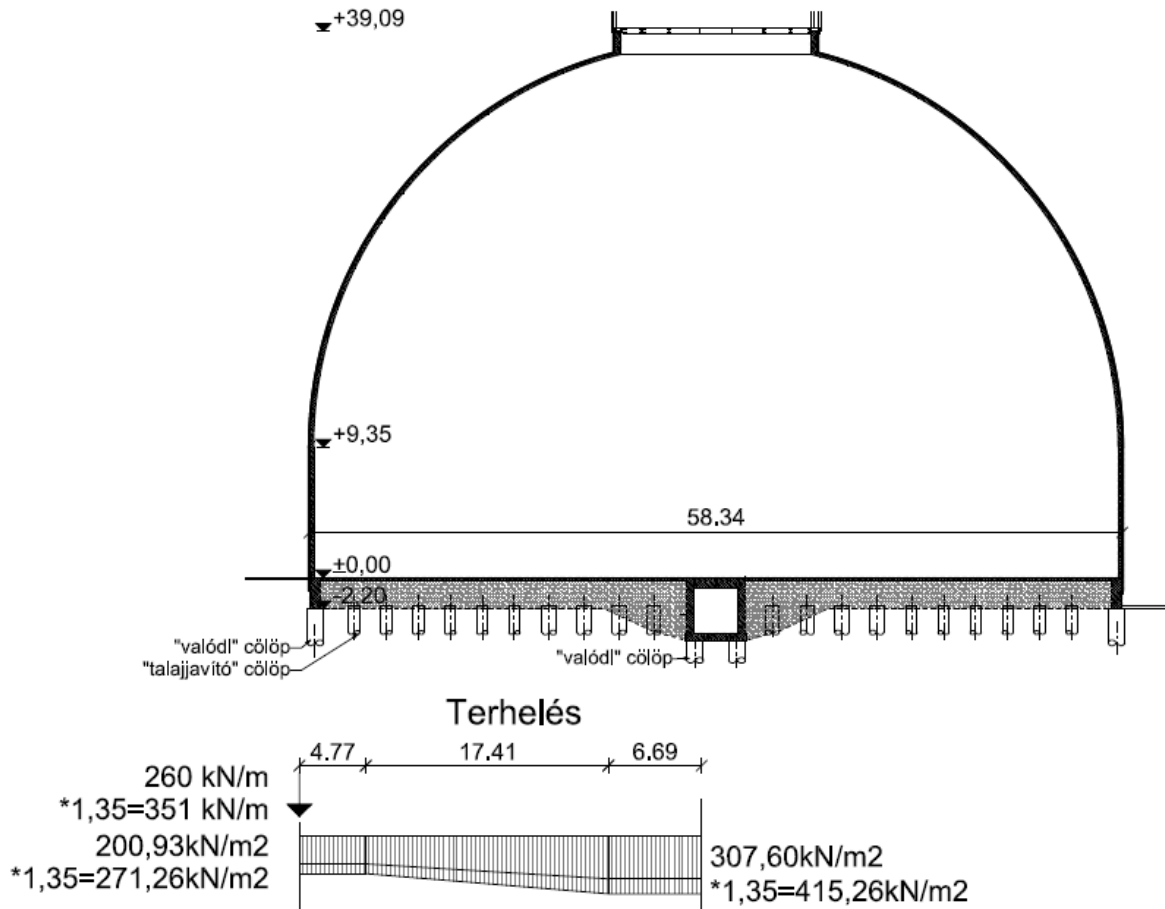
16. ábra: 2D végelelemes modell felépítése [2]

Az alapozás környezetében sűrűbb hálókiosztást alkalmaztak, ami a modell peremei felé fokozatosan csökken, így a számítási idő valamelyest lecsökkenthető volt. Az analízis során a szerkezet geometriai kialakításából, valamint a cukortömeg alapján számított terhelést 17. ábra szemlélteti.

A számítás során a következő építési fázisokat építették be a modellbe:

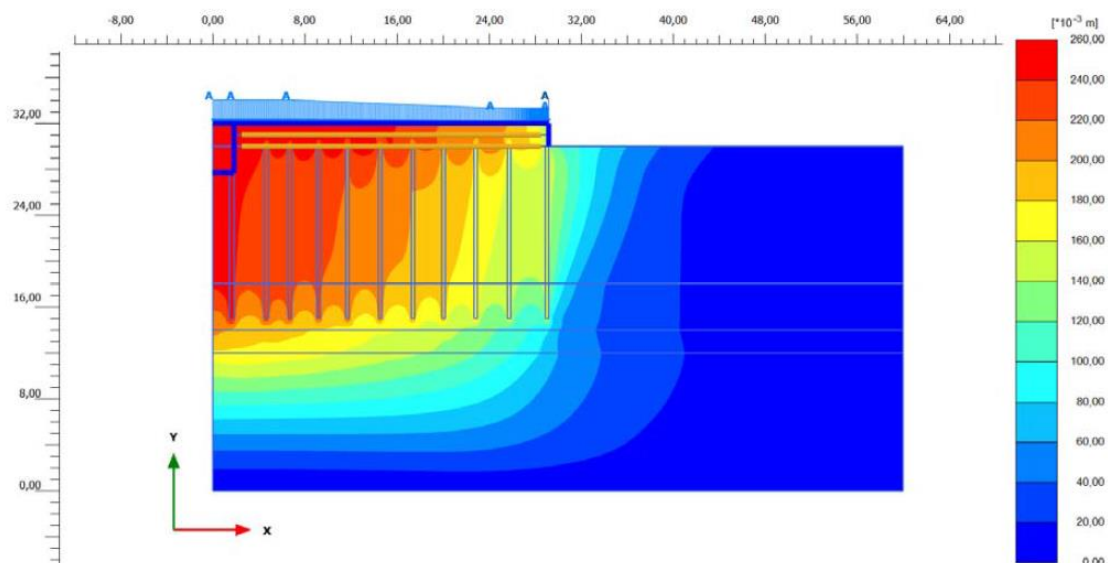
1. Alaplemez építése: 90 nap
2. Felszerkezet építése: 60 nap
3. Pihentetés: 60 nap
4. Feltöltés: 60 nap

Utolsó számítási lépésként a feltöltési fázis után beiktattak egy konszolidációs lépést, ahol a pórusvíznyomás többlet $p_{\max}=10 \text{ kN/m}^2$ értékre való csökkenését várták el.

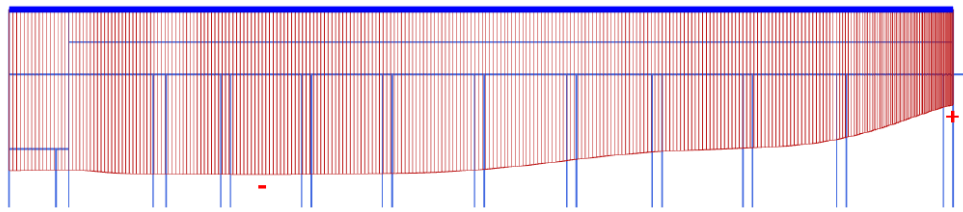


17. ábra: Terhelés a 2D modellezés során [2]

Végleges állapotban a teljes elmozdulást és az alaplemez elmozdulását a 18. ábra és a 19. ábra szemlélteti.

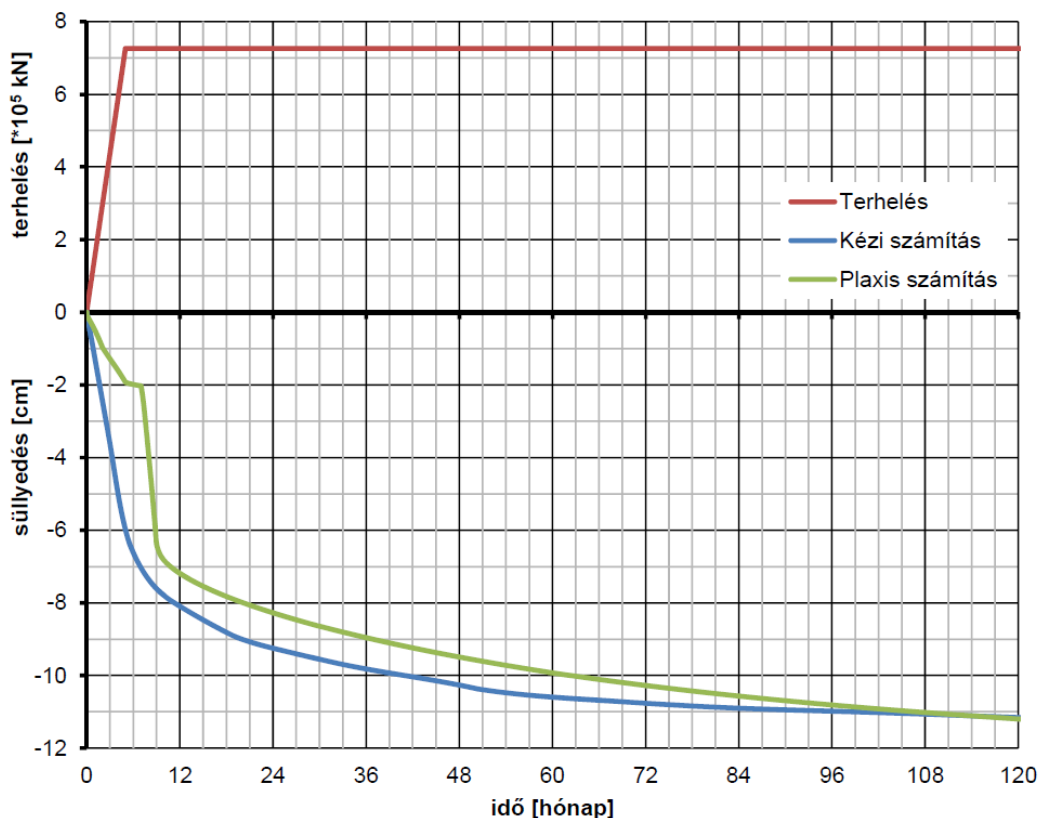


18. ábra: Teljes elmozdulási ábra - végleges állapot [2]



19. ábra: Alaplemez elmozdulása ($e_{\max}=25,5$ cm) [2]

A végeleemes modell eredményei azt mutatták, hogy az alaplemez szélén 15 cm, míg lemezközépen 25 cm süllyedés keletkezett. A vizsgálati eredmények alapján megállapítható volt, hogy a cölöpök lineárisan rugalmas felületelemként történő modellezése megfelelően visszaadja a cölöpök tényleges viselkedését, a cölöpök összenyomódása elhanyagolhatóan kicsi a számításokban. Az ágyazati rétegben elhelyezkedő georács erősítések az analízis során megfelelően viselkedtek, mivel tapasztalható volt, hogy a felszerkezetről átadódó terhelés hatására az ágyazat alatt elhelyezkedő cölöpökre csak nyomó igénybevétel hat, továbbá az eredetileg gyenge minőségű altalaj kevésbé érzékeny a süllyedésekre. A georácsokban keletkező jelentős húzóerő igazolja a rendszer hatékony működését és a georácsok teherelosztó hatását.



20. ábra: Süllyedés időbeli alakulása [2]

Az eredmények korrekt értékelésekor a tervezők mérlegelték a terhelések tartósságát, mely során megállapították, hogy jelen építmény esetében, a szerkezet önsúlya a teljes terhelésnek csak egy viszonylag kis hányadát teszi ki, ami a felépítéstől kezdve folyamatosan működik. A hasznos terhelés (cukor) a teljes terhelés jelentős részét teszi ki. Az építési terület altalaját képező agyag rétegek vízáteresztő-képessége nagyon kicsi, ami azt eredményezi, hogy a

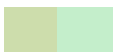
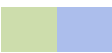




konzolidációs folyamatok éves időtartamot kívánnak, ezért a valóban nagy terhelések okoznak süllyedéseket.

Ezen feltételezések alapján a ciklikusan változó feltöltési és leürítési hullámok következtében tartós teherként a teljes töltőanyag nagyjából felét-kétharmadát vették számításba. Mindezek, valamint a korábbi szakmai tapasztalatok alapján, a süllyedések mértékét 10-13 cm-ben maximalizálták. Az elvégzett konzolidációs számítások eredményeit a 20. ábra mutatja be.

5. Plaxis 2D végeleemes modellt reprodukáló Plaxis 3D modell

A korábbi modellezési adatokból kiindulva, valamint az ottani feltételezéseket alapul véve a modellezési tartomány előállításánál a teljes szerkezet ¼-nek a kialakítása mellett döntöttem, ugyanis a modellezés alapjául szolgáló Plaxis 2D analízis során a szimmetria viszonyokra támaszkodva a teljes építmény felét vizsgálták. A szoftver az általunk előállított modellgeometriát tetraéder elemekre bontva számítja az elemek határán, felületén fellépő alakváltozásokat és feszültségeket.

Plaxis 3D végeleemes modellezés során a talajrétegződés megadása tetszőleges helyeken fúrásszelvények (Boreholes) felvételével történik, melyek segítségével a program automatikusan generálja a kívánt rétegfelépítést. Jelen vizsgálat során egyetlen fúrásszelvényt létesítettem, melynek pozíciója az origó. Az egyes rétegek vastagságát, talajfizikai paramétereit, valamint az alkalmazott talajmodelleket, a korábbi tervezési fázisokban Plaxis 2D geotechnikai szoftverrel készített modellből adoptáltam (7. táblázat). Ezek alapján az előállított 3D-s talajmodellt a 21. ábra szemlélteti.

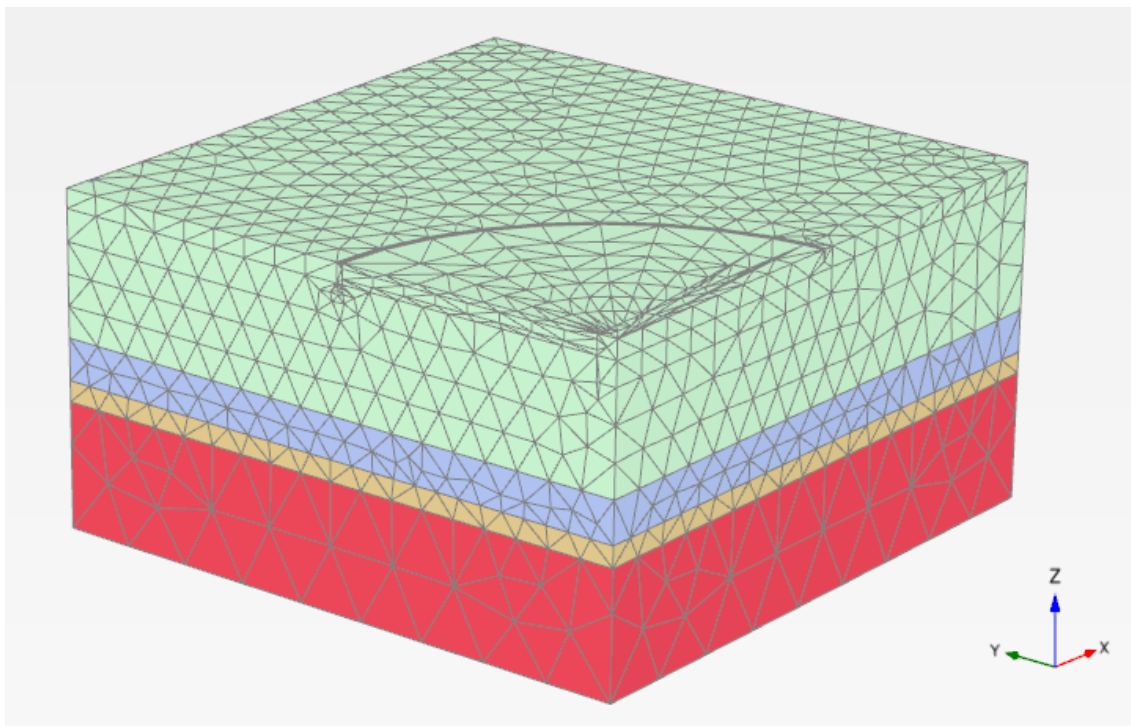
Talajfizikai jellemzők	Iszap - Sovány agyag	Iszap - Iszapos homok	Homok	Agyag	Ágyazat	Beton
Jelölés						
Mélység-tartomány	0 - 12	12 - 16	16 - 18	18 - 30	-	-
Anyagmodell	HS	HS	HS	HS	MC	LE
Drénezés típusa	Drénezetlen	Drénezetlen	Drénezett	Drénezetlen	Drénezett	Nem porózus
γ_{unsat} [kN/m ³]	18	18	19	19	20	25
γ_{sat} [kN/m ³]	19	19	20	20	20	25
E_{50}^{ref} [MPa]	7	10	20	17	-	33000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [MPa]	7	10	20	17	100	-
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [MPa]	21	30	60	45	-	-
m [-]	0,5	0,5	0,5	0,5	-	-
ν [-]	-	-	-	-	0,2	0,2
c^{ref} [kPa]	15	5	1	50	10	-
φ° [°]	20	26	32	16	40	-

7. táblázat: Talajfizikai paraméterek és anyagjellemzők

Ahol,

LE - Lineárisan rugalmas (Linear elastic) anyagmodell;

- E_{50}^{ref} - a „drénezett” triaxiális vizsgálatnál a deviátor feszültség 50 %-hoz tartozó húr modulus;
- E_{oed}^{ref} - összenyomódási modulus (a referencia feszültség értékéhez tartozó érintő modulus);
- E_{ur}^{ref} - a tehermentesítés-újratelhelés folyamatához tartozó húr modulus;
- m - a kompressziós görbét leíró hatványfüggvény kitevője;
- ν - Poisson tényező;
- c'_{ref} - kohézió;
- φ' - belső súrlódási szög.



21. ábra: Talajmodell felépítése

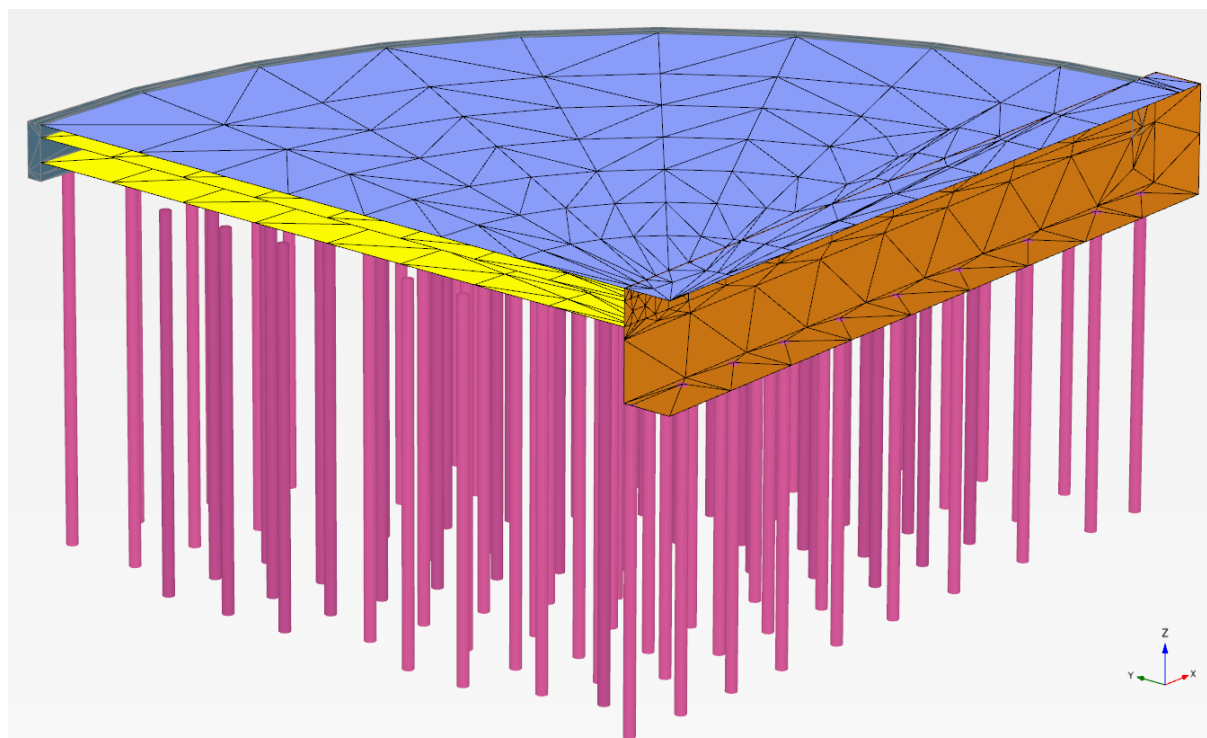
A cölöpöket az analízis során 1D gerendaelemként (Embedded pile) építettem be a modellbe. A program a cölöpök modellezésénél a gerendaelemekhez automatikusan hozzárendel határfelületi (interface) elemeket, hogy megfelelően leírja a szerkezet és a talaj kölcsönhatását. Plaxis 3D végeselemes szoftver esetében a gerenda elemek lineárisan rugalmas anyagtulajdonságúak. A vizsgálat során a cölöpök kiosztására készített kiviteli tervet használtam, és ez alapján határoztam meg x és y koordináta-rendszerben az egyes cölöpök helyzetét. Mélységüket, a GeoPlan Kft. által készített tervdokumentáció alapján vettem fel. Input paraméterként Plaxis 3D esetében meg kell adnunk a különböző átmérőjű, hosszúságú és elhelyezkedésű cölöpök maximális talpellenállását, illetve palástellenállását, melyeket szintén a GeoPlan Kft. által elkészített tervekből adoptáltam. Palástellenállás paraméterként történő bevitelekor több lehetséges módszer létezik. Back analízis vizsgálatom ezen modellezési fázisában azt a megoldást választottam, miszerint a cölöpök felső, illetve alsó síkjánál egy maximális palástellenállás érték alapján a program a két érték között lineáris

kapcsolatot teremt, és ezek alapján számol. Ezen bementi paramétereket a 8. táblázat foglalja össze.

Cölöp jele	Átmérő [m]	Rugalmassági modulus E [MPa]	Térfogatsúly γ [kN/m ³]	Palástellenállás		Talpellenállás F_{\max} [kN]
				$T_{\text{top,max}}$ [kN/m]	$T_{\text{bot,max}}$ [kN/m]	
C1	1,00	33000	25	131,9	116,2	2309
C3	1,20	33000	25	158,3	139,5	3325
C4	1,20	33000	24	158,3	139,5	3325
C5	1,00	33000	24	131,9	116,2	2309
C6	0,80	33000	24	105,6	92,99	1478

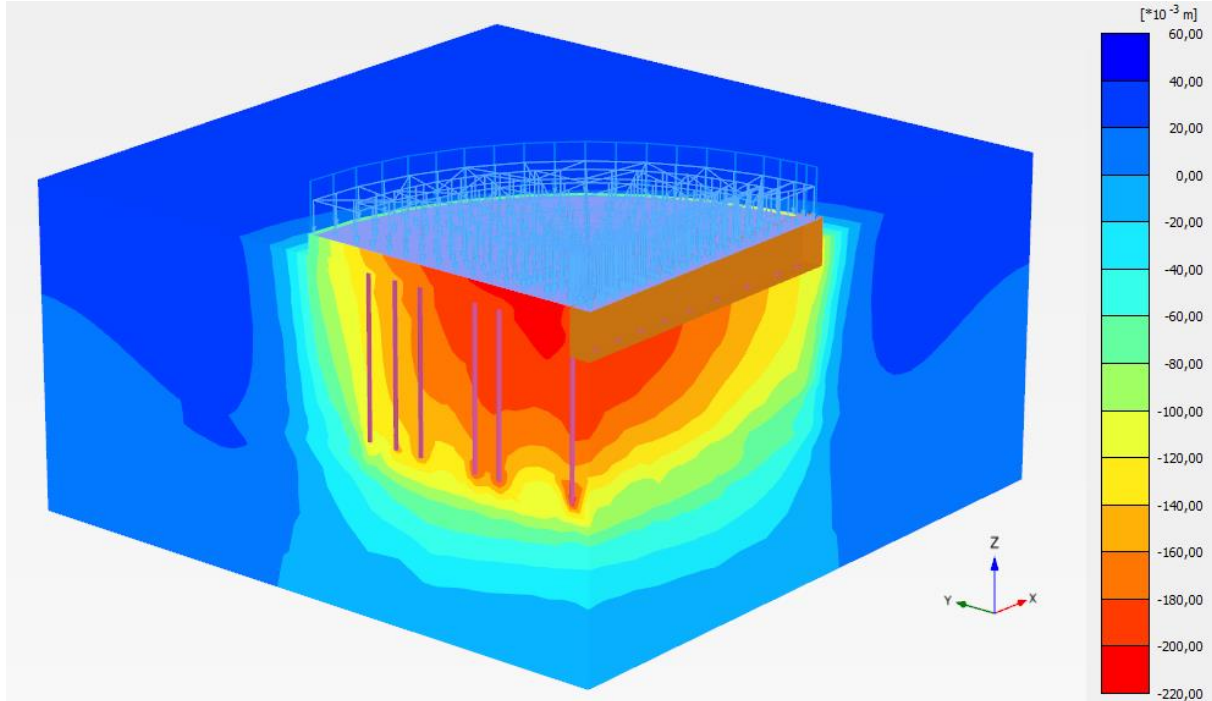
8. táblázat: Cölöpök modellparamétere

A további szerkezeti elemek modellgeometriájának kialakítása szintén a korábbi tervek alapján történt. A héjszerkezetet alátámasztó talpgerendát 3D tömbelemként építettem be a vizsgálati modellbe, mely anyagtulajdonságainak megadása hasonló módon történik, mint a talajrétegek esetében. A létrehozott tömb anyagtulajdonságának a vasbetonét vettem fel. Az alagút falszerkezetét és alaplemezt, valamint a siló alaplemezt lemez (plate) elemként modelleztem. A szoftver a plate elemek hajlítási és normálmerevségét a szerkezeti vastagságból és a rugalmassági modulusból számolja. Az ágyazati réteg, valamint a 2 szinten elhelyezett georácsok bementi paramétereit nem módosítottam. Ezen kiindulási adatok alapján kialakított szerkezeti elemek 3D-s modelljét a 22. ábrán láthatjuk.

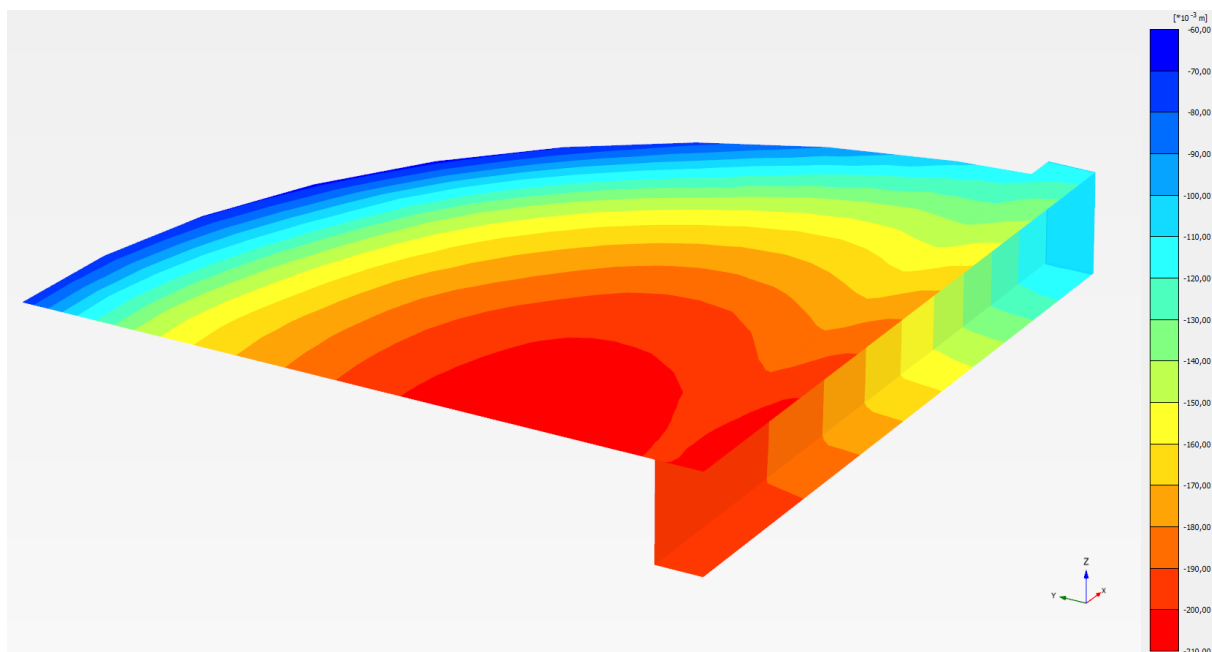


22. ábra: Szerkezeti elemek 3D-s modellje

Az analízis során ugyan azokat az építési fázisokat és modellbeállításokat követtem, melyeket a megvalósult szerkezet tervezésénél használtak. Ezek alapján, a vizsgálat során keletkezett szerkezeti viselkedések meglepően jól közelítik a Plaxis 2D végeleemes szoftverrel elkészített modell kapcsán tapasztaltakat, ugyanis végleges állapotban az alaplemez maximális süllyedése 20,60 cm-re adódott (23. ábra), a korábbi 25,50 cm-rel ellentétben.



