



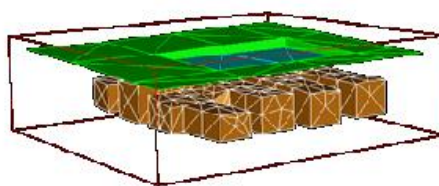
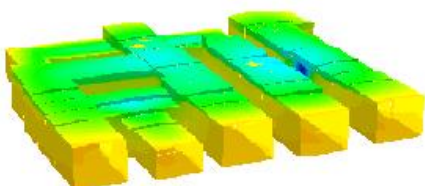
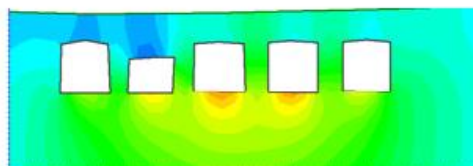
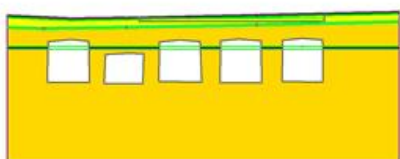
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

TDK dolgozat

## Üregállékonyság vizsgálata, durva mészkő kőzetkörnyezetben, két- és háromdimenziós modellek összehasonlítása



Készítette:

Nagy Tamás

Konzulensek:

Dr. Görög Péter

Dr. Török Ákos

## Tartalomjegyzék

<b>Absztrakt</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Feladat ismertetése</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Előzmények</b> .....	<b>6</b>
2.1 A pincerendszer kialakulása, a terület nyersanyagbányászata .....	7
2.2 A pincék geometriájának ismertetése .....	8
<b>3. Helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok</b> .....	<b>9</b>
3.1 Helyszínbejárás .....	9
3.2 A terület közetrétegződésének a meghatározása .....	10
3.3 Laboratóriumi vizsgálatok.....	10
3.3.1 Mintavétel .....	10
3.3.2 Laboratóriumi vizsgálatok eredményei.....	12
<b>4. A modellvizsgálatok módszertana</b> .....	<b>14</b>
4.1 Végeselem módszer .....	14
4.1.1 Phase2 .....	17
4.1.2 RS3.....	17
4.2 Peremelem módszer .....	17
4.2.1 Examine 2D.....	19
4.2.2 Examine 3D.....	18
<b>5. Kétdimenziós modell vizsgálat</b> .....	<b>19</b>
5.1 Modellvizsgálat Examine 2D-vel .....	19
5.1.1 A C jelű keresztmetszet vizsgálata .....	20
5.1.5 A B jelű keresztmetszet vizsgálata .....	22
5.1.3 Az A jelű keresztmetszet vizsgálata.....	24
5.2 Modellvizsgálat Phase2-vel.....	25
5.2.1 A C keresztmetszet modellezésének lépései .....	26
5.2.2 A C keresztmetszet vizsgálati eredményei száraz állapotban.....	31
5.2.3 A C keresztmetszet vizsgálatainak eredménye telített állapotban.....	37
<b>6. Háromdimenziós modell vizsgálat</b> .....	<b>38</b>
6.1 Modellvizsgálat Examine 3D-vel .....	38
6.1.1 A modellépítés fő lépései.....	38
6.1.2 Az A jelű keresztmetszet vizsgálati eredményei .....	40

6.1.3 A C jelű keresztmetszet vizsgálati eredményei .....	43
6.2 Modellvizsgálat RS <sup>3</sup> alkalmazásával.....	47
6.3.1 A modellépítés fő lépései .....	47
6.3.2 A vizsgálat eredményei .....	48
<b>7. Modellvizsgálatok összehasonlítása .....</b>	<b>49</b>
7.1 A peremelem és a végeelem módszer eredményeinek az összehasonlítása .....	49
7.1.1 A kétdimenziós modellek összehasonlítása .....	49
7.1.2 A háromdimenziós modellek összehasonlítása .....	52
7.2 A 2D-s és a 3D-s modellek eredményeinek összehasonlítása .....	55
<b>8. Eredmények értékelése .....</b>	<b>58</b>
8.1 Az A jelű keresztmetszet értékelése .....	58
8.2 A B jelű keresztmetszet értékelése.....	58
8.3 A C jelű keresztmetszet értékelése.....	60
8.4 Általános tapasztalatok, megjegyzések .....	62
<b>9. Összefoglalás .....</b>	<b>63</b>
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>65</b>
<b>Felhasznált irodalom.....</b>	<b>66</b>
<b>Ábrajegyzék.....</b>	<b>67</b>
<b>Táblázat jegyzék .....</b>	<b>68</b>

## Absztrakt

Az alábányászott, alapincézett területek okozta veszély megelőzése, jelentős műszaki kihívásokat jelent a mérnökök számára. Ezeken a területeken a felszínalatti üregeknek jelentős hatása lehet a felszíni épített környezetre. Az ezáltal fennálló veszélyhelyzeteket csak az üregek rendszeres ellenőrzésével és karbantartásával lehet megelőzni. A pincék, üregek megjelenése elsősorban azokra a helyekre jellemző, ahol korábban valamilyen bányászati tevékenység folyt. Budapesten több kőbánya is üzemelt, ezek közül is kiemelkedőek voltak Budafok kőbányái, melyek már a római korban is építőkövel látták el az akkori lakosságot. A bányászat hatására napjainkra egyedülálló 360.000 m<sup>2</sup> alapterületű és körülbelül 120 km hosszú pincerendszer alakult ki a terület alatt. A városok gyorsuló fejlődésével sokszor az alábányászott területeket is be szeretnék építeni. Ezekben az esetekben elengedhetetlen az üregek komoly felülvizsgálata és részletes állékonyságszámítás készítése, amelyek alapján eldönthető, hogy lehetséges-e biztonságosan, az üreg fölé történő építkezés.

A kutatási munka során a budafoki térség alatti pincék, üregek viselkedését vizsgáltam felszíni beépítés hatására, az üregek geometriai kialakítása, az üregeket körülvevő kőzetrétegződés, repedezettség és a kőzettakarás függvényében. A vizsgált helyszín kőzetanyagára a felszín közelben a szarmata durva mészkő jellemző. A pincék, üregek alaprajzainak, geometriájának megismerése és a kőzet repedezettségének felmérése után nagyszámú laborvizsgálat elvégzése szükséges a pincefalak kőzetanyagából. Ezekből a laboratóriumi eredményekből a mészkő nyomó- és húzószilárdságára, rugalmassági modulusára lehetett következtetni. Az ebből származtatott kőzetzfizikai paraméterek meghatározása után modellezni lehetett a pincék kőzetanyagának viselkedését a leendő felszíni beépítés hatására. A vizsgálat során a két és háromdimenziós modellek eredményei és a modellek alkalmazási lehetőségeinek korlátai és hibái kerültek összehasonlításra. Ezen tapasztalatok segíthetnek abban, hogy mikor milyen típusú modell vizsgálatot célszerű használni, ahhoz hogy az adott feladatnál a lehető legpontosabb eredményeket kapjuk, ugyanakkor a ráfordított idő alapján gazdaságos munkát végezhessünk.

## 1. A feladat ismertetése

Napjainkban az alábányászott, alapincézett területek feletti telkek beépítése, a városok fejlődésével egyre gyakrabban előfordulnak. Ez jelentős műszaki kihívásokat jelent a mérnökök számára, mivel a felszínalatti üregeknek jelentős hatása lehet a felszíni épített környezetre. Az ilyen telkekre történő építkezést minden esetben részletes állékonyságvizsgálattal kell alátámasztani. Egyszerű geometriájú pincéknél, üregeknél az állékonyságszámítás kétdimenziós modellezéssel elvégezhető. Bonyolultabb esetben viszont, amikor több üreg egymás mellett helyezkedik el, vagy keresztezi egymást a kétdimenziós vizsgálatokkal már nem bizonyítható megfelelően az állékonyság. Ilyen esetekben a problémás részeket vagy az egész pince- vagy üregrendszert háromdimenzióban kell vizsgálni. A háromdimenziós vizsgálat, viszont sokkal bonyolultabb és időigényesebb, ezért a mérnöknek mérlegelni kell, hogy mikor van rá feltétlenül szükség és mikor lehet egyszerűsítéseket, megkötéseket alkalmazva egy jóval gyorsabb kétdimenziós vizsgálatot elvégezni a feladatot.

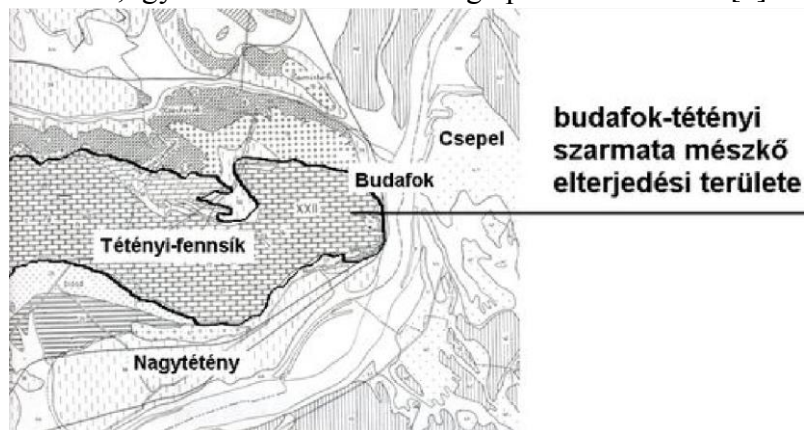
Dolgozatomban üregek állékonyságvizsgálatának számítógépes modellezési lehetőségeivel foglalkozom. A modellezési lehetőségeket és az eredményeket egy mintapéldán fogom bemutatni, amihez felhasználok a BSc diplomamunkám során elvégzett laborvizsgálataim és a végelelemes módszerrel elvégzett 2D-s modellvizsgálataim eredményeit. Annak a munkának a végén nem tudtam teljes mértékben belátni, hogy a pincerendszer valóban megfelel-e az állékonysági követelményeknek, mivel nem állt rendelkezésemre olyan szoftver, amivel 3D-ben tudtam volna vizsgálni az üregek globális viselkedését. A mostani dolgozatom keretében a 2D-s modellezést egy peremelem módszeren alapuló szoftverrel is elvégzem és ezen felül a problémát 3D-ben is megvizsgálom. A különböző módszeren alapuló programok továbbá lehetőséget nyújtanak a peremelem és a végelelemes módszerből kapott eredmények összehasonítására is.

A konkrét feladat, amin a modellvizsgálataimat végrehajtom a Park utca 56 szám alatti pincerendszer állékonyságvizsgálata. Az itt elhelyezkedő telken egy családi ház építését tervezik, és ennek a pincerendszerre gyakorolt hatásait vizsgálom. Korábban részletes helyszíni és laboratóriumi vizsgálatokat végeztem, hogy megismerjem a járatok mészköanyagának közetmechanikai tulajdonságait. A közetkörnyezet tulajdonságainak ismerete elengedhetetlen a későbbi modellvizsgálatokhoz ezért a következő két fejezetben röviden összefoglalom az elvégzett helyszíni és laboratóriumi munkám eredményeit. Ezek után a végelelemes és peremelemes módszereket használva, 2D-s illetve 3D-s modellek segítségével tanulmányozom a feszültségek, alakváltozások és a biztonság alakulását. Végül a különböző modellek eredményeinek az összehasonlításából a felhasznált számítási módszerek mellett, a problémáról szerzett tapasztalataim és a számításokból levonható következtetéseim alapján a pincerendszer állékonyságát is értékelem.

## 2. Előzmények

### 2.1 Pincerendszer kialakulása, a terület nyersanyag bányászata

A vizsgált pincerendszer a Tétényi fennsík keleti részén Budafok városrészen belül helyezkedik el (1. ábra). Ezen a területen a XIX. században és a XX. század elején durva mészkő bányászat folyt, felszín alatti kőfejtőkben. A durva mészkő nem polírozható, de jól faragható, megmunkálható kőzet, az üreges szerkezet miatt jó hőszigetelő, kiválóan alkalmas építőkönek. Falazóelemként, burkolólapként, díszítőelemként, korlátok, anyagaként, sőt műalkotások, szobrok anyagaként már a középkortól alkalmazták. Az egykori bányák helyén üregek, pincék maradtak, így alakult ki a szóban forgó pincerendszer is. [1]



1. ábra. Budafok-Tétény vázlatos geológiai térképe [2]

Az 1920-as évek közepétől a mészkő bányászat mellett, a mészkő rétegek között elhelyezkedő bentonit bányászata is megindult. A Balatoni út (jelenlegi 7 sz. út) környékén illetve Nagytétényben közvetlenül a felszín alatt, külfejtéses bányászati módszerrel másutt mélyműveléssel történt a bentonit kitermelése. A bentonit posztvulkanikus eredetű kőzet, az ún. riolít-dácittufa agyagos mállásterméke, amely vulkáni kitörésekkor magasba szállt és a tengerbe hullt poranyagából keletkezett víz alatti bomlás útján. Sokoldalúan hasznosítható, régen fullerföld vagy kallóföld néven gyapjútisztításra, növényi olajok, bor, ecet stb. derítésére használták. A budatétényi bentonitbánya, a zömében szarmata mészkőből álló Tétényi-fennsík keleti részén helyezkedett el, ahol a bentonitrétegek vastagsága 60-90 cm között változott.

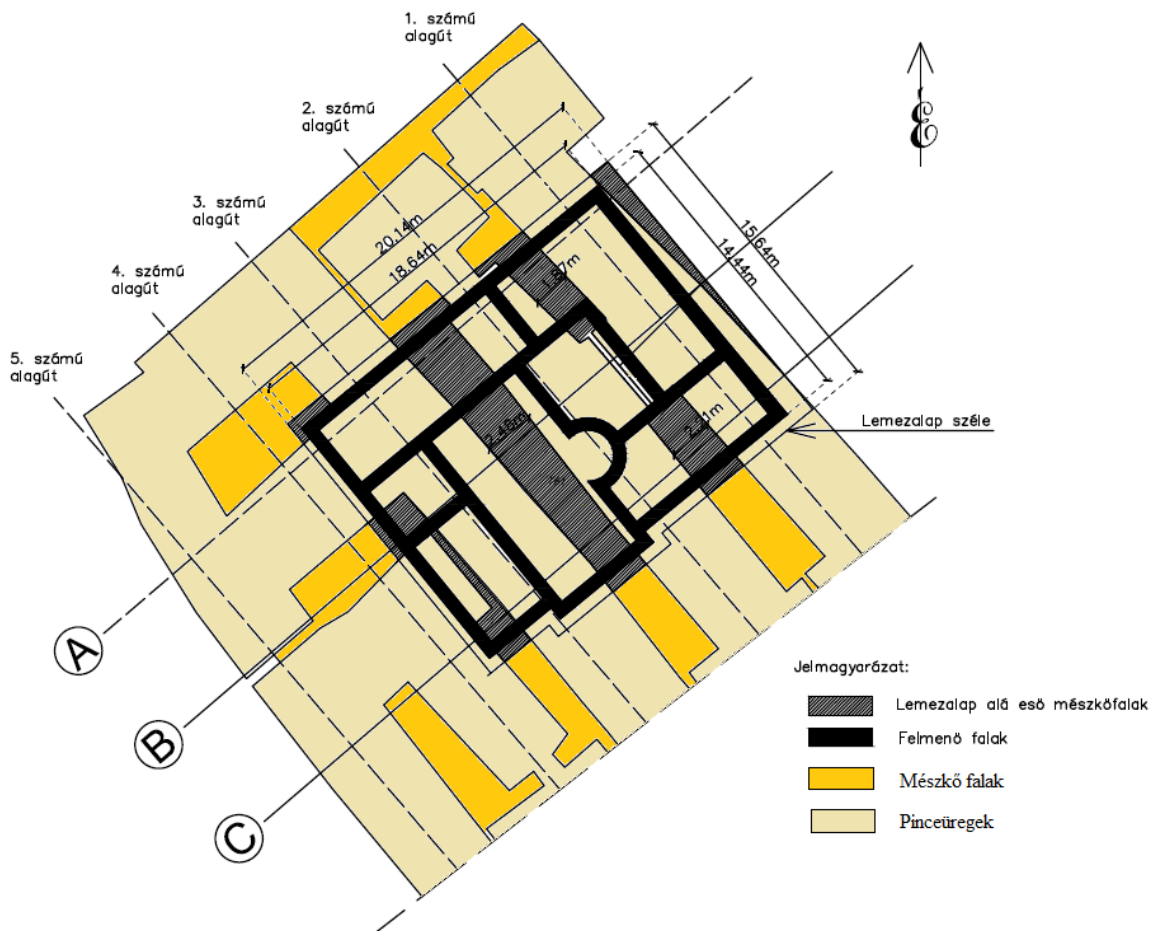
A vizsgálat tárgyát képező pincerendszer egy hosszú, keskeny (120m x40m) körülbelül 0.5 hektár nagyságú telek alatt helyezkedik el, mindössze 500 méteres távolságban az előbbieken leírt bentonit bánya határától. A telek alatt 5 db kb. 80 méter hosszú alagút húzódik. Az eredeti állapotukban az alagutak több helyen átjárhatók voltak, ezáltal egy összefüggő pincerendszert alkottak. Jelen állapotban az alagutak közötti átjárókat befalazták, így 5 különálló egymástól elszigetelt pincét alakítottak ki. Erre azért volt szükség, mert a jelenlegi tulajdonos gombatermesztéssel foglalkozik és az ezzel járó fertőtlenítési műveleteket így egyszerűbben tudja végrehajtani. A tulajdonostól megtudtam, hogy amikor a teleket megvette a pincerendszer szeméttel volt feltöltve. A pince kitisztítását és a szemét elszállítását ő végezte el. A gombatermesztést 1990-es évek elejétől kezdve végzik. A pincék fertőtlenítése frissen oltott meszes lemosással történik, amit minden egyes újra telepítésnél elvégeznek. Ez hatással van a pince falak mészkő anyagára is, hiszen mára már több cm



vastag meszes bevonó réteg alakult ki a mészkő felületén. Ez a réteg nem csak a fertőzésektől véd, hanem a mészkő mállását is megakadályozza. A pincék szellőztetését 8 db szellőző kürtő segítségével végzik. A tervezett családi ház 4 alagút fölé esne, és mint egy 270 m<sup>2</sup> területen épülne (2-3. ábra).



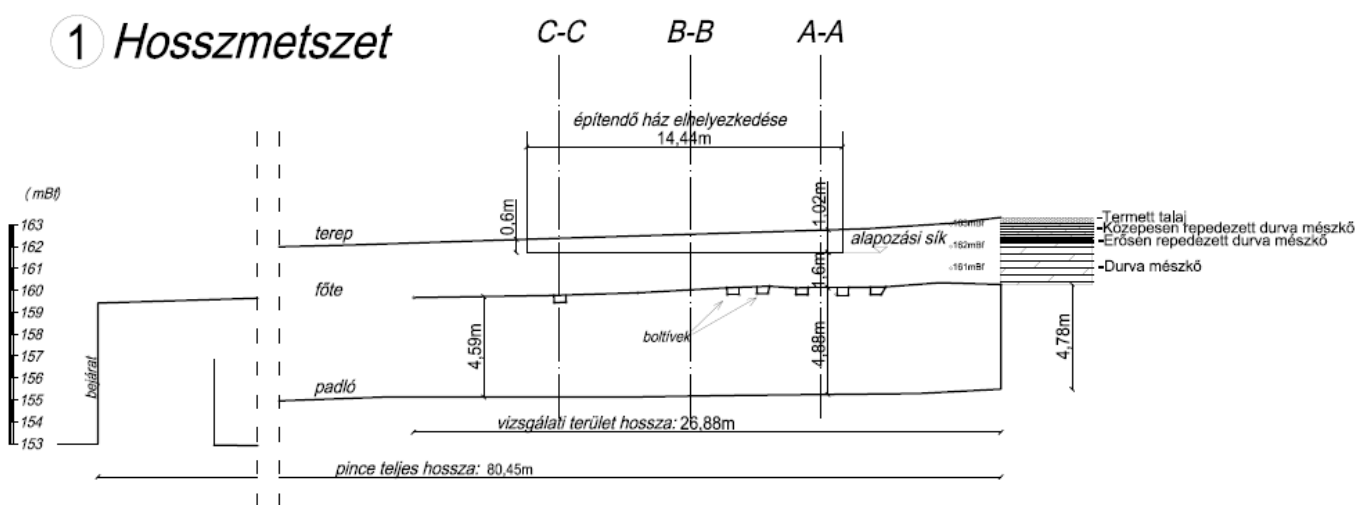
2. ábra. A pincék feletti terepviszonyok



3. ábra. Az építendő ház elhelyezkedése a pincerendszer felett

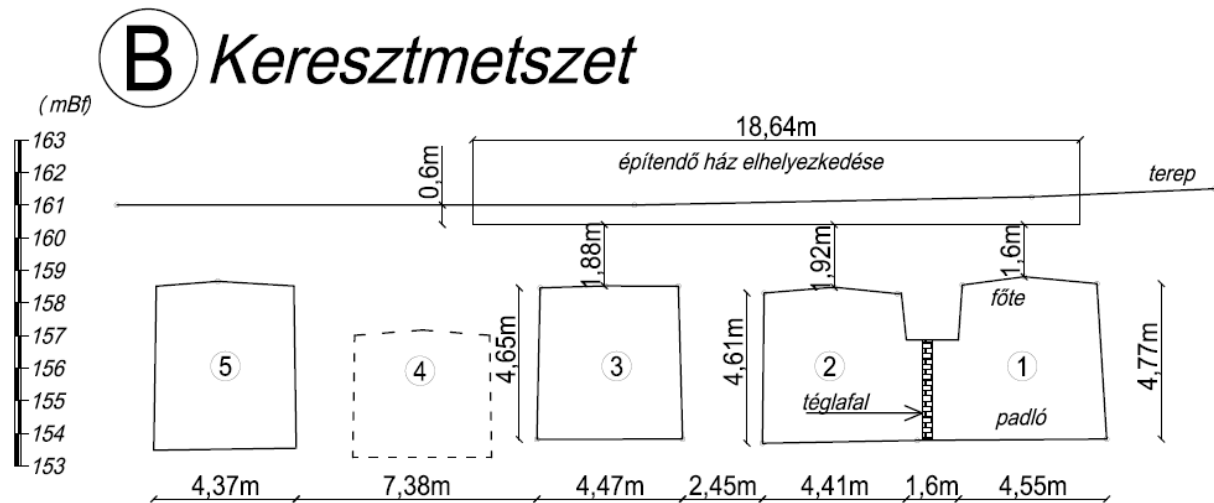
## 2.2 A pincék geometriájának ismertetése

Ahhoz hogy vizsgálni tudjam a pincerendszer állékonyságát, először is szükségem van a pincék alaprajzára, hossz- és keresztirányú metszeteire, valamint meg kell választanom milyen síkalapozási rendszert tervezek az épület alá. A legegyszerűbb módszer a sávalapok használata lenne, ami az itt jelenlevő jó teherbírású kőzet miatt jó megoldást is kínálna. Azonban az alaprajzot és a pince üregek elhelyezkedését figyelembe véve, azt tapasztalhatjuk, hogy a sávalapoknak legjobb esetben is csak 19%-a nem esne üreg felé. Ebben az esetben a terhek 71%-a az üregek felé koncentrálna. Azt mérlegelve, hogy a pincék főtéje feletti kőzettakarás vastagsága mindösszesen 1,5-2 méter között változik, más megoldást is meg kell fontolni, a biztonság növelésének érdekében. Egy ilyen alternatív megoldást nyújtana, egy az épület terheit egyenletesen elosztó, ezáltal a kőzetre kisebb terhelést átadó lemezalap készítése. A 3. ábrán látható sraffozott rész jelöli azt a területet, ahol a lemezalap alatt kőzet van. Ebből kiszámítható, hogy a teljes lemezalap 316 m<sup>2</sup>-en terülne el és ebből 79 m<sup>2</sup> támaszkodna kőzetre. Ebben az esetben is mindössze 28% az a rész, ami nem üreg felé esik, viszont az egyenletesen eloszló terhelés miatt nem alakulnak ki olyan jelentős feszültség csúcsok, mint sávalap alkalmazása esetén. A lemezalap kialakításánál még fontos szempont, hogy azt az épület É-K-i részénél, az 1-es számú alagút ürege feletti részen megnyújtsuk, ezáltal azon a felén a ház fel tud támaszkodni a kőzetre. A könnyebb áttekinthetőség érdekében bemutatok 1-1 hossz- illetve keresztmetszet a pincerendszerről (4-5. ábra). A hosszmetset az 1-es számú pince tengelyvonalában, míg a B-B metszetet az épület közepe alatt vettem fel, ahol is 3 db pince esik a ház alá. Ez egy kritikus pontnak tekinthető, mert itt a legvékonyabb a kőzettakarás (1,6-2 m) illetve az 1-es és 2-es pince között 4.6 m hosszban egy átjáró található, ami ugyan egy téglafallal már fel lett falazva, de a számítás során ezt az utólag épített falat elhanyagolható teherbírása miatt nem lehet figyelembe venni. Továbbá az 1-es és 2-es pince ugyan rendelkezik egy utólagos boltíves megerősítéssel (6. ábra), de ezt szintén a biztonság javára történő közelítés céljából nem veszem majd figyelembe a későbbi modellvizsgálataimnál.



4. ábra. Az 1-es hosszmetset



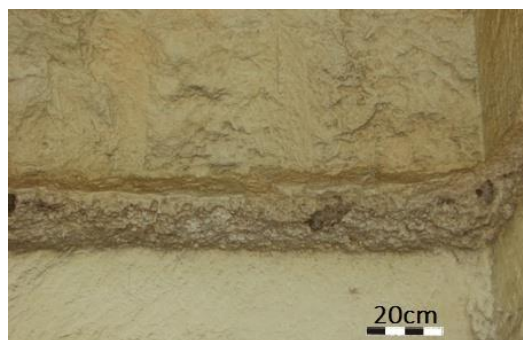


5. ábra. A B keresztmetszet

### 3. Helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok

#### 3.1 Helyszínbejárás

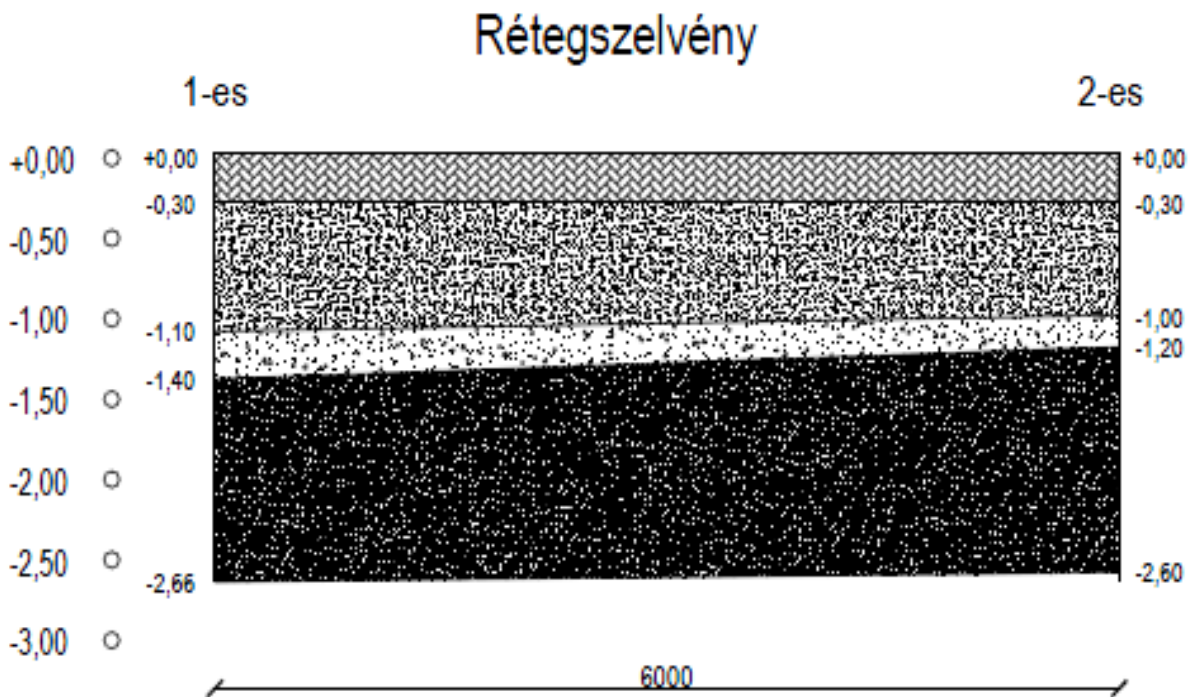
A helyszínbejárás során megnéztük a telek és a pincék elhelyezkedését, kialakítását, a pince feletti terepviszonyokat és a pincék állapotát. Felmértem a pince főték repedezettségének mértékét és kőzetmintát vettem a pincefal anyagából. Továbbá roncsolásmentes módszerrel vizsgáltam a kőzet felületi szilárdságát. A helyszíni tapasztalatok alapján a pince tagoltsági viszonyai kedvezőek, mivel kismértékű repedezettség volt csak jelen a főtéknél. A korábban említett, a területre jellemző bentonit réteg itt is megtalálható. Jelen esetben a pince főték alatt kb. fél méterre jelentkezik 15-20 cm vastagságban (6. ábra).



6. ábra. Pincék belső nézete és a bentonit réteg

### 3.2 A terület kőzetrétegződésének meghatározása

Szerencsére nem volt szükség a területen fúrásokra, hiszen a már meglévő pincék szellőzőit feltárásként lehet használni és ez alapján következtetni a terület rétegződésére. A szellőzőknél a következő kőzetrétegződés figyelhető meg: A felső 30 cm szerves talaj után 80 cm közepesen tagolt durva mészkő található, amit egy 20-30 cm-es erősen tagolt, töredezett mészkő réteg választ el az épnek mondható, repedésmentes durva mészkőtől, ami a pincék falainak anyagát is képi. A két szellőzőnél elkészített fúrásszelvényből, felvehető a terület egy jellemző rétegszelvénye, amit a későbbi modellvizsgálatoknál fel lehet használni (7. ábra).

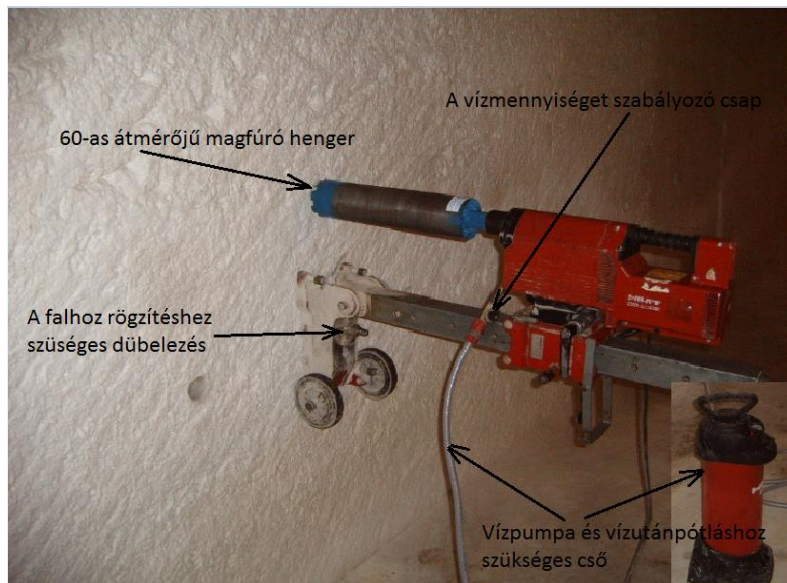


7. ábra. Az 1-es és 2-es szellőző közötti rétegszelvény

### 3.3 Laborvizsgálatok

#### 3.3.1 Mintavétel

A laborvizsgálatokhoz szükséges kőzetminta beszerzése a második terepbejáráskor történt. Az első alkalommal, amikor szemrevételeztük a pincéket, kézi véséssel hasítottunk le egy darabot a 2-es számú pince egyik falából. Ez a módszer nem járt sikerrel, mivel a levésett darab elég nagy sem volt ahhoz, hogy próbatesteket készítssek belőle és a kőzet tulajdonságainak következtében (puha, nagy porozitású) eléggé szétmállott. A második alkalommal egy állványos, vízöblítéses magfúróval mentünk a helyszínre (8. ábra).



8. ábra. Mintavétel állványos, vízöblítéses fúróval

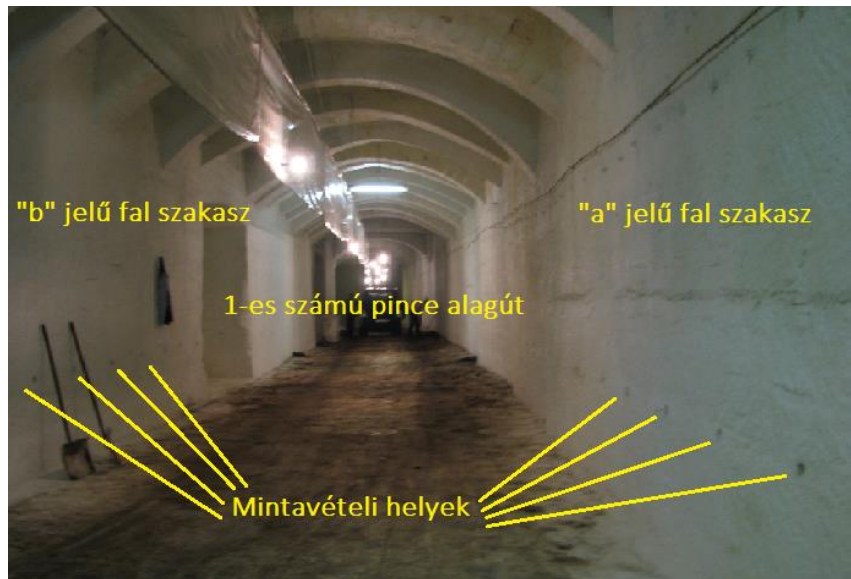
Ahhoz hogy ezzel a berendezéssel magmintákat tudjunk venni, az állványzatát a falra kell rögzíteni. Ez úgy történik, hogy a falba az előre kézi fúróval kifúrt lyukba beütünk egy dübelt, ami befeszül, amikor a rögzítő csapot betekerjük. Erre a csapra akasztjuk rá az állványt és egy anyával rögzítjük hozzá. Ekkor a gépet egyenletesen tolva a falba, közben vízzel hűtve magmintát tudunk kifúrni. A másik alkalmazott módszer egy kézi HILTI típusú fúrógép használata volt, amelynek a tokmányába bele lehetett helyezni a magfúró hengert (9. ábra). Ennél is vízöblítéses hűtést alkalmaztunk.



9. ábra. Kézi HILTI típusú fúrógép

A fúrás egyik esetben sem ment zökkenőmentesen, mivel a kőzetből kifúrt minták rendkívül könnyen széttörték a fúrás vagy a kiemelés során. Végül a pince két szemközti falából 20 db 60 mm átmérőjű magmintát vettünk, amelyek az alábbi ábrán láthatóak (10. ábra).





10. ábra. Mintavételi helyek és a kinyert magminták

A magmintákat ezután az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumába szállítottuk, ahol elvégeztem a méretre vágásukat, kiszáritásukat, méretezésüket és a szükséges vizsgálatokat. A méretre vágásnál az volt a cél, hogy a kőzetmintákból minél több 2:1 magasság:átmérő arányú próbatestet hozzak létre. A maradék magmintából, ami nem volt elég hosszú a 2:1 arányhoz, 1:1 arányú próbatesteket készítettem. Végül 10 db 2:1-es és 10 db 1:1-es próbatestet tudtam készíteni, amelyeket 3 napig 60°C szárítottam. A kiszáritott próbatesteket a mintavétel helyének figyelembevételével megszámoztam, és jegyzőkönyvet készítettem a méreteik (magasság, átmérő) és tömegük lemerésével.

### 3.3.2 Laboratóriumi vizsgálatok eredményei

A laborvizsgálatok során egyirányú nyomószilárdsági és közvetlen húzószilárdsági (brazil vizsgálat) vizsgálatok kerültek elvégzésre, száraz és telített állapotú próbatesteken. Ezek a terület mészkőanyagának testsűrűségét, nyomó- és húzószilárdságát, rugalmassági modulusát és Poisson tényezőjét eredményezték. Ezekből a modellezéshez szükséges további paramétereket is meghatározhatók voltak. A következő táblázatokban összefoglalom a laboreredményeket és az abból számított közetfizikai paramétereket (1-6. táblázat).

Szár az állapotban végzett vizsgálatok eredményeinek összesítése					
Próbatest száma	Ultrahang terjedési sebesség (km/s)	Egyirányú nyomószil. (MPa)	Rug. Modulus (GPa)	Poisson tényező (-)	Testsűrűség (kN/m <sup>3</sup> )
1.a	1,87	1,44	0,97	0,09	1568
2.a	2,14	1,61	0,66	0,15	1451
3.a	1,77	1,21	0,56	0,15	1382
4.a	2,10	3,08	0,81	0,06	1719
1.b	1,98	0,96	0,65	0,02	1448
2.b	1,84	1,10	0,95	0,21	1410
3.b	1,88	1,68	0,81	0,22	1420
4.b	1,78	1,36	0,75	0,12	1357
7.	2,11	2,03	0,44	0,35	1571
8.	2,21	1,93	1,22	0,13	1476
9.	2,45	2,00	0,32	0,12	1547
Átlag:	2,01	1,67	0,74	0,15	1486
Szórás:	0,21	0,59	0,26	0,09	106

1. táblázat. Szár az állapotban kapott laboreredmények

Telített állapotban végzett vizsgálatok eredményeinek összesítése					
Próbatest száma	Egyirányú nyomószil. (MPa)	Rug. Modulus (GPa)	Poisson tényező (-)	Testsűrűség (kN/m <sup>3</sup> )	Telített testsűrűség (kN/m <sup>3</sup> )
5.a	1,08	0,30	0,05	1472	1695
6.a	1,61	1,20	0,11	1593	1816
5.b	1,94	1,86	0,24	1588	1834
6.b	0,35	0,10	0,44	1337	1655
15.	0,56	1,01	0,23	1451	1720
16.	0,83	0,32	0,08	1399	1712
Átlag:	1,06	0,80	0,19	1473	1739
Szórás:	0,61	0,68	0,14	102	71

2. táblázat. Telített állapotban kapott laboreredmények

Szár az állapotban végzett közvetett húzóvizsgálatok eredményeinek összesítése			
Próbatest száma	Ultrahang terjedési sebesség (km/s)	Közvetett húzószilárdság (MPa)	Testsűrűség (kN/m <sup>3</sup> )
10. (brazil)	2,01	0,11	1419
11. (brazil)	2,19	0,48	1439
12. (brazil)	1,85	0,31	1429
13. (brazil)	2,00	0,34	1415
17. (brazil)	1,88	0,71	1446
Átlag:	1,99	0,39	1429
Szórás:	0,13	0,22	13

3. táblázat. Brazil vizsgálat eredményei

A modellben jelenlévő talajok adatai:

Talaj típusa	Száraz térfogatsúly (kN/m <sup>3</sup> )	Nedves térfogatsúly (kN/m <sup>3</sup> )	Összenyomódási modulus (MPa)	Kohézió (kPa)	Belső súrlódás szög (fok)	Poisson tényező (-)	Húzószilárdság (MPa)
Szerves talaj	17,1	17,8	6	5	8	0,3	0
Bentonit	17,0	19,0	8	35	15	0,3	0

4. táblázat. A modell vizsgálathoz szükséges talajok tulajdonságai

A modellben jelenlévő kőzetek adatai száraz állapotban:

Kőzet típusa	Száraz térfogatsúly (kN/m <sup>3</sup> )	Alakváltozási modulus (MPa)	Kohézió (kPa)	Belső súrlódás szög (fok)	Poisson tényező (-)	Húzószilárdság (MPa)
Durva mészkő	14,6	690,2	173,3	49.2	0,14	0.09822
Közepesen repedezett durva mészkő	14,6	293,9	28,2	46.6	0,14	0.00702
Erősen repedezett durva mészkő	14,6	81,6	15,7	40.1	0,14	0.00155

5. táblázat. A modell vizsgálathoz szükséges kőzetek tulajdonságai száraz állapotban

A modellben jelenlévő kőzetek adatai telített állapotban:

Kőzet típusa	Nedves térfogatsúly (kN/m <sup>3</sup> )	Alakváltozási modulus (MPa)	Kohézió (kPa)	Belső súrlódás szög (fok)	Poisson tényező (-)	Húzószilárdság (MPa)
Durva mészkő	17,4	766,9	112,5	47.1	0,19	0.06234
Közepesen repedezett durva mészkő	17,4	323,6	23,3	42.1	0,19	0.00445
Erősen repedezett durva mészkő	17,4	90,7	14,4	36.1	0,19	0.00098

6. táblázat. A modell vizsgálathoz szükséges kőzetek tulajdonságai telített állapotban

## 4. A modellvizsgálatok módszertana

### 4.1 Végeselem módszer

A véges-elemek módszere a Ritz-módszer speciális esete, amelyben sajátosan megválasztott bázisfüggvényekkel hajtjuk végre egy stacionaritási feladat megoldását. Általánosabban megfogalmazva a véges-elemek módszerének lényege a közelítő eljárásoknál a geometriai és a matematikai függvényter finitizálásával együtt járó sajátos bázisfüggvény-megválasztási technika. [3]



A véges-elemek módszere lényegében hat lépésben old meg egy műszaki feladatot. Ezek a lépések a következők:

1. A szerkezet elemekre osztása (a geometriai finitizálás).
2. A szerkezet vizsgálatához szükséges speciális bázisfüggvények kiválasztása (a függvénytér finitizálása).
3. A részekre osztott szerkezet elemeihez tartozó mátrixok előállítás.
4. A szerkezet egészéhez tartozó egyenletrendszer összeállítása.
5. Az egyenletrendszer megoldása, az ismeretlen változók meghatározása.
6. A feladat vizsgálatához szükséges úgynevezett másodlagos változók számítása.