23. ábra: Teljes z irányú elmozdulási ábra



24. ábra: Alaplemez és alagút z irányú elmozdulásai

Korábbi tapasztalataim, valamint nemzetközi tanulmányok alapján nagyobb differenciát vártam a két modellezés eredményeinek összehasonlításánál a térbeli hatások érvényesülése miatt, ugyanis 2D geotechnikai végeleemes szoftverek elsősorban vonalas létesítmények

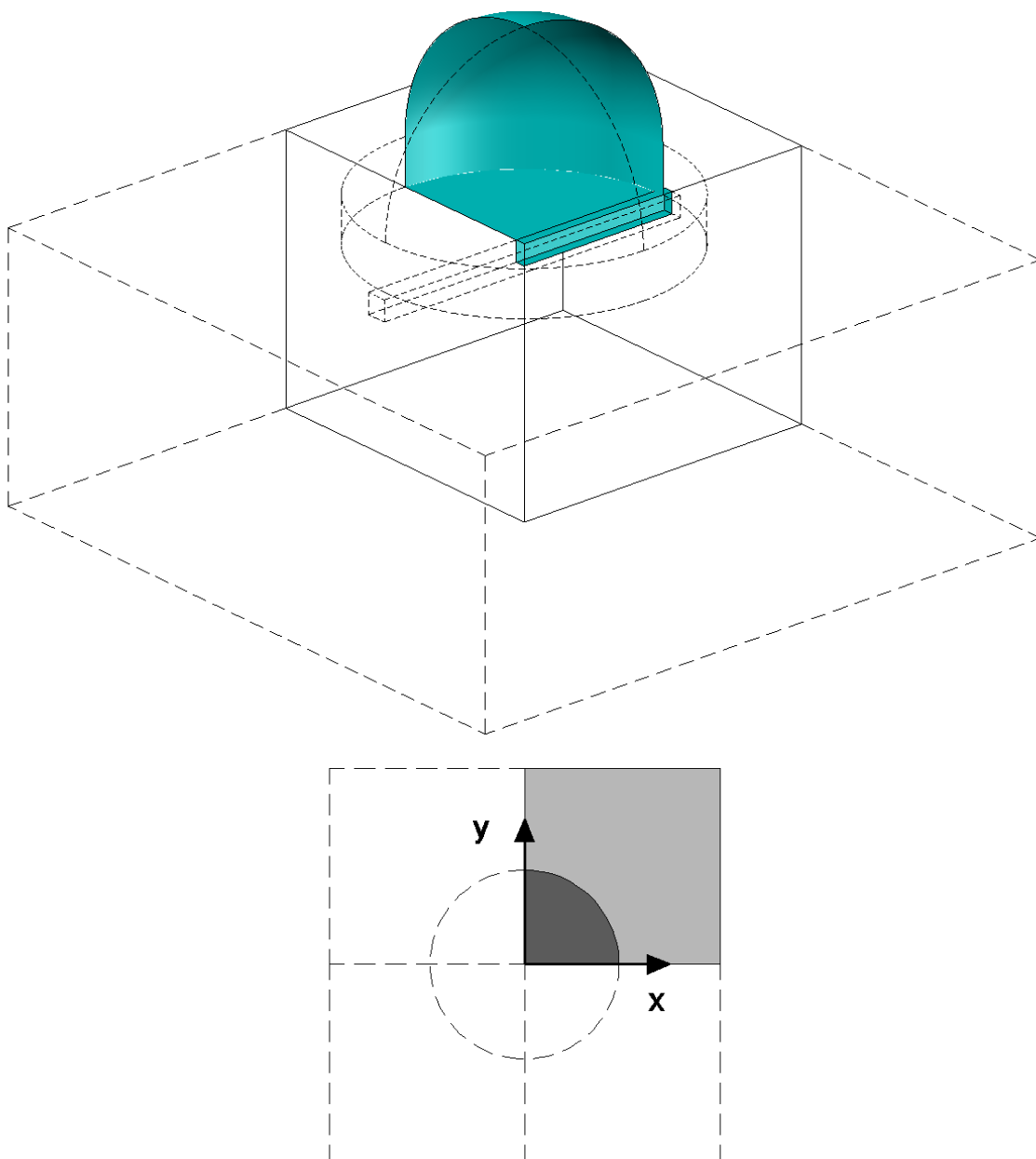
elemzésére szolgálnak, ebben az esetben azonban egy komplex alapozási rendszerrel és felszerkezettel rendelkező létesítmény analízise volt a feladat. 2D modell esetében elsősorban az alaptest kör alakú geometriája, valamint ebből kifolyólag a cölöpök viszonylag „szabálytalan” elhelyezkedése jelenti a problémát, melyek helyes modellparaméterek felvételével áthidalható. A tervezők szakmai tapasztalatának köszönhető, hogy az eredmények ~80%-os egyezőséget mutatnak, amely egy ilyen összetett építmény esetében megfelelő pontosság.

A helyes modellgeometria, modellezési technika kiválasztásával, továbbá a bementi, input paraméterek helyes felvételével az állapítható meg, hogy hagyományos 2D geotechnikai végeselemes szoftver segítségével, ugyan azon paraméterekkel rendelkező 3D-s modell eredményei kellő pontossággal megközelíthetőek, azonban a valósabb szerkezeti viselkedések reprodukálása elsősorban 3D geotechnikai végeselemes szoftverekkel lehetséges.

6. Back analízis vizsgálat alapjául szolgáló Plaxis 3D modell

6.1 Modellezési tartomány kialakítása

Kutatásom ezen fázisában elsődleges célom a lehető legpontosabban, legreálisabban reprodukálni a valóságban tapasztalt szerkezeti viselkedéseket. Ennek érdekében olyan geometriai kialakítást kellett megválasztanom, mely tükrözi a kiviteli tervek alapján elkészített építmény állapotát. A szerkezet szimmetriaviszonyaiból kiindulva ebben az esetben is a megvalósult silószerkezet $\frac{1}{4}$ -ét modelleztem.



25. ábra: Modellezési tartomány

A számítási modell geometriai méretét úgy határoztam meg, hogy azok ne befolyásolják az eredményeket. Ez azért fontos, mert az analízis során minden lehetséges hibát ki kell szűrni, ami a számítást kedvezőtlenül befolyásolhatja. Ezért x és y irányban a cukorsilón túl ~ 30 m-rel növeltem a modellméretet, így 60×60 m alapterületű a vizsgálati helyszín, z irányban a

modell mélységét 50 m-ben maximalizáltam a feltárások alapján. Ezekkel a feltételekkel elértem a célokat, azaz a deformációk és feszültségek megfelelő mértékű eloszlása, „lecsengése” a „doboz modellen” belül megtörténik, a „doboz” széleinek környezetében ezen értékek közel nullára adódnak. A szoftver a téglatest alakú „doboz modell” oldalain, szélein automatikusan, a szimmetriai viszonyokat figyelembe véve alakítja ki a peremfeltételeket. Ezen peremfeltételek teljesülésével összhangban keletkeznek az elmozdulás- és feszültségkomponensek.

6.1 Talajgeometria modellezése

A talajmodell megalkotása a talajvizsgálati jelentésben meghatározott rétegszelvények és fúrászelvények figyelembevétele alapján történt. A feltárások közül a megfelelő altalajmodell létrehozásához az SCPTu C és a BH2 jelű feltárásokat használtam fel. A megvalósult silószerkezet környezetének utólagos, terepi felméréseinek eredményeként a terület É-i részén a terepszint magassága 131,95 mBf, D-i részén pedig 129,70 mBf. A talajvízszintet a terepszinttől számítva -1,65 m mélyen vettem fel.

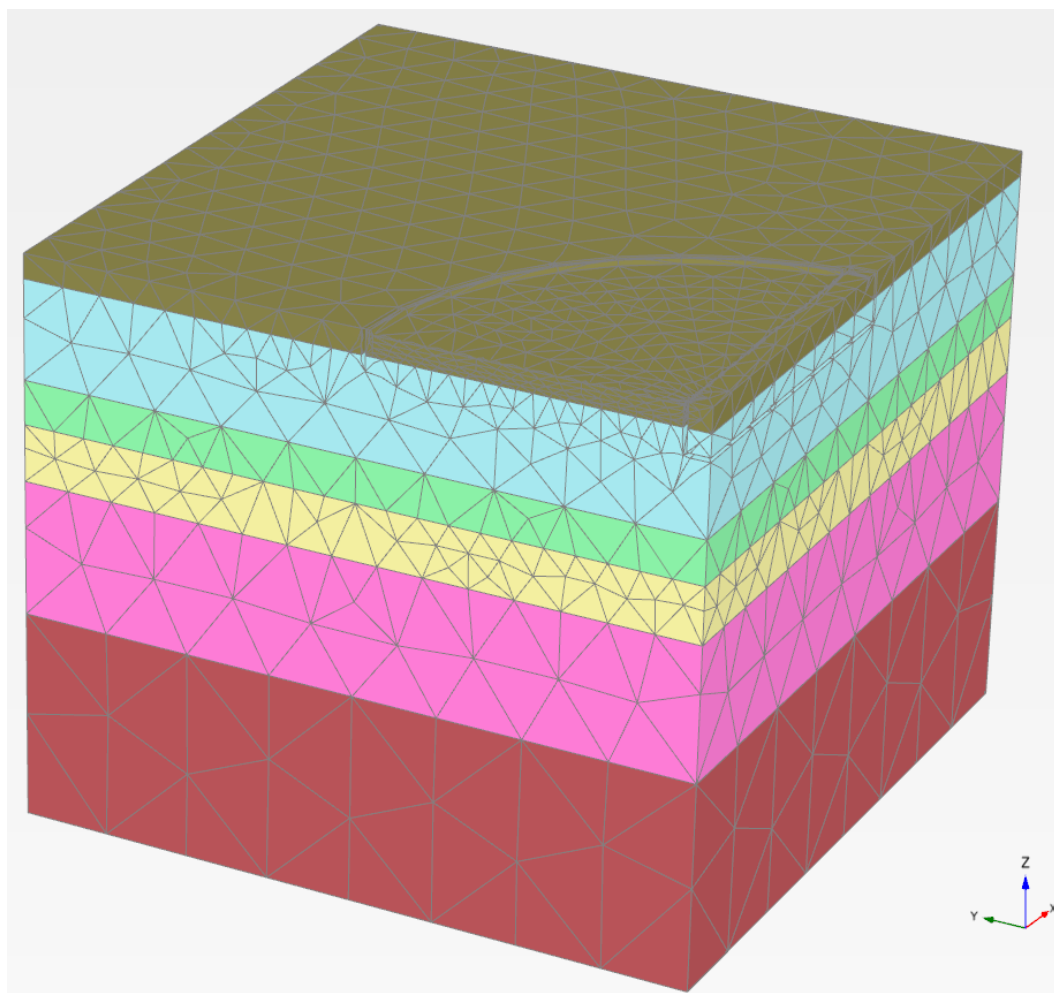
Talajréteg megnevezése	Relatív mélység [m]		Mélység [mBf]	
	SCPTu C	BH2	SCPTu C	BH2
FELTÖLTÉS	0,00-0,975	0,00-3,385	131,825-130,85	130,825-127,44
ISZAP / HOMOKOS ISZAP	0,975-10,78	3,385-10,19	130,85-121,05	127,44-120,64
HOMOKOS ISZAP / ISZAPOS HOMOK	10,78-14,97	10,19-13,79	121,05-116,85	120,64-117,04
HOMOK	14,97-19,98	13,79-18,79	116,85-111,85	117,04-112,04
ISZAPOS AGYAG / AGYAG	19,98-30,48	18,79-31,98	111,85-101,35	112,04-98,84
AGYAG	30,48-50,00	31,98-49,00	101,35-81,825	98,84-81,825

9. táblázat: Talajrétegződések mélységei SCPTu C és BH2 feltárások alapján

A rétegvastagságok helyes kialakításánál a feltárásokból és az utólagos felmérésekből kiindulva átlagos értéket vettem fel az ¼ modellgeometria miatt. Változó rétegvastagságok alkalmazása esetén a szoftverbe beépített automatikus szimmetria viszonyok figyelembevételének köszönhetően a számítások hibával terhelték lettek volna, az altalaj geometriája túlságosan nagy torzulást szenvedne.

Talajréteg megnevezése	Relatív mélység [m]	Mélység [mBf]
FELTÖLTÉS	0,00-2,19	131,825-129,635
ISZAP / HOMOKOS ISZAP	2,19-10,99	129,635-120,835
HOMOKOS ISZAP / ISZAPOS HOMOK	10,99-14,88	120,835-116,945
HOMOK	14,88-19,89	116,945-111,935
ISZAPOS AGYAG / AGYAG	19,89-31,73	111,935-100,095
AGYAG	31,73-50,00	100,095-81,825

10. táblázat: Plaxis 3D modellben alkalmazott rétegvastagságok



26. ábra: 3D altalajmodell

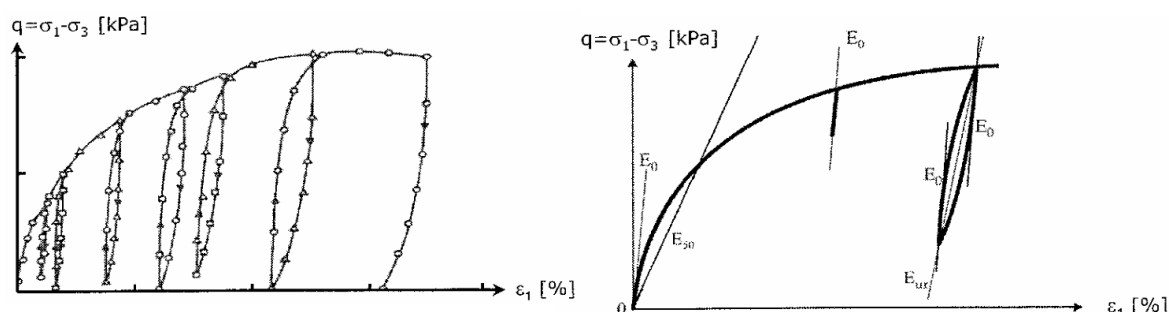
Mindezen paraméterek, információk figyelembevételével kialakított 3D altalajmodell (26. ábra) a valós viszonyokat a lehető legmegfelelőbben tükrözi. Ezekkel a feltételezésekkel,

továbbá a teljes geometria $\frac{1}{4}$ méretűre történő lecsökkentésével a haló generálás után kialakuló tetraéder elemek száma optimális lett, ezáltal az számítás ideje is ideális.

6.2 Talajrétegek vizsgálatához alkalmazott anyagmodell

Plaxis 3D végeleemes szoftverben rendelkezésemre álltak modern, korszerű anyagmodellek, melyek a korábbi 2D Plaxis verzióban még nem szerepeltek. Az új anyagmodellek segítségével a talajok, szerkezetek valós viselkedése kedvezőbben vizsgálható. Reálisabb képet kapunk az építmény és a talaj együttes viselkedéséről. Kutatásom során nemzetközi, kisebb számban hazai tapasztalatokra támaszkodva az ún. HSsmall (Hardening Soil model with small-strain stiffness) anyagmodellt használtam a talajszerkezet modellezésére. A hagyományos HS (Hardening Soil - Felkeményedő) modell a tehermentesítés-újratelhelés során rugalmas anyagviselkedést feltételez.

Korábbi kutatások, vizsgálatok megmutatták, hogy az alacsony feszültségek tartományában a talajok összenyomódása megszűnik, vagy csak elenyésző mértékű. A lineáris rugalmasságtanon alapuló süllyedésszámítások jól ismert ellentmondása, hogy ha végtelen mélységig lenne feszültség, akkor ennek következtében lenne belőle alakváltozás, melyeknek a végtelen mélységig történő összegzése végtelen mértékű süllyedést eredményezne. Ezen ellentmondás hatására vezették be a számítások során a határmélységet, azt mondván, hogy ahol az új feszültségek a korábbi feszültségek egy adott részét (20%) nem érik el, ott már nem okoznak összenyomódást. Hasonló jelenség figyelhető meg a triaxiális vizsgálatok során, ugyanis a terhelés kezdetén, továbbá a tehermentesítési-újratelhelési ciklus kezdetén sokkal kisebb alakváltozás keletkezik. A 27. ábra alapján megállapítható, hogy az E_{ur} hajlású vonal csak a hiszterézis egészére jellemző, a kezdeti érintők E_0 hajlása valójában sokkal nagyobb.



27. ábra: A triaxiális vizsgálat q - ϵ_1 összefüggésén értelmezhető modulusok [10]

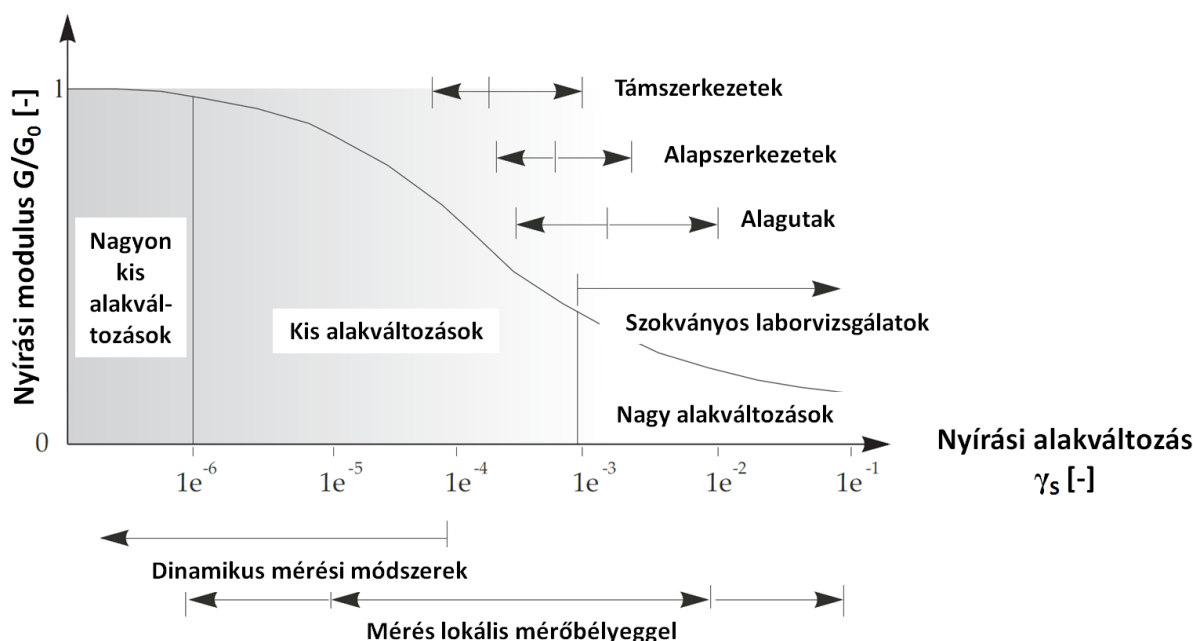
A talajok kezdeti E_0 merevsége helyett általában a

$$G_0 = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \nu_{ur})}$$

kezdeti nyírási modulus változását szokták vizsgálni.

HSsmall anyagmodell esetében a program a terhelésváltozások kezdetén (a kis alakváltozások tartományában) a G_0 modulussal, majd a nyírási alakváltozás növekedésével fokozatosan csökkenő nyírási modulussal számol. A nagyobb alakváltozási tartományban, a felkeményedő talajmodellnél megszokottak szerint, a feszültség szint emelkedésével fokozatosan növekvő összenyomódási modulus jellemzi az adott talajréteget. A kísérletek szerint a nyírási modulus

a kezdeti nagy G_0 értékről a nyírási alakváltozások előrehaladásával a 28. ábra szerint csökken. Az ábrán be van jelölve, hogy kb. mely tartományban van a talaj alakváltozása a geotechnikai szerkezetek körül.



28. ábra: A nyírási modulus változása és a geotechnikai szerkezetek körüli jellemző nyírási alakváltozások [11]

A 28. ábrán látható változást a

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + a \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_{0.7}}\right)}$$

képlet írja le. A képletben szereplő tagok közül $a=0,385=\text{const.}$ -ra vehető, $\gamma_{0.7}$ pedig azt a fajlagos nyírási alakváltozást jelenti, melynél a nyírási modulus a $0,7 \cdot G$ -ra csökken. A HSsmall talajmodellben a HS-modell bemenő paraméterei ennek megfelelően a G_0 és a $\gamma_{0.7}$ paraméterekkel egészülnek ki.

Rémai Zsolt PhD értekezése kitér az egyes anyagmodellek süllyedésekre gyakorolt hatásának a vizsgálatára is. Megállapította, hogy a vizsgált anyagmodellek (Mohr-Coulomb, Felkeményedő, HSsmall) közül a HSsmall modell szolgáltatja a leginkább modellmélység-független eredményeket.

Modellezések során elsősorban a HSsmall anyagmodell alkalmaztam az altalaj rétegek vizsgálatára. Ettől eltérő anyagmodell az ágyazati rétegnél (ahol, Hardening Soil-t), a cukornál (ahol, Mohr-Coulomb-ot), valamint a 3D test elemként modellezett szerkezeti egységeknél (ahol, Lineárisan Rugalmas-t) alkalmaztam.

6.3 Talajfizikai paraméterek

6.3.1 Rugalmassági modulusok meghatározása

Számos kutatás, vizsgálat azt mutatja, hogy süllyedésszámítások során a tervezők általában túlbecsülik a ténylegesen kialakuló elmozdulásokat. Ennek fő oka, hogy a talajok alakváltozási jellemzőit a laboratóriumi vizsgálatokkal általában alábecsülik, mivel az ödométeres vizsgálatok mintáinak minden hibája járulékos összenyomódást okoz. Ezen tapasztalatok alapján az egyes talajrétegekre jellemző rugalmassági modulus értékeket a lehető legnagyobb odafigyelés és átgondolás alapján építettem be a modellezési vizsgálatomba, mivel e paraméterek nagyban befolyásolják a süllyedések mértékét.

Fugro Consult Kft. által, a vizsgálati területen készített BH1 és BH2 jelű fúrások elkészítése során, minden egyes talajrétegben zavartalan mintát vettek. Laboratóriumban a különböző mélységekből vett talajmintákon, lépcsőzetes terheléssel elvégzett ödométeres vizsgálat során előállított kompressziós görbék alapján határoztam meg az egyes talajzónákra az összenyomódási modulusok értékét.

Talajvizsgálati jelentések során a 100 kPa és 200 kPa normálfeszültségek közé eső húrnak az érintője alapján határozzák meg a rugalmassági modulusok értékét ($E_s^{100-200}$). Kutatásom során ettől eltértem, ugyanis a kompressziós görbének a 100 kPa függőleges teherhez tartozó érintője alapján számított rugalmassági modulus értéket használtam modellparaméterként. A rugalmassági modulusot és a kompressziós görbét leíró hatványfüggvény kitevőjét úgy vettem fel, hogy a segítségükkel előállított görbe a lehető legjobban illeszkedjen a laboratóriumi vizsgálatok során előállított görbéhez. A görbét a következő képlet írja le:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\varphi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \cdot \sin\varphi}{c \cdot \cos\varphi + p^{ref} \cdot \sin\varphi} \right)^m$$

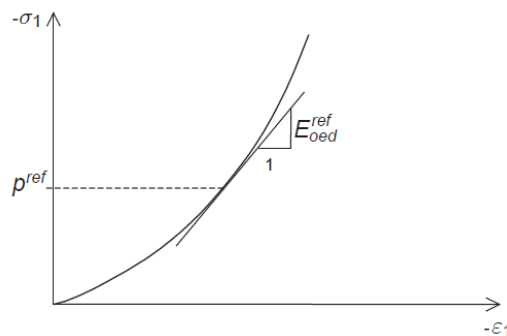
Ahol,

E_{oed} - összenyomódási modulus;

E_{oed}^{ref} - összenyomódási modulus (a referencia feszültség értékéhez tartozó érintő modulus);

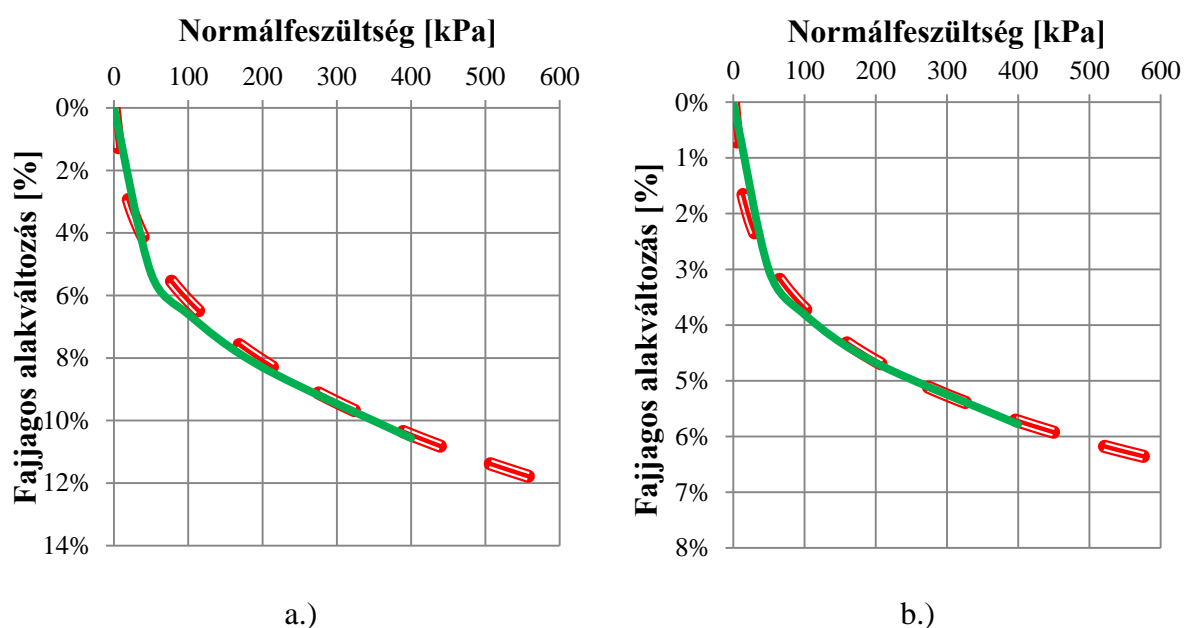
$$\sigma'_1 = \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}}$$

$$p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$$



29. ábra: E_{oed}^{ref} definiálása ödométeres vizsgálati eredmények alapján [9]

Ezen módszer alapján felvett rugalmassági modulus értékekkel a Plaxis 3D végeleemes szoftver kedvezőbben képes leírni a talaj viselkedését.



30. ábra: Kompressziós görbék az A jelű rétegben - BH1 fúrás alapján (a); BH2 fúrás alapján (b)

A 30. ábrán láthatóak a kompressziós görbék az A jelű talajréteg esetében. A további rétegekhez tartozó kompressziós görbék ábráit a mellékletek tartalmazzák. BH1 és BH2 jelű feltárások alapján számított rugalmassági modulusok értékét, valamint a görbékhez tartozó érintők meredekségeit átlagoltam. Ezen eredményeket összefoglalva a 11. táblázat tartalmazza.

Talaj	E [MPa]		E _{átlag} [MPa]	Kompressziós görbét leíró hatványfüggvény kitevője		m _{átlag} [-]
	BH1	BH2		BH1	BH2	
Feltöltés	-	6	6	-	0,70	0,70
A - réteg	4	7,9	5,95	0,70	0,80	0,75
B - réteg	4,300	5,4	4,85	0,80	0,80	0,80
C - réteg	20	-	20	0,70	-	0,70
D - réteg	4,5	3,2	3,85	0,60	0,70	0,65
E - réteg	6,2	15	10,60	0,50	0,50	0,50

11. táblázat: Rugalmassági modulusok a kompressziós görbék alapján

Bemeneti paraméterként HSS és HS talajmodellek esetében szükséges megadni az E_{50}^{ref} (a „drénezett” triaxiális vizsgálatnál a deviátor feszültség 50 %-hoz tartozó húr modulus) és az

$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (összenyomódási modulus) értékét is, melyeket valamilyen arányszámmal szokás figyelembe venni. Ezen értékek csökkenése a süllyedések növekedését, értékük növekedése pedig azok csökkenését eredményezi. Rémai Zsolt PhD értekezésében vizsgálatsorozattal megvizsgálta, hogy a két érték hányadosának ($E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$) változtatása mekkora hatással van az alakváltozásokra. A különböző $E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ arányértékek eltérő süllyedést eredményeztek, nagyobb szám esetén nagyobbak lettek a süllyedések, kisebb esetén pedig kisebbek. Megállapításra került továbbá, hogy az arányszám hatással van a számított süllyedések értékére, azonban a süllyedési görbe alakját csak minimálisan befolyásolja. Ez azt jelenti, hogy a mért süllyedési görbék bármely arányszám használatnál megfelelően jól közelíthetőek. Ha nem áll rendelkezésre megfelelő adat mind a két értékre, akkor a legegyszerűbb az $E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=1,00$ arányszámot alkalmazni a számítások során, melyet a nemzetközi szakirodalom is javasol. Ezen megfontolások alapján vizsgálataim során nem tértem ki az arányszám változtatására. További kutatásokkal bebizonyították az elemzők, hogy a kompressziós görbét leíró hatványfüggvény kitevője (m) nincs hatással a süllyedési görbék alakjára, valamint a maximális süllyedés értékére sem.

6.3.2 Kis alakváltozási paraméterek meghatározása

A kis alakváltozási tartományában érvényes alakváltozási paraméterek meghatározására az alábbi laboratóriumi- és terepi vizsgálati módszerek a legelterjedtebbek:

- triaxiális vizsgálat, nyúlásmérő bélyegekkel ellátott mintán;
- talajmintán gerjesztett hullámok terjedési sebességét mérő bender elemekkel végzett vizsgálat;
- dinamikus triaxiális vizsgálat;
- torziós nyíróvizsgálat
- downhole vagy crosshole vizsgálat
- szeizmikus CPT

Ezen vizsgálati módszerek közül némelyik már hazánkban is jelen van, azonban a mindennapos gyakorlatban nem terjedt el használatuk. Ezen vizsgálatok hiányában számos tapasztalati összefüggést vezettek be a kutatók a tervezési folyamatokba, melyek segítségével a hagyományos geotechnikai paraméterek alapján megbecsülhető a G_0 és $\gamma_{0.7}$ értéke. Leggyakrabban használt tapasztalati összefüggésekben a drénezetlen nyírószilárdság, a hézagtényező, az előterhelési viszonyszám, továbbá a CPT ellenállás értékek szerepelnek. Az építési helyszínen elvégzett szeizmikus CPT vizsgálatok eredményeit, továbbá tapasztalati képleteket és diagramokat alapul véve határoztam meg a kis alakváltozási paramétereket.

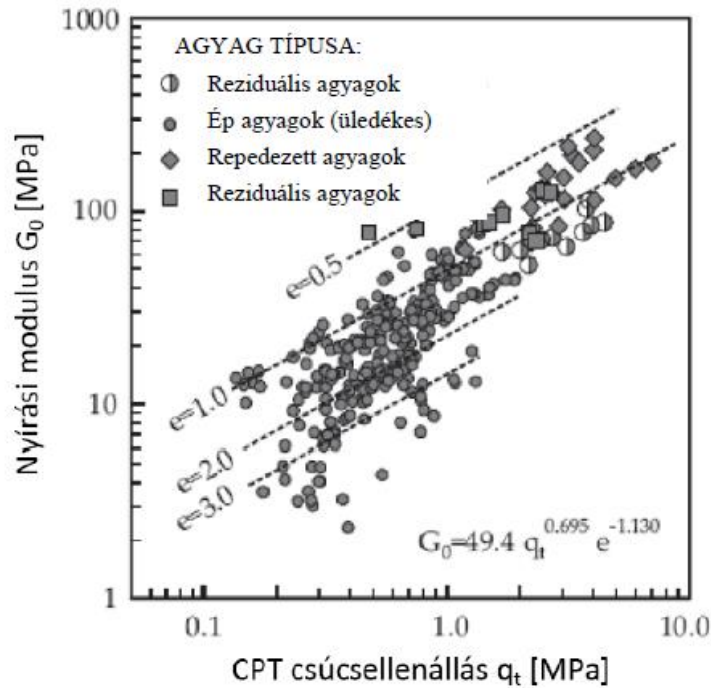
A rendelkezésemre bocsájtott nyíróhullám terjedési sebességek, valamint az egyes rétegek nedves térfogatsúlyainak ismeretében a G_0 értékek szemcsés talajok esetén megfelelő biztonsággal meghatározhatóak voltak a következő képlet segítségével:

$$G_0 = v_{s,\text{átlag}}^2 \cdot \gamma_{\text{unsat}}$$

Ahol,

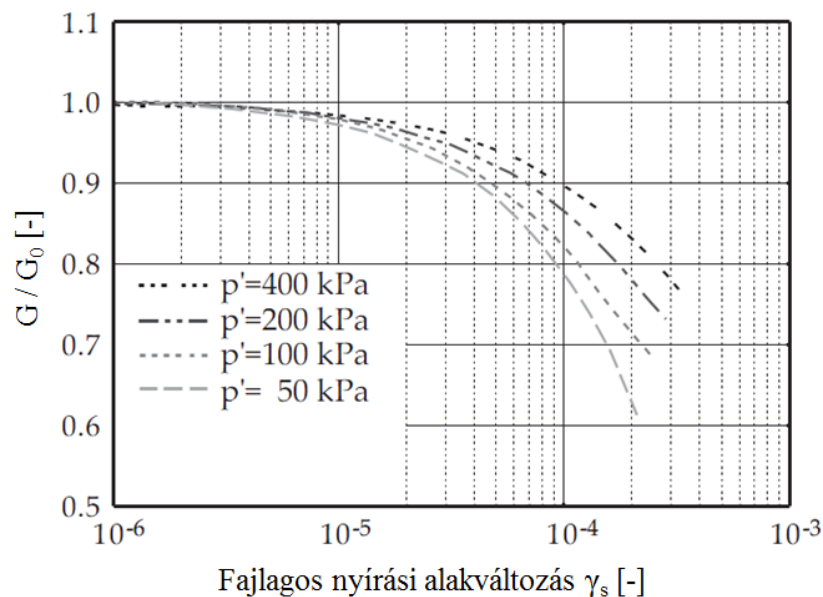
- G_0 - a kezdeti nyírási modulus (nagyon kis alakváltozásoknál, $\gamma_s < 10^{-6}$);
- γ_{unsat} - nedves térfogatsúly;
- $v_{s,\text{átlag}}$ - rétegekre jellemző átlagos nyíróhullám terjedési sebesség.

Kötött talajok G_0 értékének meghatározására a 31. ábra mutat példát (tapasztalati összefüggés). Ebben az esetben szükségünk van az egyes rétegekben a csúcseellenállások átlagos értékére, valamint az adott talajréteget jellemző hézagtényezőre.

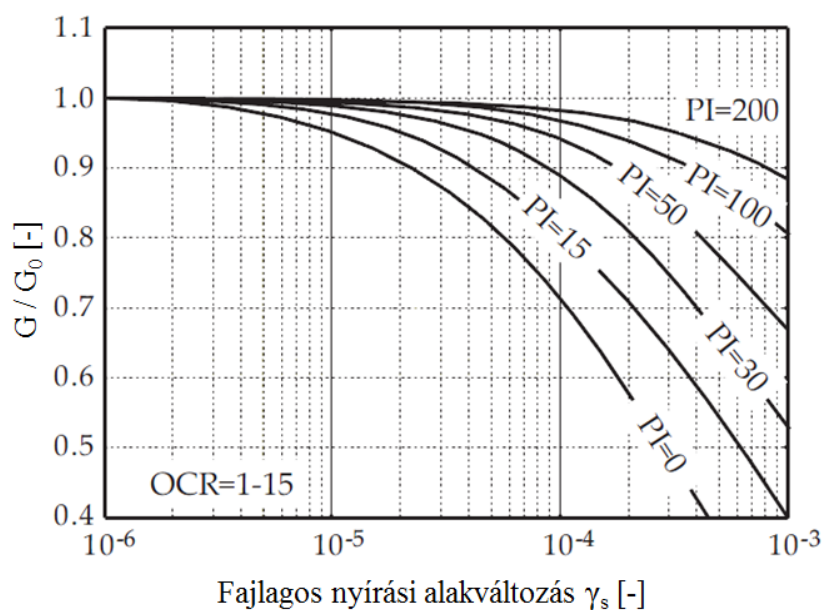


31. ábra: A CPT csúcsellenállás és a kezdeti nyírási modulus tapasztalati összefüggése [12]

A nagyon kis alakváltozásokhoz tartozó kezdeti nyírási modulus értékének meghatározásán túl szükséges megadni a $\gamma_{0.7}$ értékét is, mely a merevségváltozást leíró függvény (degradációs görbe) alakját határozza meg. Mérési eredmények hiányában, szintén tapasztalati összefüggések állnak rendelkezésünkre. Ezek közül számos a mindennapos gyakorlatban elvégzett mérési vizsgálatok eredményeinek függvényében megbízhatóan megadja a $\gamma_{0.7}$ értékét. Szemcsés talajok esetében a hatékony feszültség, kötött talajoknál pedig a plaszticitási index határozza meg a degradációs görbe alakját.



32. ábra: Szemcsés talajok nyírási modulusának degradációs görbéje [4]



33. ábra: Kötött talajok nyírási modulusának degradációs görbéje [4]










Ezen tapasztalati összefüggések, diagramok, képletek alapján az általam meghatározott kis alakváltozási paramétereket a 12. táblázat tartalmazza.

Talajfizikai jellemzők	Talajrétegződés jele					
	Mg	A	B	C	D	E
Típus	szemcsés	szemcsés	szemcsés	szemcsés	kötött	kötött
γ_{unsat} [g/cm ³]	2,00	1,90	1,80	1,70	2,00	2,10
e [-]	0,30	0,55	0,65	0,68	0,65	0,55
$q_{c,\text{átlag}}$ [Mpa]	1,08	1,42	3,10	18,87	3,80	6,19
$v_{s,\text{átlag}}$ [m/s]	340,2	243,6	218,1	275,6	379,6	406,2
$I_{p,\text{átlag}}$ [%]	-	-	-	-	20,31	35,07
G_0 [MPa]	232,49	112,76	85,65	129,12	203,31	344,70
$\gamma_{0.7}$ [-]	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

12. táblázat: Kis alakváltozási paraméterek

6.3.3 Talajfizikai paraméterek összegzése

Az egyes talajrétegekhez kapcsolódó talajfizikai input paramétereket a talajvizsgálati jelentés alapján vettem fel, melyet a Fugor Consult Kft. készített el. Bemeneti adatként a geotechnikai paraméterek átlagos értékét építettem a modellbe, kivéve a rugalmassági modulusokat, melyeket kompressziós görbék alapján határoztam meg, valamint a HSsmall anyagmodellhez szükséges kis alakváltozási paramétereket, melyeket tapasztalati összefüggések alapján számoltam. A vizsgálataim során használt talajfizikai paramétereket a 13. táblázat tartalmazza összefoglalva.

Talajfizikai jellemzők	Talajrétegződés jele						Ágyazat	Cukor	Beton
	Mg	A	B	C	D	E			
Jelölés									
Mélység-tartomány [m]	0 - 2,20	2,20 - 11,00	11,00 - 14,90	14,90 - 19,90	19,90 - 31,70	31,70 - 50,00	-	-	-
Anyagmodell	HSS	HSS	HSS	HSS	HSS	HSS	HS	MC	LE
Drénezés típusa	D	D	D	D	D	D	D	D	NP
γ_{unsat} [kN/m ³]	20	19	18	17	20	21	20	8,50	25
γ_{sat} [kN/m ³]	20	20	20	19	22	22	20	8,50	25
E_{50}^{ref} [MPa]	6	5,95	4,85	20	3,85	10,60	70	30	33000
$E_{\text{0ed}}^{\text{ref}}$ [MPa]	6	5,95	4,85	20	3,85	10,60	70	-	-
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [MPa]	18	17,85	14,55	60	11,55	31,80	210	-	-
m [-]	0,70	0,75	0,80	0,70	0,65	0,50	0,50	-	-
ν [-]	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,20
c'_{ref} [kPa]	1	16,90	9,50	6,80	40,60	71	10	1	-
φ' [°]	20	26,90	31,50	31,90	16,90	16,70	40	35	-
$\gamma_{0.7}$ [-]	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	-	-	-
G_0^{ref} [MPa]	231,49	112,76	85,65	129,12	203,31	344,70	-	-	-
k_x, k_y, k_z [m/day]	0,864	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	0,475	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	864	8,64	-

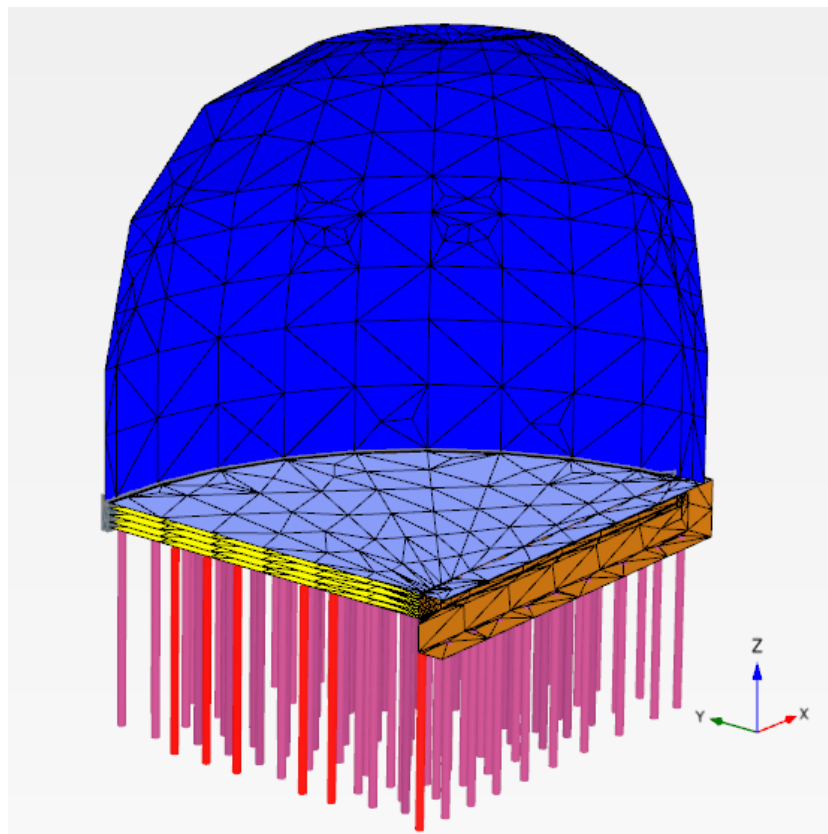
13. táblázat: Talajfizikai paraméterek és anyagjellemzők

Ahol,

- HSS - HSsmall (Hardening Soil model with small-strain stiffness) anyagmodell;
- HS - Felkeményedő (Hardening Soil) anyagmodell;
- MC - Mohr-Coulom anyagmodell;
- LE - Lineárisan Rugalmas (Linear Elastic) anyagmodell;
- D - Drénezett;
- NP - Nem-Porózus (Non-porous);
- γ_{unsat} - nedves térfogatsúly;
- γ_{sat} - telített térfogatsúly;
- E_{50}^{ref} - a „drénezett” triaxiális vizsgálatnál a deviátor feszültség 50 %-hoz tartozó húr modulus;
- $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ - összenyomódási modulus (a referencia feszültség értékéhez tartozó érintő modulus);
- $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ - a tehermentesítés-újraterhelés folyamatához tartozó húr modulus;
- m - a kompressziós görbét leíró hatványfüggvény kitevője;
- v - Poisson tényező;
- c'_{ref} - kohézió;
- φ' - belső súrlódási szög;
- $\gamma_{0.7}$ - az a fajlagos nyírási alakváltozás, ahol $G=0,7G_0$;
- G_0^{ref} - kezdeti nyírási modulus (nagyon kis alakváltozásnál, $\gamma_s < 10^{-6}$);
- k_x - x irányú áteresztőképességi együttható;
- k_y - y irányú áteresztőképességi együttható;
- k_z - z irányú áteresztőképességi együttható.

6.4 Szerkezeti elemek modellstruktúrája

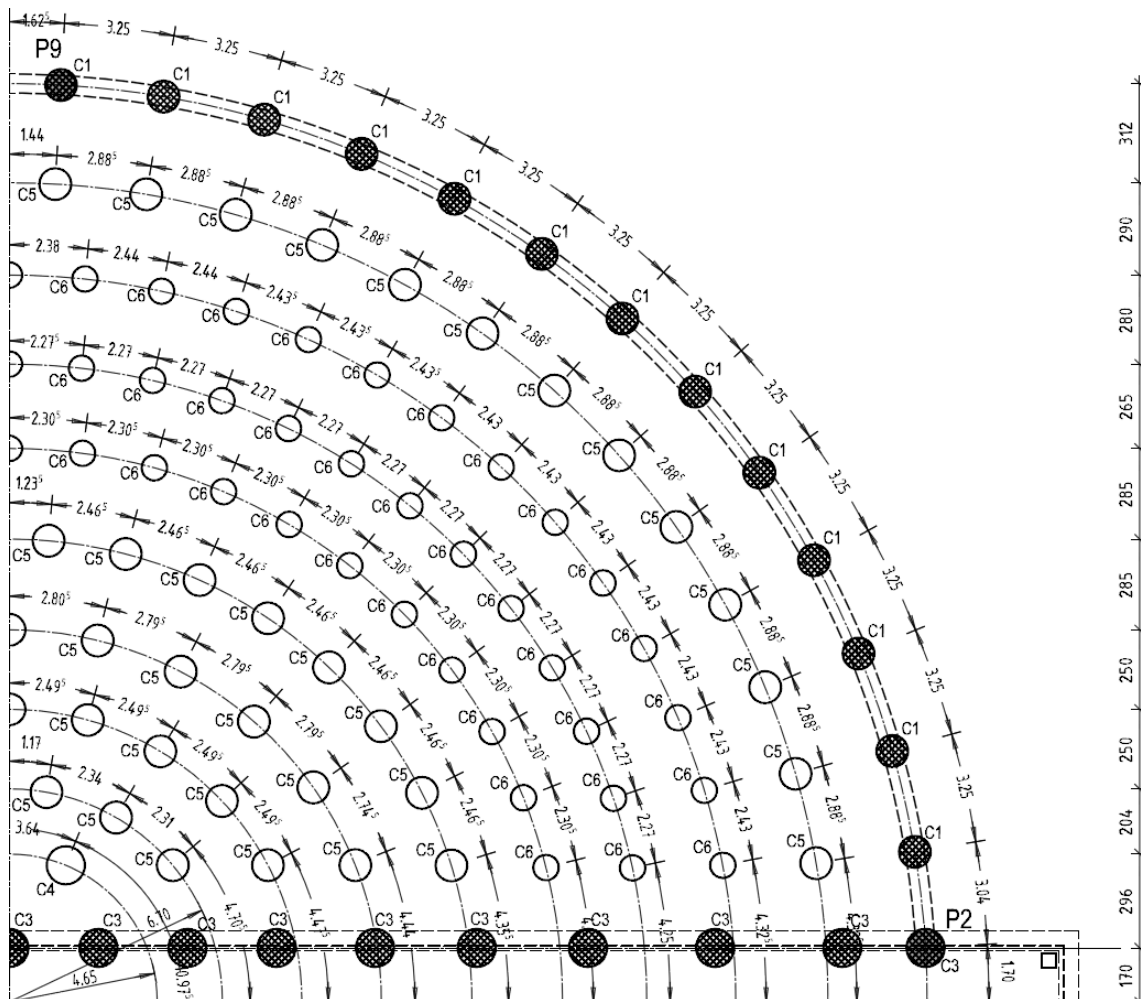
A szerkezeti elemek modellezésénél az elkészült kiviteli-, megvalósulási tervdokumentációkat használtam, így reális szerkezeti geometriát alakíthattam ki. Az építmény korábbi tervezési, modellezési fázisaiban az értékek több helyen is eltérőek voltak.



34. ábra: Szerkezeti elemek modellstruktúrája

6.4.1 Cölöpök

A CFA cölöpöket az analízis során 1D gerendaelemként (Embedded pile) építettem be a modellbe. A program a cölöpök modellezésénél a gerenda elemekhez automatikusan hozzá rendel interface (határfelületi) elemeket, hogy megfelelően leírja a szerkezet és a talaj kölcsönhatását. Plaxis 3D végeselemes szoftver esetében a gerenda elemek lineárisan rugalmas anyagtulajdonságúak. A cölöpök szerkezeten belüli elhelyezkedését a kiviteli tervek (35. ábra) alapján határoztam meg, akárcsak az 5. pontban ismertetett modellezés során. Az építési helyszínen elvégzett statikus CPT szondázások során rögzített csúcsellenállások és köpenysúrlódási értékeket figyelembe véve határoztam meg minden egyes cölöpre a talpellenállások és palástellenállások maximális nagyságát, Dr. Szepesházi Róbert: Cölöpök méretezése az Eurocode 7 követelményei szerint doktori értekezése alapján, melyeket a cölöpök tulajdonságainak megadásánál használtam fel. Azon cölöpök esetében, ahol a modell geometriai viszonyai miatt fél cölöpgeometria adódott, ott az adott modelltulajdonságokat (palástellenállás, talpellenállás) a felére csökkentettem.



35. ábra: Cölöpök kiosztása

A CPT-n (statikus szondázáson) alapuló empirikus méretezési módszerek közül a szemcsés talajba kerülő cölöpök méretezési módszerét használtam a cölöpök talpellenállásának és palástellenállásának a meghatározására (Dr. Szepesházi Róbert PhD értekezése alapján). A részletes számítás menetét a C1 jelű cölöpök estére bemutatom. A további cölöpök részletes számítását a mellékletek tartalmazzák.

Kiindulási adatok C1 jelű cölöpök esetében:

- Cölöp hossza:

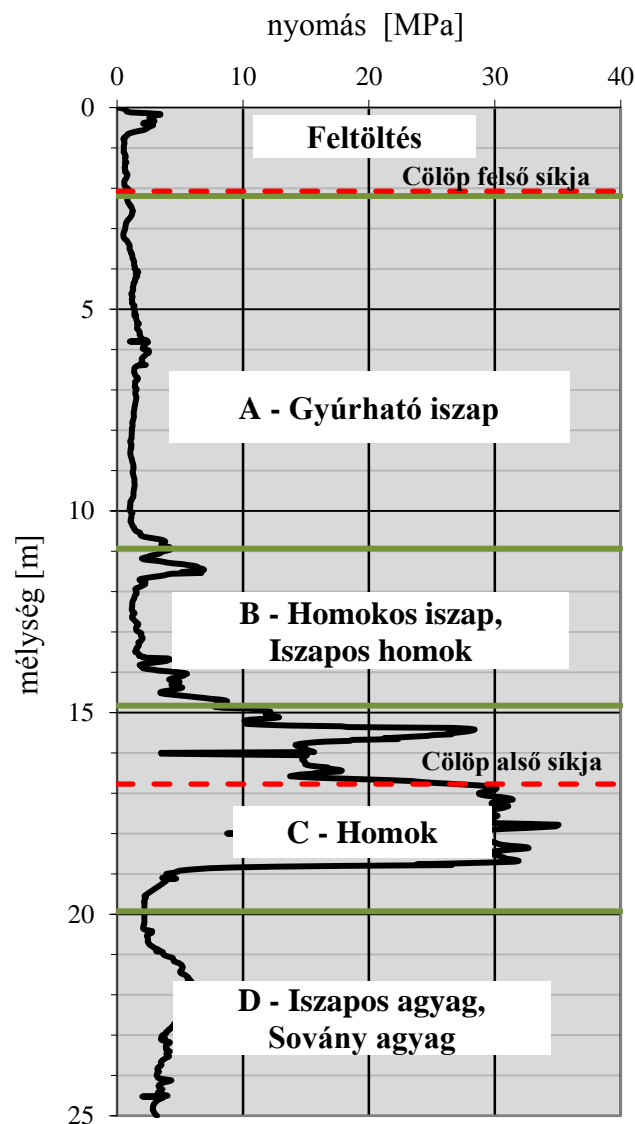
$$L = 14,70 \text{ m}$$

- Cölöp átmérője:

$$D = 1,00 \text{ m}$$

- Keresztmetszeti terület:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0,785 \text{ m}^2$$



36. ábra: CPT csúcsellenállás

Számítás menete:

A fajlagos talpellenállást a

$$q_{b.cal} = \alpha_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q_{c1m} + q_{c11m}}{2} + q_{c11m} \right) = 3,84 \text{ MPa}$$

képlettel számoltam, ahol

- $\alpha_b = 0,7$ - a cölöp típusát veszi figyelembe, ebben az esetben CFA;
- $q_{c1m} = 16,30 \text{ MPa}$ - a cölöptalp alatti t zóna mért q_c értékeinek az átlaga, mely t mélységet úgy kell $0,7 \cdot D$ és $4 \cdot D$ között felvenni, hogy a számított $q_{b.cal}$ a legkisebb legyen;
- $q_{c11m} = 2,10 \text{ MPa}$ - a cölöptalp alatti t zóna legkisebb q_c értékeinek átlaga, mely „legkisebb” értékeket úgy kell felvenni, hogy a t mélységtől a

talpig felfelé haladva az előzőnél mindig csak kisebbeket szabad számításba venni;

$q_{cIII m} = 1,78 \text{ MPa}$ - a cölöptalp feletti $8,0 \cdot D$ zóna legkisebb q_c értékeinek az átlaga, mely „legkisebb” értékeket a talptól $8,0 \cdot D$ -ig felfelé haladva az előbbi elv szerint kell felvenni, a talptól a q_{cII} számításakor figyelembe vett utolsó értékéből indulva.

Ezek alapján a talpellenállás számított értéke:

$$R_{b.cal} = A_b \cdot q_{b.cal} = 3015,7 \text{ kN}$$

Szemcsés talajok estében a palástellenállást a kPa-ban behelyettesítő q_c -ből:

$$q_s = \alpha_{sq} \cdot \sqrt{q_c}$$

képlettel lehet számítani, ahol palástellenállási szorzó $\alpha_{sq} = 0,55$, CFA cölöpök esetén.

Programban a palástellenállás értékét az alábbi formában kell megadni:

$$T = D\pi q_s \text{ [kN/m]}$$

Talaj jele	α_{sq}	$q_{c, \text{átlag}}$ [kPa]	q_s [MPa]	T [kN/m]	H [m]
Mg	0,55	983	17,2	54,18	0,068
A	0,55	1437	20,8	65,49	8,793
B	0,55	3061	30,4	95,60	3,895
C	0,55	1640	70,4	221,24	1,945

14. táblázat: Palástellenállás értékek C1 jelű cölöpök esetén

A számítás menete a többi cölöp esetében is ugyan ezen elvek, javaslatok alapján történt. Az analízis során a cölöpök palástellenállását rétegenként vittem be (Multi-linear) a 3D végelelemes modellbe. Ezzel a lehető legpontosabb cölöpviselkedést tudtam létrehozni, ugyanis a korábbi 2D modellt reprodukáló 3D modellben csak a cölöpök felső és alsó síkjánál adtam meg ezen palástellenállás értékeket, a közbenső részekét azonban nem, mivel a szoftver lineáris kapcsolatot állított fel a két érték között. A felmerülő pontatlanságokat elkerültem azzal, hogy rétegenként adtam meg a palástellenállás értékeket. A cölöpök modellparaméterei a 15. táblázatban összefoglalva megtalálhatóak.

A cölöpök talpsíkja a C jelű homokréteg felső síkjától 1,945 m mélyen található. Felső síkjuk eltérő, attól függően, hogy a szerkezeten belül hol helyezkednek el (talpgerenda alatt, alagút alatt, ágyazati réteg alatt).