A geometriai finitizálás során a szerkezetet véges méretű elemek halmazára osztjuk fel. Magának a módszernek az elnevezése („*véges-elemek*”) is innen származik. Az elemek formája és mérete nagyon sok tényezőtől függ. Olyan szerkezetnél, ahol maga a tartó lényegében egyváltozós kialakítású (gerenda, oszlop, rácsos tartó, keret), a felosztás során kialakuló elemek is egyváltozósak lesznek, függetlenül attól, hogy esetleg az egész szerkezetnek kétdimenziós vagy éppen térbeli a viselkedése. Egy faltartó (tárca) vagy egy lemez azonban már mindig kétdimenziós felosztást igényel, s külön mérlegelnünk kell, hogy háromszög, vagy négyszög jellegű elemeket kívánunk-e alkalmazni. Ha a vizsgált szerkezet görbe vonalakkal határolt részeket is tartalmaz (például egy kör alakú áttörés egy földemlemezen), akkor célszerű az elemeket is íves oldalúnak felvenni. Ilyenkor görbült oldalú háromszög vagy négyszög alakú tartományokat alkalmazhatunk. A felosztás során akár többféle elem típust is felhasználhatunk, a háromszög és négyszög alakú elemek együttes alkalmazásának nincs elvi akadálya. Valódi térbeli feladatoknál (gátak, geotechnikai problémák, vastag szerkezeti elemek stb.) tetraéder vagy általános téglatest típusú felosztás a szokásos. Az elemek határoló lapjai lehetnek síkok vagy szükség esetén (pl. egy íves gát modellezésénél) görbült felületek. Az elemek felvétele szorosan összefügg a második lépéssel, a függvénytér finitizálással, hiszen a geometriai felosztásnál az elem alakja mellett már arról is döntenünk kell, hogy hány csomópontot helyezünk el rajta. Az egy elemen felveendő csomópontok számát tehát befolyásolja:

- a megoldandó differenciálegyenlet rendje (milyen folytonossági osztályba kell tartoznia a bázisfüggvényeknek),
- a geometriai finitizálás (egyenes vagy görbült felületet kívánunk modellezni) és
- a közelítés pontossági igénye (hányadfokú polinomokkal akarjuk közelíteni a keresett függvény(ek)e)t. [3]

Az elemek felvétele (az elem típus kiválasztása után) a legtöbb szoftverben ma automatikusan történik, azonban ennek lehetőség szerinti ellenőrzése, esetleg módosítása szükséges lehet. Hol célszerű elemeket sűríteni? Mindig ott, ahol a számítandó jellemzők várhatóan erőteljesen változnak, például pontszerű támaszok, sarkok, bemetszések, áttörések, lyukak, éles változás a vastagságban vagy az anyagi tulajdonságokban. Ezek a hatások általában alakváltozás- és feszültségkoncentrációval járnak, és környezetükben egy ritkább háló jelentősen ronthatja az eredmények pontosságát. Az elemek geometriai méretének elméletileg nincs minimális vagy maximális határa, azonban az alkalmazott számítógép numerikus adottságai és a feladat fizikai paraméterei természetesen korlátok közé szorítják ennek értékeit. Az elemek méreteinek megválasztásakor különösen arra kell ügyelni, hogy

egy elemen belül ne alkalmazzunk igen jelentősen eltérő méretű (~1:10 aránynál kisebb vagy nagyobb) oldalakat, mert ez rontja az eredmények pontosságát. Ugyanilyen negatív hatása van annak is, ha az elemméretek egy elemen belül ugyan megfelelő arányúak, de egymás mellé kerülnek nagyon eltérő méretű elemek. Az elemkiválasztás és a teljes szerkezet elemekre való felosztása együtt jár a csomópontok globális számozási rendjének kialakulásával. Az automatikus hálógenerálás általában véletlenszerűen számozza be a csomópontokat, ez azonban nem előnyös az egyenletrendszer megoldásánál, mert igen nagyméretűvé teheti a sáv szélességet, a nagy sáv szélesség pedig megnöveli a számítási időt. A modern hálógenerálókhoz csatolt matematikai segédprogramok azonban általában gondoskodnak arról, hogy a szerkezeti hálón felsorolt csomópontok számozásának sorrendje - a felhasznált egyenletrendszer-megoldó típusához illesztve - közel optimális legyen a globális egyenletrendszer megoldása szempontjából. A harmadik és negyedik lépésben a szerkezet elemeihez tartozó merevségi és alakváltozási mátrixokat és tehervektorokat állítjuk elő, majd az egész szerkezethez tartozó egyenletrendszer összeállítását végezzük el. Az egyenletrendszer megoldásával a szerkezet csomópontjainak elmozdulásaiból alkotott vektort számítjuk ki. A mindig szimmetrikus, sáv szerkezetű együttható-mátrixú globális egyenletrendszer megoldására ma már nagyon sokféle változat alakult ki a közvetlen megoldások ötletes numerikus módosításaitól kezdve, az igen nagyméretű rendszereknél szokásos iterációs eljárásokig. Ha már ismerjük a szerkezet csomópontjainak elmozdulásait, akkor abból minden nehézség nélkül kiválaszthatók bármely elem csomópontjainak elmozdulásai. Ezek felhasználásával akár az elem elmozdulás-függvényei akár az alakváltozás-függvényei számíthatók, az alakváltozásokból pedig az anyagmodellek segítségével megkaphatók a feszültségek. Ha ismerjük az elem elmozdulás-, alakváltozás- és feszültség-függvényeit, akkor azokból természetesen bármelyik keresztmetszet elmozdulásait, alakváltozásait és feszültségeit kiszámíthatjuk, ha a megfelelő függvénybe behelyettesítjük a kérdéses keresztmetszetek koordinátáit. [3]

#### 4.1.1 Phase2

A Rocscience cég 1996 óta gyárt megbízható geotechnikai programokat. Szakterületük a 2D és 3D-s elemző és tervező programok, amelyek a mélyépítésben és bányászati tevékenységeknél nyújtanak segítséget a mérnökök számára. [5] A Phase2 csakúgy, mint a későbbiekben ismertetésre kerülő szoftverek mindegyike, a Rocscience programcsaládnak a tagja. Ez egy kétdimenziós, az előzőekben leírt véges elemes módszeren alapuló feszültség és alakváltozás elemző program, melynek segítségével a földalatti és felszíni munkavégzés hatását lehet számítani. A szoftver mind talaj, mind kőzet anyag modellezésére is alkalmas és több különböző talajmodellel is képes dolgozni, a rugalmas modell mellett a Drucker-Prager, a Mohr-Coulomb, ezek módosított változatait, és a módosított Cam-clay, modellt is alkalmazza. Széleskörű lehetőségeket kínál, beton, lőtt-beton, acél rendszerek, cölöpök, támfalak, geotextiliák beépítésének modellezésére is. Egyszerű kezelhetőség, felhasználóbarát felület és gyors számítás jellemzi a programot.

#### 4.1.2 RS<sup>3</sup>

A másik alkalmazott véges elemes szoftver az RS<sup>3</sup>, ami több mint 10 év fejlesztési munkáinak eredménye. Széleskörűen alkalmazható program, amely egyaránt alkalmas kőzet-

és talajkörnyezetben lévő alagutak és azok megtámasztásainak, alapozások és töltések építésének modellezésére, valamint konszolidációs és talajvíz-áramlási vizsgálatokra. [6] Nagy előnye a programnak az egyszerű kezelhetőség és a felhasználóbarát felület. Ez a felület nagyon hasonlít a korábban bemutatott Phase2 szoftveréhez, így a használatához nem kell egy teljesen új programmal megismerkedni. A 3D-s geometria létrehozásának elve, hogy 2D-s szeleteket rakunk egymás mellé és ezeknek vastagságot definiálunk, vagyis megnyújtjuk a harmadik sík irányába. Ezeket a 2D-s keresztmetszeteket importálhatjuk DXF fájlból vagy akár a korábban Phase2-ben használt modellekből. Ha utóbbit alkalmazzuk, akkor nem csak a geometria importálható, hanem az anyagtulajdonságok, megerősítések, terhek és a korábban alkalmazott építési fázisok is egyszerűen átvehetők. Ugyanakkor hátránya a programnak, hogy csak 2D-ben lehet bevinni geometriát a fent leírt működési elv miatt, ezért ha a modellezni kívánt üreg kialakítása változik, azt csak egy új keresztmetszet felvételével lehet lekövetni. Ebből az következik, hogy minden változásnál egy új „szeletet” kell létrehozni, így ha egy nagyon összetett üregrendszert kell vizsgálni, ez nagyon megbonyolítja a modellalkotást. Ahhoz hogy az üregrendszer pontos geometriája bevihető lehessen nagyon sűrűn kellene új keresztmetszeteket definiálni. Az egyik legfontosabb lépés a véges-elem háló generálása, ami szintén nagyon egyszerűen végrehajtható és a felhasználó tudja beállítani a háló sűrűségét és fajtáját. A hálógenerálás után, szükség esetén hálósűritésre is lehetőségünk van az általunk kritikusnak vélt részekben, így ha csak a szükséges helyeken sűrítjük a hálót a számítási fázisban sok időt spórolhatunk meg és így nem tévedünk az eredmények pontosságának a kárára. A sűritésre lehetőség van pontban, él mentén, felületen vagy akár térfogati sűritést is alkalmazhatunk. A számítási idő viszonylag gyors egyszerű modelleknél, de egy összetettebb feladat esetén már nem árt egy komolyabb teljesítményű számítógép is. Az eredmények megtekintésére számos lehetőség biztosított. A modell bármely pontján metszeteket tudunk létrehozni és többek között lehetőségünk van vektorosan, szintvonalasan vagy szín szerint ábrázolni az eredményeket.

#### **4.2 Peremelem módszer**

A peremelem módszer sok területen a végeselemes módszer hatékony alternatívája az elméleti kutatásokban és a gyakorlati számításokban. Olyan esetekben célszerű alkalmazni, amikor a vizsgált tartomány belsejében sem geometriai, sem szilárdságtani értelemben nincsenek jelentős változások. A módszer lényege, hogy az erős alakban megadott peremérték-feladatot különlegesen megválasztott súlyfüggvények használatával átírjuk olyan gyenge alakba, amelyben az ismeretlen függvénynek egy tetszőleges pontbeli értéke kifejezhető ezen függvénynek a vizsgált tartomány peremén felvett jellemzőivel. Így - ha a peremet diszkretizáljuk - akkor az ott felvett csomóponti értékek a tartomány belsejében felvett paraméterektől függetlenül meghatározhatóak, majd a tartomány belső pontjaiban felvett értékek egyenként számíthatók a peremen kapott értékekből. [4]

A módszer előnyei:

- a feladat dimenziószáma általában eggyel csökken (térbeli feladatok esetén a tartomány felületére felírt integrálegyenleteket kell numerikusan megoldani, síkfeladatok esetén pedig a tartomány kontúrgörbéjére felírt integrálegyenletek adják a megoldást),
- a dimenziószám csökkenéséből adódóan ugyanazon feladatot tekintve a végeselemes technikához képest legalább egy nagyságrenddel kevesebb a csomópontok száma, és

így természetesen kisebb számítógépes kapacitásra van szükség és jóval kisebb a futási idő.

A módszer hátrányai közé tartozik, hogy

- a megoldást adó lineáris egyenletrendszer mátrixa, eltérően a véges elemes eljárásoktól, nem sávós szerkezetű és nem szimmetrikus,
- az egyenletrendszer megoldhatóságát jellemző kondíciószám speciális esetekben nagyon nagy lehet, ami numerikus stabilitási problémákat okozhat.

A peremelemes technika általában csak a peremeken (2D feladatoknál a kontúrvonalakon, 3D feladatoknál a határoló felületeken) alkalmaz finitizálást, ezért a tartomány belsejével nem foglalkozik, így nem minden esetben célszerű az alkalmazása. A peremelemes módszeren belül megkülönböztethetünk direkt és indirekt módszert. A direkt módszer esetében feladatban szereplő ismeretleneknek van közvetlen fizikai jelentése, míg az ún. indirekt módszernél, általában valamilyen peremen vett potenciálfüggvény az ismeretlen. [4]

#### 4.2.1 Examine 2D

Az Examine 2D az előzőekben leírt peremelem módszeren alapuló kétdimenziós szoftver, amit közetkörnyezetben lévő felszíni vagy felszín alatti üregek vagy műtárgyak modellezésére tudunk használni. A végelemes módszerekkel ellentétben a peremelem módszer csak az üregek körüli határoknál generál hálót, így nincs szükség bonyolult a teljes térfogatot kitöltő végelemes-háló generálására. Ezzel a módszerrel nagyon gyorsan tudjuk vizsgálni a feszültségek és az elmozdulások alakulását üregek, alagutak környezetében. A program használatánál nincs szükség hosszas számításokra, ugyanis az eredményeket automatikusan generálja, sőt a vizsgált geometria változtatásával egy időben tudjuk a környezet feszültség vagy elmozdulás viszonyait is vizsgálni. A program kitűnően alkalmas egy földalatti műtárgy tervezés kezdeti fázisában vagy egy már meglévő üreg környezetének gyors elemzésére. [7] Ennek segítségével pár perc alatt kaphatunk közelítő eredményeket az adott feladathoz, persze azt nem szabad elfelejteni, hogy ez csak olyan esetekben ad pontos megoldást, amikor vizsgált tartomány belsejében sem geometriai, sem szilárdságtani értelemben nincsenek jelentős változások, egyébként a biztonság kárára is tévedhet.

#### 4.2.2 Examine 3D

Az Examine 3D közetben épített szerkezetek vizsgálatára kifejlesztett szoftver, ami elsősorban feszültség analízisre alkalmas és a direkt peremelem módszer elvén alapszik. Emiatt a program finitizálást csak a 3D-s felületek határán alkalmaz, és nem foglalkozik a vizsgált tartomány belsejével. [8] Ezért a modellezés során nincs is lehetőség a közet rétegződésének megadására. A felhasználói felület az előző szoftverekhez képest nagyon barátságos, viszont lehetőség van 3D-ben történő koordináták megadására, így az  $RS^3$  programhoz képest sokkal pontosabban tudjuk a vizsgált üregek geometriáját bevinni. További nehézsége a program használatának a felület elemek pontos definiálása. Ha a felület-elemek nem illeszkednek tökéletesen, akkor a számítást el se lehet végezni. A hiba megtalálása és javítása nagyon körülményes főként, ha egy bonyolult modellel van dolgunk. Az alkalmazott technika révén a számítás időtartalma sokkal kedvezőbb. Az eredmények

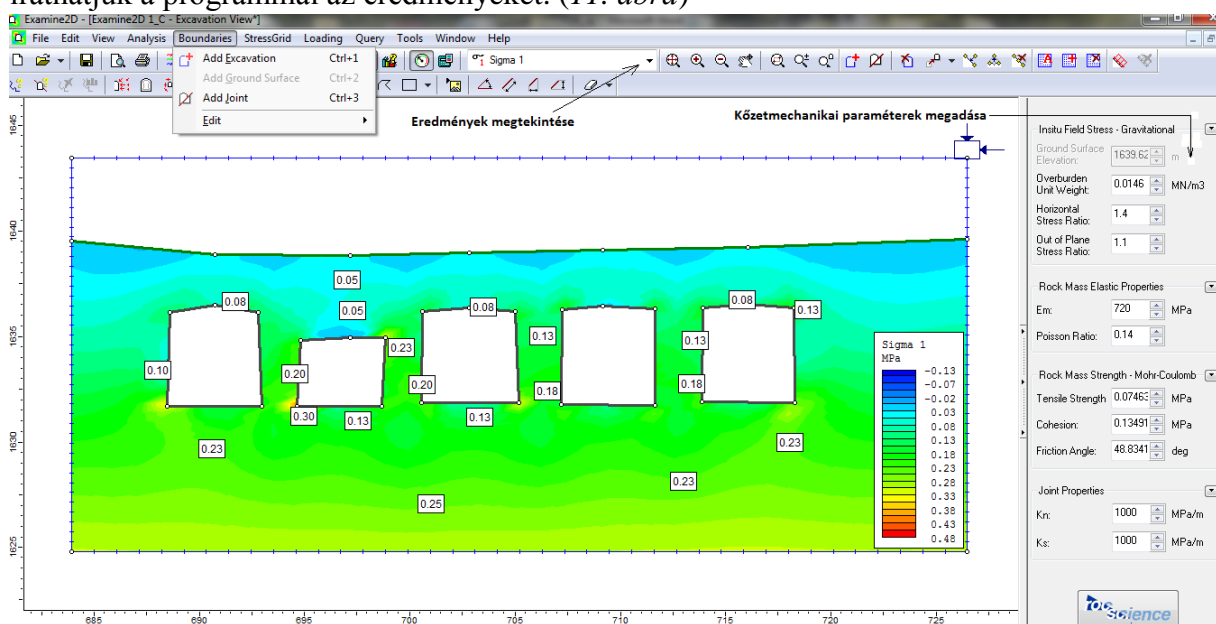
révén a feszültségek mellett az elmozdulások és a teherbírás alakulását is nyomon követhetjük.

## 5. Kétdimenziós modellvizsgálat

A 2D-s modellezés elvégzéséhez először is kijelöltem három, a pincerendszerre jellemző keresztmetszetet, amelyekre ezután rendre A, B és C jelű keresztmetszetként fogok hivatkozni (3. ábra). A további fejezetekben ezeknek a vizsgálatát fogom bemutatni. Elsőként a korábban ismertetett legegyszerűbb Examine 2D szoftver segítségével vizsgáltam a kiválasztott metszeteket. Ennek a programnak nagy előnye, hogy rendkívül gyorsan képet kaphatunk vele a feszültségek és elmozdulások alakulásáról. A kapott eredmények pontosságának elemzésére a 7. fejezetben fogok kitérni, amikor is ez a peremelemes módszer és a kétdimenziós végelem módszer eredményeit hasonlítom össze.

### 5.1 Modellvizsgálat Examine 2D-vel

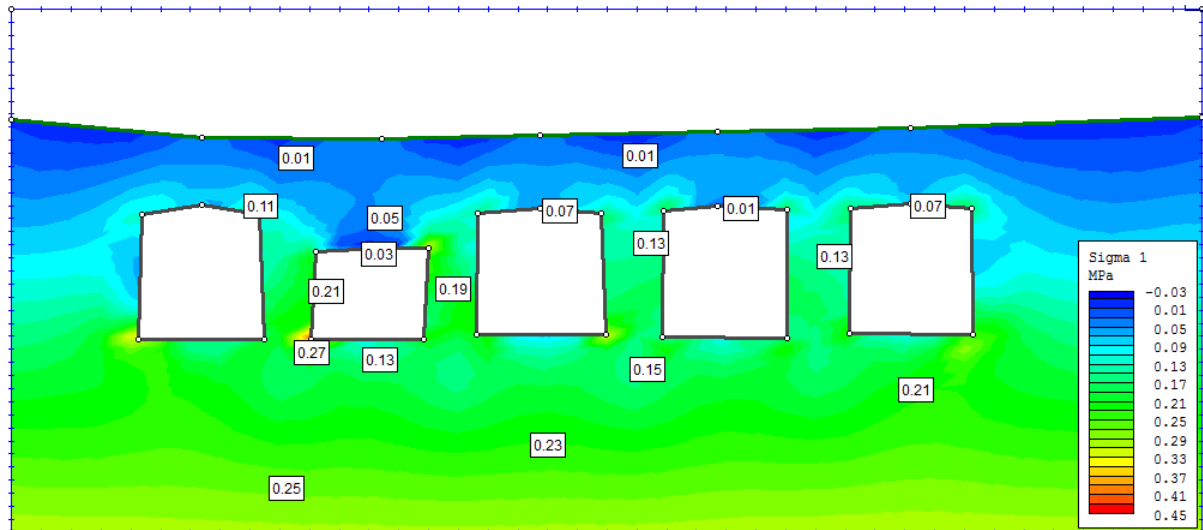
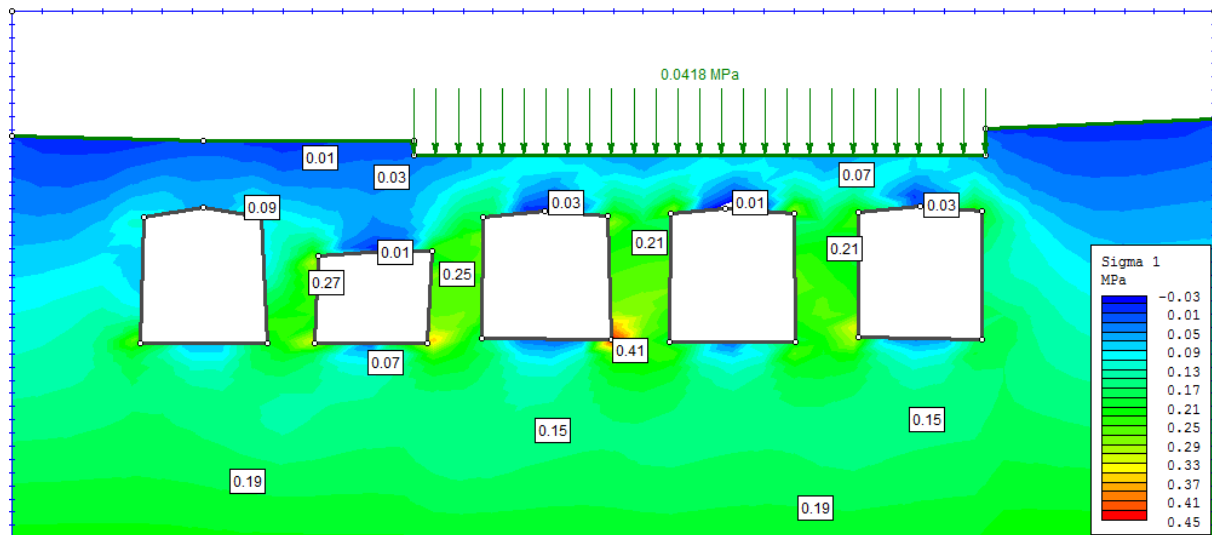
Ezzel a szoftverrel a modellépítés rendkívül gyorsan elvégezhető. Az üregek helyzetét többféleképpen is megadhatjuk. A leggyorsabb eljárás, ha valamilyen rajzoló program segítségével megrajzolt geometriát DXF fájl formátumból beimportáljuk a programba. Másik lehetőség, ha ismerjük az üregek sarokpontjainak koordinátáját, ezeknek a bemásolásával is hasonló eredményre jutunk és természetesen magában a szoftverben is megrajzolhatjuk a szükséges geometriát. Az első üreg bevitele után a program automatikusan generál egy vizsgálati területet és azonnal eredményeket szolgáltat. Az üreg geometriájának változtatásával lehetőség van az eredmények alakulásának egyidejű nyomon követésére is. A program a vizsgálati területen belül egyféle anyagot tud kezelni, aminek tulajdonságait a jobb oldali táblázatban tudjuk megadni. Ezek után már nincs más dolgunk csak a számunkra szükséges eredmények megtekintése. Az eredmények megjelenítésénél lehetőségünk van színnel kitöltött vagy szintvonalas ábrázolási módra, illetve az általunk kívánt pontban ki is írathatjuk a programmal az eredményeket. (11. ábra)