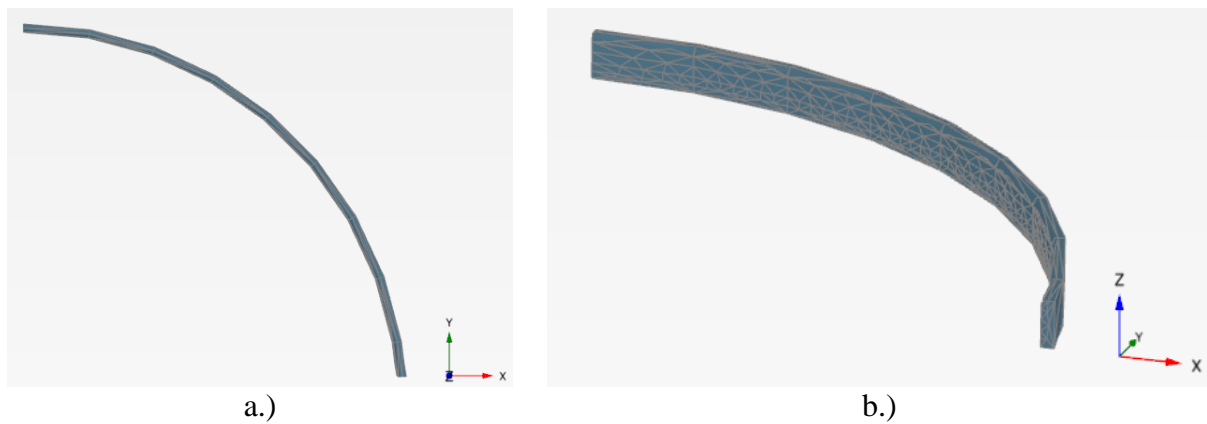
Cölöp jele	D [m]	E [MPa]	γ [kN/m ³]	Palástellenállás		Maximális talpellenállás F_{\max} [kN]
				H [m]	T [kN/m]	
C1	1,00	33000	25	0,07	54,18	3016
				8,78	65,49	
				3,90	95,60	
				1,95	221,24	
C3	1,20	33000	25	6,81	80,82	4030
				3,90	114,71	
				1,95	265,49	
C4	1,20	33000	24	0,32	62,57	4030
				8,79	78,60	
				3,90	114,71	
				1,95	265,49	
C5	1,00	33000	24	0,32	52,14	3016
				8,79	65,49	
				3,90	95,60	
				1,95	221,24	
C6	0,80	33000	24	0,32	41,70	2257
				8,79	52,40	
				3,90	76,48	
				1,95	177,00	

15. táblázat: Cölöpök modellparaméterei

6.4.2 Talpgerenda, lemez-, interface- és geogrid elemek

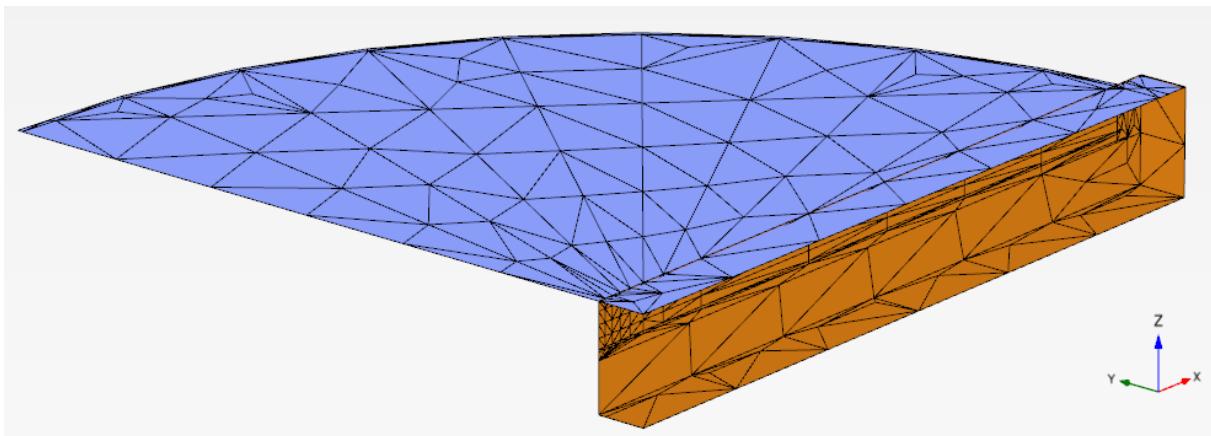
A szerkezeti elemek modellezésénél az elkészült kiviteli-, megvalósulási tervdokumentációkat használtam, melyeket az MMérnöki Iroda Kft. készített. Ezen tervek segítségével egy reális építménygeometriát alakíthattam ki. Az 1D és 2D elemeket a statikai tengelyük, középfelületük alapján vettem fel és építettem be az analízisbe. Azon alkotórészeknél, melyeket 3D testelemként vizsgáltam, a valós szerkezeti méreteket tekintettem kiindulási adatnak.

3D tömbként alakítottam ki a héjszerkezetet alátámasztó, annak terheit az altalajra és az összekapcsolt cölöpökre továbbító talpgerendát. Funkciójából adódóan a feszültségek eloszlásában nagy szerepet tölt be. Ez volt az elsődleges szempont, amiért a lehető legpontosabb modellgeometriát próbáltam felvenni a talpgerenda esetében. A számítási idő és a hálógenerálás hatására kialakuló elemek számának optimalizálása érdekében az eredetileg kör alakot sokszöggel, $\frac{1}{4}$ modellezési tartomány esetében 9 részre történő felosztással, egyenesekkel közelítettem. A létrehozott tömb anyagtulajdonságának a betonét vettem fel.



37. ábra: Talpgerenda modellgeometriája - Felülnézet (a); Általános nézet (b)

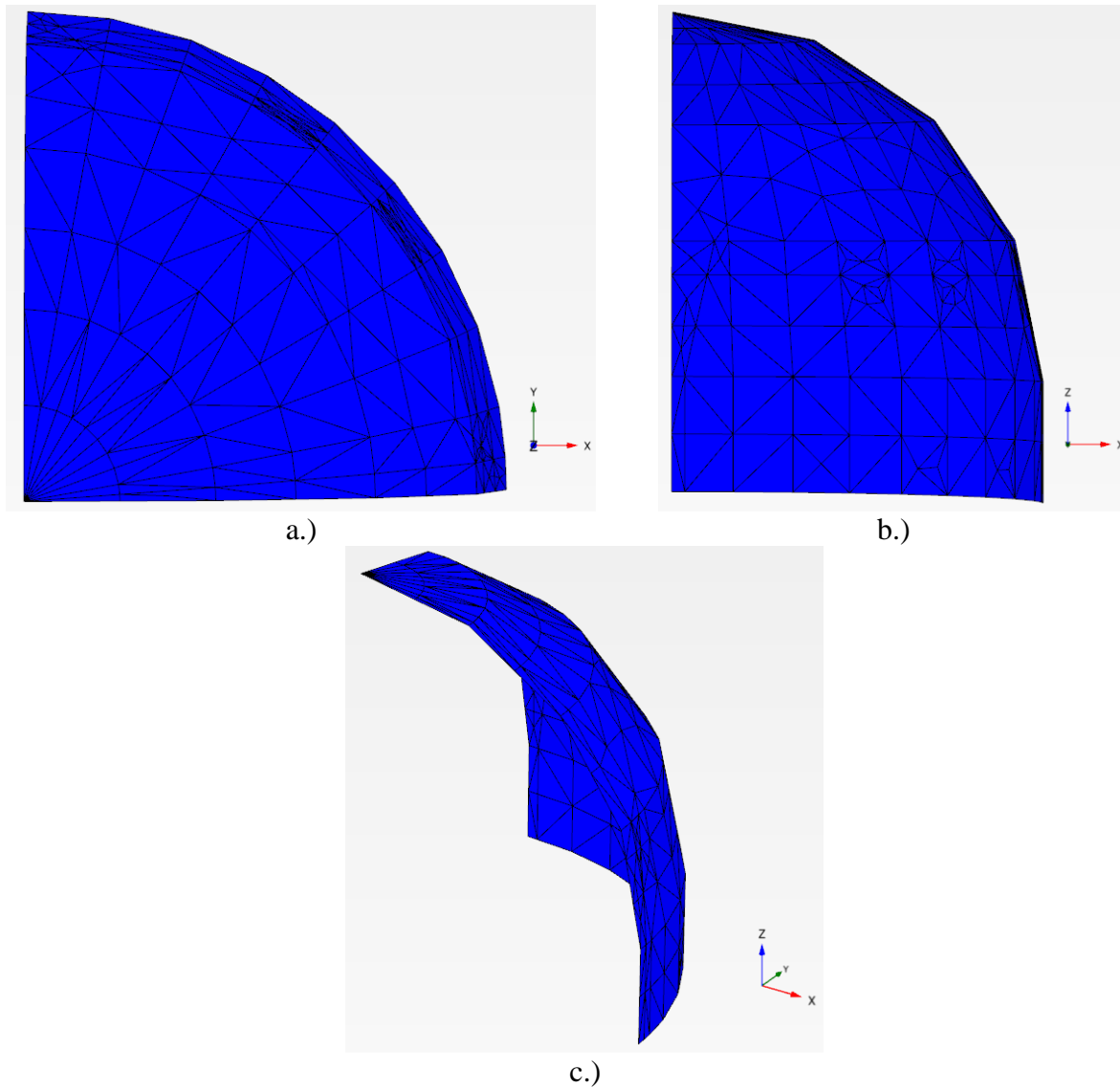
Az alagút falát és alaplemezt, a héjszerkezetet, valamint a siló alaplemezt lemez (plate) elemként modelleztem, melyeknél a szerkezeti vastagságot a kivitelei tervek alapján adtam meg, anyagjellemzőként lineáris, izotróp beállításokat választottunk. A megvalósulási tervek alapján az elemeket középfelületükkel modelleztem.



38. ábra: Alaplemez és alagút modellgeometriája





A való életben megvalósult alagút egy kiszolgáló épülettel köti össze a silószerkezetet, ahová továbbítja a betöltött cukortömeget. A melléképületet az analízis során nem építettem be a modellbe. Az alagút végfalát nem az alaplemez és a talpgerenda síkjánál alakítottam ki, hanem ~1 méterrel azon túl. Ezzel a kialakítással sikerült elérnem, hogy az alaplemezben és az alagút falában a feszültségek megfelelő kialakulását nem befolyásolja a végfal merevítő hatása. A szoftver a plate elemek hajlítási és normálmerevségét a szerkezeti vastagságból és a rugalmassági modulusból számolja.

A Plaxis 3D korlátaiból adódóan, miszerint kétszeresen görbült felületszerkezetek geometriai kialakítása nem lehetséges, a siló héjszerkezetét egyenes felületelemekkel közelítettem. Az így kialakított modellgeometriát a 39. ábra szemlélteti.



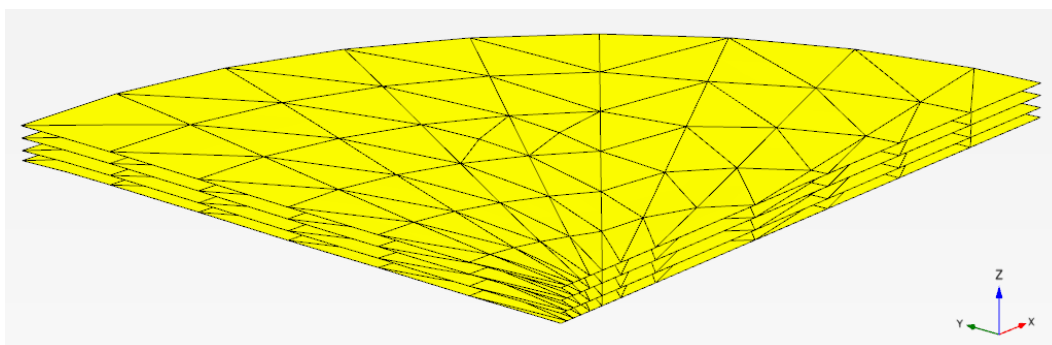
39. ábra: Héjszerkezet modellgeometriája – Felülnézet (a); Oldalnézet (b); Általános nézet (c)

Silók tervezésénél nem magának a szerkezetnek a méretezése jelenti a problémát a tervezők számára, hanem a szemcsés anyagból származó terhelések pontatlan ismerete. Szemcsés anyagok tárolása esetében, a tároló falára az nyomást fejt ki. A folyamatos feltöltési és leürítési hullám során a tárolt anyagban átboltozódás alakul ki, ennek következtében a héjszerkezetre hárul a töltőanyag jelentős súlya. Helyes tervezéssel, kivitelezéssel a héjszerkezetben csak normálerő ébred. A kialakuló oldalnyomást a peremgerendának kell felvennie. Ezen bonyolult membrán erőjáték, valamint a szemcsés anyag (cukor) mozgása miatt döntöttem úgy, hogy a felszerkezetet és a cukortömeget nem vonal- és felület mentén megoszló teherként építem be a modellbe.

Tulajdonságok	Alagút alaplemez	Alagút fal	Alaplemez	Héj
Jelölés				
Vastagság [m]	0,25	0,45	0,25 0,88	0,30
γ [kN/m ³]	25	25	25	25
E [MPa]	33000	33000	33000	33000
ν [-]	0,2	0,2	0,2	0,2

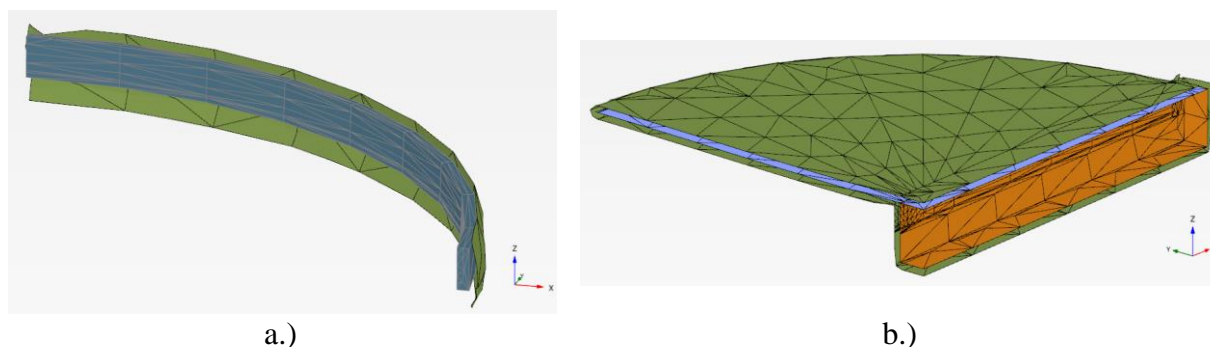
16. táblázat: Lemez (Plate) elemek modellparaméterei

Az ágyazati rétegben 4 szinten elhelyezkedő georács rétegeket geogrid elemként, rugalmas anyagmodellel modelleztem, merevségét EA=500 kN/m-re vettem fel, a gyártó adatai alapján.



40. ábra: Georács elemek modellgeometriája

Az alagút alaplemez, az alagút fal és a talpgerenda külső oldalán, valamint az alaplemez alsó és felső oldalán határfelületi ún. interface elemeket alkalmaztam. Ezen interface elemek segítségével a környező talajtömeg kellőképpen mobilizálódni tud és a megfelelő mértékű feszültségállapotok, elmozdulások képesek kialakulni. Két különálló szerkezeti elemet a határfelületek segítségével lehet különválasztani, ugyanis a programban a kapcsolódó elemek közös pontokkal rendelkeznek. Az interface elemek, ezeket a pontokat „bontják” szét. Segítségükkel a szerkezeti elemek körüli talajtömeg kellőképpen mobilizálódni tud, nincsenek „gátló” hatások. A talpgerenda esetében a szokásostól eltérő módon alakítottam ki az interface elemeket, ugyanis a határfelületek 1 méterrel a talpgerenda alsó síkja alá érnek. Ez azért volt kiemelten fontos, mert a kezdeti modellfuttatások során azt tapasztaltam, hogy a talpgerenda környezetében a talajtömeg és maga a talpgerenda mozgása alacsony mértékű volt, nem tudtak kialakulni a megfelelő elmozdulások a két közeg egymásra gyakorolt hatása miatt.

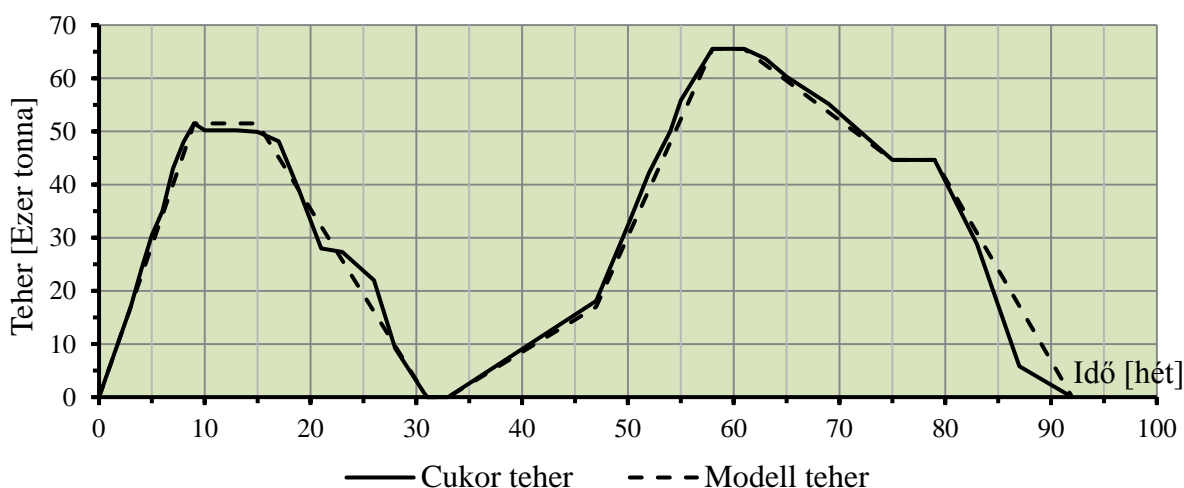


41. ábra: Interface elemek - Talpgerendánál (a); Alaplemeznél és alagútnál (b)

6.5 Töltőanyag modellezése

A cukor, mint töltőanyag teherként történő modellezése során amellet a megoldás mellett döntöttem, miszerint „talajként” építem be az analízisbe, nem pedig felületen megoszló teherként, mivel így a héjszerkezetet megfelelő mértékben tudom bevonni a teherviselésbe, aminek következtében a talpgerendára, valamint az alaplemezre átadódó terhek mértéke a lehető legpontosabb eredményt adja. A cukortömegben képes kialakulni az átboltozódás hatása, így az alaplemez középső zónájában kisebb teherintenzitás ébred, mintha a geometriai és térfogati adatok alapján, felületen megoszló terhelést használnék.

Mivel a siló feltöltése és leürítése folyamatosan változik, ezért több cukorgeometriát kellett kialakítanom, hogy képes legyek lekövetni a terhelés időbeli változását. A rendelkezésemre bocsájtott monitoring eredmények tartalmazzák a szerkezet süllyedését és a betöltött cukor mennyiségét.

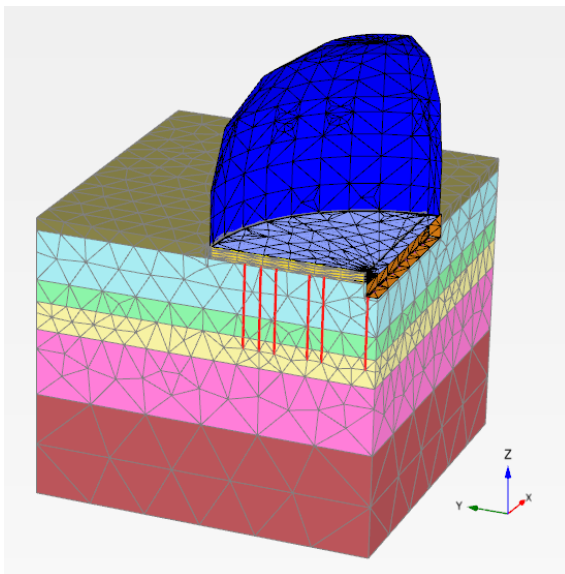


42. ábra: Terhelés időbeli alakulása

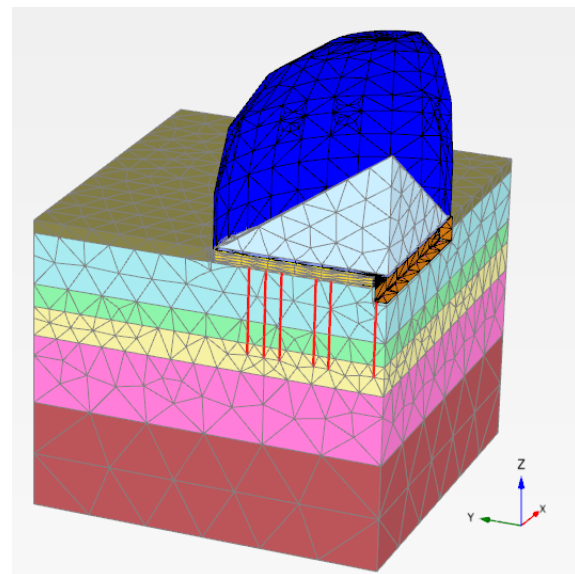
A 42. ábrán látható a monitoring során meghatározott töltőanyag mennyiség időbeli alakulása, valamint az általam kialakított modell teher, mely követi azt. Megfigyelhető hogy az első feltöltési hullám alkalmával, a silóba 9 hét alatt ~51.500 tonna cukrot töltöttek be, melyet 6 hétig közel konstans szinten tartottak, majd elkezdődött a leürítési fázis, mely 16 hétig tartott. A második feltöltési időszak során ~65.500 tonna cukrot töltöttek be a szerkezetbe, melyet fokozatosan, hosszabb időtartam alatt ürítettek le, mint a korábbi fázis esetében. Jól láthatóan 5 jellegzetes állapot olvasható le az ábráról, melyek a következők:

1. Üres állapot
2. 17.000 tonnás feltöltési állapot
3. 44.650 tonnás feltöltési állapot
4. 51.500 tonnás feltöltési állapot
5. 65.500 tonnás feltöltési (teljesen feltöltött) állapot

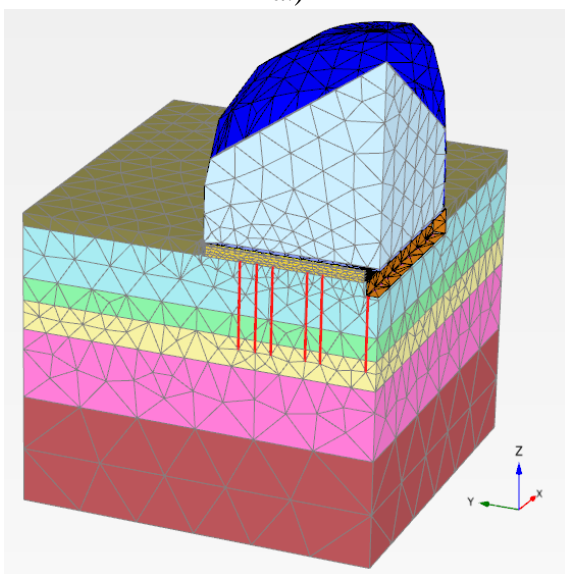
Ezen állapotok közül elsőre a 17.000 tonnás feltöltési állapot nem tűnik jellegzetesnek, azonban 3 hét alatt, amíg el nem érték ezt a töltöttségi szintet, a szerkezeten nem alakultak ki süllyedések, ezért kiemelten fontosnak éreztem ezt részletesebben megvizsgálni. Minden egyes tömegértékhez kisserkesztettem a megfelelő modellgeometriát (43. ábra), melyeket a számítások során aktiváltam. A cukor modellparamétereinek megadása hasonlóan történt, mint az altalajrétegek esetében. Mohr-Coulomb anyagmodellt használtam az egyszerűbb, gyorsabb számítás érdekében.



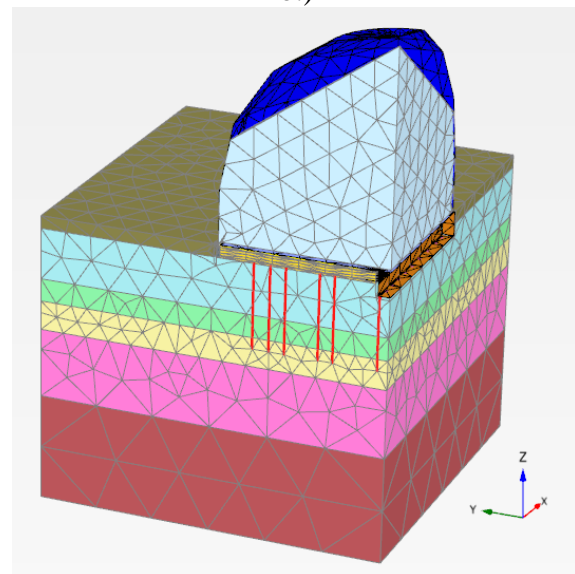
a.)



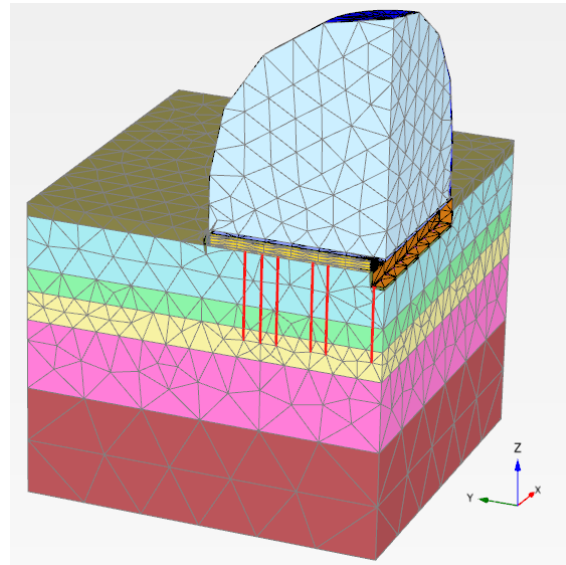
b.)



c.)



d.)

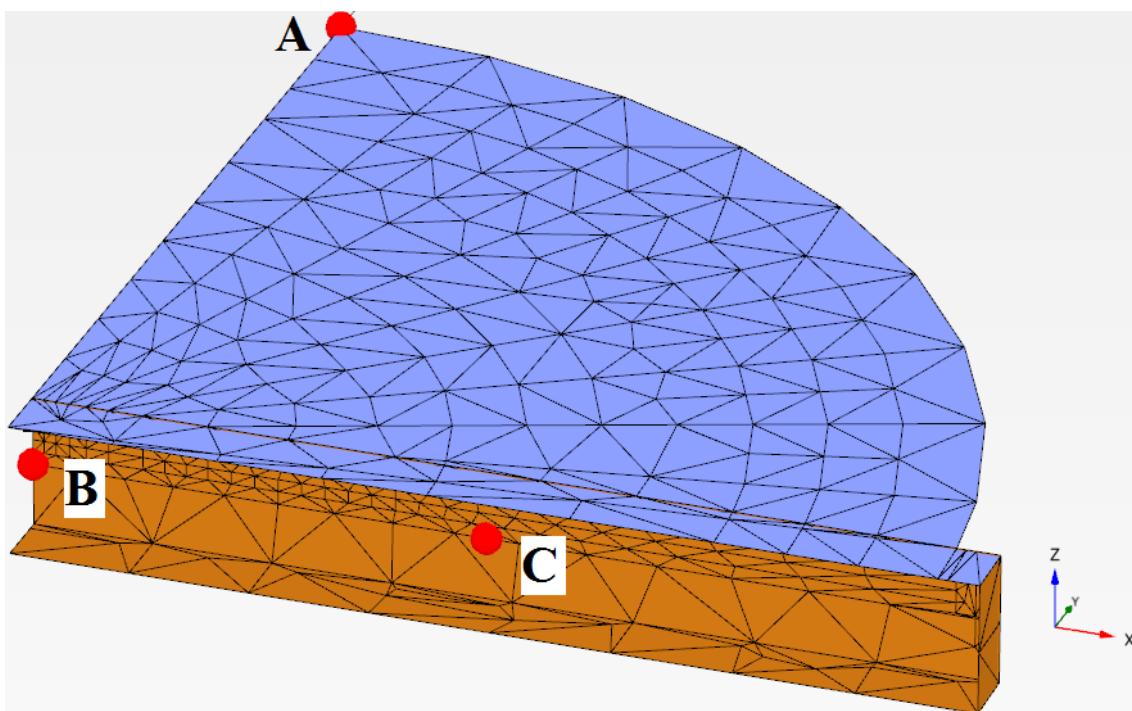


e.)

43. ábra: Üres állapot (a); 17.000 tonnás feltöltés (b); 44.650 tonnás feltöltés (c); 51.500 tonnás feltöltés (d); Teljes feltöltés (e)

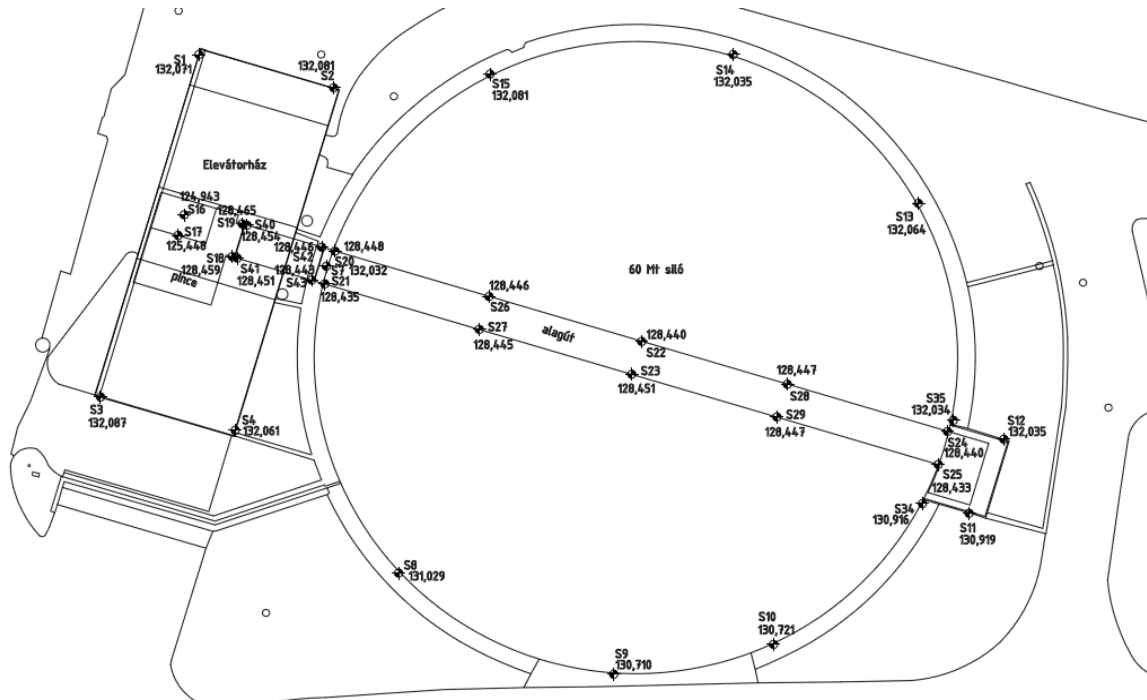
6.6 Vizsgálati eredmények

A modellfuttatások során törekedtem a való életben lezajló feltöltési és leürítési hullámokat a lehető legpontosabban reprodukálni és legrészletesebben végig követni a vizsgálati időtartamon. Az építési fázisokat és a teherlépcsőket ennek függvényében választottam meg. A monitoring rendszer kiépítése során, az alaplemez szélén 8 db, az alagút falán 10 db mérési pontot létesítettek. Modellemben a deformációk időbeli változásának alakulását 3 kitüntetett pontban követtem figyelemmel, melyek szerkezeten belüli elhelyezkedését a 44. ábra szemlélteti.



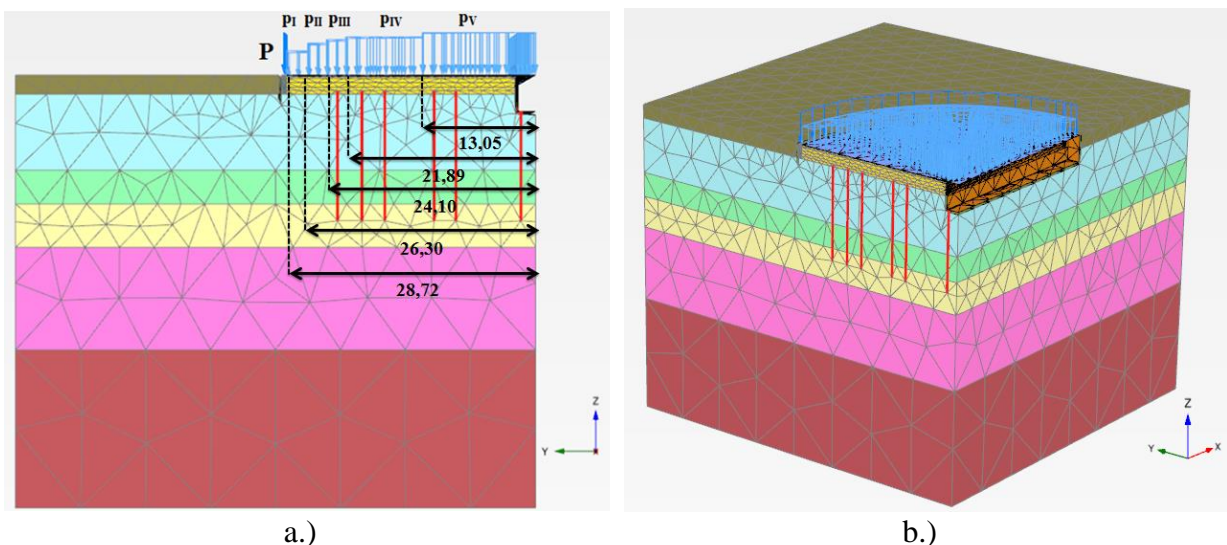
44. ábra: Kiválasztott vizsgálati pontok

A monitoring rendszer kiépítése során létesített számos mérési pont pontos, szerkezeten belüli elhelyezkedését a Strabag MML Kft. rendelkezésemre bocsájtotta. Ezek függvényében, mivel nem a teljes szerkezetet, hanem annak $\frac{1}{4}$ -ét modelleztem, az egyes pontokat rendszereztem, attól függően, hogy hol helyezkednek el (alaplemez szélén, alagút közepén, alagút negyedénél). A mért süllyedéseket ezek alapján átlagoltam, mivel a süllyedési adatok a siló D-i irányában kissé nagyobbak, mint az É-i oldalon tapasztaltak.



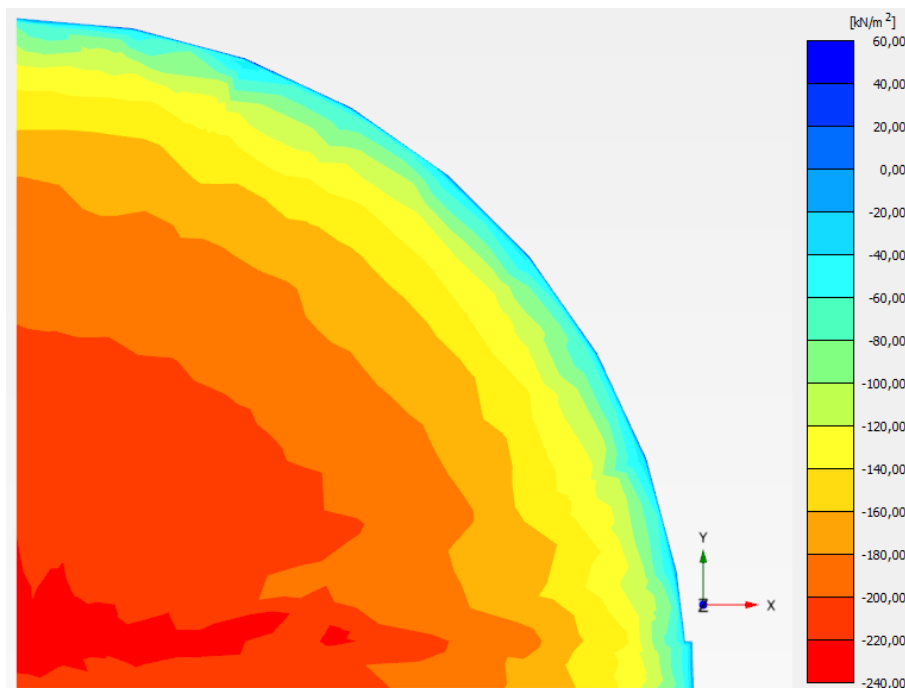
45. ábra: Mérési pontok helyzete

A konszolidációs folyamat részletes vizsgálata során konvergencia problémákhoz vezetett a felszerkezet és a cukortömeg viselkedésének modellezése, így a számításokhoz itt ezeket, a 46. ábrán látható módon, felületen-, valamint vonal mentén megoszló teherként vettem figyelembe.

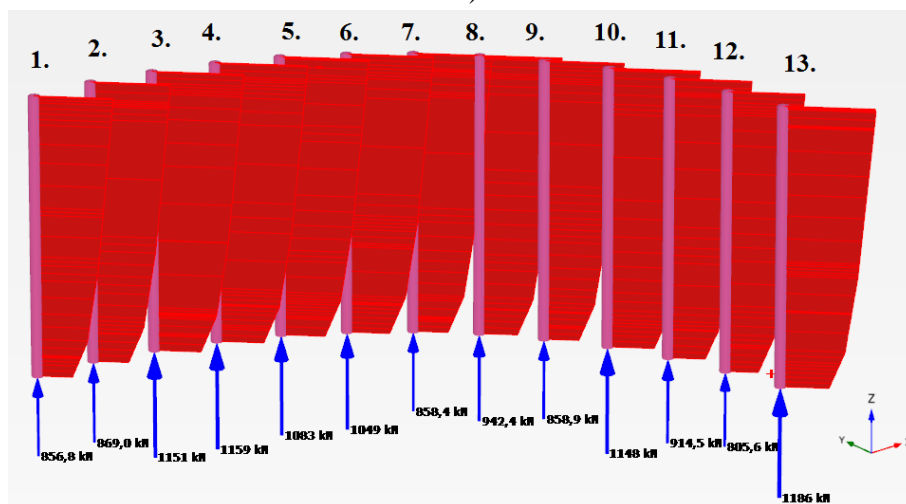


46. ábra: Helyettesítő terhelés - Oldalnézet (a); Általános nézet (b)

Vizsgálataim során, a jellegzetes terheléseket egyenként, külön modellekben számítottam, melyekben szerepelt a héjszerkezet, továbbá a cukortömb is. Ezek alapján, a helyettesítő terheket minden terhelési lépcsőnél a talpfeszültségekből, illetve a cölöpökben keletkezett normál igénybevételekből számoltam vissza. Ezzel a módszerrel az egyes teherintenzitások megfelelően jól közelíthetőek, az analízis nincs túlzott mértékű hibával terhelve. A vonal mentén megoszló terhelést a talpgerenda felső síkján működtettem, ugyan ott, ahol eredetileg a héjszerkezetet modelleztem. A cukortömeget helyettesítő felületen megoszló terhelést a félgömb alakú silógeometria miatt lépcsőzetesen (5 darab lépcső) vettem figyelembe. Következőkben bemutatom az 51.500 tonnás feltöltési esetre a helyettesítő terhek számításának menetét.



a.)



b.)

47. ábra: Talpfeszültség (a); Normál igénybevétel a C1 jelű cölöpökben (b)
- 51.500 tonnás feltöltési állapot

C1 jelű cölöpökben keletkező maximális normál igénybevételek:

Sorszám	Maximális normál igénybevétel N_{max} [kN]
1	1926
2	1950
3	2246
4	2269
5	2176
6	2134
7	1939
8	2025
9	1938
10	2228
11	1995
12	1871
13	2235
ΣN_{max}	26932

Vonal mentén megoszló teher hossza (talpgerenda hossza): $L = 43,53 \text{ m}$

Vonal menti teher értéke 51.500 tonnás feltöltési állapotnál: $P = \frac{\Sigma N_{max}}{L} = 620 \frac{kN}{m}$

A felület mentén megoszló terhelés nagyságát és lépcsőzetes változását az egyes építési fázisoknál a kialakult talpfeszültségek alapján határoztam meg Plaxis 3D modelledmények

alapján. Ezeket, valamint a vonal mentén megoszló terhelések nagyságát összefoglalva a 17. táblázat tartalmazza.

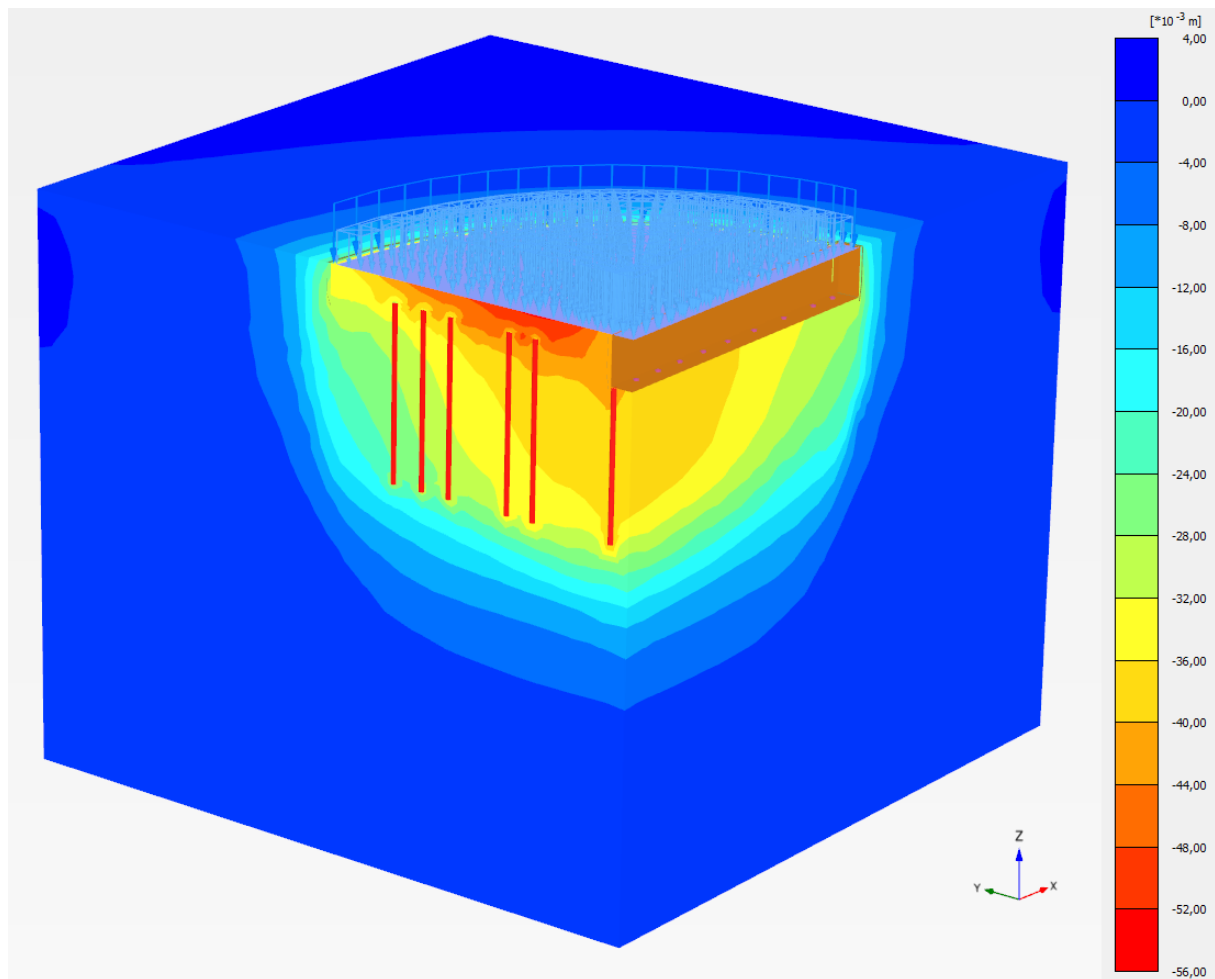
Építési fázis	P_I [kN/m ²]	P_{II} [kN/m ²]	P_{III} [kN/m ²]	P_{IV} [kN/m ²]	P_V [kN/m ²]	P [kN/m]
Üres állapot	0	0	0	0	0	270
17.000 tonnás feltöltés	90	65	35	25	5	300
44.650 tonnás feltöltés	195	175	155	140	105	585
51.500 tonnás feltöltés	220	195	170	145	110	620
65.500 tonnás feltöltés	245	220	205	185	140	930

17. táblázat: Helyettesítő terhelés

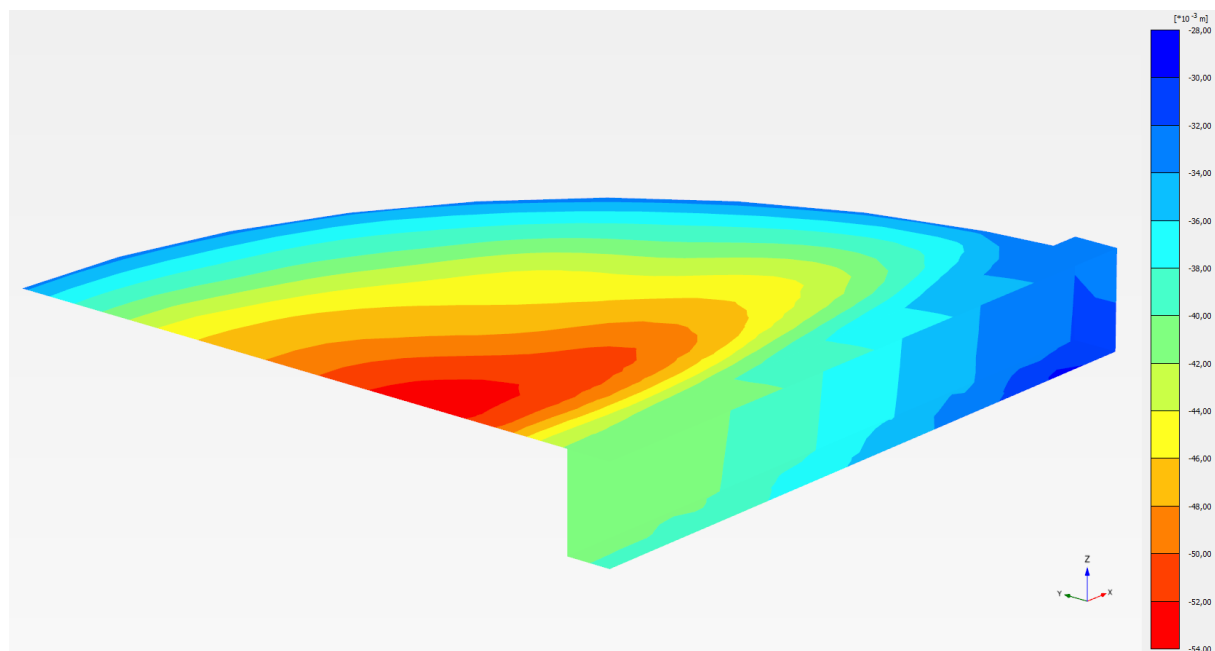
A konszolidációs számítás során, az alábbi ütemezést alkalmaztam, mellyel a valóságban kialakult terhelési lépcsőket követtem:

1. Feltöltés 17.000 tonnáig: 21 nap (3 hét)
2. Feltöltés 51.500 tonnáig: 42 nap (6 hét)
3. Pihentetés 51.500 tonnás állapotban: 42 nap (6 hét)
4. Leürítés 0 tonnáig: 112 nap (16 hét)
5. Pihentetés 0 tonnás állapotban: 14 nap (2 hét)
6. Feltöltés 17.000 E tonnáig: 98 nap (14 hét)
7. Feltöltés 65.500 tonnáig: 77 nap (11 hét)
8. Pihentetés 65.500 tonnás állapotban: 20 nap (3 hét)
9. Leürítés 44.650 tonnáig: 98 nap (14 hét)
10. Pihentetés 44.650 tonnás állapotban: 18 nap (4 hét)
11. Leürítés 0 tonnáig: 91 nap (13 hét)

A számítás során kapott eredmények közül a 48. ábrán a 65.500 tonnás feltöltési állapothoz tartozó z irányú elmozdulásokat mutatom be. A többi terhelési állapothoz tartozó eredmények a mellékletekben megtalálhatóak.



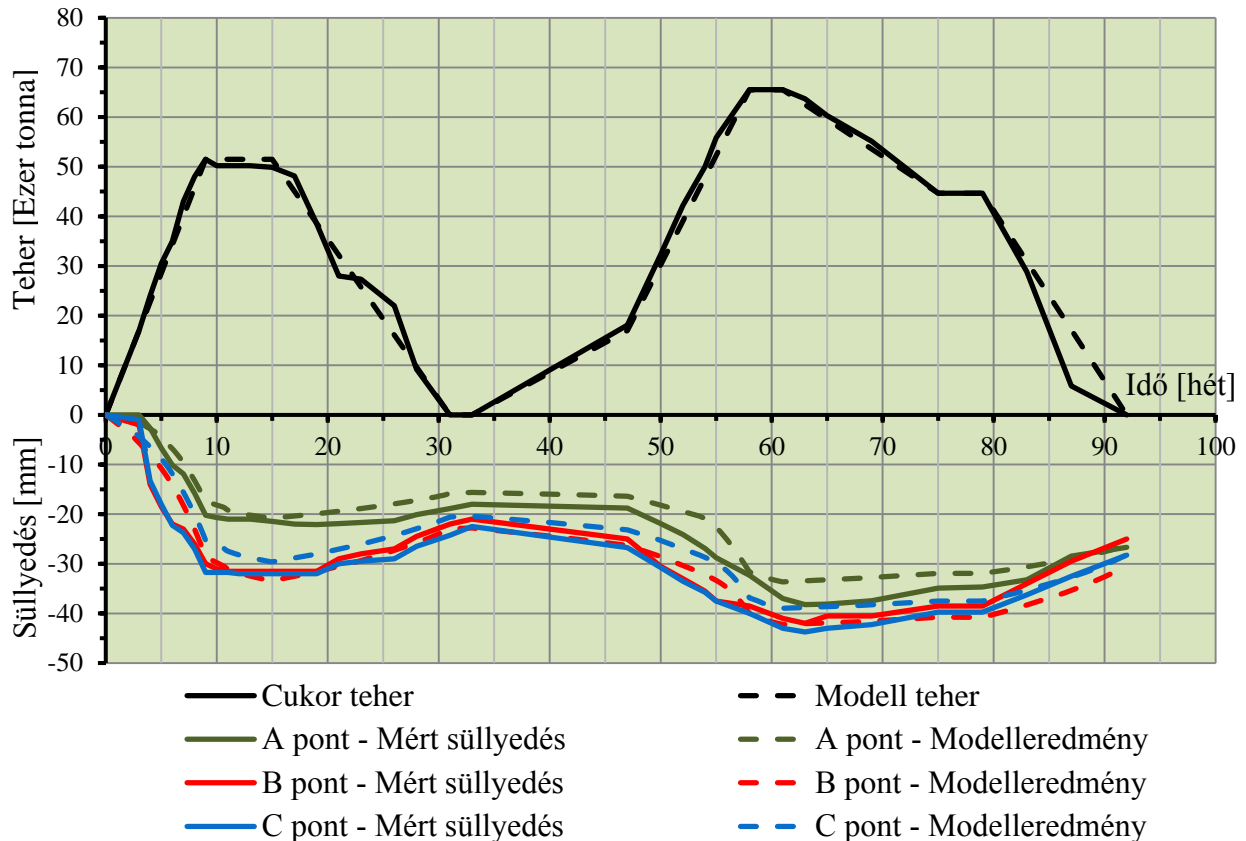
a.)



b.)

48. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
- 65.500 tonnás feltöltési állapot

Az ábrán látható, hogy teljesen feltöltött állapotban, az alaplemez maximális z irányú elmozdulás értéke 52,8 mm-re adódik. Az alaplemez szélén 33,3 mm, az alagút fal közepén pedig 41,7 mm a süllyedések értékei. Ezen eredmények megfelelően jól tükrözik a szerkezet valós viselkedését. A teljes feltöltési-leürítési időszakot tükröző süllyedésértékeket a 49. ábra szemlélteti.



49. ábra: Süllyedési diagram

A süllyedési diagramról leolvasható, hogy az első feltöltési hullám során, a valós szerkezet esetén a 3. hétig az alaplemezen nem alakultak ki elmozdulások, majd ezt követően hirtelen, „roskadás”-szerű süllyedés következett be. Korábban, egyes nagy műtárgyaknál tapasztaltak már hasonló jelenséget, azonban elméleti magyarázata még nem tisztázott. 51.500 tonnás betöltési szintnél 6 hétig nem történt leürítés, ebben a fázisban a terhelés állandónak tekinthető. Jól látható, hogy viszonylag nagy egyenletes terhelésnél, 6 hetes időtartam alatt sem alakultak ki konszolidációs süllyedések. A szerkezet alaplemezének szélén 21 mm-t, közepén pedig 31,5 mm elmozdulást regisztráltak. Modelleredményekből a lemez peremén ~19,5 mm, míg közepén ~31,5 mm süllyedés keletkezett.

A 15. hét után megkezdődött a betöltött cukortömeg teljes leürítése, melynél megfigyelhető az altalaj „fellelegzése”, az alaplemez süllyedésének nagysága a lemez közepén 9,5 mm-rel, míg a széleken 2,5 mm-rel csökkent. Hasonló mértékű expanziót eredményezett a végeelemes analízis is. A második feltöltési fázis során a betöltés kezdetekor nem tapasztalható „roskadás”-szerű elmozdulás, a süllyedések a teherintenzitás emelkedésének hatására fokozatosan növekednek. Az alaplemez szélén 37 mm-re, közepén pedig 42 mm-re nőttek az elmozdulások. A 3D modell eredményei ezekben a pontokban 33,5 mm-re és 42 mm-re

adódtak. Leürítés során hasonló tendencia figyelhető meg, mint az első feltöltési hullámnál. A lemez peremén 10 mm-rel, míg középen 17 mm-rel csökkentek a mozgások.

Az általam elkészített 3D végelelemes modell elemzésekor az első betöltési fázisnál hirtelen, „rozkadás”-szerű süllyedés nem tapasztalható, a mozgások összhangban vannak a teherszint növekedésével. Az 51.500 tonnás állapot elérése után, a modelleredményekből előállított süllyedési görbék közel párhuzamos lefutásúak a megvalósult szerkezet süllyedési görbéivel, az eltérés mindösszesen pár milliméter.

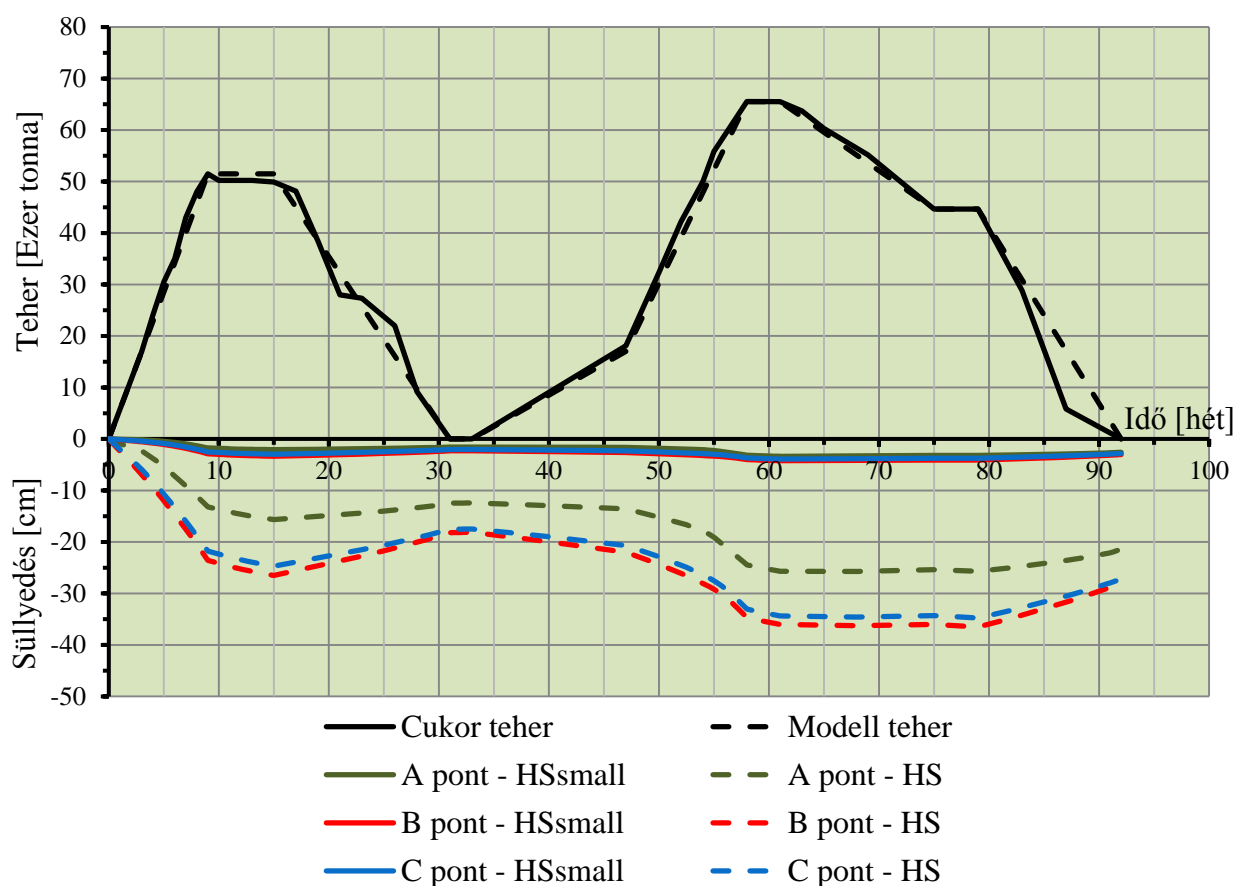
6.7 Paraméteranalízis, érzékenységvizsgálat

Érzékenységvizsgálatok megmutatják, hogy egy modell mennyire érzékeny a bemenő adatok paramétereinek hibáira. Ezek a bemenő adatok sokszor mért értékek, vagyis a bizonytalanság állandóan jelen van, így az eredmények megbízhatósága is kétségbe vonható. Az input adatokra vonatkozó érzékenység alatt azt értjük, hogy az output eredményekben milyen mértékű változást idéz elő a bemenő adatok változása. A modellt sokszor végigfuttatjuk a megváltozott input adatokkal és megállapítjuk, hogy mely paraméterekre érzékeny a modell eredménye.