11. ábra. Examine 2D beállításai

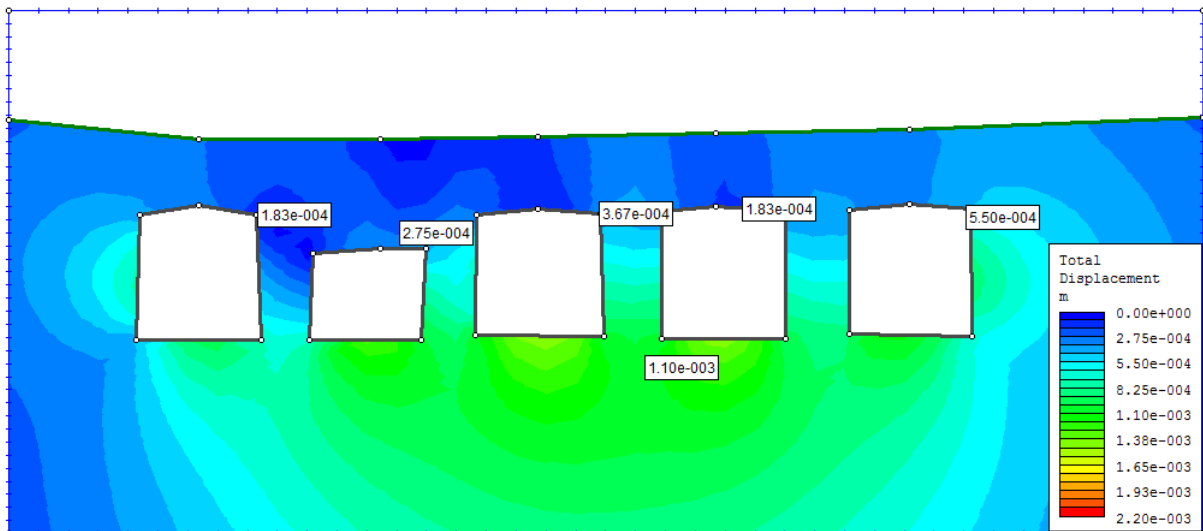
## 5.1.1 A C jelű keresztmetszet vizsgálata

A következő ábrák segítségével a feszültségek, elmozdulások és a teherbírási tényező alakulását fogom bemutatni az eredeti és a terhelt állapot között. A C jelű keresztmetszet esetében a feszültségeknél a pincék közötti falakban tapasztalhatunk 20-30%-os növekedést a terhelés hatására. Máshol a változás nem mondható jelentősnek. (12-13. ábra)

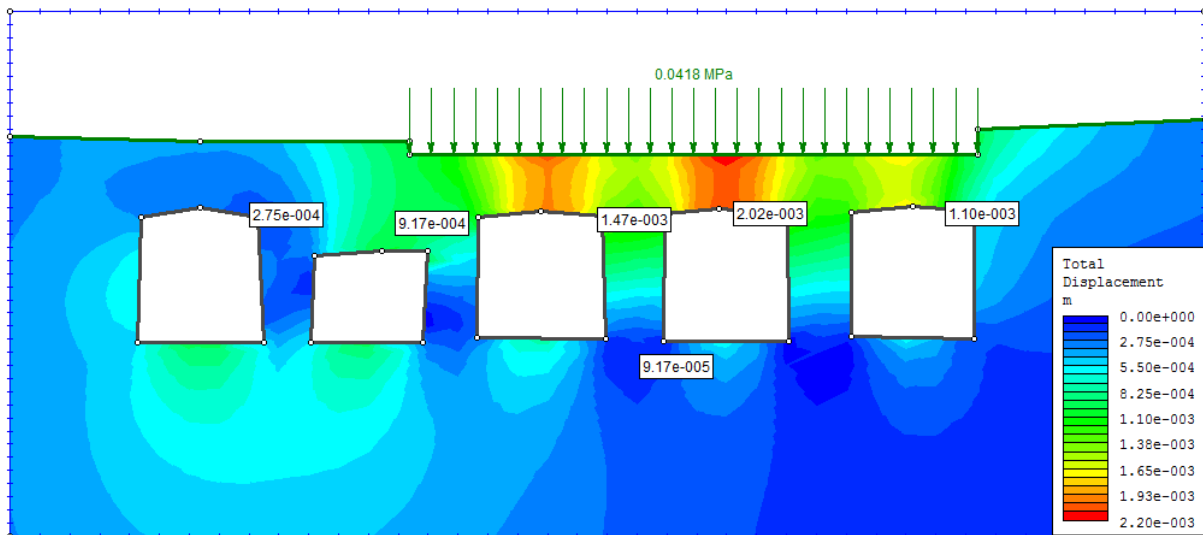
12. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség eredeti állapotban13. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség végleges állapotban

Az elmozdulások alakulásánál 1-2 mm-es süllyedésnél nagyobb érték sehol sem keletkezik (14-15. ábra) és a teherbírási tényező vizsgálatánál sem tapasztalhatunk semmilyen problémát a terhelés hatására (16-17. ábra). Így ennél a keresztmetszetről várhatóan a részletesebb vizsgálatnál is kedvező eredményeket kaphatunk a pincerendszer állékonyságával kapcsolatban.

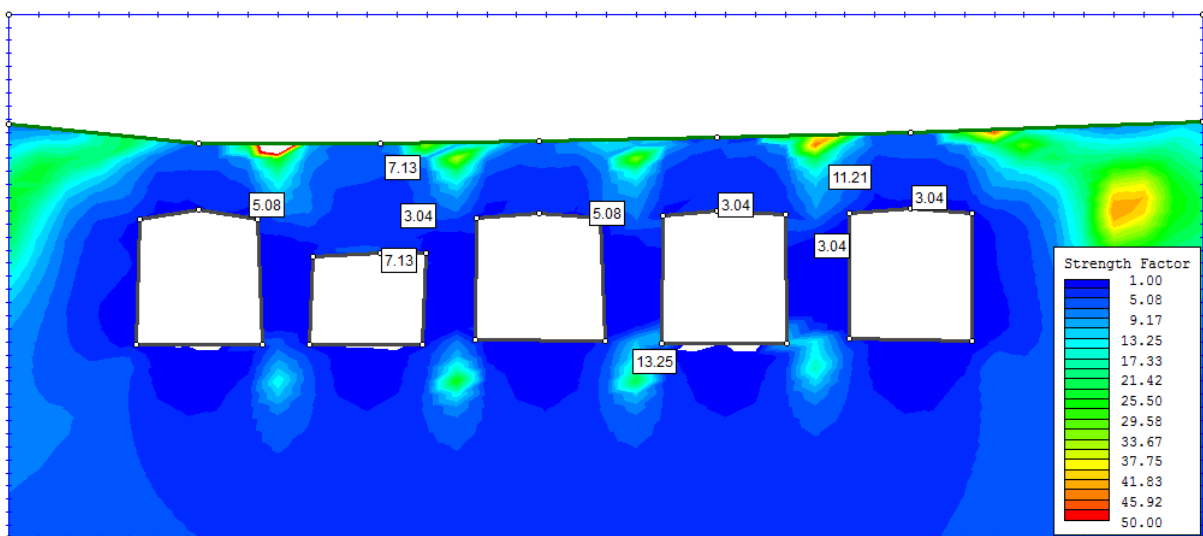




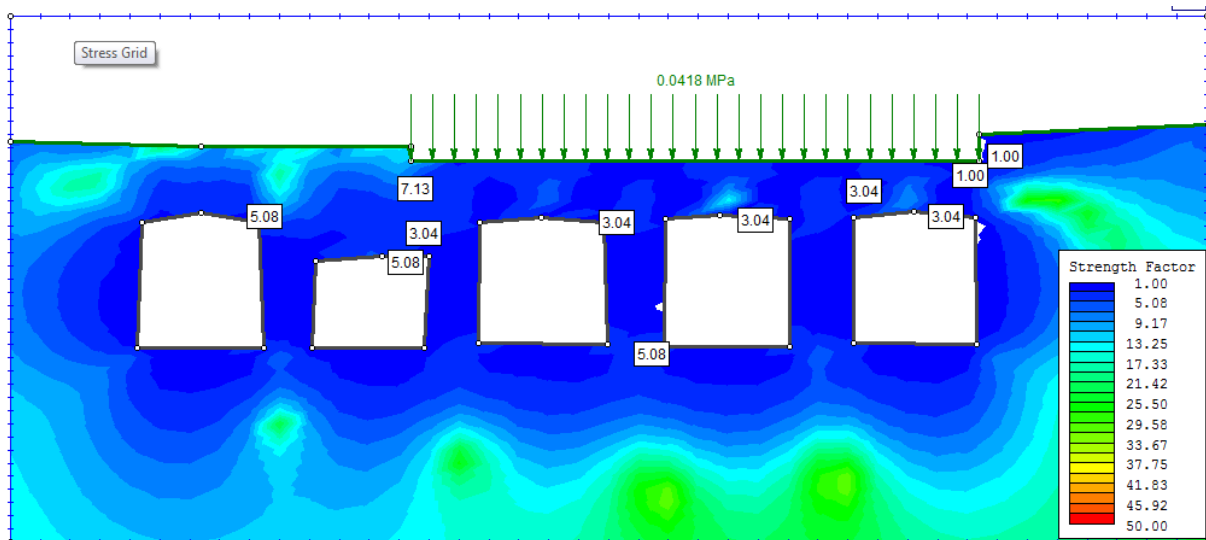
14. ábra. Az elmozdulások alakulása eredeti állapotban



15. ábra. Az elmozdulások alakulása végleges állapotban



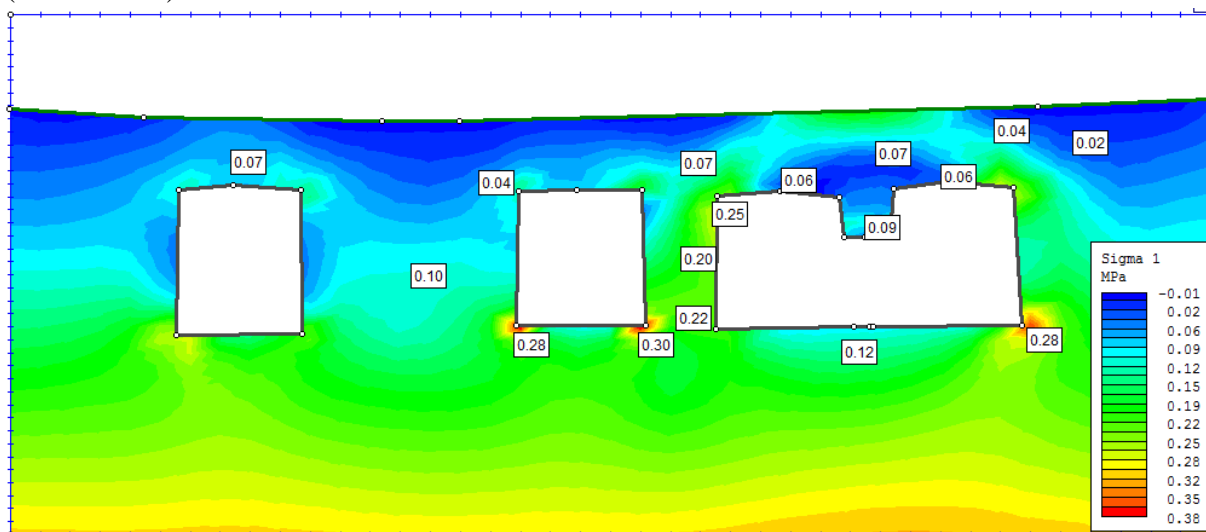
16. ábra. Az teherbírási tényező alakulása eredeti állapotban

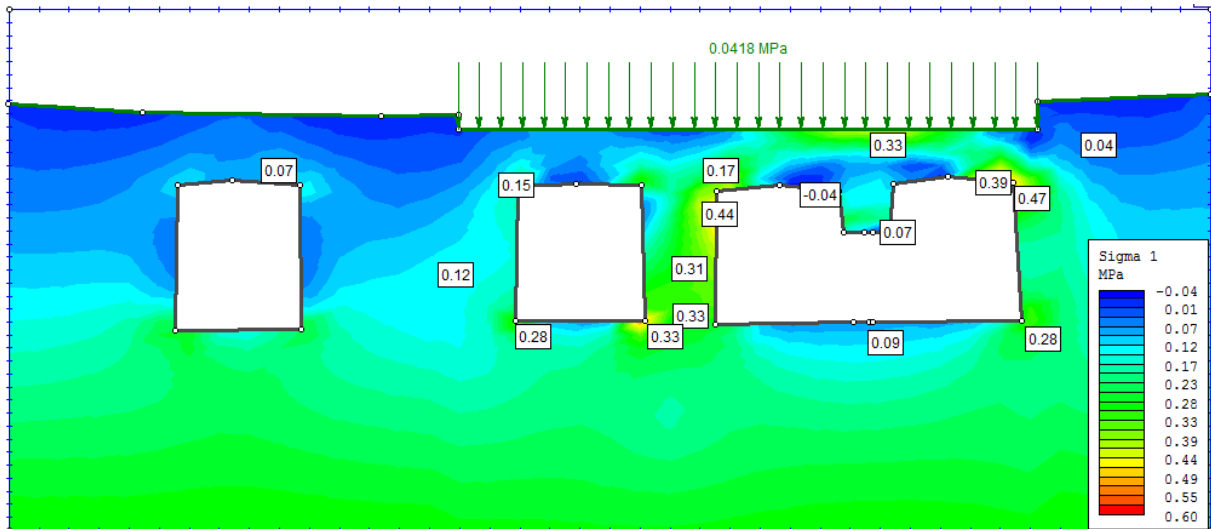


17. ábra. Az teherbírási tényező alakulása végleges állapotban

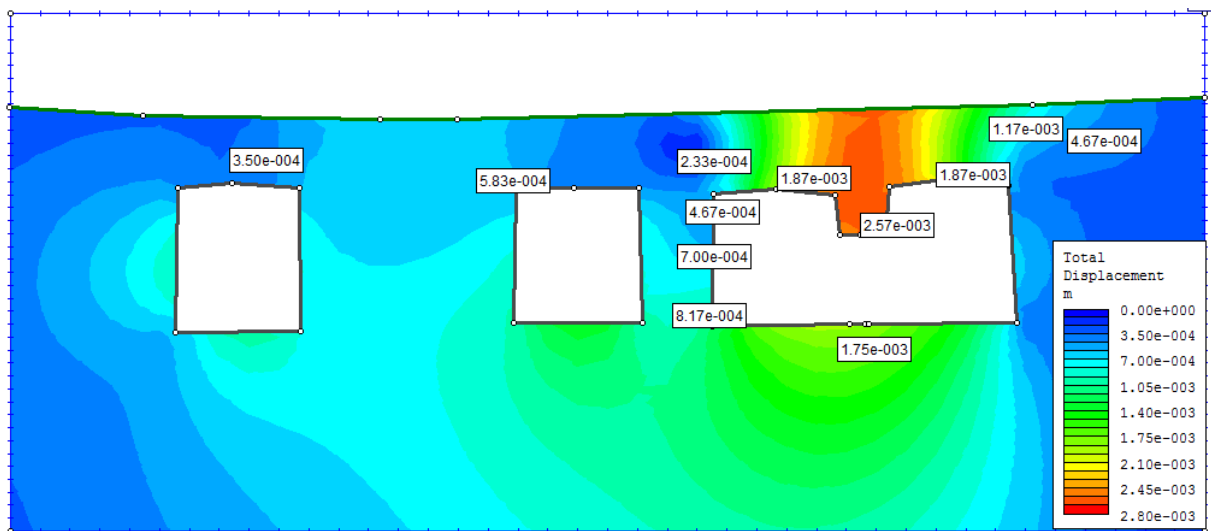
### 5.1.2 A B jelű keresztmetszet vizsgálata

A B jelű keresztmetszetenél a feszültségek esetében a pince főté széleinél illetve a pincék közötti falakban tapasztalható egy 50-60% feszültség növekedés a terhelés hatására (18-19. ábra). Az elmozdulások alakulását vizsgálva az eredeti állapotban kapott eredményeket levonva a végső állapotban kapottból, a kritikus helyeken 5-6 mm süllyedést tapasztalhatunk. (20-21. ábra)

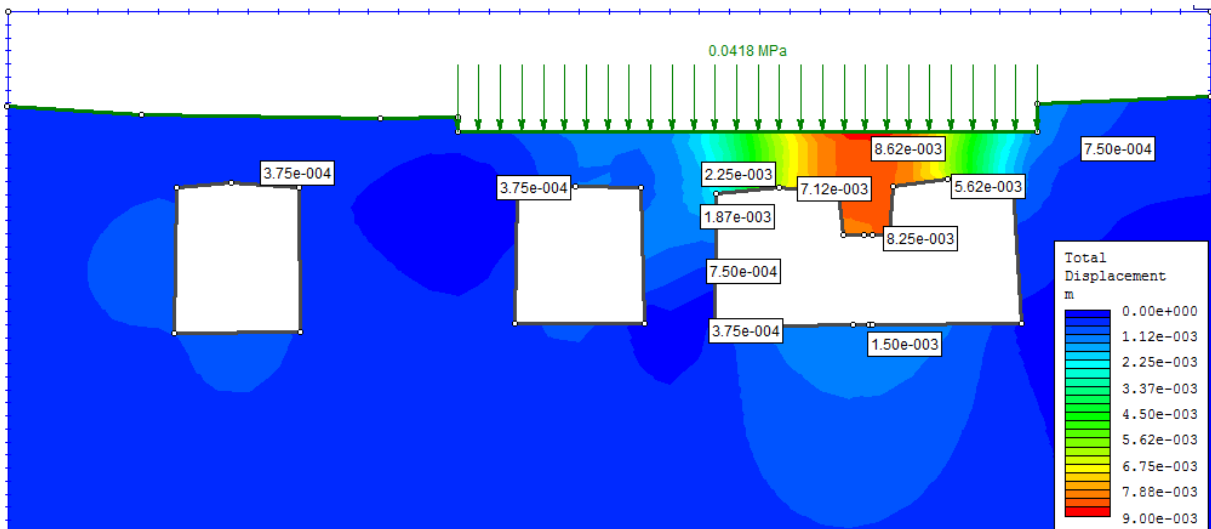
18. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség eredeti állapotban



19. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség végleges állapotban

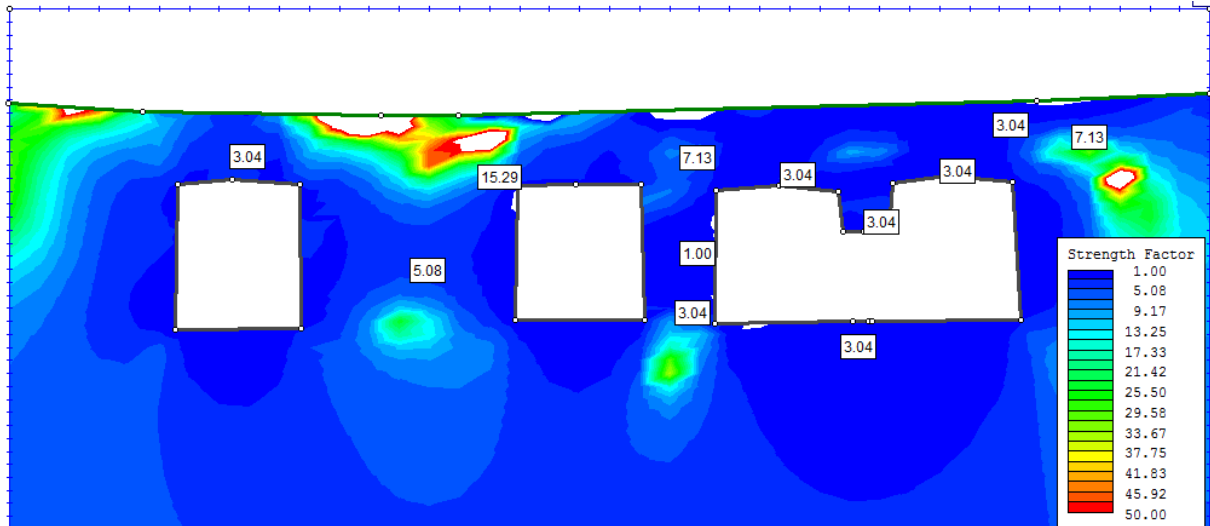


20. ábra. Az elmozdulások alakulása eredeti állapotban

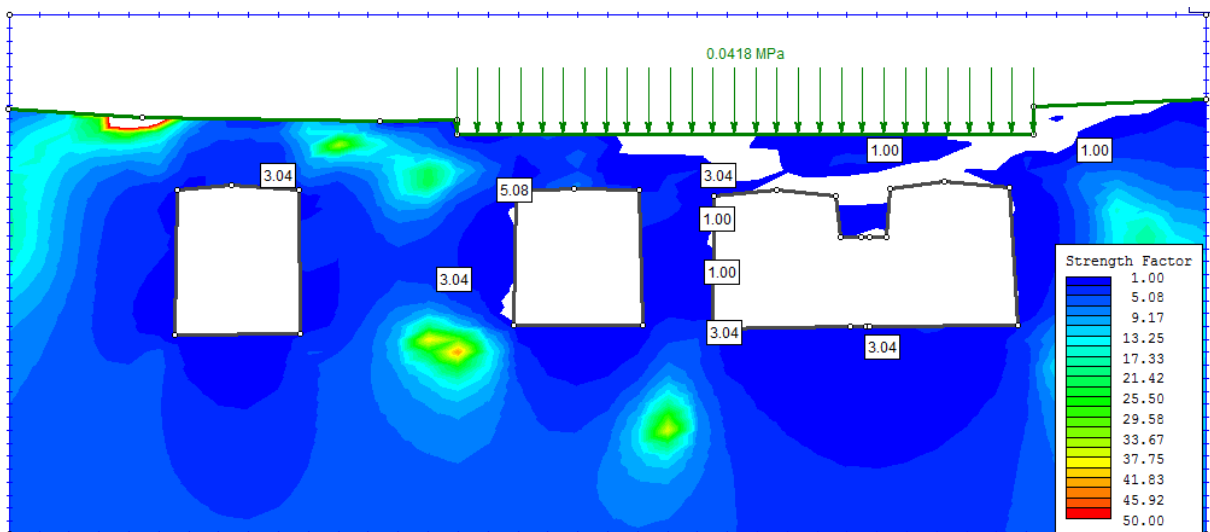


21. ábra. Az elmozdulások alakulása végleges állapotban

A következő két ábrán (22-23. *ábra*) a teherbírési tényező alakulását figyelhetjük meg. Ez a tényező a kőzet teherbírásának és a kőzetben létrejövő feszültségeknek az arányát mutatja meg. Tehát ha ez az érték 1-nél kisebb, akkor azon a részen nagyobb feszültségek keletkeznek, mint amit kőzet tönkremenetel nélkül el tud viselni. Az itt kapott eredményeknél már megfigyelhető, hogy a jobb oldali két pince felett a végső állapotban probléma alakul ki, mivel elég nagy területen 1 alá csökken a teherbírás.