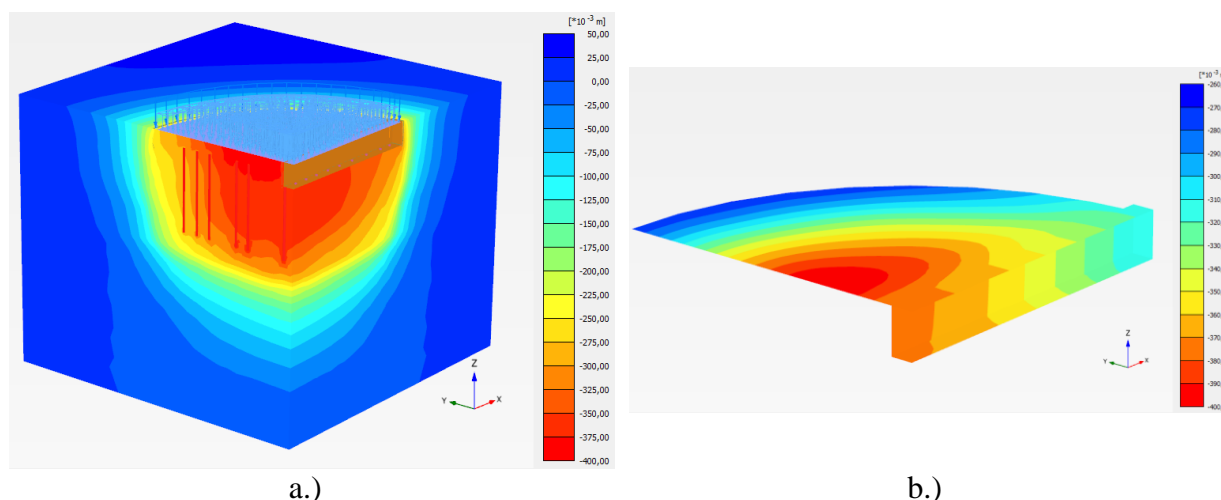
TDK dolgozatom során első sorban a cölöpök modellparamétereinek, valamint az anyagmodellek megváltoztatásának hatását vizsgáltam. Mivel ez a téma képezi az MSc diplomamunkámat is, ezért a paraméterek részletesebb érzékenységvizsgálatának kidolgozása abban szerepel.

6.7.1 HS anyagmodell

A paraméterek végeredményre gyakorolt hatásának vizsgálatánál először a HS anyagmodell befolyását elemeztem. Mint ismert, Plaxis 2D modellezés során is ezt az anyagmodellt használták a talajok viselkedésének leírására a tervezők. Az elemzésnél a back analízis vizsgálat során használt modellparamétereket változatlanul hagytam, egyedül az altalajrétegek (Mg réteg, A réteg, B réteg, C réteg, E réteg) anyagmodelleit változtattam meg HSsmall-ról HS-re.



50. ábra: Süllyedési diagram



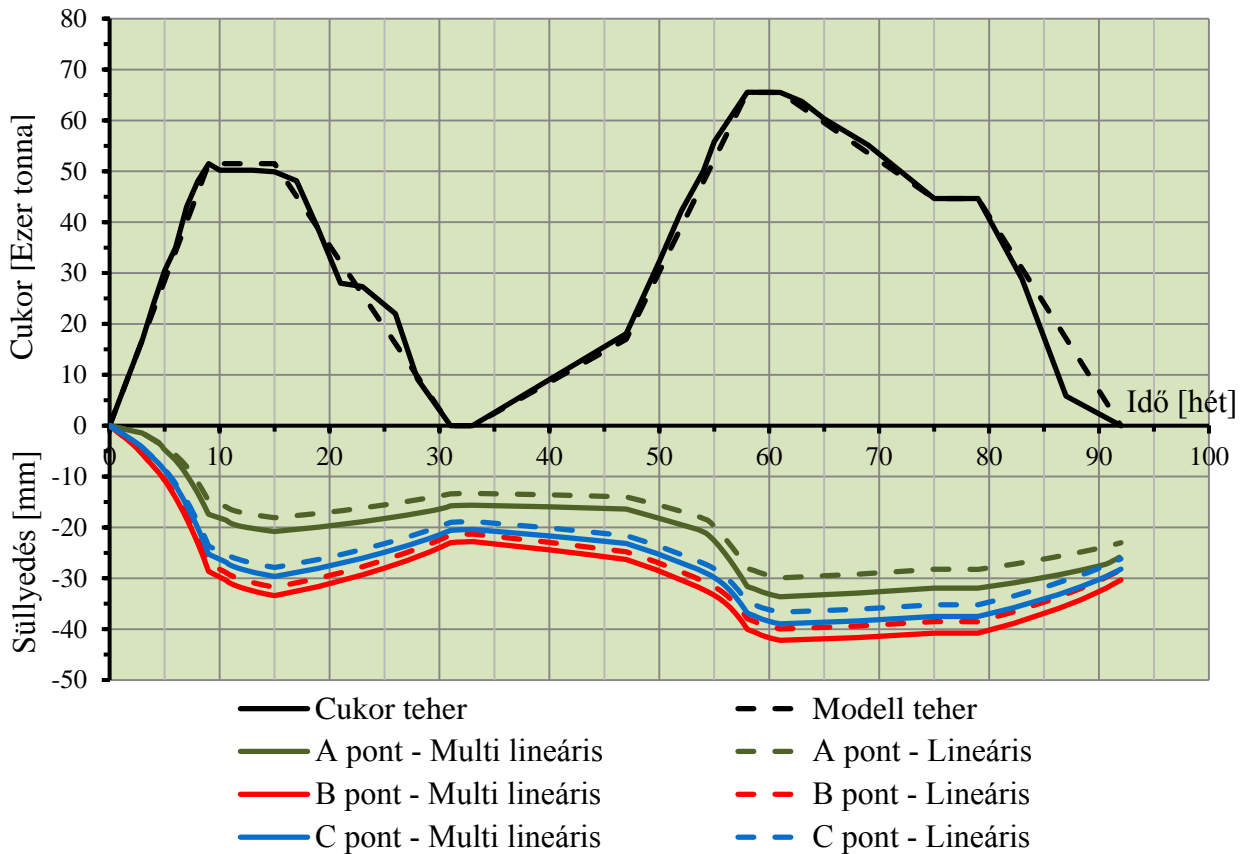
51. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra - 65.500 tonnás feltöltési állapot

A diagramon (50. ábra) jól látható, hogy a HS anyagmodellel elvégzett analízis süllyedési görbéinek a lefutása megegyezik a HSsmall modellel, azonban az elmozdulások értékei körülbelül egy nagyságrenddel nagyobbak. Megállapítható, hogy felkeményedő talajmodellel a számítás helytelen eredményekhez vezetett, a süllyedéseket túlbecsüli. Az eredeti 20-40 mm-es mozgások ebben az esetben 250-350 mm-re adódtak. Az eredmény a Plaxis 2D, valamint azt reprodukáló Plaxis 3D modellekével nagyságrendileg megegyezik.

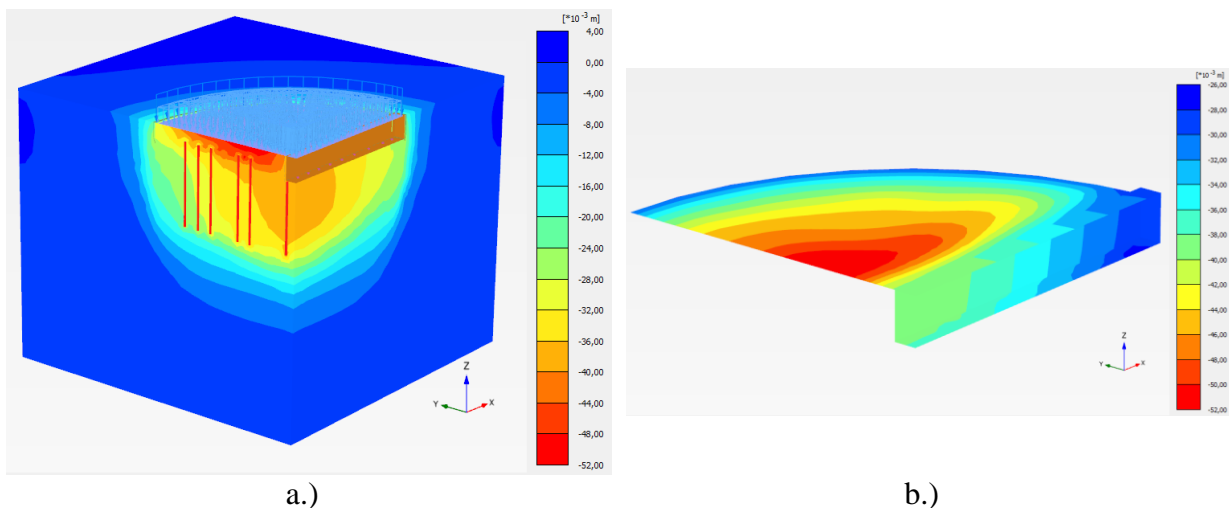
A felkeményedő talajmodellnél az elsődleges terhelések hatására egyszerre keletkeznek rugalmas (tehermentesítéskor visszanyerhető) és képlékeny (nem visszanyerhető) alakváltozások. Figyelembe veszi a feszültségek talajmerekvségekre gyakorolt hatását. E modell alaptulajdonsága a modulusok feszültségfüggése, a σ_3 növekedésének hatására történő felkeményedés. A másik alaptulajdonság a triaxiális kísérlet alapján a hiperbolikus összefüggés a függőleges fajlagos deformáció (ε_1) és a deviátorfeszültség ($\sigma_1 - \sigma_3$) között. A felkeményedő anyagmodell a HSsmall modellel ellentétben nem veszi figyelembe a kis alakváltozások tartományában a nagyobb nyírási modulus értéket.

6.7.2 Lineáris változású palástellenállás

Mint ahogy korábban már a 6.4.1 pontban említettem, a cölöpök palástellenállásainak modellparaméterként történő megadásánál lehetőségünk van rétegenként megadni, valamint lineáris változást feltételezve, a cölöp felső- és alsó síkjánál megadni a palástellenállás értékeit. Ebben az esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora eltérés van a köpenymenti ellenállás pontos illetve félpontos input paraméterként történő bevitele között.



52. ábra: Süllyedési diagram

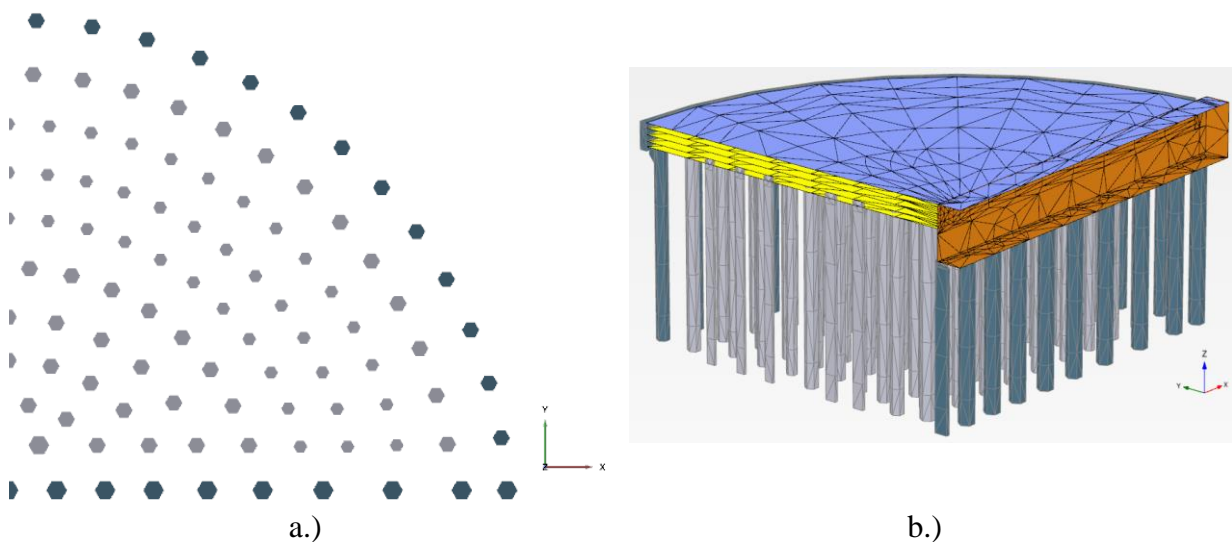


53. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra - 65.500 tonnás feltöltési állapot

A vizsgálat során a 6.4.1 pontban kiszámított köpenymenti ellenállásokat használtam, azonban csak a cölöpök felső- és alsó síkjánál adtam meg a maximális ellenállásértékeket. Az 52. ábrán megfigyelhető, hogy a két módszer között nincs jelentős eltérés, az analízis végeredményét nem befolyásolja döntő mértékben a palástellenállás megadásának módszere. Megállapítható, hogy abban az esetben, amikor rétegenként (pontosan) adtam meg a cölöpök köpenymenti ellenállását, összességében ~3-5 mm-rel nagyobb süllyedést kaptam, ezáltal közelebbi eredményt a valós elmozdulásokhoz.

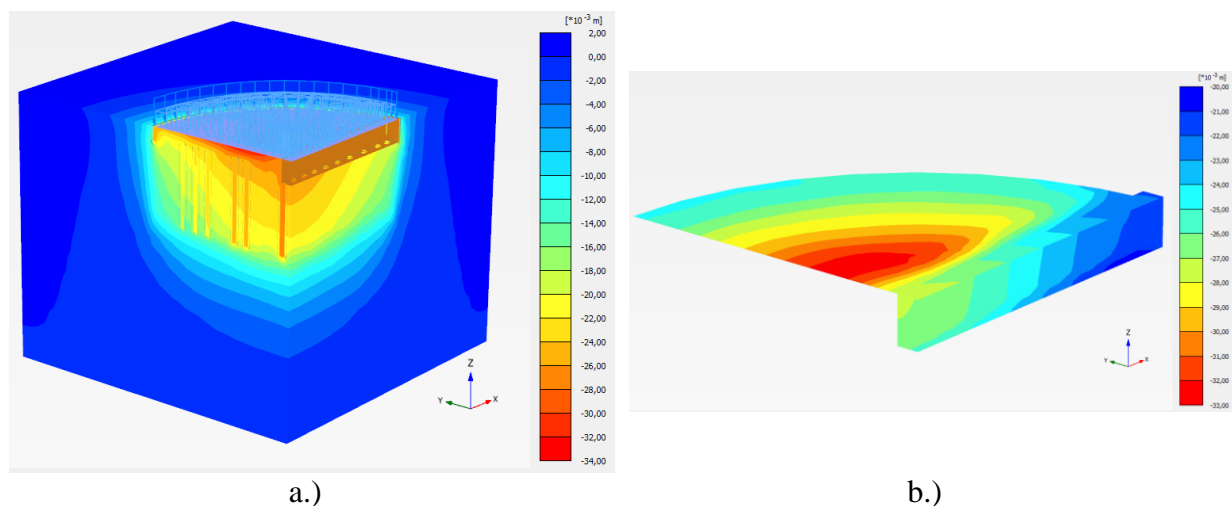
6.7.3 3D cölöpök

Érzékenységvizsgálatom ezen fázisában a modellgeometria, azon belül is a cölöpök geometriájának megváltoztatásának süllyedésekre gyakorolt hatását vizsgáltam. A cölöpöket 3D testelemként modelleztem, a korábbi 1D gerendaelemek helyett. Ezzel lehetőségem volt a cölöpök valós keresztmetszeti geometriáját beépíteni az analízisbe. Az eredetileg kör keresztmetszetet, hatszög elemekkel közelítettem a számítási idő optimalizálásának érdekében. A 3D testelemek köré interface (határfelületi) elemeket alkalmaztam a környező talajtömeg megfelelő mobilizálódásának érdekében. (Interface elemek hiányában a süllyedések mértéke nagyon alacsonyra adódott)

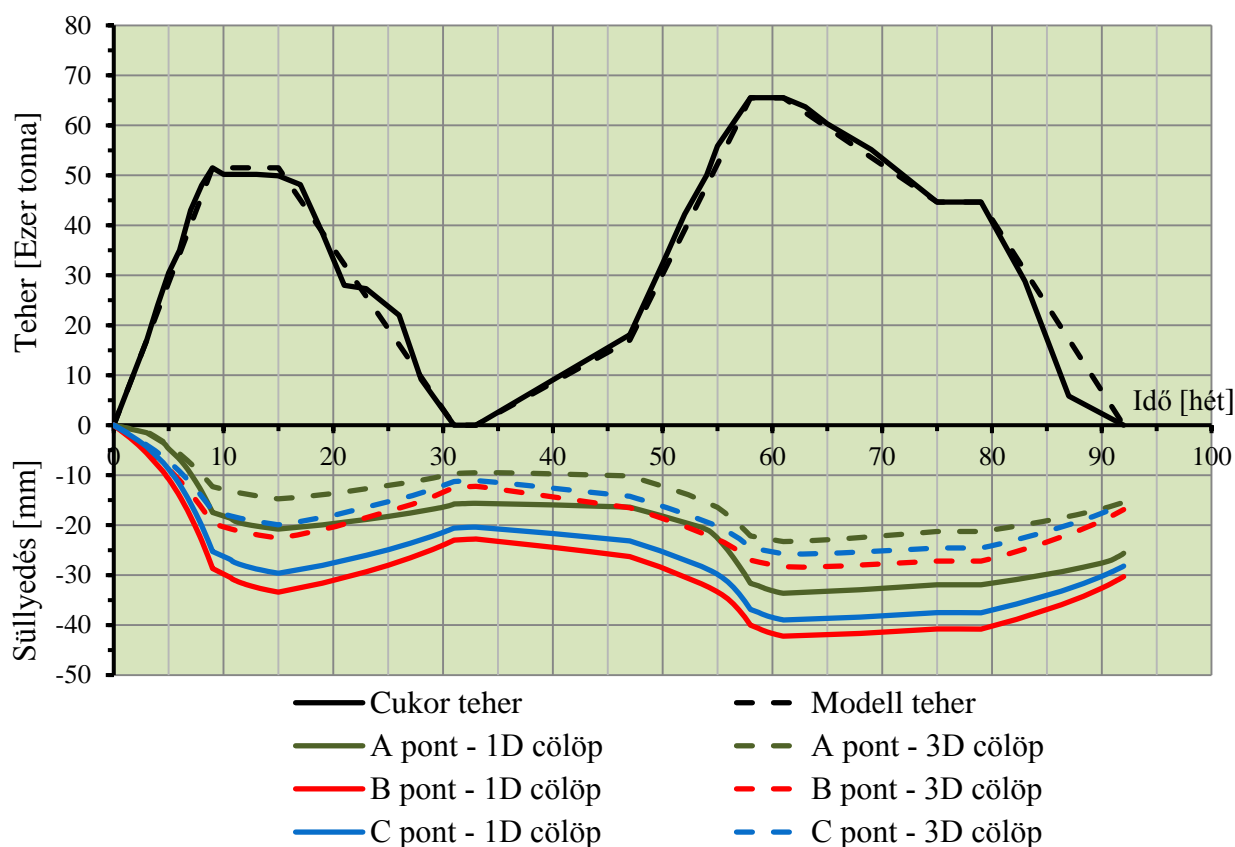


54. ábra: Cölöpök elhelyezkedése a modellben (a); Szerkezeti elemek modellgeometriája (b)

Azáltal, hogy tömbelemekkel modelleztem a cölöpöket, a szerkezeti elemek száma és a háló generálásának ideje jelentősen megnőtt a korábbiakhoz képest.



55. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra - 65.500 tonnás feltöltési állapot (b)

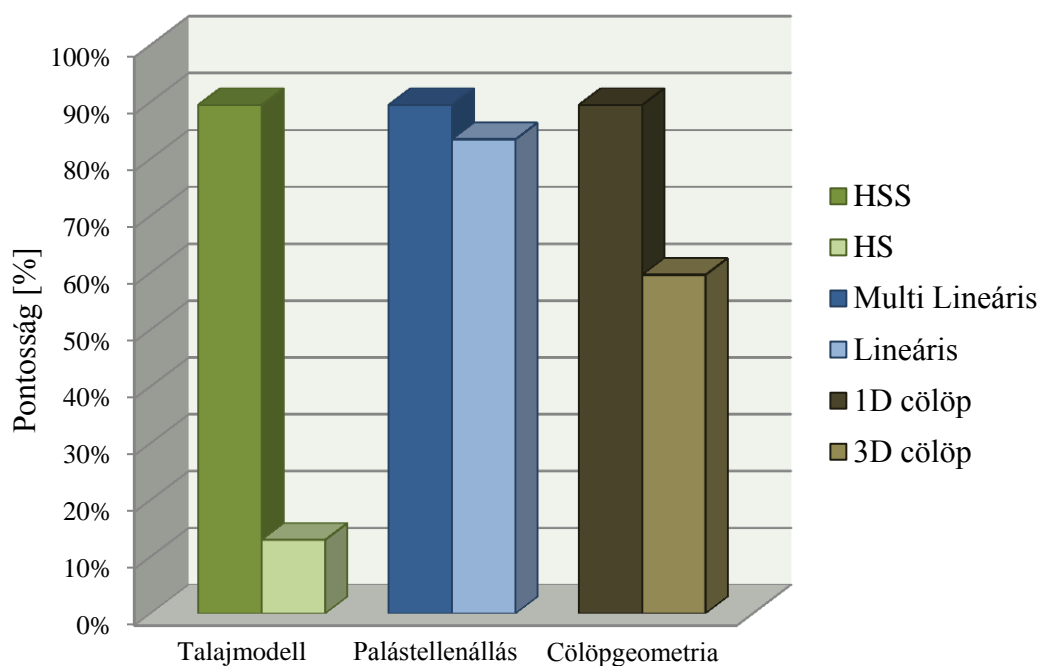


56. ábra: Süllyedési diagram

Az eredmények alapján az tapasztalható, hogy 3D testelemként modellezett cölöpök esetében a szerkezet süllyedései lecsökkentek. A cukor betöltésének kezdetén (~3. hétig) az „A” vizsgálati pontnál a görbék közel egymáson helyezkednek el, az eltérés csekély, azonban a „B” és „C” pontoknál a különbségek már jelentősebbek. Az alaplemez szélén az első feltöltési hullám során 6,30 mm-rel, míg középen 9,80 mm-rel lettek kisebbek az elmozdulások a korábbi 1D cölöpgeometriával vizsgált analízishez képest. A második feltöltési fázisnál, a lemez peremén 10,70 mm, közepén pedig 13,60 mm volt a differencia a két vizsgálat süllyedésgörbéi között. A két módszer során előállított görbék lefutása párhuzamos. A vizsgálati időtartam alatt, a kialakult maximális elmozdulások mértékéhez képest az eltérések jelentősnek mondhatóak. A cölöpök geometriájának pontosabb modellezésével a mozgások csökkentek és a valós értékekhez képest rosszabb eredményt adott, mint az 1D gerendamodel esetében.

6.7.4 Összegzés

Érzékenységvizsgálat, paraméteranalízis a modellezési folyamatok egyik kulcsfontosságú része. Elsősorban akkor célszerű az egyes modellparaméterek, geometriák részletesebb vizsgálata, ha nem állnak rendelkezésre vizsgálati adatok és a tervezést csupán tapasztalati információkra alapozzuk. Szerencsére kutatásom során rendelkezésemre állt egy részletes talajvizsgálati jelentés, továbbá a szerkezet kiviteli tervei is. Az 57. ábrán összefoglalva látható az egyes módszerek pontossága, hatékonysága.



57. ábra: Érzékenységvizsgálatok összehasonlítása

Az összehasonlító ábrán megfigyelhető, hogy az eredmények pontosságát leginkább a talajmodell megválasztása befolyásolja. Megfelelően helyes anyagmodell alkalmazásával az eredmények pontossága nagy eséllyel kedvező lesz. Nagyobb projektek esetében fontos kérdés lehet a modellek futtatási ideje, ami a gazdaságosság szempontjából sem elhanyagolható. Analíziseim során a legtöbb elemszámot tartalmazó 3D cölöpgeometriával kialakított modellnek volt a leghosszabb számítási ideje (~13 óra), a többi esetben körülbelül azonosak voltak a futtatási idők (~10 óra).

7. Megállapítások

A dómszerkezetű siló alapozása meglehetősen összetett, tartalmaz hagyományos cölöpöket illetve rigid inclusion talajerősítést is, ebből adódóan viselkedése csak szofisztikált térbeli geotechnikai végeelemes modell segítségével vizsgálható megbízhatóan. A back analízis során a talajrétegek viselkedését HSsmall talajmodell segítségével írtam le, ehhez kiindulási adatként a geotechnikai jelentéshez készített laboratóriumi (ödométer, közvetlen nyírás) és terepi vizsgálatok (SCPT, CPTu) eredményeit használtam. A cölöpök illetve rigid inclusion-ök teherbírás jellemzőit szintén a CPT adatok alapján definiáltam. A Plaxis 3D segítségével számított süllyedéseket összehasonlítottam a feltöltés során mért süllyedés eredményekkel. Ezzel kapcsolatban a következő konklúziók vonhatóak le:

- A számított süllyedések jó egyezést mutatnak a mért értékekkel, a legnagyobb eltérés is csak néhány mm (~10%).
- A kezdeti süllyedések időbeni kialakulása tekintetében eltérő tendenciát mutat, a mért süllyedések az első pár hétben jelentősen kisebbek a számítottnál (szinte elhanyagolhatóak), majd ezt követően a számítottnál gyorsabban alakulnak ki. Ennek a jelenségnek az oka egyelőre nem ismert, azonban korábbi hasonló munkáknál is tapasztaltak ilyen tendenciát.
- Az első feltöltést követően a számított és mért süllyedések görbéi hasonló lefutásúak.
- A reprezentatív pontok számított süllyedéskülönbségei minimálisan térnek el a mért értékektől.

Összességében megállapítható, hogy a végeelemes modellel meghatározott talajviselkedés, illetve talaj - szerkezet kölcsönhatás és a monitoring eredmények jó egyezést mutatnak. Ezek az eredmények is azt sugallják, hogy a megfelelő laboratóriumi- és terepi vizsgálati input paraméterek, valamint a HSsmall anyagmodell felhasználásával ilyen komplexitású geotechnikai problémák esetén is megbízható, a valóságoshoz nagyon közeli eredmények kaphatóak a geotechnikai végeelemes analízis során.

A továbbiakban több érzékenységvizsgálat elkészítését tervezem, melyek a diplomamunkámban fognak megjelenni. Elsősorban a cölöpök palást- és talpellenállásának süllyedésekre gyakorolt hatását fogom vizsgálni, mivel ezen modellparamétereket CPT szondázások eredményeiből számoltam, ezáltal bizonytalanságokat tartalmaz. Továbbá vizsgálni fogom a kis alakváltozási paraméterek hatását az output eredményekre, mivel azokat tapasztalati képletek, diagramok alapján számítottam.

8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni tanszéki konzulenseimnek, Dr. Móczár Baláznak és Dr. Mahler Andrásnak a Tudományos Diákköri dolgozat során nyújtott hathatós segítségét. Továbbá köszönetet szeretnék mondani a Strabag MML Kft-nek, akik rendelkezésemre bocsájtották a dolgozat alapjául szolgáló adatokat.