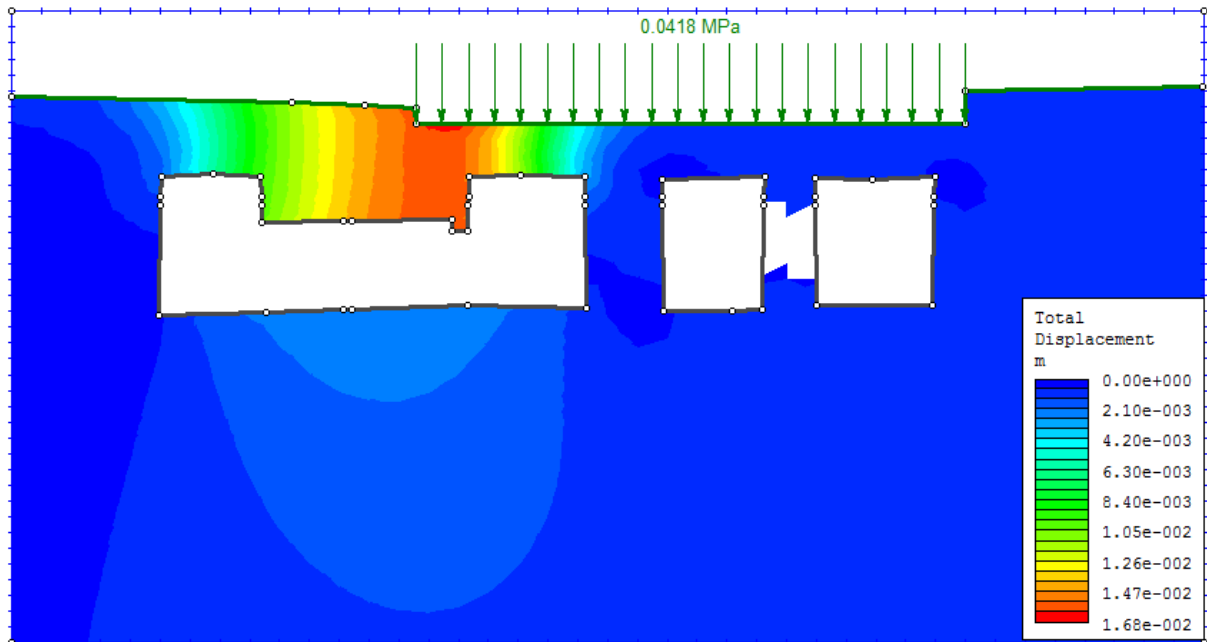
22. *ábra.* Az teherbírési tényező alakulása eredeti állapotban



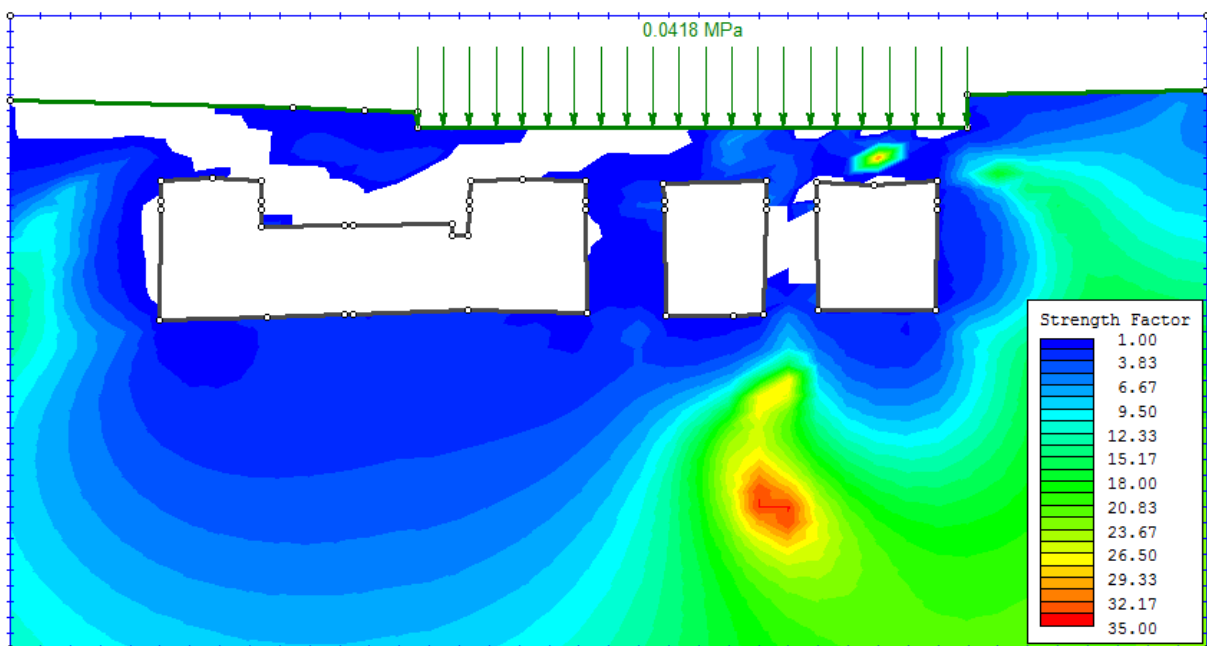
23. *ábra.* Az teherbírési tényező alakulása végleges állapotban

### 5.1.3 A jelű keresztmetszet vizsgálata

Az A jelű keresztmetszetet esetén kiderült, hogy ilyen formában 2D-ben nem érdemes vizsgálni, ezért az eredményeit részletesen nem is fogom bemutatni. A keresztmetszet kialakításának megismerése szempontjából két *ábra* található az elmozdulások és a teherbírési tényező alakulásáról (24-25. *ábra*). Ezeken látszik, hogy a korábbiakhoz képest egy nagyságrenddel nagyobb süllyedések keletkeznek, és hogy a kőzet jelentős területen elveszti a teherbírását.



24. ábra. Az elmozdulások alakulása végleges állapotban

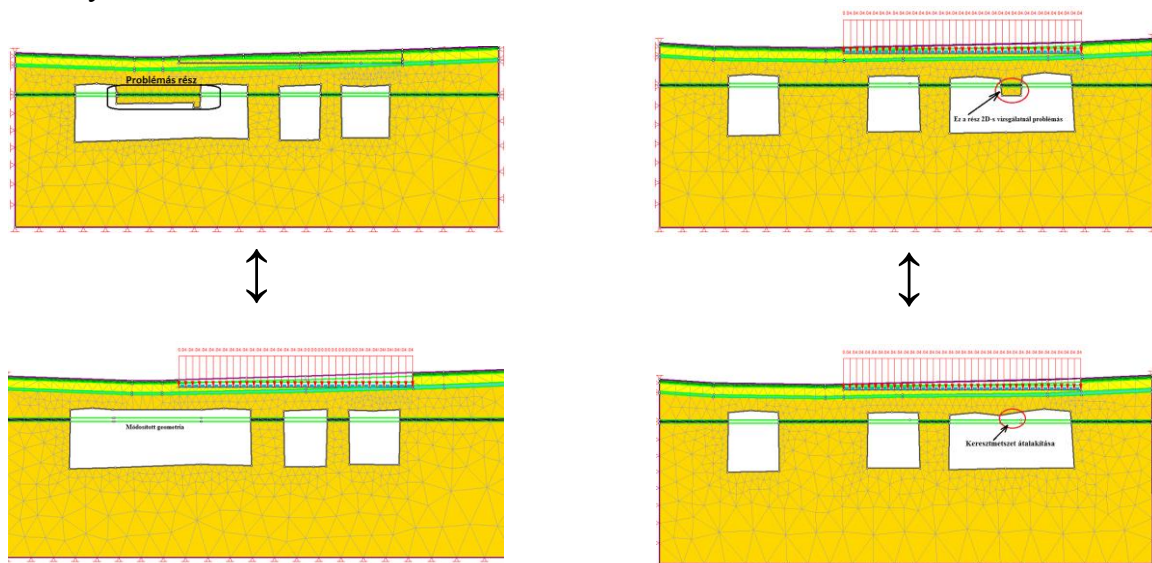


25. ábra. Az teherbírési tényező alakulása végleges állapotban

## 5.2 Modellvizsgálat Phase2-vel

A program segítségével a korábban kiválasztott keresztmetszetek mindegyikére elvégeztem a modell vizsgálatokat és azt tapasztaltam, hogy csak a C jelű keresztmetszet esetében kaptam reálisnak mondható eredményeket. Ennek oka elsősorban a kétdimenziós modellezés hiányosságaiban rejlik, mivel a pincék közötti átjárónál a keresztirányú átboltozódás hatását nem tudja figyelembe venni. Ennek következményeképpen az A és B jelű keresztmetszeteknél a számítás során állékonyságvesztést vagy lokálisan túlságosan nagy elmozdulásokat tapasztaltam. A 26. ábrán a pincék geometriájából adódó problémás részeket és azok kezelésére tett kísérletek láthatók, amelyekkel sikerült értékelhető eredményeket

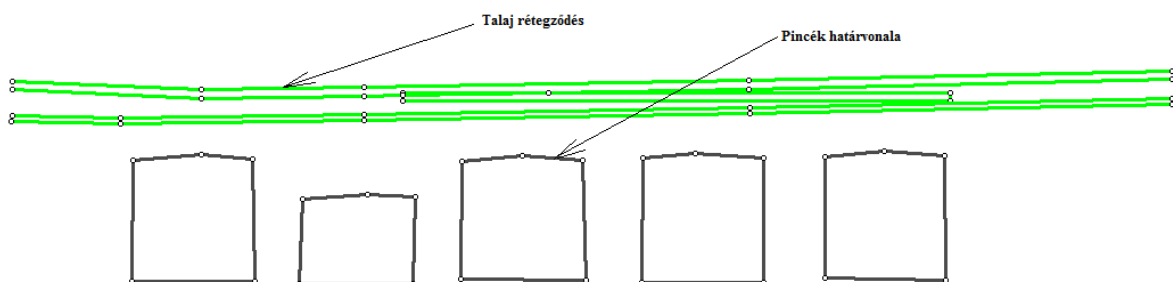
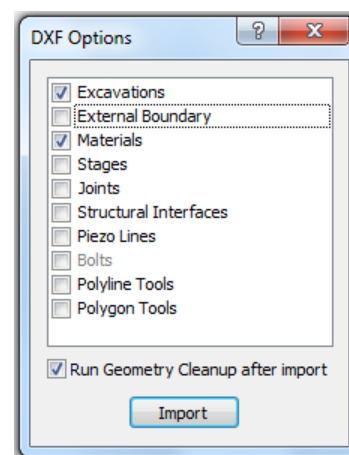
kapni, viszont a kapott eredményeket csak a C jelű keresztmetszet esetén fogom ismertetni. A szoftver használatának és beállításainak rövid ismertetése után térek rá a kapott eredményekre.



26. ábra. A pincék geometriájának módosítása

### 5.2.1 A C keresztmetszet modellezésének lépései

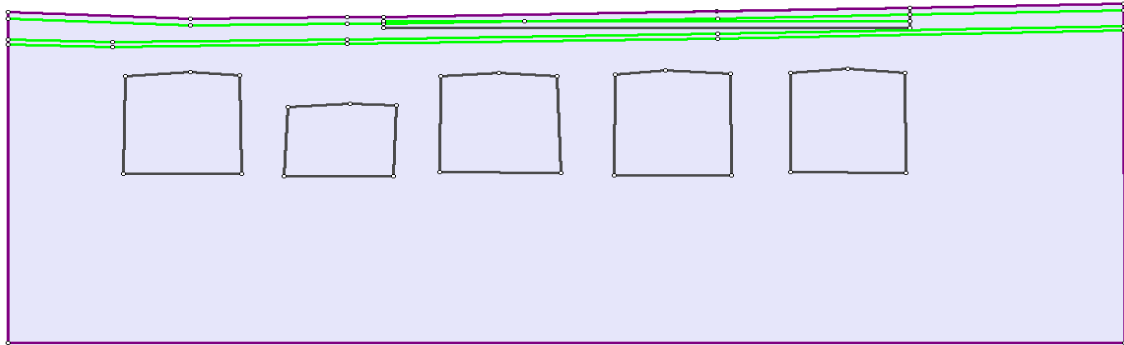
Első lépésként az üregek, a közetrétegződések és a felszín geometriáját kell megalkotni. Ezeket korábban már megrajoltam ezért egyszerűen AutoCad Dxf fájlok segítségével importáltam be a programba (27. ábra).



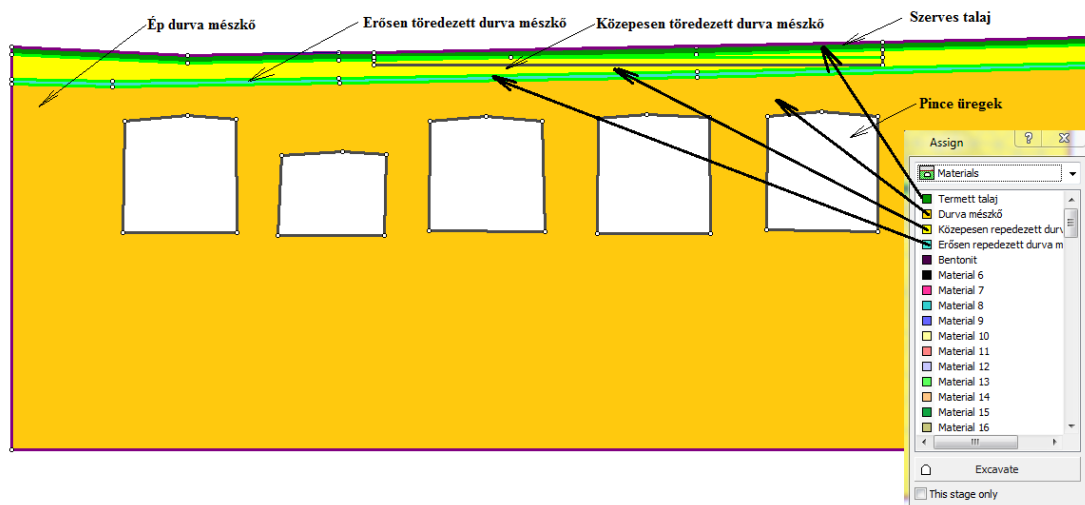
27. ábra. A pincék keresztmetszetei és talajrétegződések importálása Dxf fájlból

A következő lépésben megadtam a vizsgálandó terület és a majdani lemezalap határvonalait (28. ábra). Ezután a jól átláthatóság miatt színekkel különböztettem meg a talaj és közetrétegeket, majd kiemeltém a már meglévő pincék keresztmetszeteiből a kőzetet (29. ábra).



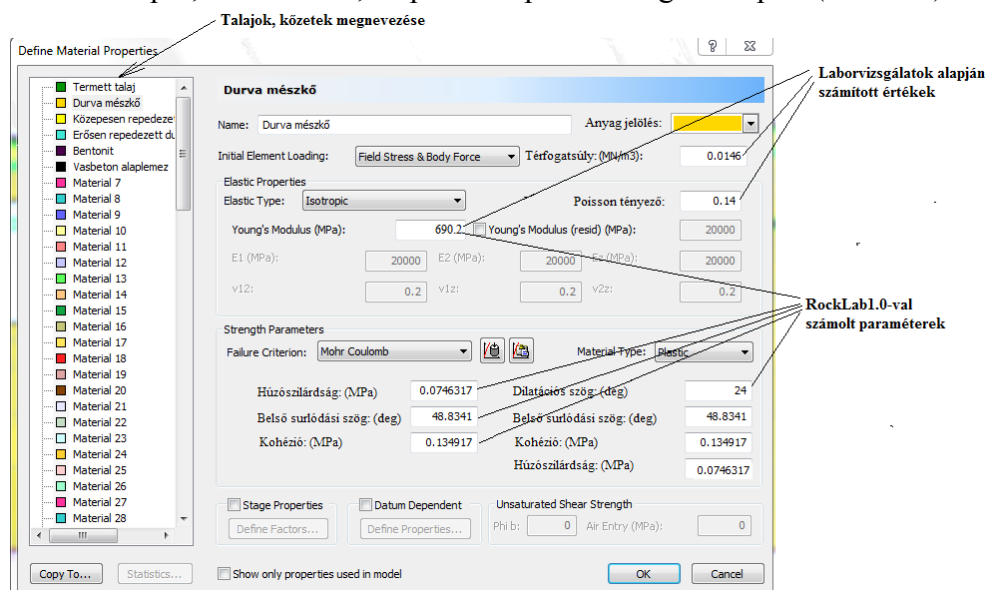


28. ábra. A modell lehatárolása, lemezalap helyének felvétele

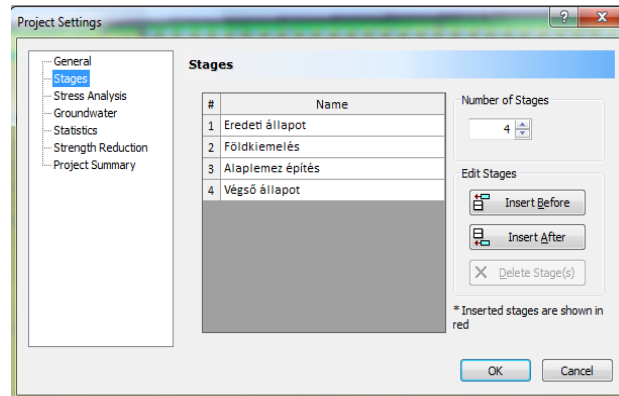


29. ábra. A különböző rétegek felvétele, pince üregek kiemelése

A színekkel definiált talaj és kőzetrétegekhez a laborvizsgálatok által meghatározott és a RockLab1.0-val számolt paramétereket rendeltem, amiket a 4-6. táblázatban foglaltam össze (30. ábra). Ezek után a projekt beállítások menüpontban létrehoztam az építési fázisokat, úgymint eredeti állapot, fölkimelés, alaplemez építés és végső állapot. (31. ábra)



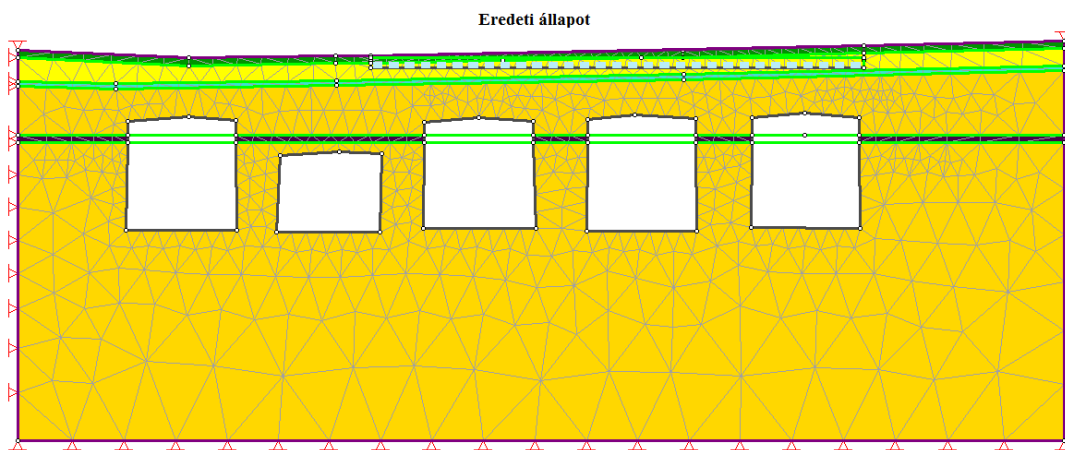
30. ábra. A talajok és kőzetek paramétereinek megadása a 4-6. táblázat alapján



31. ábra. Az építési fázisok létrehozása

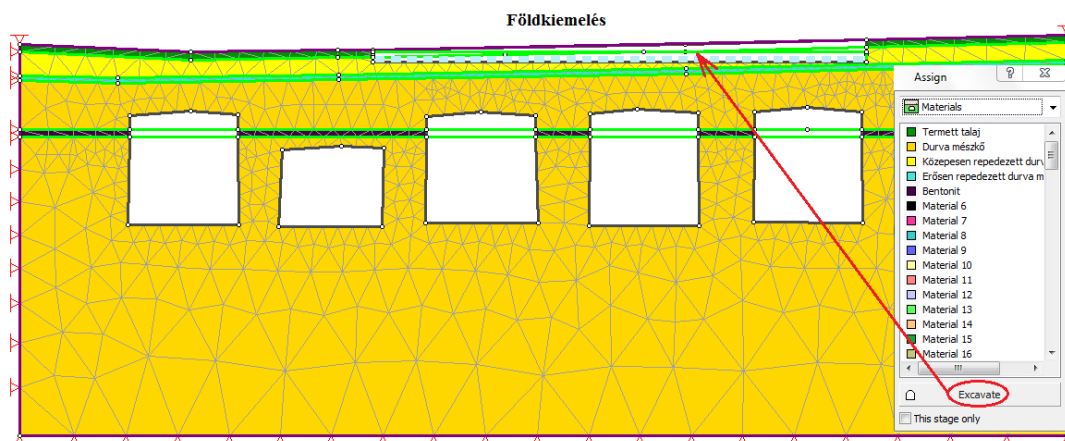
Építési fázisok beállításai:

1. Eredeti állapot: Ez a kiinduló helyzet, a terület jelenlegi állapota (32. ábra).



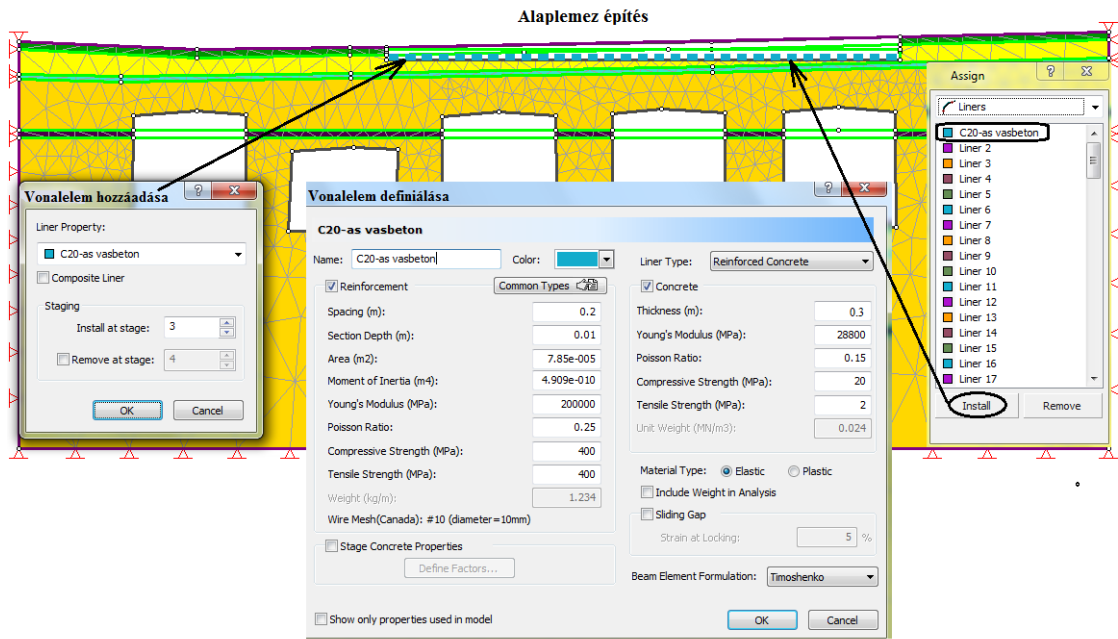
32. ábra. Eredeti állapot

2. Földkiemelés: A munkafolyamat első része, az alapozási sík mélységéig a talajt és a kőzetet kiemelik. Ez várhatóan az eredeti állapothoz képest egy kismértékű feszültség csökkenéssel jár, hiszen a kiemelt föld mennyiségének súlyával arányosan fellelegzik a közetkörnyezet (33. ábra).



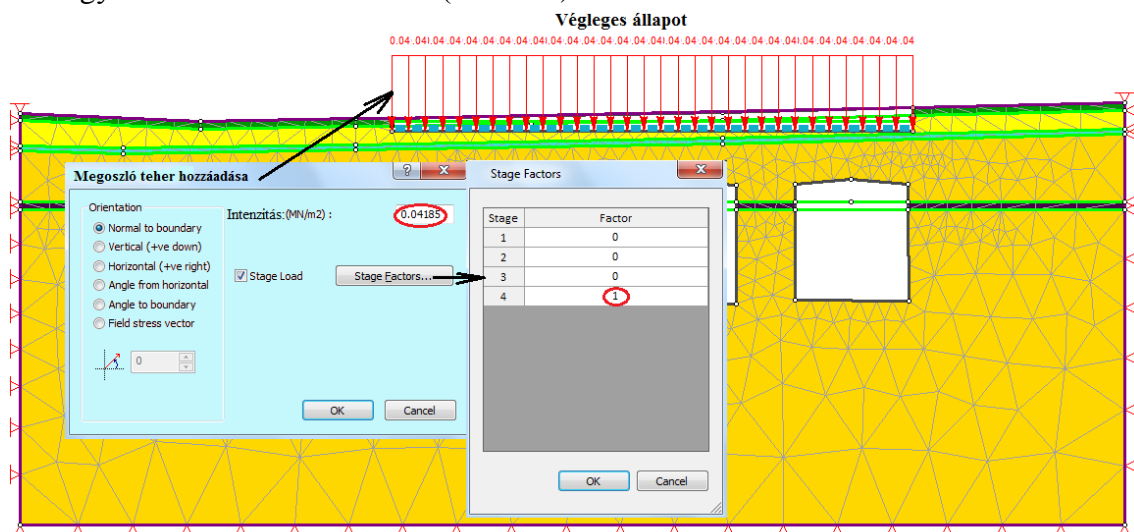
33. ábra. Földkiemelés

3. Alaplemez építés: A munkafolyamat következő része, amikor elkészül a lemezalap. A modellezésnél ekkor egy vonalelemet hozok létre az alapozási sík mentén, aminek egy 30cm vastagságú, C20-as betonminőségű, hálós vasalással erősített vasbeton anyagot definiálok. A vasalást  $\Phi 10$ -es átmérőjű, mindkét irányban 20 cm-enként elhelyezett hálós kialakításúra tervezem, aminek paramétereit a program számolja. A beépített lemezalapot ebben a fázisban aktiválom is (34. ábra).



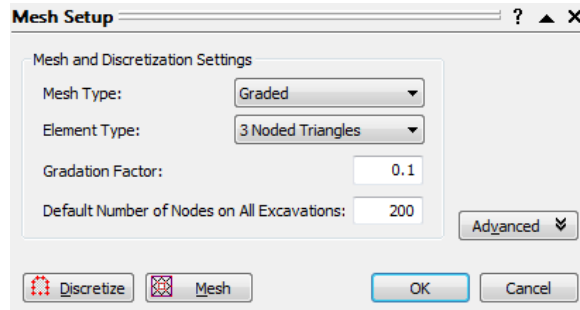
34. ábra. Alaplemez építés

4. Végző állapot: Az építkezés befejezése utáni állapot. Ekkor a ház összes terhét a lemezalapon egyenletesen megoszló teherként veszem figyelembe, melynek intenzitását, a statikus által megadott  $q_k=31\text{kN/m}^2$  értékűre vettem fel. Pontosabb megoldás lenne, ha a falakról lejövő erőket, koncentrált erőként működtetném, de az ebből keletkező különbségeket elhanyagolom, mivel a lemezalap várhatóan úgy is egyenletessé teszi a terhelést (35. ábra).

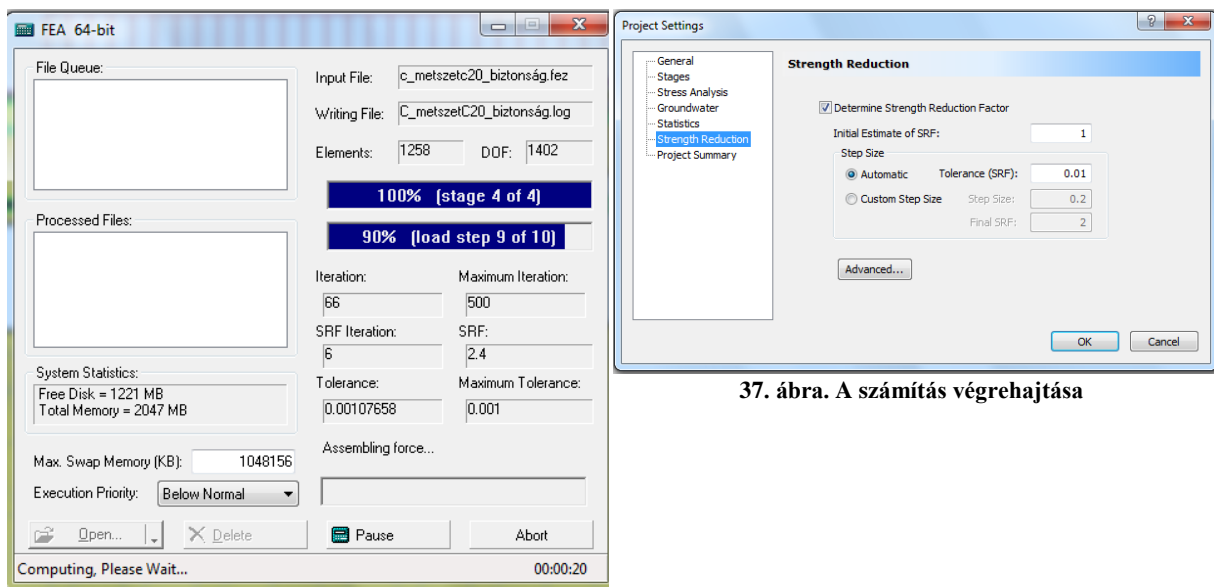


35. ábra. Végleges állapot

Végezetül egy kellően finom végeleemes háló generálok (36. ábra), majd lefuttatom a számítást (37. ábra). A számítást 2 módon futtatom le, először feszültségeket, alakváltozásokat vizsgálom, másodjára az állékonysággal szembeni biztonságot számoltatom ki a programmal.



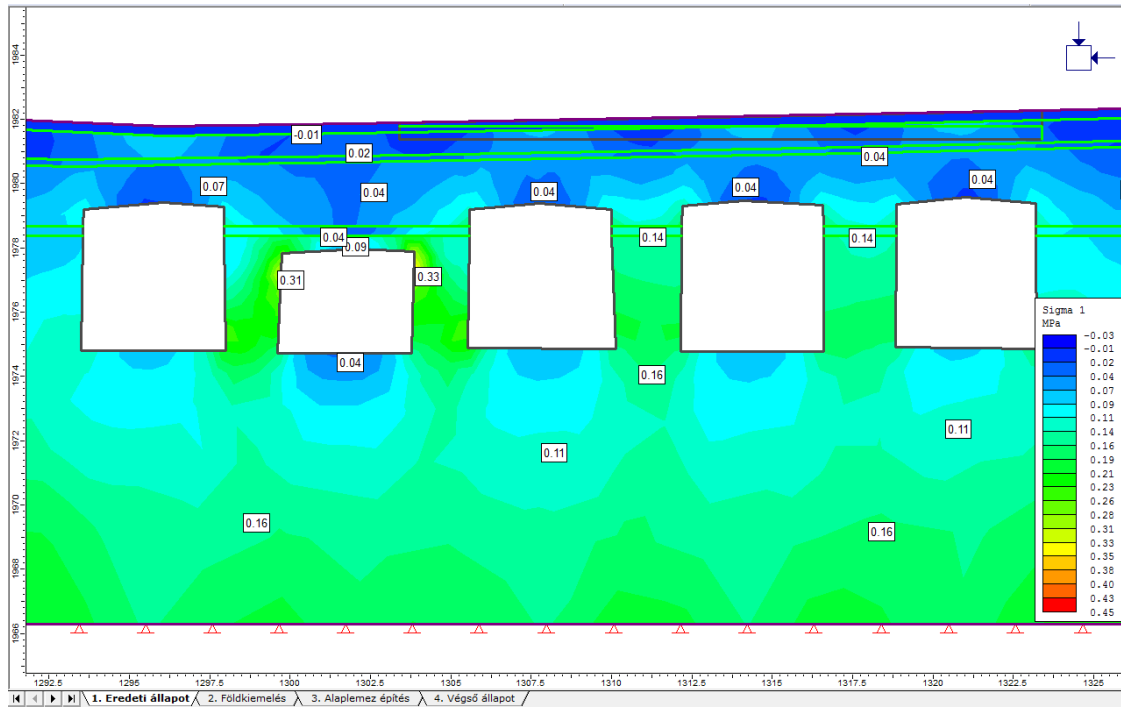
36. ábra. Végeleemes háló generálása



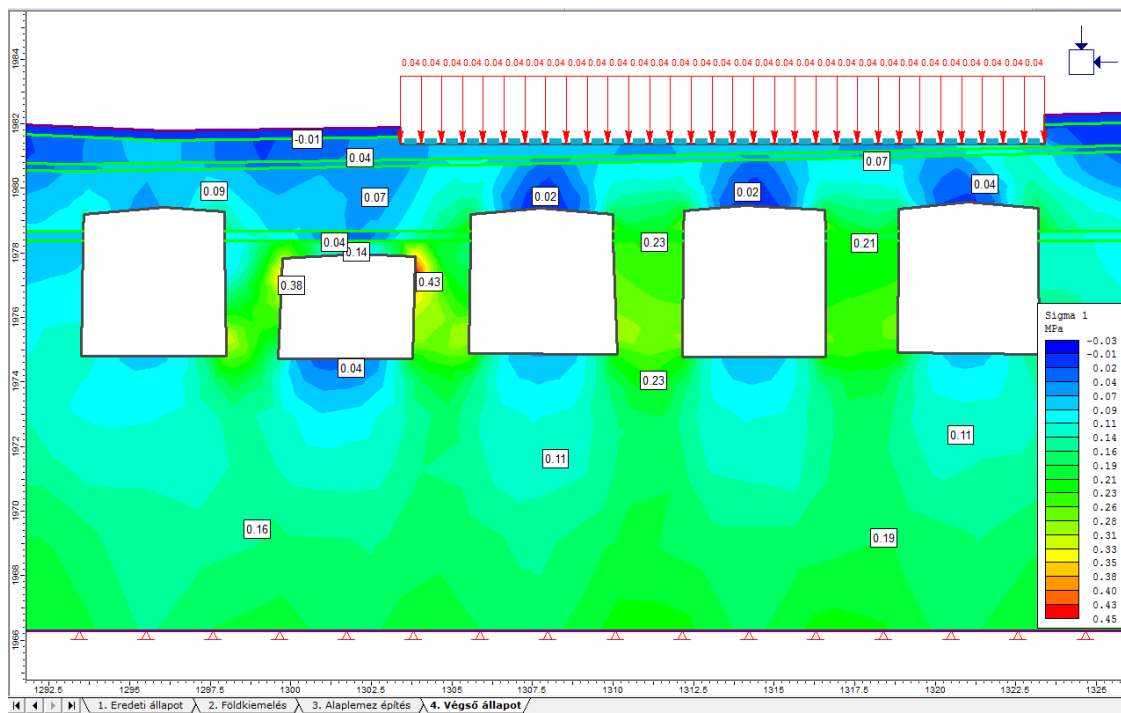
37. ábra. A számítás végrehajtása

## 5.2.2 A C keresztmetszet vizsgálatának eredményei száraz állapotban

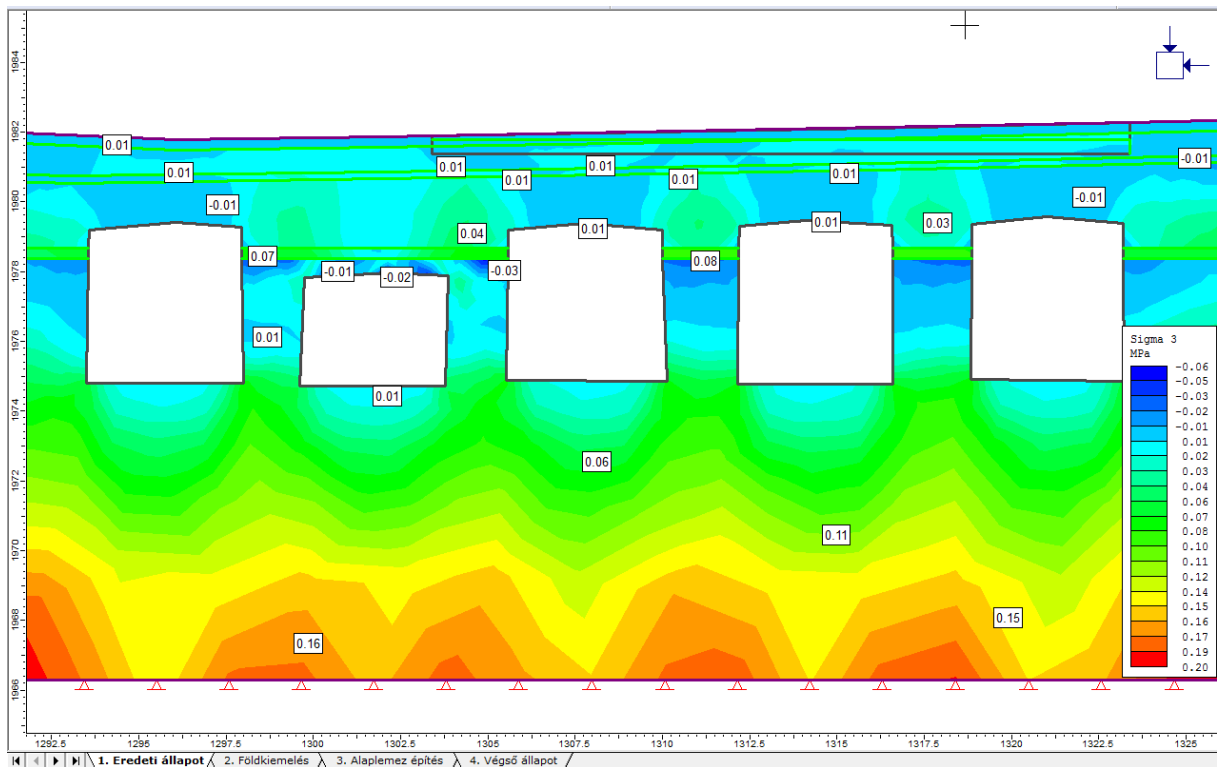
Az eredmények értékelésénél, az eredeti állapotot és a végső állapotot hasonlítom össze, mert a két közbenső munka fázis (földkiemelés, alaplemez építés) nem ad mértékadó eredményeket. Először a feszültségek változását vizsgálom (38-39. ábra). A  $\sigma_1$  feszültségek a pincék közötti falakban változtak jelentős mértékben, ami egy 30-60%-os növekedést jelent az eredeti állapothoz képest. A  $\sigma_3$  feszültségek esetében a pincék fötéje feletti csökkenés figyelhető meg. (40-41. ábra)