Ábrajegyzék

1. ábra: Megvalósult cukorgyári siló [www.trademagazin.hu]	4
2. ábra: A vizsgált helyszín légifelvétele [Forrás: Google Maps]	4
3. ábra: Szerkezet geometriai kialakítása [2]	5
4. ábra: Cölöpök elhelyezkedése	6
5. ábra: Rigid Inclusion rendszer működése [5]	7
6. ábra: Ágyazat belső súrlódási szögének és hatékonyságának kapcsolata [5]	8
7. ábra: Ágyazat belső súrlódási szögének és a süllyedés viszonya [5]	8
8. ábra: Ágyazati réteg kialakítása	8
9. ábra: Siló szerkezeti elemek (építés közbeni állapot)	9
10. ábra: Általános szerkezeti kialakítás [7]	10
11. ábra: Fólia felfújása	11
12. ábra: Feltárások helyszínrajza [1]	12
13. ábra: Rétegszelvény a feltárások alapján [1]	12
14. ábra: Nyíróhullám terjedési sebességek [1]	15
15. ábra: Szeizmikus zónatérkép [www.foldrenges.hu]	16
16. ábra: 2D végeelemes modell felépítése [2]	19
17. ábra: Terhelés a 2D modellezés során [2]	20
18. ábra: Teljes elmozdulási ábra - végleges állapot [2]	20
19. ábra: Alaplemez elmozdulása ($e_{\max}=25,5$ cm) [2]	21
20. ábra: Süllyedés időbeli alakulása [2]	21
21. ábra: Talajmodell felépítése	24
22. ábra: Szerkezeti elemek 3D-s modellje	25
23. ábra: Teljes z irányú elmozdulási ábra	26
24. ábra: Alaplemez és alagút z irányú elmozdulásai	26
25. ábra: Modellezési tartomány	28
26. ábra: 3D altalajmodell	30
27. ábra: A triaxiális vizsgálat q - ε_1 összefüggésén értelmezhető modulusok [10]	31
28. ábra: A nyírási modulus változása és a geotechnikai szerkezetek körüli jellemző nyírási alakváltozások [11]	32
29. ábra: $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ definiálása ödométeres vizsgálati eredmények alapján [9]	33
30. ábra: Kompressziós görbék az A jelű rétegben - BH1 fúrás alapján (a); BH2 fúrás alapján (b)	34
31. ábra: A CPT csúcscellenállás és a kezdeti nyírási modulus tapasztalati összefüggése [12]	37
32. ábra: Szemcsés talajok nyírási modulusának degradációs görbéje [4]	37
33. ábra: Kötött talajok nyírási modulusának degradációs görbéje [4]	38
34. ábra: Szerkezeti elemek modellstruktúrája	41
35. ábra: Cölöpök kiosztása	42
36. ábra: CPT csúcscellenállás	43
37. ábra: Talpgerenda modellgeometriája - Felülnézet (a); Általános nézet (b)	46
38. ábra: Alaplemez és alagút modellgeometriája	46
39. ábra: Héjszerkezet modellgeometriája – Felülnézet (a); Oldalnézet (b); Általános nézet (c)	47

40. ábra: Georács elemek modellgeometriája	48
41. ábra: Interface elemek - Talpgerendánál (a); Alaplemeznél és alagútnál (b)	49
42. ábra: Terhelés időbeli alakulása	49
43. ábra: Üres állapot (a); 17.000 tonnás feltöltés (b); 44.650 tonnás feltöltés (c); 51.500 tonnás feltöltés (d); Teljes feltöltés (e).....	51
44. ábra: Kiválasztott vizsgálati pontok	51
45. ábra: Mérési pontok helyzete	52
46. ábra: Helyettesítő terhelés - Oldalnézet (a); Általános nézet (b)	52
47. ábra: Talpfeszültség (a); Normál igénybevétel a C1 jelű cölöpökben (b) – 51.500 tonnás feltöltési állapot.....	53
48. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b) – 65.500 tonnás feltöltési állapot.....	56
49. ábra: Süllyedési diagram	57
50. ábra: Süllyedési diagram	59
51. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra - 65.500 tonnás feltöltési állapot.....	60
52. ábra: Süllyedési diagram	61
53. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra - 65.500 tonnás feltöltési állapot.....	61
54. ábra: Cölöpök elhelyezkedése a modellben (a); Szerkezeti elemek modellgeometriája....	62
55. ábra: Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra - 65.500 tonnás feltöltési állapot.....	62
56. ábra: Süllyedési diagram	63
57. ábra: Érzékenységvizsgálatok összehasonlítása.....	64

Táblázatok jegyzéke

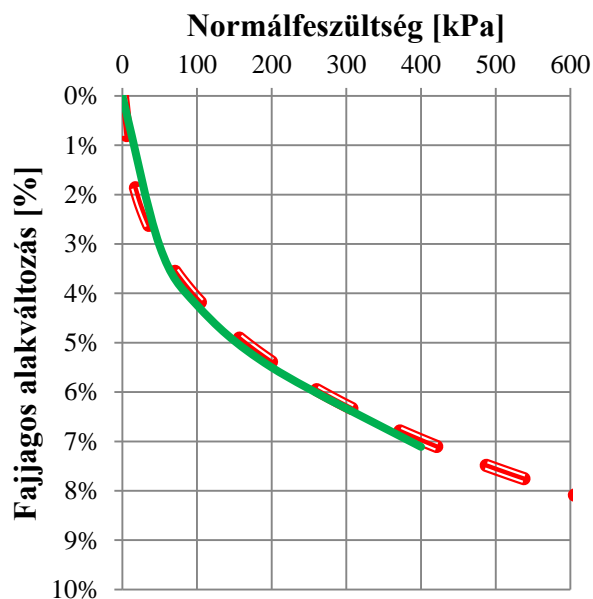
1. táblázat: Alkalmazott cölöpök paraméterei.....	6
2. táblázat: Feltárások geometriai adatai	11
3. táblázat: Talajvízviszony adatok	16
4. táblázat: Talajosztály az MSZ EN 1998-1 szerint.....	17
5. táblázat: Talajfizikai paraméterek tervezési értékei	17
6. táblázat: 2D végelelemes talajmodell	18
7. táblázat: Talajfizikai paraméterek és anyagjellemzők	23
8. táblázat: Cölöpök modellparaméterei.....	25
9. táblázat: Talajrétegződések mélységei SCPTu C és BH2 feltárások alapján.....	29
10. táblázat: Plaxis 3D modellben alkalmazott rétegvastagságok.....	30
11. táblázat: Rugalmassági modulusok a kompressziós görbék alapján	34
12. táblázat: Kis alakváltozási paraméterek	38
13. táblázat: Talajfizikai paraméterek és anyagjellemzők	39
14. táblázat: Palástellenállás értékek C1 jelű cölöpök esetén	44
15. táblázat: Cölöpök modellparaméterei.....	45
16. táblázat: Lemez (Plate) elemek modellparaméterei	48
17. táblázat: Helyettesítő terhelés.....	55

Irodalomjegyzék

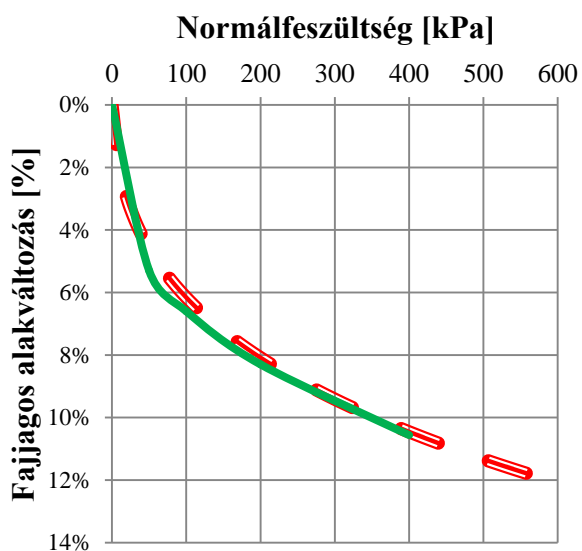
- [1] Nyári I. - Turi D. - Dr. Pusztai J.: Talajvizsgálati jelentés és geotechnikai tervfejezet a Magyar Cukor Zrt. területén létesítendő DOM cukorsiló építési engedélyezési tervéhez (2012)
- [2] Wolf Á. - Szilvágyi L. - Schell P.: Kaposvár Cukorgyár Cukorsiló - Geotechnikai terv (2013)
- [3] Dr. Szepesházi Róbert: Cölöpök méretezése az Eurocode 7 követelményei szerint - doktori (PhD) értekezés (2011)
- [4] Thomas Benz: Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences (2007)
- [5] Fugro Consult Kft.: HND_STAHL_FOU_SPC_V0_140228.pdf
- [6] Keller: Rigid Inclusions (Brochure 35-02E)
- [7] www.domtech.com, [domtech_ebrochure.pdf](#)
- [8] Hunyadi Mátyás: Héjak a világban (2015) (Lemezek és héjak órai előadásjegyzet)
- [9] Plaxis 3D: Material Models Manual (2013)
- [10] Szepesházi Róbert: A HS-talajmodell (2007)
- [11] Plaxis 3D: Reference Manual (2013)
- [12] Dr. Rémai Zsolt: Töltések alatti, vízzel telített agyagok vizsgálata - PhD értekezés (2012)
- [13] Plaxis 3D: Tutorial Manual (2013)
- [14] Th. Timmermann - A. Truty - K. Podles: Numerics in geotechnics and structures (2010)
- [15] Andrzej Truty: Hardening Soil with small strain stiffness (2009)
- [16] Czap Zoltán: Geotechnikai numerikus módszerek - MSc képzés (2012)

Mellékletek

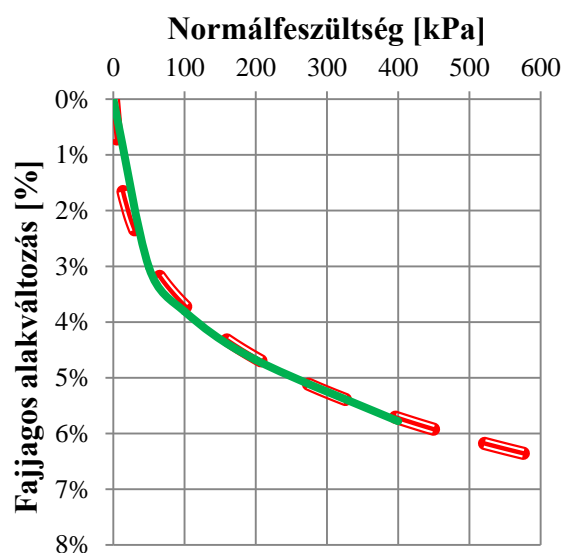
Kompressziós görbék



Kompressziós görbe az Mg jelű rétegben BH2 fúrás alapján

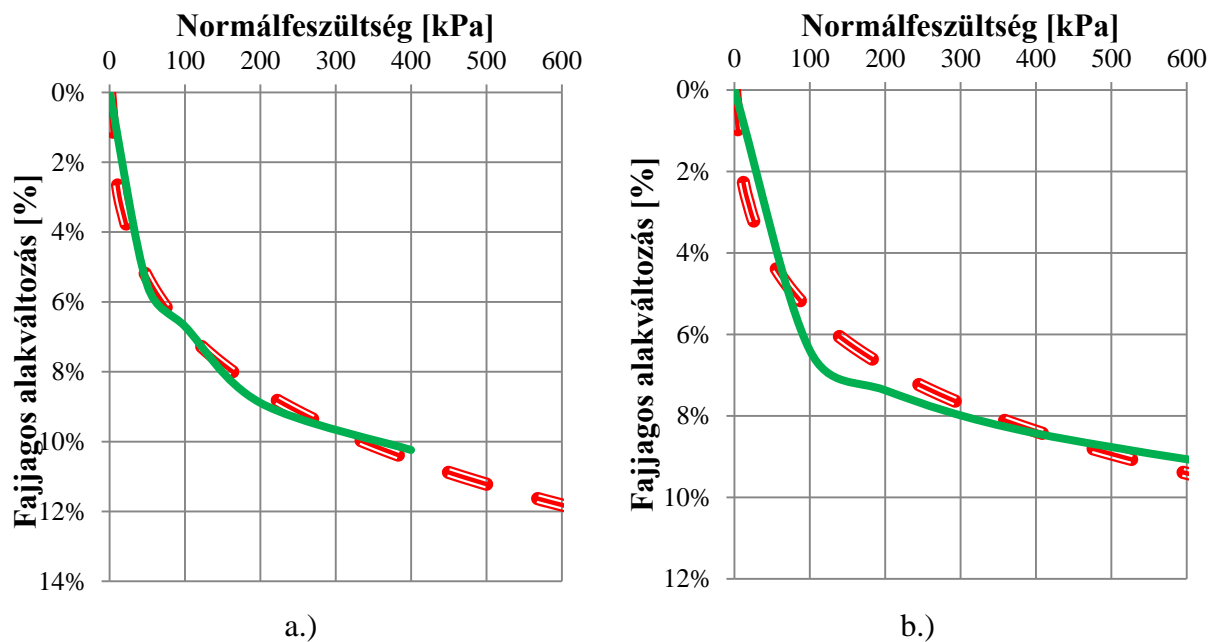


a.)

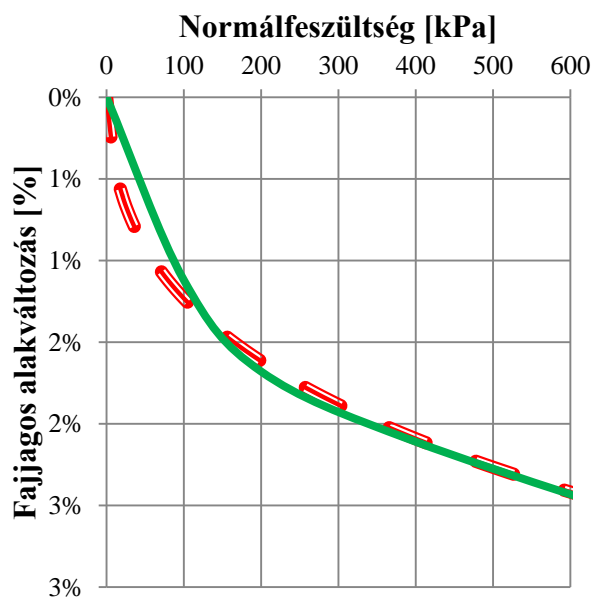


b.)

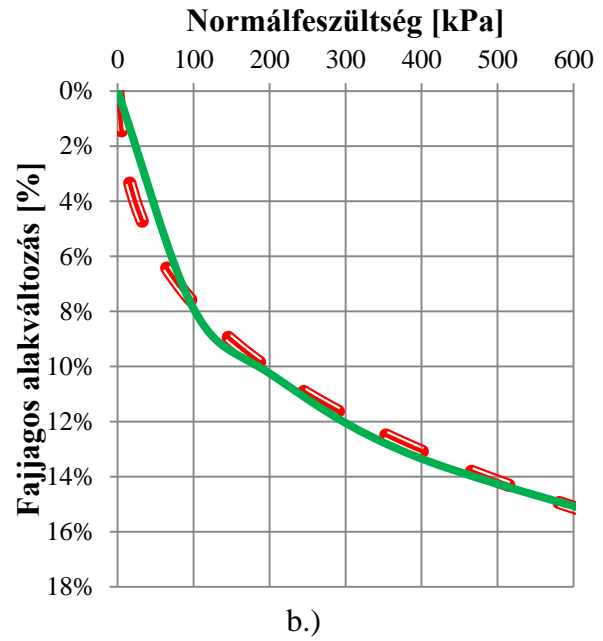
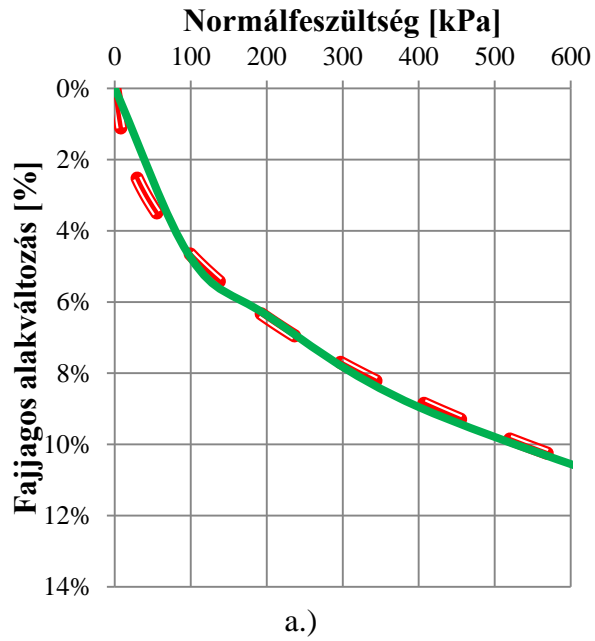
Kompressziós görbék az A jelű rétegben - BH1 fúrás alapján (a); BH2 fúrás alapján (b)



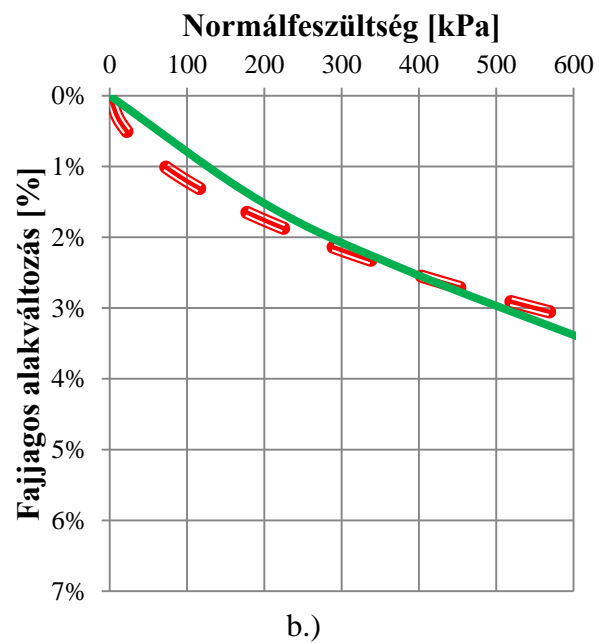
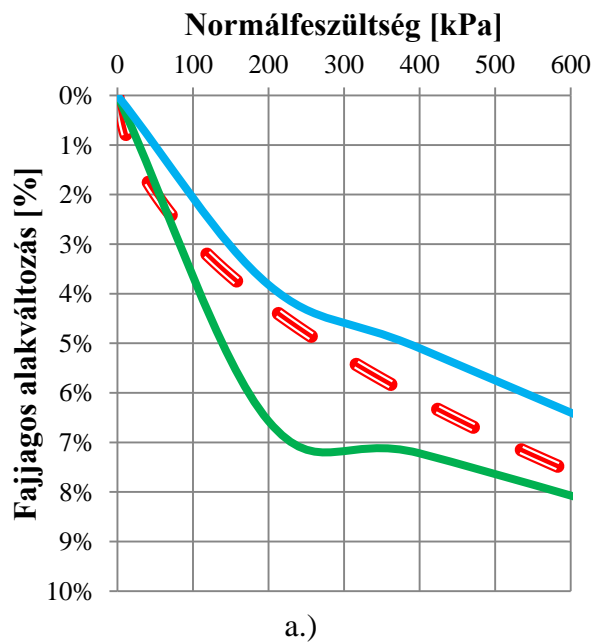
Kompressziós görbék a B jelű rétegben - BH1 fúrás alapján (a); BH2 fúrás alapján (b)



Kompressziós görbe a C jelű rétegben BH1 fúrás alapján



Kompressziós görbék a D jelű rétegben - BH1 fúrás alapján (a); BH2 fúrás alapján (b)



Kompressziós görbék az E jelű rétegben - BH1 fúrás alapján (a); BH2 fúrás alapján (b)

CFA cölöpök talp- és palástellenállásainak számítása

1. C1 jelű cölöp (D=100cm)

1.1. Kiindulási adatok

- Cölöp hossza: $L_c := 14,70\text{m}$
- Cölöp átmérője: $D := 100\text{cm}$
- Keresztmetszeti terület: $A_b := \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 7853,982\text{cm}^2$

1.2. Számítás EC7 alapján

1.2.1. Talpellenállás számítása

- Talp alatti kritikus zónán belüli csúcsellenállás átlagértéke:
 $q_{c,1} := 16,29\text{MPa}$
- Talp alatti kritikus zónán belüli minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,2} := 2,09\text{MPa}$
- Talp feletti 8D zónában a minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,3} := 1,77\text{MPa}$
- A fajlagos talpellenállás számított értéke:
 $q_{b,cal} := \alpha_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q_{c,1} + q_{c,2}}{2} + q_{c,3} \right) = 3,84\text{MPa}$
- A talpellenállás számított értéke:
 $R_{b,cal} := A_b \cdot q_{b,cal} = 3015,674\text{kN}$

1.2.2. Palástellenállás számítása

Talaj jele	α_{sq}	$q_{c,átlag}$ [kPa]	q_s [MPa]	T [kN/m]	H [m]
Mg	0,55	983	17,2	54,18	0,068
A	0,55	1437	20,8	65,49	8,793
B	0,55	3061	30,4	95,60	3,895
C	0,55	1640	70,4	221,24	1,945

- A köpenymenti ellenállás számított értéke:
 $R_{s,cal} := D \cdot \pi \cdot q_s \cdot H = 1380,416\text{kN}$

2. C3 jelű cölöp (D=120cm)2.1. Kiindulási adatok

- Cölöp hossza: $L_c := 12.645\text{m}$
- Cölöp átmérője: $D := 120\text{cm}$
- Keresztmetszeti terület: $A_b := \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 11309.734\text{cm}^2$

2.2. Számítás EC7 alapján2.2.1. Talpellenállás számítása

- Talp alatti kritikus zónán belüli csúcsellenállás átlagértéke:
 $q_{c,1} := 14.334\text{MPa}$
- Talp alatti kritikus zónán belüli minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,2} := 2.53\text{MPa}$
- Talp feletti 8D zónában a minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,3} := 1.748\text{MPa}$
- A fajlagos talpellenállás számított értéke:
 $q_{b,cal} := \alpha_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q_{c,1} + q_{c,2}}{2} + q_{c,3} \right) = 3.563\text{MPa}$
- A talpellenállás számított értéke:
 $R_{b,cal} := A_b \cdot q_{b,cal} = 4029.658\text{kN}$

2.2.2. Palástellenállás számítása

Talaj jele	α_{sq}	$q_{c,átlag}$ [kPa]	q_s [MPa]	T [kN/m]	H [m]
A	0,55	1519	21,4	80,82	6,805
B	0,55	3061	30,4	114,71	3,895
C	0,55	1640	70,4	265,49	1,945

- A köpenymenti ellenállás számított értéke:

$$R_{s,cal} := D \cdot \pi \cdot q_s \cdot H = 1511.595\text{kN}$$

3. C4 jelű cölöp (D=120cm)

3.1. Kiindulási adatok

- Cölöp hossza: $L_c := 14.95r$
- Cölöp átmérője: $D := 120cm$
- Keresztmetszeti terület: $A_b := \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 11309.734cm^2$

3.2. Számítás EC7 alapján

3.2.1. Talpellenállás számítása

- Talp alatti kritikus zónán belüli csúcscellenállás átlagértéke:
 $q_{c,1} := 14.334MPa$
- Talp alatti kritikus zónán belüli minimum csúcscellenállások átlagértéke:
 $q_{c,2} := 2.53MPa$
- Talp feletti 8D zónában a minimum csúcscellenállások átlagértéke:
 $q_{c,3} := 1.748MPa$
- A fajlagos talpellenállás számított értéke:
 $q_{b,cal} := \alpha_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q_{c,1} + q_{c,2}}{2} + q_{c,3} \right) = 3.563MPa$
- A talpellenállás számított értéke:
 $R_{b,cal} := A_b \cdot q_{b,cal} = 4029.658kN$

3.2.2. Palástellenállás számítása

Talaj jele	α_{sq}	$q_{c,átlag}$ [kPa]	q_s [MPa]	T [kN/m]	H [m]
Mg	0,55	911	16,6	62,57	0,318
A	0,55	1437	20,8	78,60	8,793
B	0,55	3061	30,4	114,71	3,895
C	0,55	1640	70,4	265,49	1,945

- A köpenymenti ellenállás számított értéke:
 $R_{s,cal} := D \cdot \pi \cdot q_s \cdot H = 1671.99kN$

4. C5 jelű cölöp (D=100cm)

4.1. Kiindulási adatok

- Cölöp hossza: $L_c := 14.95\text{m}$
- Cölöp átmérője: $D := 100\text{cm}$
- Keresztmetszeti terület: $A_b := \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 7853.982\text{cm}^2$

4.2. Számítás EC7 alapján

4.2.1. Talpellenállás számítása

- Talp alatti kritikus zónán belüli csúcsellenállás átlagértéke:
 $q_{c,1} := 16.29\text{MPa}$
- Talp alatti kritikus zónán belüli minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,2} := 2.09\text{MPa}$
- Talp feletti 8D zónában a minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,3} := 1.77\text{MPa}$
- A fajlagos talpellenállás számított értéke:
 $q_{b,cal} := \alpha_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q_{c,1} + q_{c,2}}{2} + q_{c,3} \right) = 3.84\text{MPa}$
- A talpellenállás számított értéke:
 $R_{b,cal} := A_b \cdot q_{b,cal} = 3015.674\text{kN}$

4.2.2. Palástellenállás számítása

Talaj jele	α_{sq}	$q_{c,átlag}$ [kPa]	q_s [MPa]	T [kN/m]	H [m]
Mg	0,55	911	16,6	52,14	0,318
A	0,55	1437	20,8	65,49	8,793
B	0,55	3061	30,4	95,60	3,895
C	0,55	1640	70,4	221,24	1,945

- A köpenymenti ellenállás számított értéke:
 $R_{s,cal} := D \cdot \pi \cdot q_s \cdot H = 1393.325\text{kN}$

5. C6 jelű cölöp (D=80cm)5.1. Kiindulási adatok

- Cölöp hossza: $L_c := 14.95r$
- Cölöp átmérője: $D := 80cm$
- Keresztmetszeti terület: $A_b := \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 5026.548cm^2$
- CFA cölöpök esetén: $\alpha_b := 0.7$

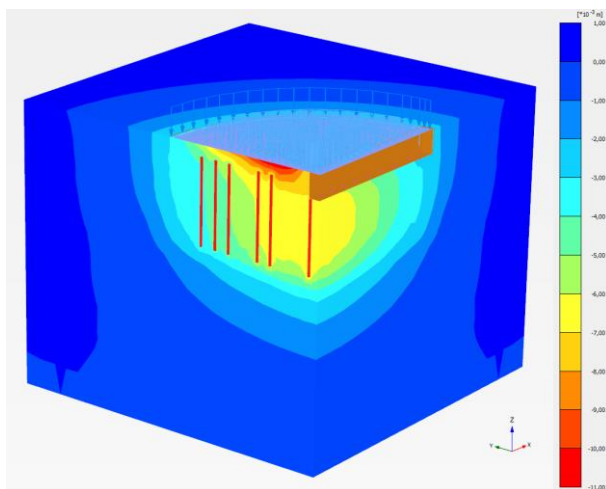
5.2. Számítás EC7 alapján5.2.1. Talpellenállás számítása

- Talp alatti kritikus zónán belüli csúcsellenállás átlagértéke:
 $q_{c,1} := 19.76MPa$
- Talp alatti kritikus zónán belüli minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,2} := 2.17MPa$
- Talp feletti 8D zónában a minimum csúcsellenállások átlagértéke:
 $q_{c,3} := 1.86MPa$
- A fajlagos talpellenállás számított értéke:
 $q_{b,cal} := \alpha_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q_{c,1} + q_{c,2}}{2} + q_{c,3} \right) = 4.491MPa$
- A talpellenállás számított értéke:
 $R_{b,cal} := A_b \cdot q_{b,cal} = 2257.435kN$

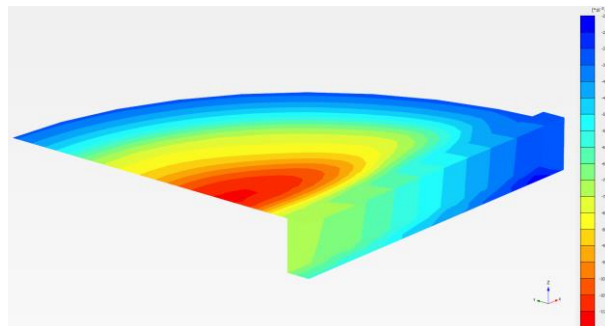
5.2.2. Palástellenállás számítása

Talaj jele	α_{sq}	$q_{c,átlag}$ [kPa]	q_s [MPa]	T [kN/m]	H [m]
Mg	0,55	911	16,6	41,71	0,318
A	0,55	1437	20,8	52,40	8,793
B	0,55	3061	30,4	76,48	3,895
C	0,55	1640	70,4	177,00	1,945

- A köpenymenti ellenállás számított értéke:
 $R_{s,cal} := D \cdot \pi \cdot q_s \cdot H = 1114.66kN$

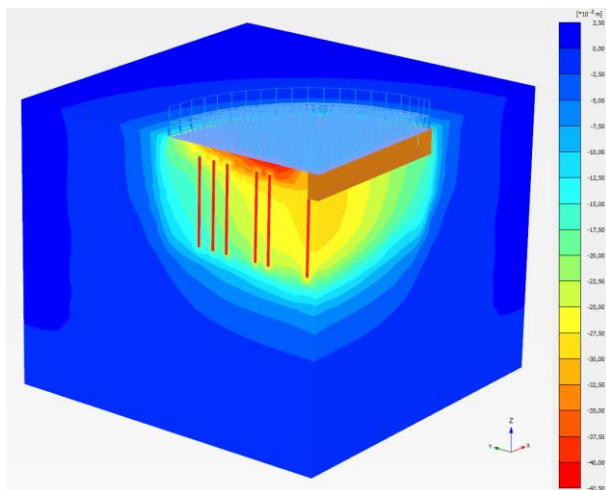
Back analízis alapjául szolgáló Plaxis 3D modell eredményei

a.)