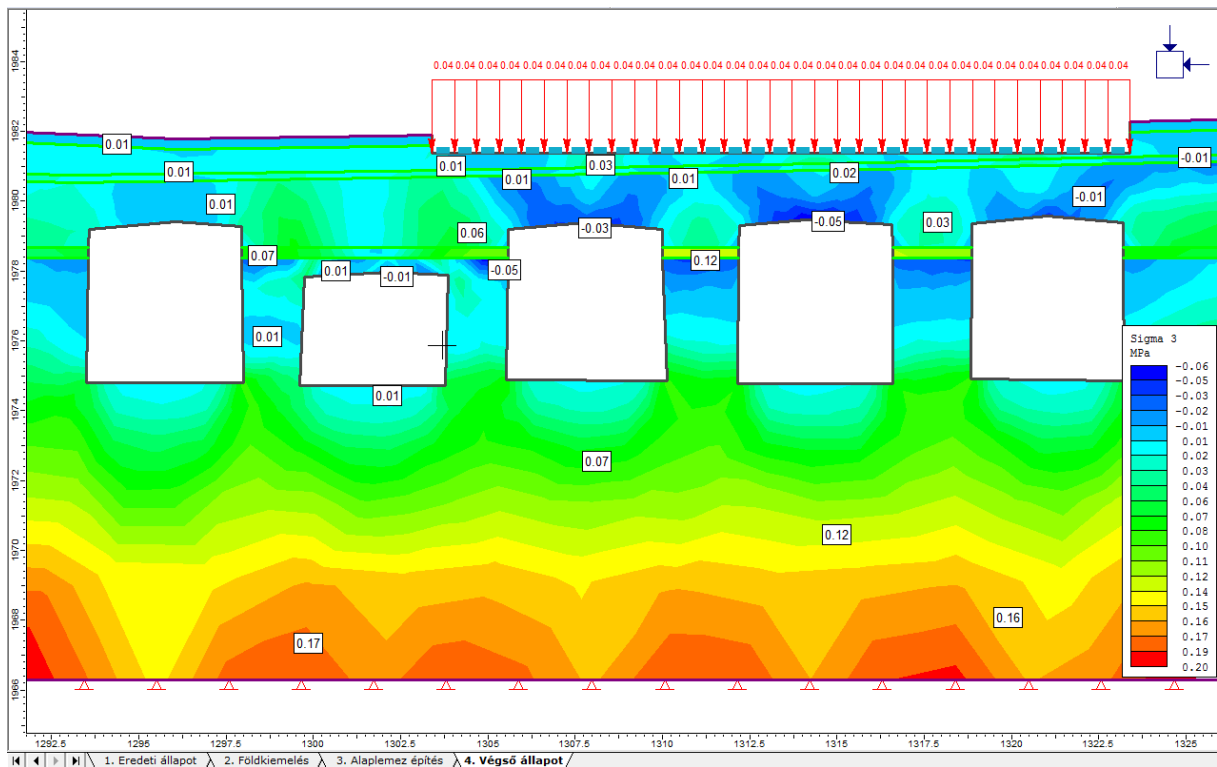
38. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség eredeti állapotban



39. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség végső állapotban



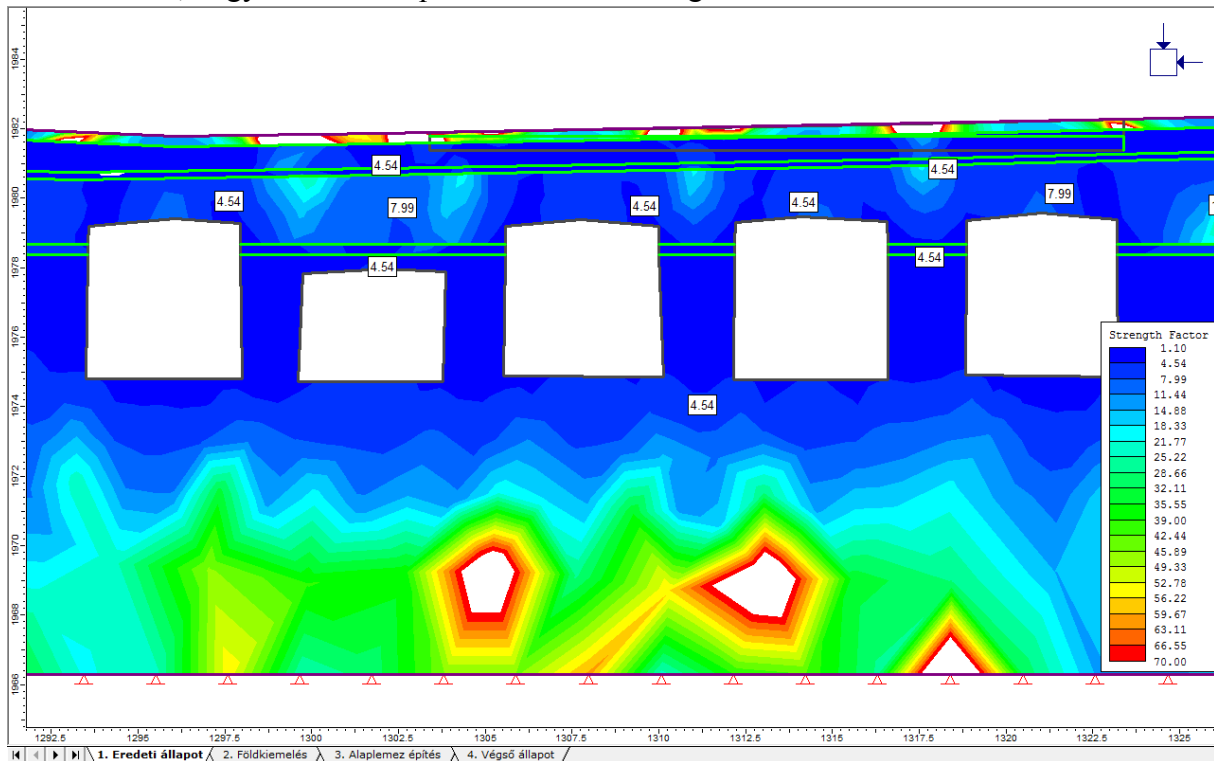
40. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség eredeti állapotban



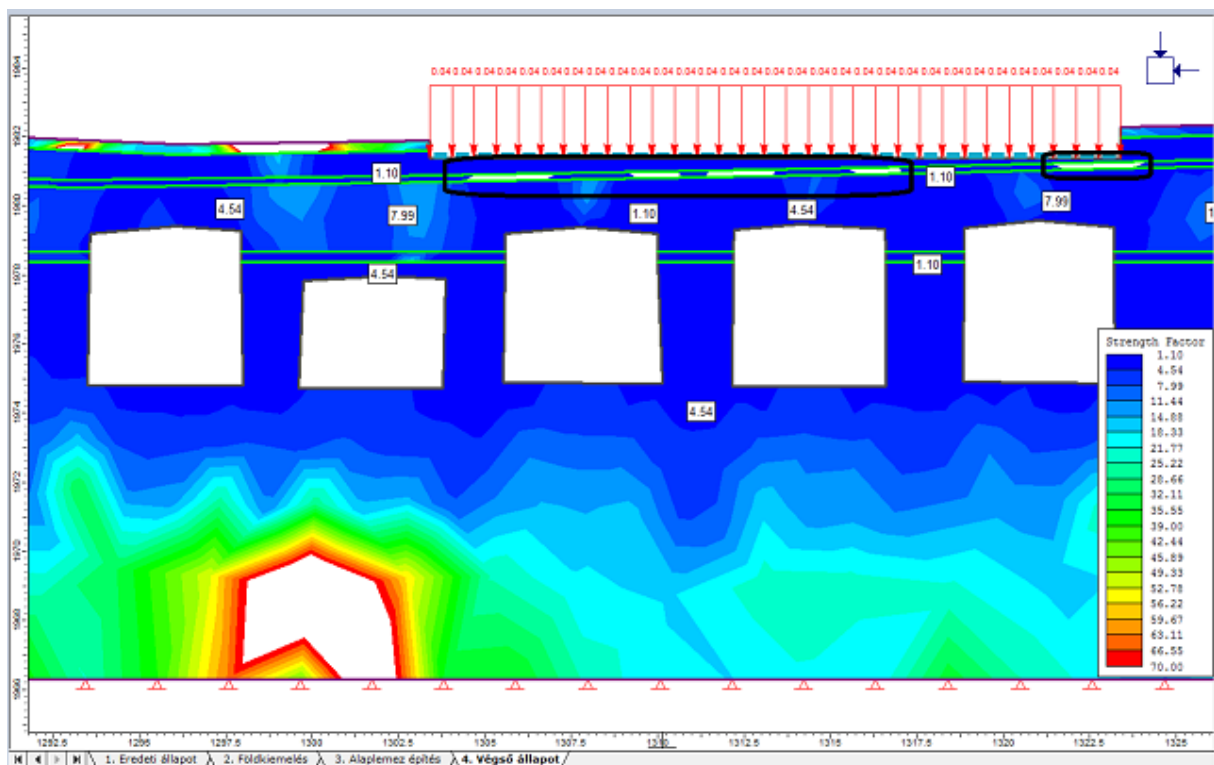
41. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség végző állapotban



A következő két ábrán (42-43. ábra) a teherbírési tényező alakulását figyelhetjük meg. Az eredeti állapotnál láthatóan 1.1-es érték alá nem megy ez a tényező, de a végső állapotnál már előfordul, hogy az erősen repedezett mészkő rétegnél ez említett érték alá csökken.

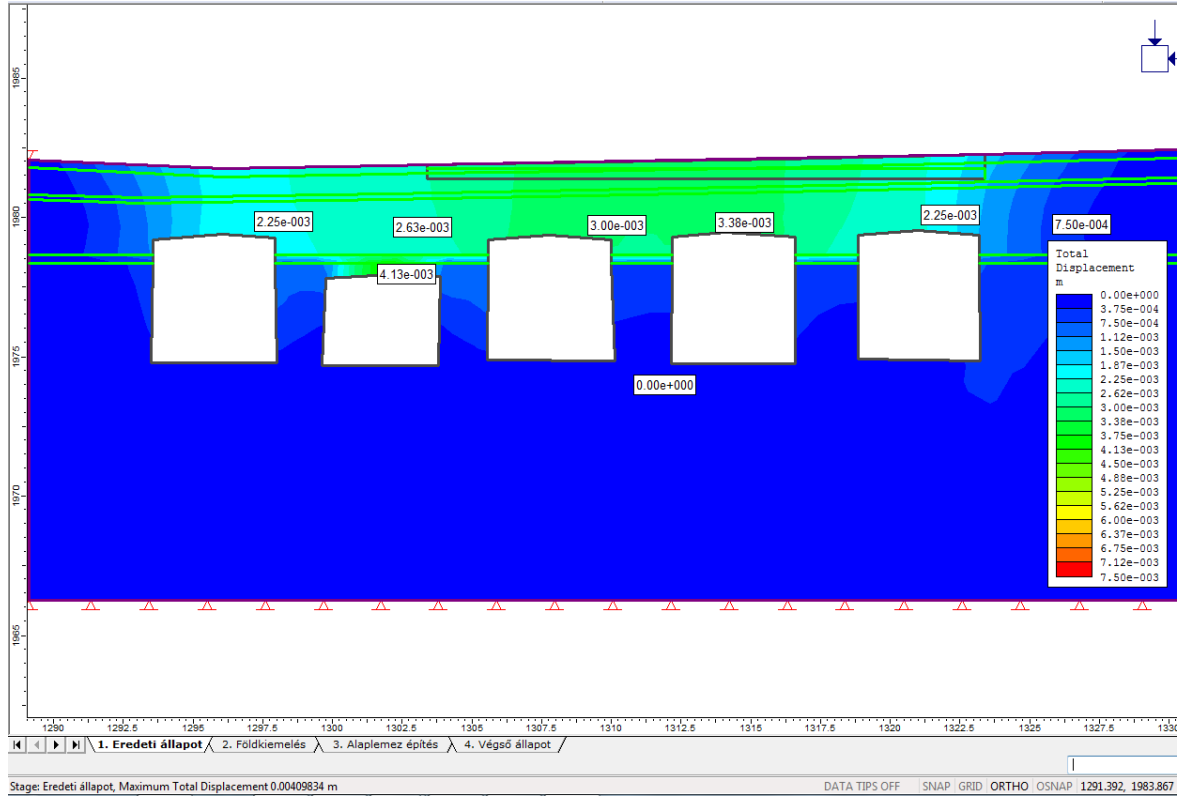


42. ábra. Az teherbírési tényező eredeti állapotban

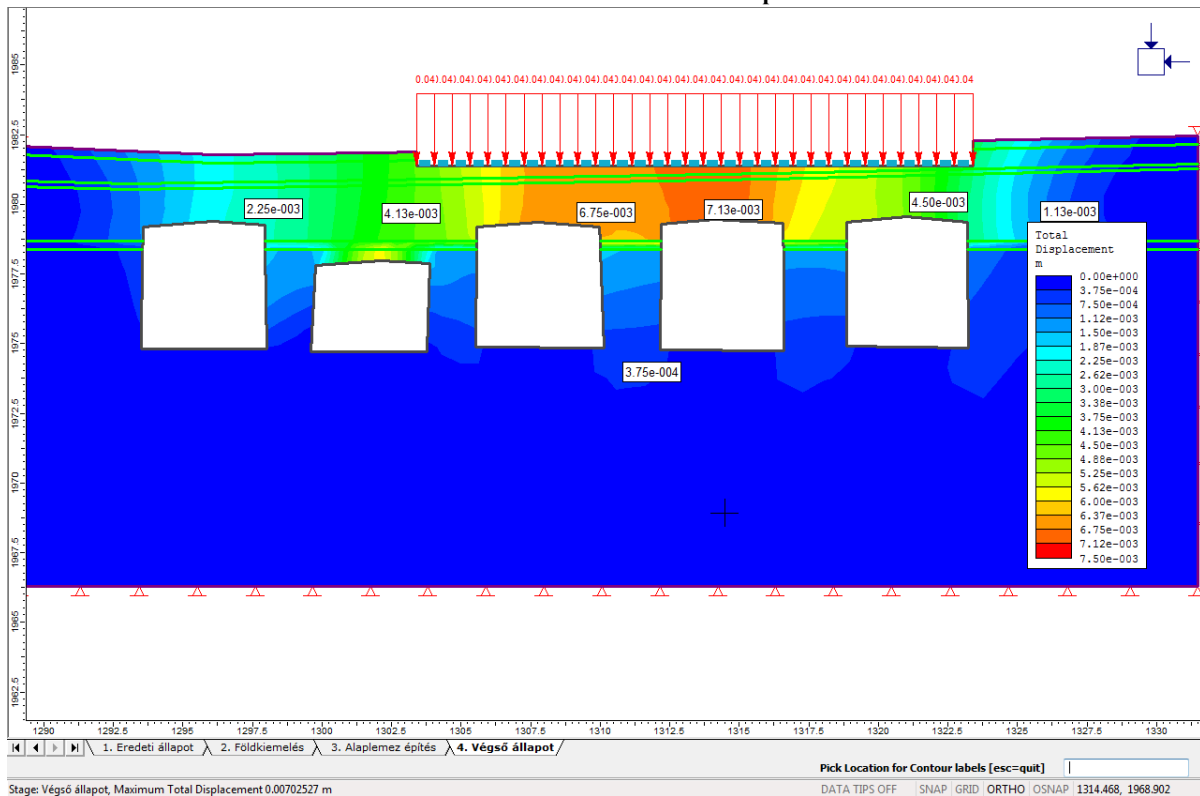


43. ábra. A teherbírési tényező végső állapotban

A süllyedés vizsgálatánál (44-45. ábra) azt tapasztalhatjuk, hogy a jobbról második pince főtéje felett alakul ki a legnagyobb elmozdulás, amely értéke a végső állapotban 7 mm körüli. Azonban ez az érték akkor lesz valós, ha az eredeti állapotban keletkező elmozdulást ebből az értékből levonjuk, mivel a program által számolt elmozdulás eredeti állapotban nem létezik. Tehát reálisan egy 3,75mm süllyedést tételezünk fel ezen a ponton.

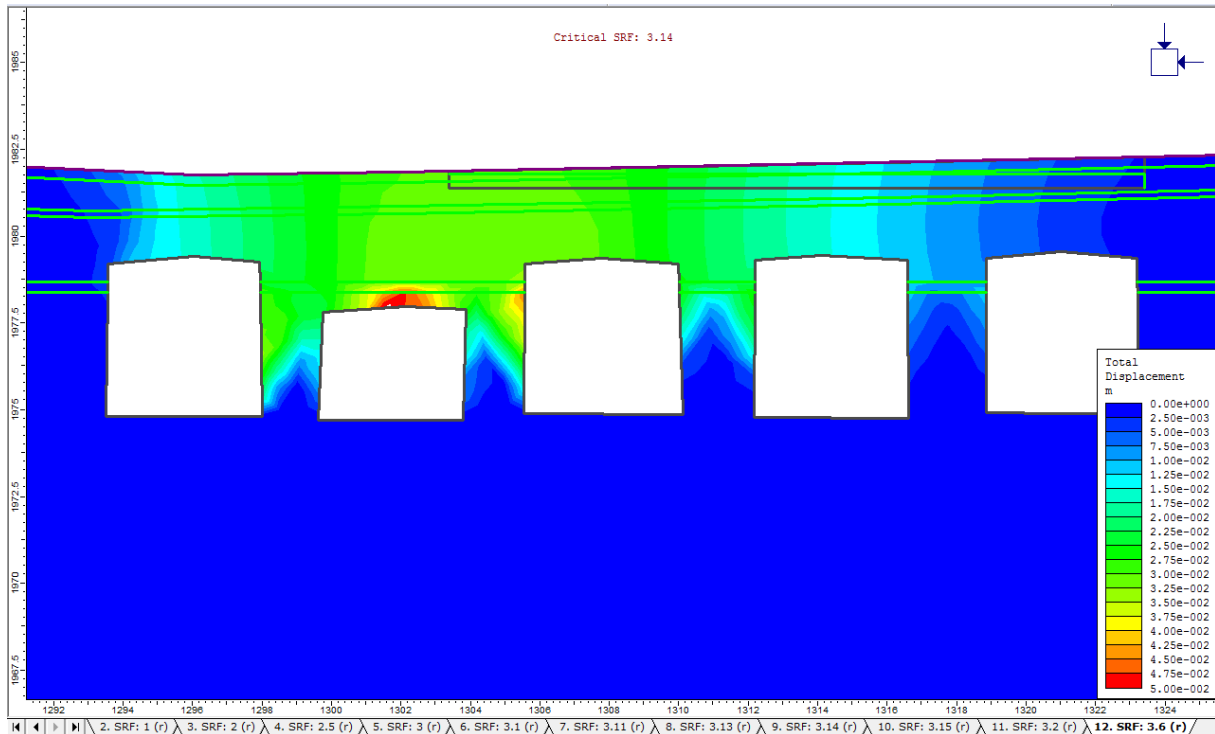


44. ábra. Az elmozdulások eredeti állapotban

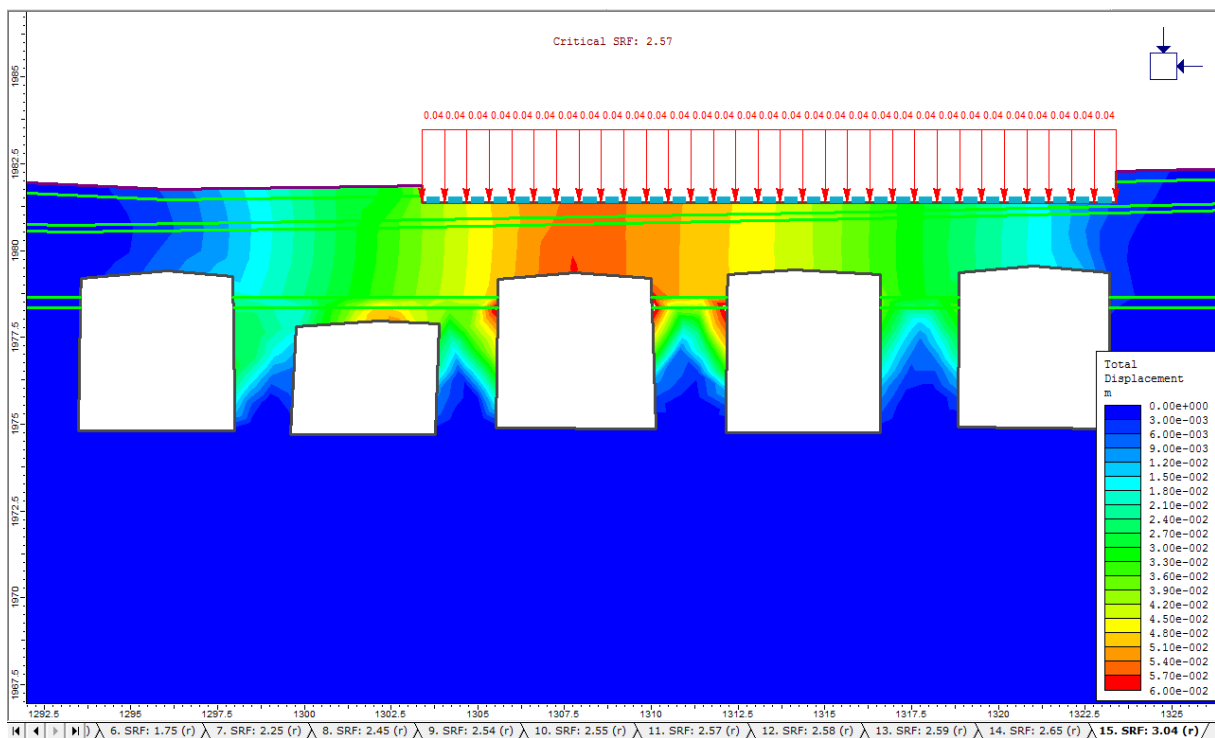


45. ábra. Az elmozdulások végső állapotban

Az állékonysággal szembeni biztonságnál (SRF), először csak a jelenlegi viszonyokat vizsgáltam, és arra voltam kíváncsi, hogy ehhez képest, hogy fog változni az értéke. Ebből a vizsgálatból azt kaptam, hogy a kezdeti 3.14-es biztonság a ház megépítésével 2.57-re fog csökkenni. (46-47. ábra)