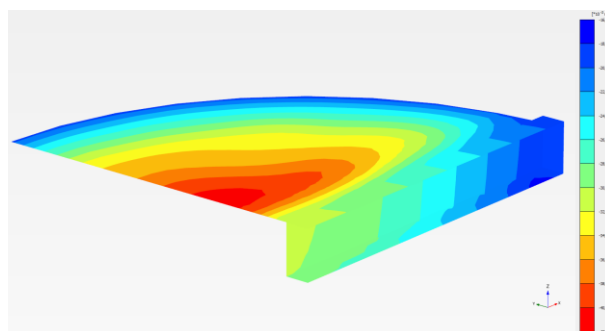


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– 17.000 tonnás feltöltési állapot

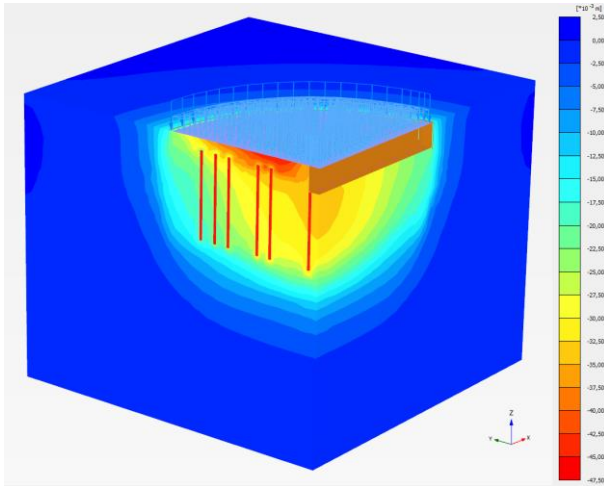


a.)

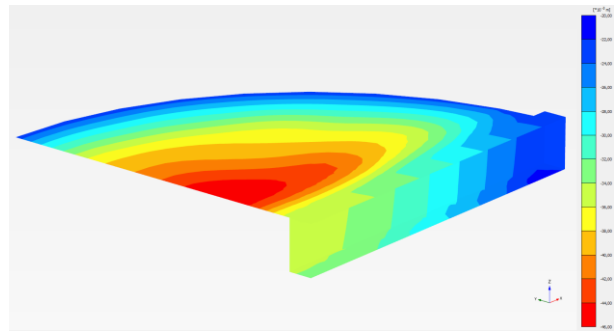


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– 51.500 tonnás feltöltési állapot

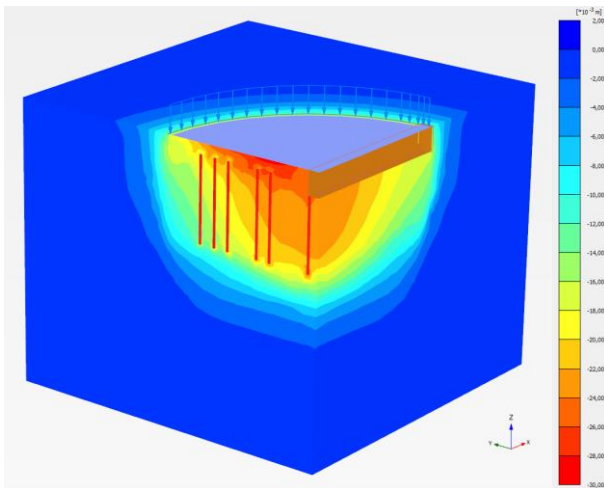


a.)

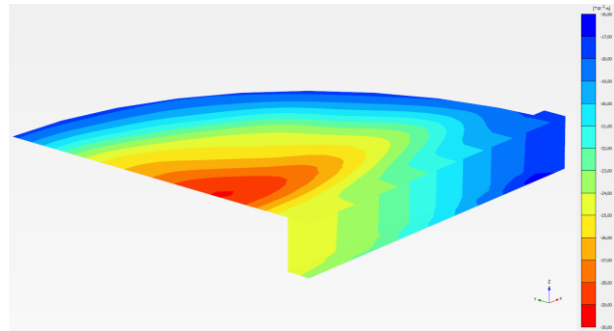


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Pihentetés 51.500 tonnás állapotban

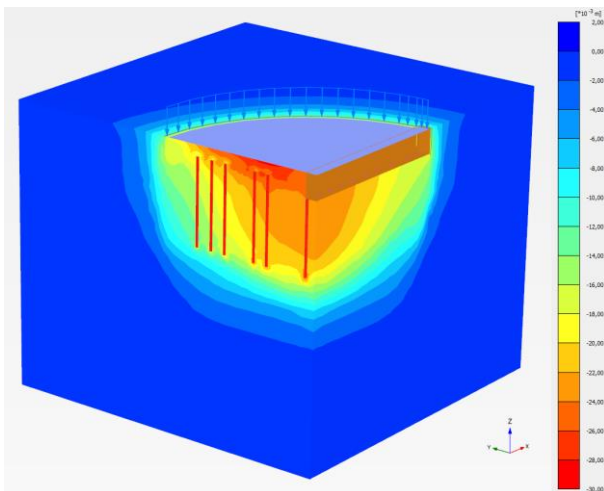


a.)

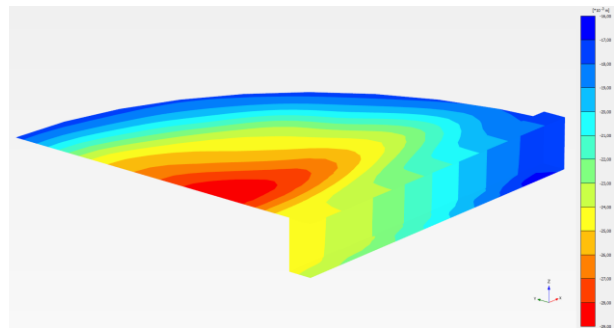


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Leürítés 0 tonnás állapotban

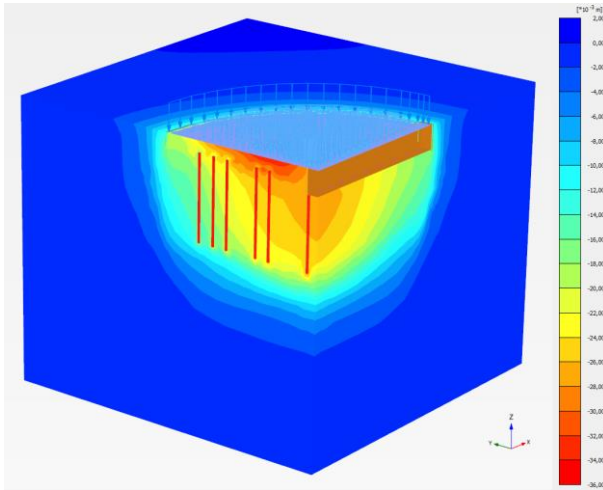


a.)

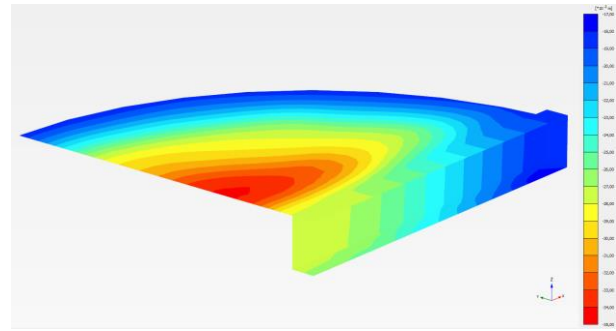


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Pihentetés 0 tonnás állapotban

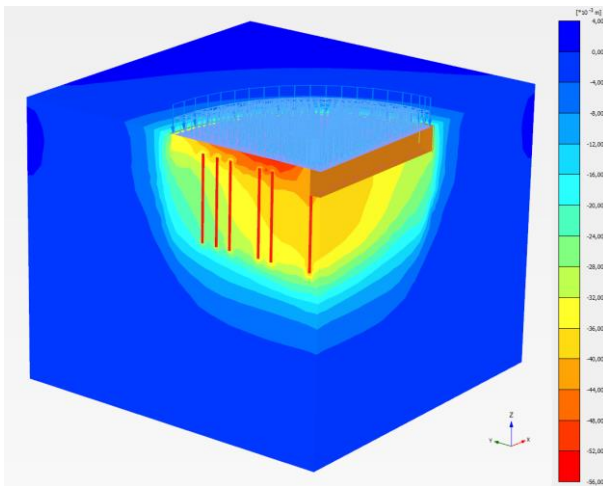


a.)

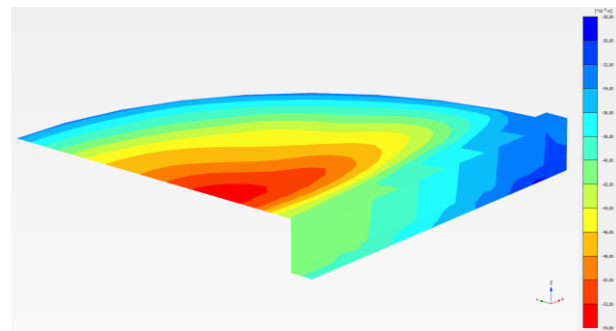


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– 18.100 tonnás feltöltési állapot

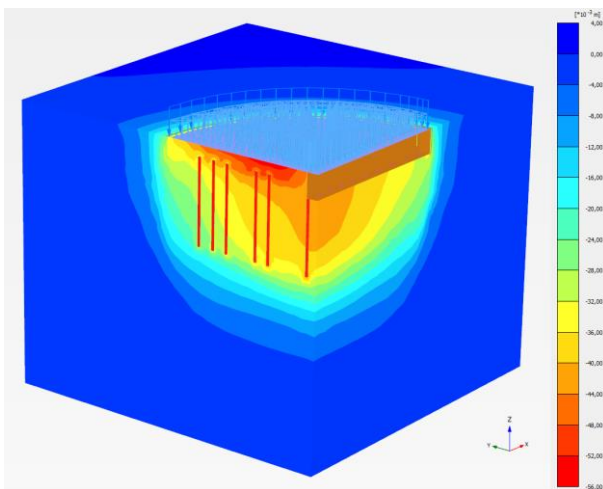


a.)

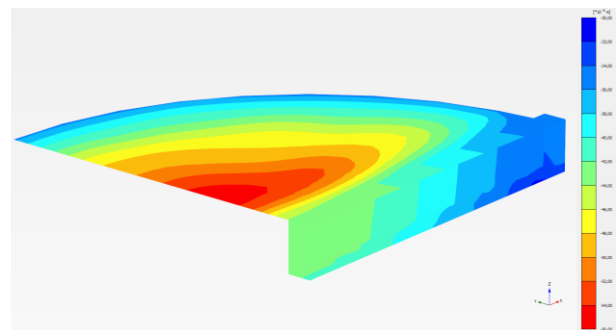


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– 65.500 tonnás feltöltési állapot

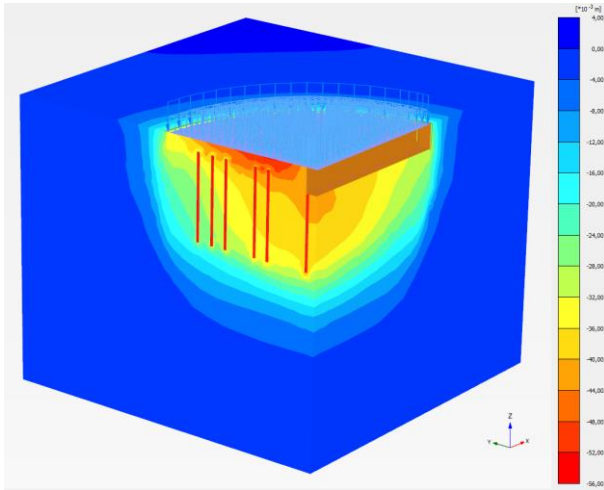


a.)

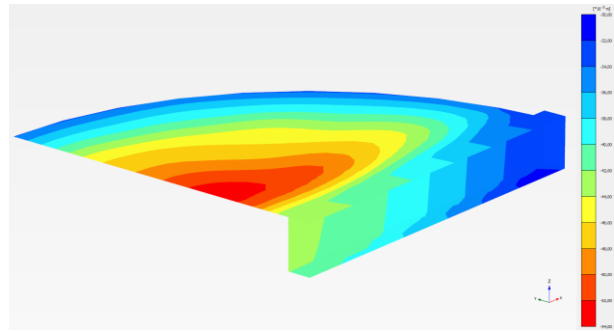


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Pihentetés 65.500 tonnás állapotban

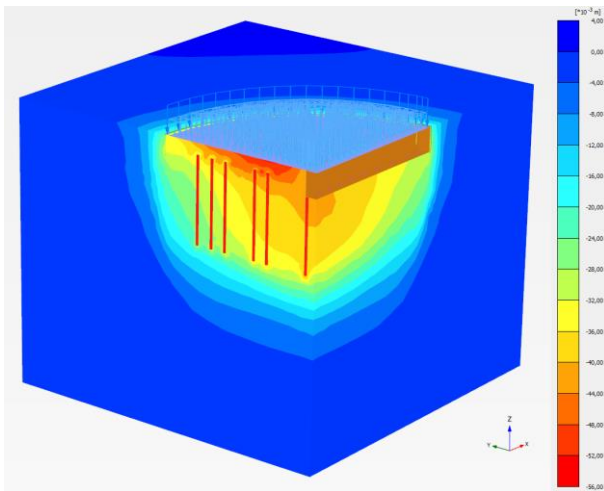


a.)

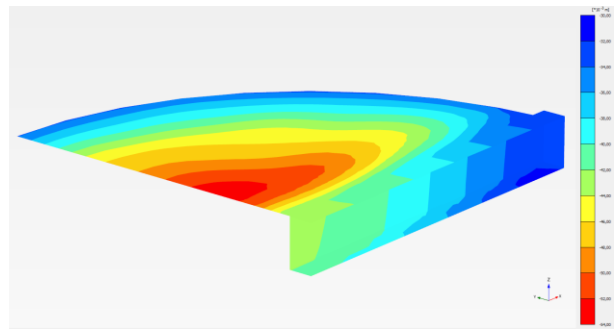


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Leürítés 44.650 tonnái

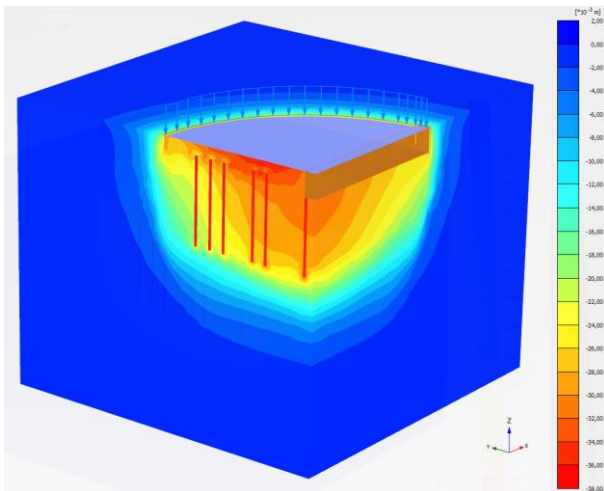


a.)

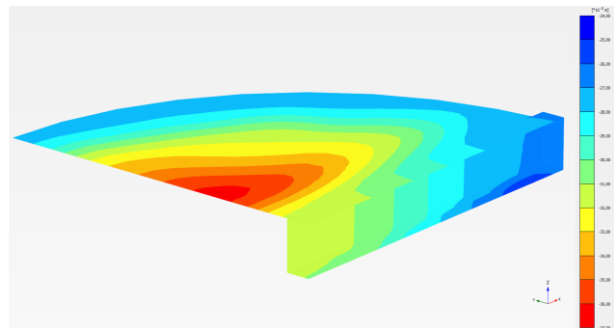


b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Pihentetés 44.650 tonnás állapotban



a.)



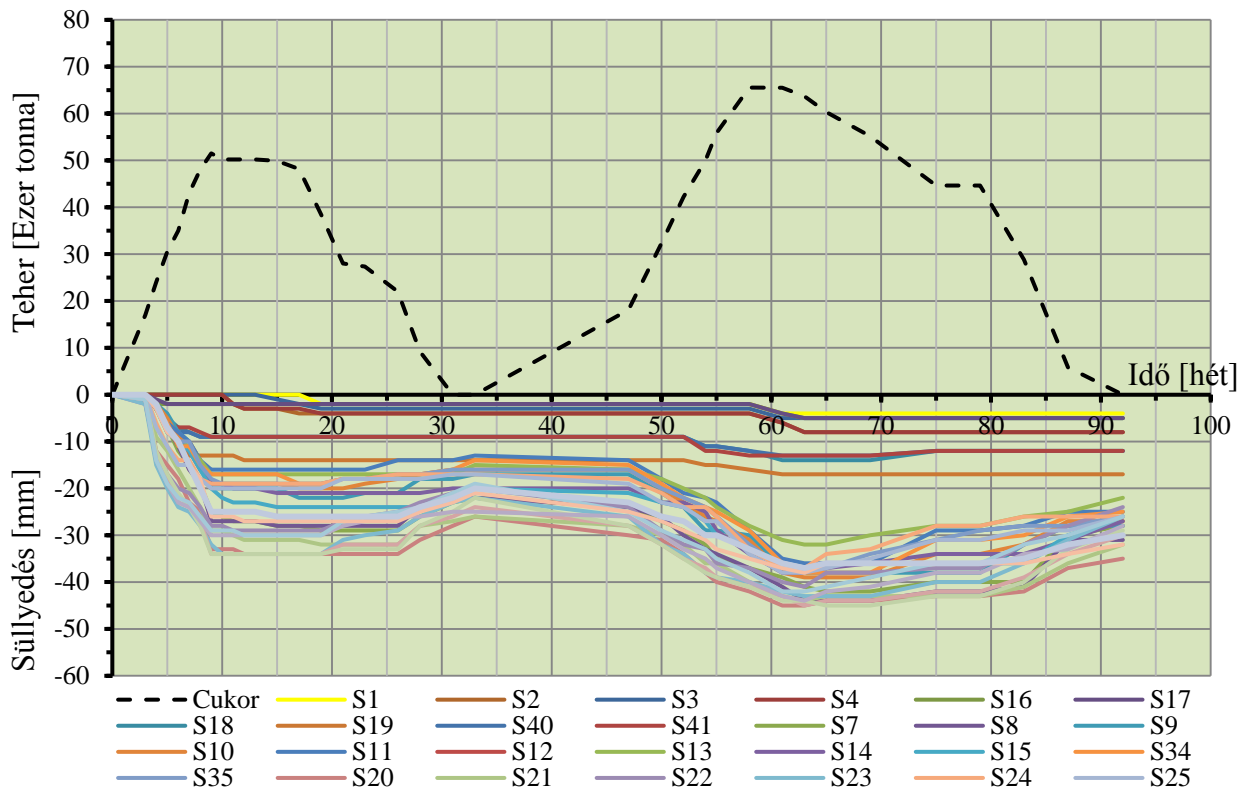
b.)

Teljes z irányú elmozdulás ábra (a); Alaplemez és alagút z irányú elmozdulás ábra (b)
– Leürítés 0 tonnái

Monitoring rendszer süllyedés eredményei

Épületrész neve	Elevátorház lábázat				Elevátorház pince						Siló lábázat										Siló alagút										Tárolt cukor mennyisége [Ezer tonna]								
	"0" mérés [mBf.]	"0" mérés ideje	Pontszám	S1 [mm]	S2 [mm]	S3 [mm]	S4 [mm]	S16 [mm]	S17 [mm]	S18 [mm]	S19 [mm]	S40 [mm]	S41 [mm]	S7 [mm]	S8 [mm]	S9 [mm]	S10 [mm]	S11 [mm]	S12 [mm]	S13 [mm]	S14 [mm]	S15 [mm]	S34 [mm]	S35 [mm]	S20 [mm]	S21 [mm]	S22 [mm]	S23 [mm]	S24 [mm]	S25 [mm]		S26 [mm]	S27 [mm]	S28 [mm]	S29 [mm]	S42 [mm]	S43 [mm]		
2013.11.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
2013.11.28	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	17,000
213.12.04	4	0	0	0	0	-2	-1	-2	-2	-3	-3	-3	-2	-2	-3	-4	-3	-3	-2	-2	-3	-2	-3	-3	-3	-3	-12	-9	-13	-15	-6	-7	-13	-12	-14	-14	-3	-2	24,000
2013.12.11	5	0	0	0	0	-2	-2	-5	-5	-6	-6	-7	-7	-4	-5	-6	-9	-8	-7	-8	-6	-8	-8	-15	-12	-17	-20	-11	-11	-17	-17	-19	-19	-8	-7	-7	-7	30,500	
2013.12.18	6	0	0	0	0	-2	-2	-7	-9	-8	-7	-12	-11	-8	-9	-8	-13	-10	-10	-10	-11	-10	-18	-16	-20	-24	-14	-15	-23	-21	-23	-22	-23	-22	-10	-10	-10	-10	35,000
2013.12.23	7	0	0	0	0	-2	-2	-8	-13	-8	-7	-15	-16	-10	-10	-10	-15	-11	-12	-12	-11	-10	-23	-20	-21	-25	-14	-15	-24	-24	-24	-24	-23	-15	-15	-15	-15	43,000	
2013.12.30	8	0	0	0	0	-2	-2	-9	-13	-9	-8	-19	-19	-14	-14	-14	-18	-14	-16	-16	-15	-15	-25	-24	-24	-28	-18	-18	-27	-28	-27	-26	-18	-20	-20	-20	48,000		
2014.01.08	9	0	0	0	0	-2	-2	-9	-13	-9	-9	-25	-27	-20	-19	-16	-20	-17	-19	-20	-17	-18	-33	-29	-28	-32	-19	-20	-34	-34	-30	-29	-26	-25	-25	-25	51,500		
2014.01.15	10	0	0	0	0	-2	-2	-9	-13	-9	-9	-26	-27	-20	-19	-16	-20	-17	-19	-22	-17	-19	-33	-29	-28	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-29	-26	-25	-25	-25	50,200		
2014.01.22	11	0	-2	0	-2	-2	-2	-9	-13	-9	-9	-27	-27	-20	-19	-16	-20	-17	-20	-23	-17	-19	-33	-30	-29	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-29	-26	-25	-25	-25	50,200		
2014.01.29	12	0	-3	0	-3	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-27	-27	-20	-19	-16	-20	-17	-20	-23	-17	-19	-34	-31	-29	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-30	-27	-25	-25	-25	50,200		
2014.02.05	13	0	-3	0	-3	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-27	-27	-20	-19	-16	-20	-17	-20	-23	-17	-19	-34	-31	-29	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-30	-27	-25	-25	-25	50,200		
2014.02.19	15	0	-3	-1	-3	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-28	-28	-20	-19	-16	-20	-17	-21	-24	-17	-19	-34	-31	-29	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-30	-27	-26	-26	-26	49,900		
2014.03.06	17	0	-4	-2	-3	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-28	-28	-22	-20	-16	-20	-17	-21	-24	-19	-19	-34	-31	-29	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-30	-27	-26	-26	-26	48,138		
2014.03.21	19	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-29	-28	-22	-20	-16	-20	-17	-21	-24	-19	-19	-34	-32	-29	-34	-19	-20	-34	-34	-30	-30	-27	-26	-26	-26	38,500		
2014.04.02	21	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-29	-28	-22	-20	-16	-19	-17	-21	-24	-18	-18	-34	-32	-27	-31	-18	-18	-32	-33	-28	-27	-27	-26	-26	-26	28,000		
2014.04.16	23	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-29	-28	-21	-19	-16	-19	-17	-21	-24	-18	-18	-34	-32	-26	-30	-18	-18	-32	-33	-27	-26	-27	-26	-26	-26	27,332		
2014.05.07	26	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-29	-28	-21	-18	-14	-18	-17	-21	-24	-17	-17	-34	-32	-25	-29	-17	-18	-32	-33	-26	-25	-27	-26	-26	-26	22,000		
2014.05.21	28	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-26	-24	-18	-17	-14	-18	-17	-21	-24	-17	-17	-31	-28	-23	-26	-17	-18	-28	-28	-26	-24	-25	-24	-24	-24	9,200		
2014.06.11	31	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-23	-22	-18	-16	-14	-17	-17	-20	-22	-16	-16	-28	-27	-21	-23	-17	-17	-26	-25	-25	-21	-23	-22	-22	-22	0,000		
2014.06.26	33	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-22	-22	-17	-16	-13	-17	-15	-20	-20	-14	-16	-26	-26	-20	-22	-17	-17	-24	-22	-25	-19	-21	-20	-20	-20	0,000		
2014.10.03	47	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-24	-24	-17	-16	-14	-18	-16	-20	-21	-15	-16	-30	-28	-24	-26	-18	-19	-28	-28	-26	-25	-25	-25	-23	-23	18,100		
2014.10.20	50	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-27	-26	-21	-20	-18	-21	-18	-23	-23	-19	-20	-31	-30	-29	-32	-21	-23	-32	-32	-30	-29	-27	-26	-26	-26	32,300		
2014.11.03	52	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-9	-14	-9	-9	-29	-30	-24	-23	-21	-25	-20	-23	-24	-22	-22	-34	-32	-32	-34	-24	-24	-35	-35	-33	-31	-29	-27	-27	-27	42,200		
2014.11.17	54	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-11	-15	-11	-12	-32	-33	-29	-26	-22	-25	-22	-25	-27	-24	-24	-38	-36	-33	-38	-24	-27	-37	-38	-35	-33	-31	-30	-30	-30	50,000		
2014.11.28	55	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-11	-15	-11	-12	-35	-34	-29	-27	-23	-27	-24	-29	-30	-25	-26	-40	-36	-36	-39	-26	-27	-39	-39	-37	-35	-33	-30	-30	-30	55,840		
2014.12.17	58	-2	-4	-3	-4	-2	-2	-12	-16	-12	-13	-37	-37	-30	-31	-29	-35	-28	-34	-33	-29	-32	-42	-40	-37	-40	-33	-34	-41	-41	-40	-38	-35	-33	-31	-30	65,527		
2015.01.05	61	-4	-6	-5	-6	-4	-4	-14	-17	-13	-13	-39	-41	-37	-38	-35	-40	-31	-38	-36	-36	-37	-45	-43	-40	-42	-37	-38	-43	-44	-43	-42	-37	-36	-36	-36	65,521		
2015.01.21	63	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-14	-17	-13	-13	-41	-44	-38	-39	-36	-40	-32	-38	-37	-38	-37	-45	-44	-41	-43	-37	-38	-45	-44	-42	-42	-38	-37	-37	-37	63,700		
2015.02.04	65	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-14	-17	-13	-13	-42	-44	-38	-39	-36	-38	-32	-37	-36	-38	-37	-44	-43	-38	-43	-34	-37	-44	-45	-42	-41	-36	-36	-36	-36	60,300		
2015.03.03	69	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-14	-17	-13	-13	-42	-44	-38	-39	-36	-36	-30	-36	-36	-38	-34	-44	-43	-38	-43	-33	-35	-44	-45	-41	-39	-36	-36	-36	55,150			
2015.04.14	75	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-12	-17	-12	-12	-40	-42	-38	-34	-29	-33	-28	-34	-36	-31	-31	-43	-43	-37	-40	-28	-31	-42	-43	-38	-36	-36	-36	-36	-36	44,650		
2015.05.11	79	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-12	-17	-12	-12	-40	-42	-38	-34	-29	-31	-28	-34	-36	-31	-29	-43	-43	-37	-40	-28	-31	-42	-43	-38	-36	-36	-36	-36	-36	44,650		
2015.06.08	83	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-12	-17	-12	-12	-40	-41	-32	-32	-28	-31	-26	-34	-36	-30	-28	-42	-41	-32	-36	-26	-29	-39	-40	-34	-32	-36	-35	-35	-35	28,823		
2015.07.10	87	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-12	-17	-12	-12	-30	-31	-28	-27	-25	-31	-25	-31	-30	-26	-28	-37	-36	-28	-31	-26	-29	-34	-33	-33	-30	-34	-32	-32	-32	5,820		
2015.08.11	92	-4	-8	-5	-8	-5	-5	-12	-17	-12	-12	-28	-31	-28	-27	-25	-29	-22	-27	-26	-25	-26	-35	-32	-24	-26	-26	-26	-30	-29	-28	-26	-32	-30	-30	-30	0,000		

Teher - Süllyedés Diagram



Süllyedésmérési pontok