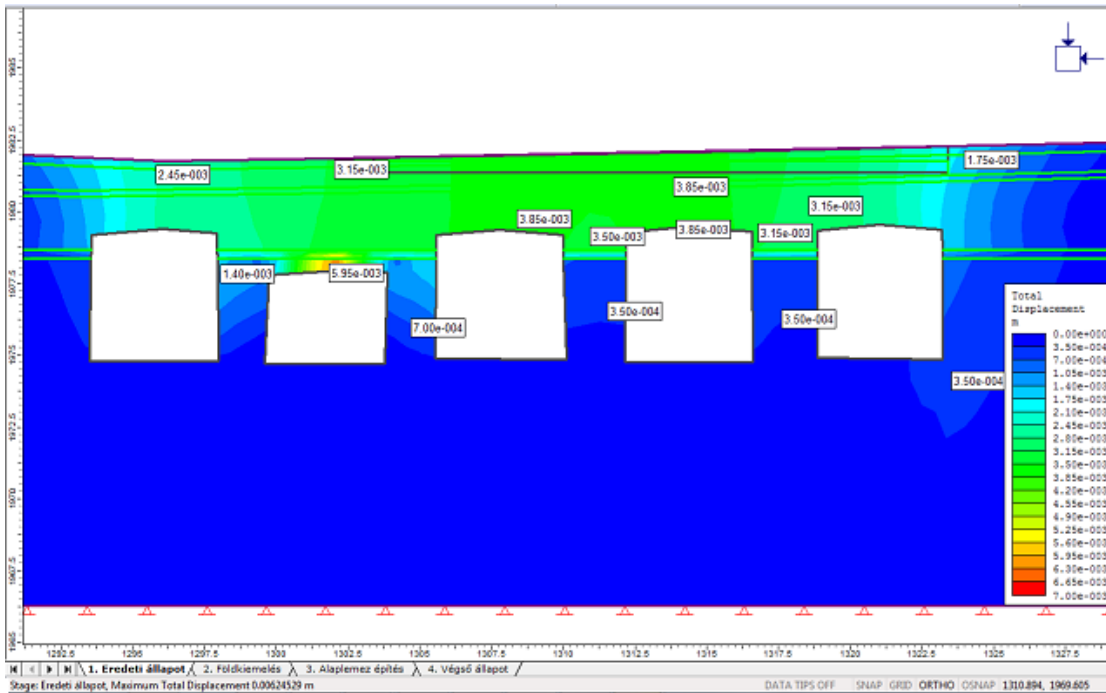
46. ábra. A biztonsági tényező eredeti állapotban



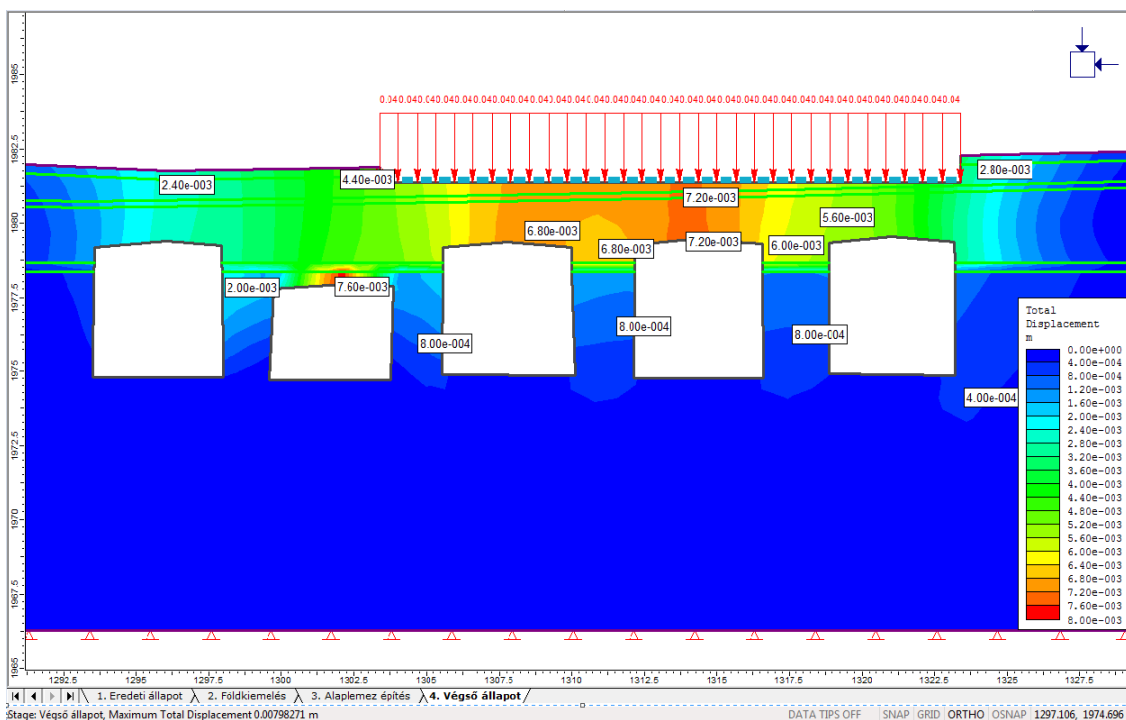
47. ábra. A biztonsági tényező végső állapotban

## 5.2.3 A C keresztmetszet vizsgálatának eredményei telített állapotban

A laborvizsgálatok során telített próbatesteken is végrehajtottam vizsgálatokat, amelyek eredményeiből feltételezni tudok egy olyan esetet, amiben a pincét körülvevő közet teljesen elázik, például egy nagy mennyiségű eső vagy egy csőtörés következtében. A mértékadó elmozdulások a három középső pince főtéje felett alakulnak ki. Az alacsony belmagasságú pince főtéje felett azért alakulhat ki a száraz állapothoz képest további 3,5 mm elmozdulás, mert a fölttte lévő bentonit réteg vízfelvevő képessége nagy, és ez jelentős teherbírás csökkenéshez vezet. (48-49. ábra)

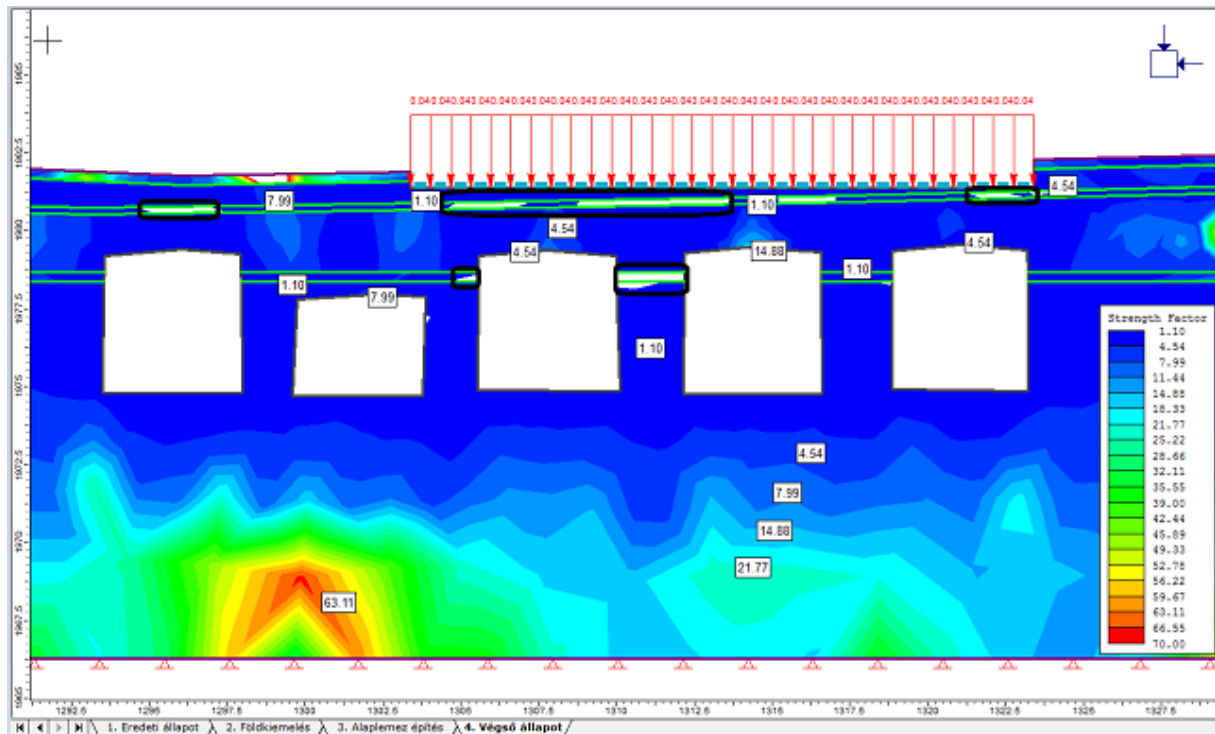


48. ábra. Az elmozdulások eredeti állapotban

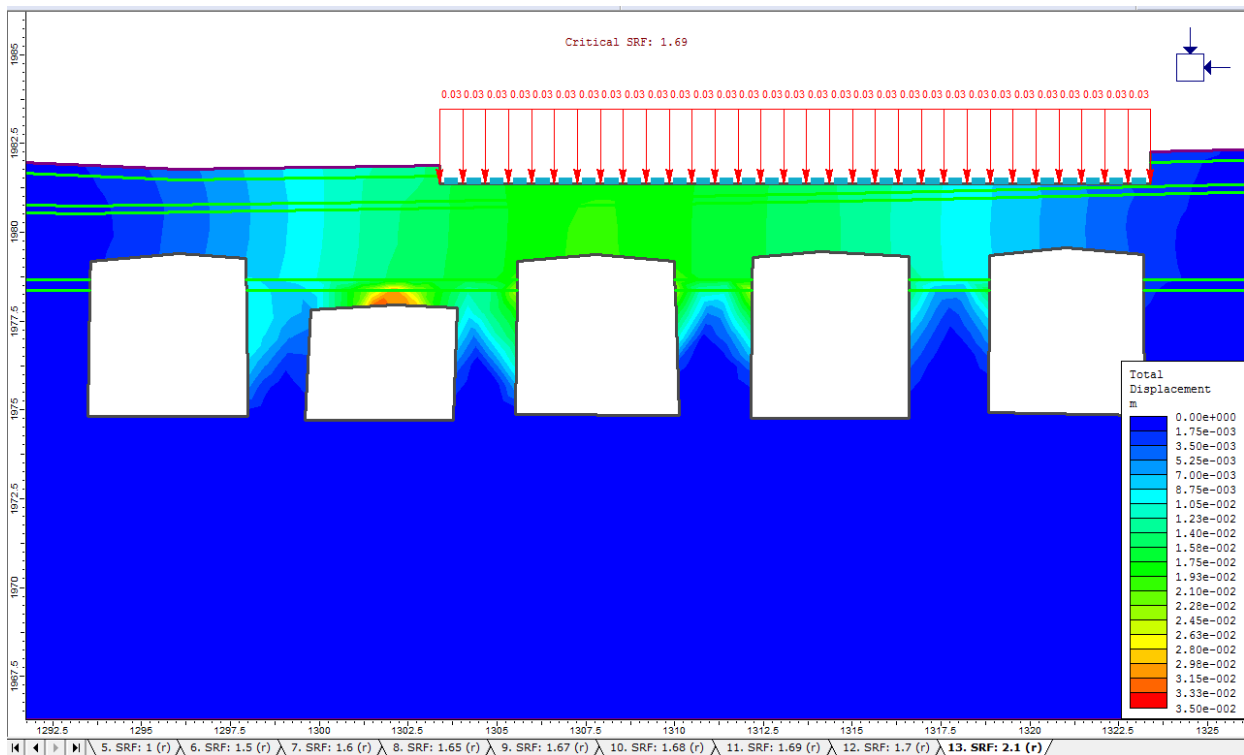


49. ábra. Az elmozdulások végző állapotban

A teherbírási tényező 1.1 érték alatti tartománya a száraz állapothoz képest, az erősen repedezett mészkő rétegben tovább terjed, illetve megjelenik a bentonit rétegben is (50. ábra). A biztonsági tényezőnél jelentős csökkenés tapasztalható a száraz állapothoz képest 2.57-ről 1.69-re csökken. (51. ábra)

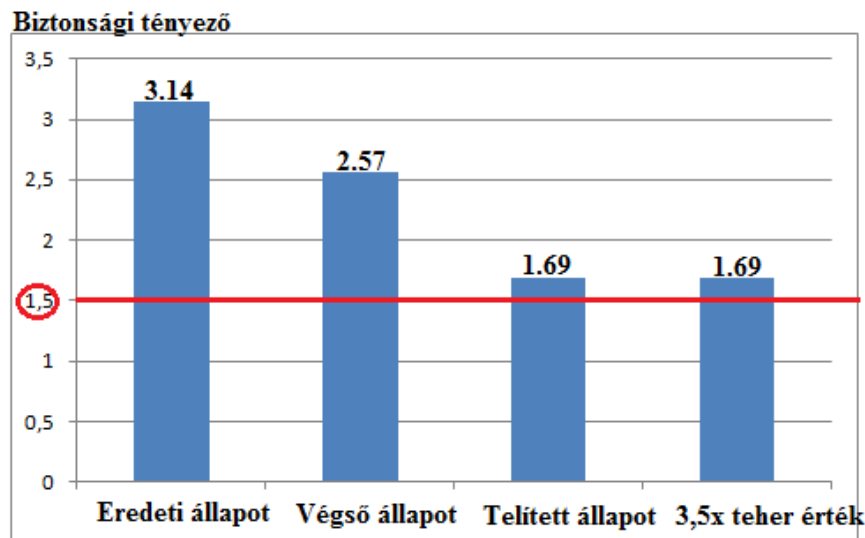


50. ábra. Az teherbírási tényező végső állapotban



51. ábra. A biztonsági tényező végső állapotban

A C keresztmetszetben a különböző állapotokban kapott biztonsági tényezőket összefoglalva, (52. ábra) azt tapasztalhatjuk, hogy minden esetben megfelel a keresztmetszet. Továbbá azt figyelhetjük meg, hogy a telített állapotra mennyire érzékeny az adott kőzetkörnyezet. Próbaképpen a teher értékét növelve azt tapasztaltam, hogy az eredeti teher 3,5x értékénél csökken a telített állapot szintjére a biztonság.



52. ábra. Biztonsági tényezők alakulása különböző esetekben

Az előzőeket összefoglalva a C jelű keresztmetszet eredményeiből a pincerendszer megfelelő állékonyságára következtethetünk, még olyan eseteket is figyelembe véve, amikor a terhet növeljük vagy a kőzet mechanikai tulajdonságait csökkentjük. Ez azonban csak abban az esetben igaz, ha a pincék közötti áttöréseket nem vesszük figyelembe vagy az építkezés feltételének, ezeknek az áttöréseknek a helyén történő megerősítést írjuk elő. Belátva, hogy ezt a problémát két dimenzióban nem lehet kezelni, a következőkben a pincerendszer 3D-s modellezését is elvégzem.

## 6. Háromdimenziós modellvizsgálat

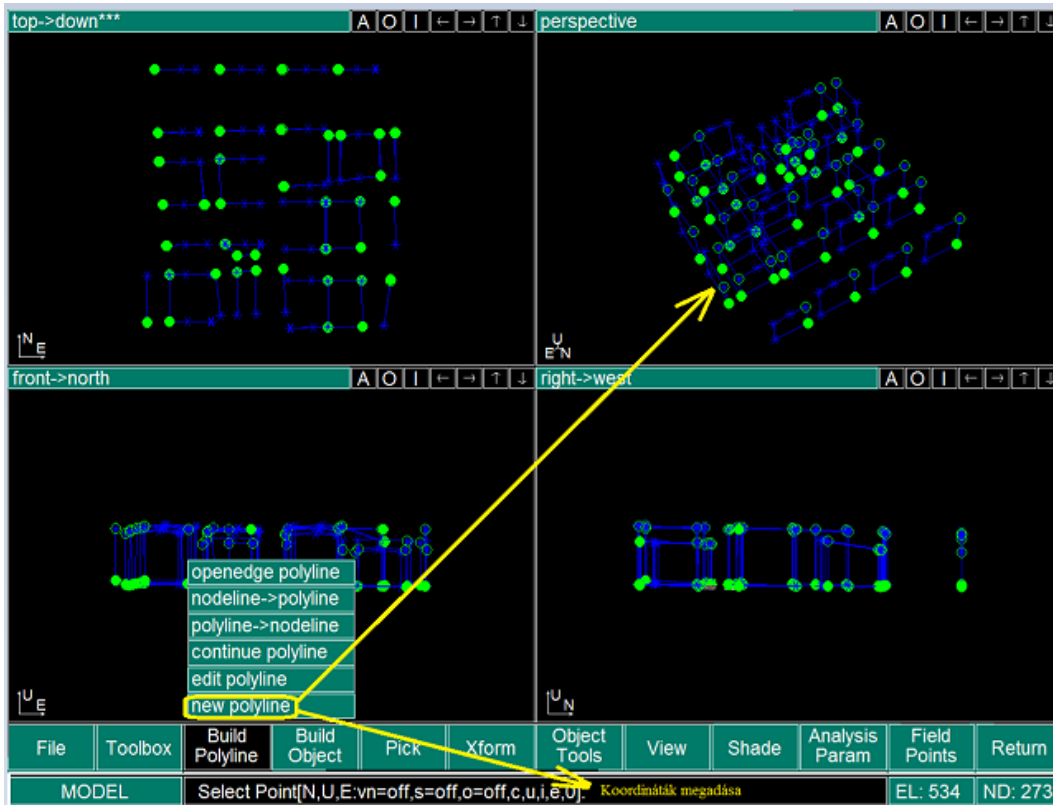
A pincerendszer meglehetősen összetett geometriai elrendezése miatt a korábbiakban bemutatott kétdimenziós modellezés sok esetben nem eredményez megbízható eredményeket. Ezért a pincerendszert 3D-ben is meg kell vizsgálni. A 3D-s analízis segítségével a pincerendszert globálisan lehet vizsgálni és így az olyan kritikus helyeknél is eredményeket kaphatunk, amelyeknél korábban kétség merült fel. A következőkben a két korábban már ismertetett 3D-s szoftver használatát, előnyeit, hátrányait és az ezekkel elért legfontosabb eredményeket mutatom be.

### 6.1 Modellvizsgálat Examine 3D-vel

#### 6.1.1 A modellépítés fő lépései

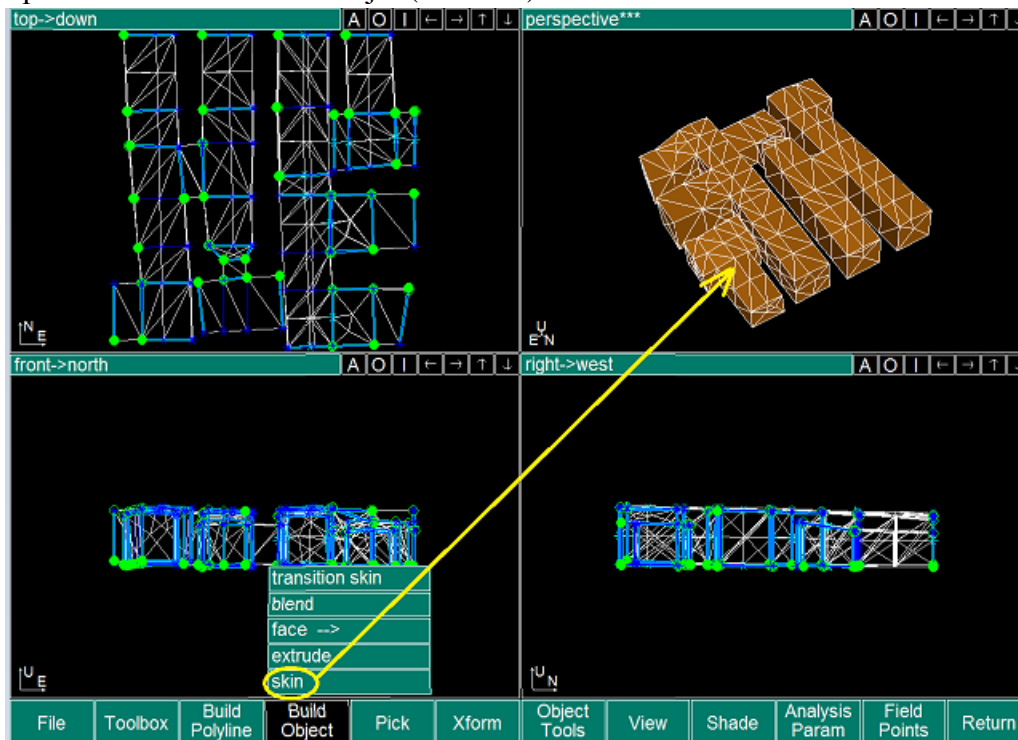
A vizsgálathoz szintén a 4-6. táblázat értékeit használtam fel. A következőkben néhány lépésben összefoglalom a modellezés menetét, majd ismertetem a kapott eredményeket.

- Első lépésben a pincék geometriáját vittem be a programba, amelyhez először is kiszámoltam a pincerendszer összes jellegzetes keresztmetszet pontjának az (x, y, z) koordinátáit, a pince alaprajzának és a metszeteinek alapján (53. ábra).



53. ábra. Geometria bevitel

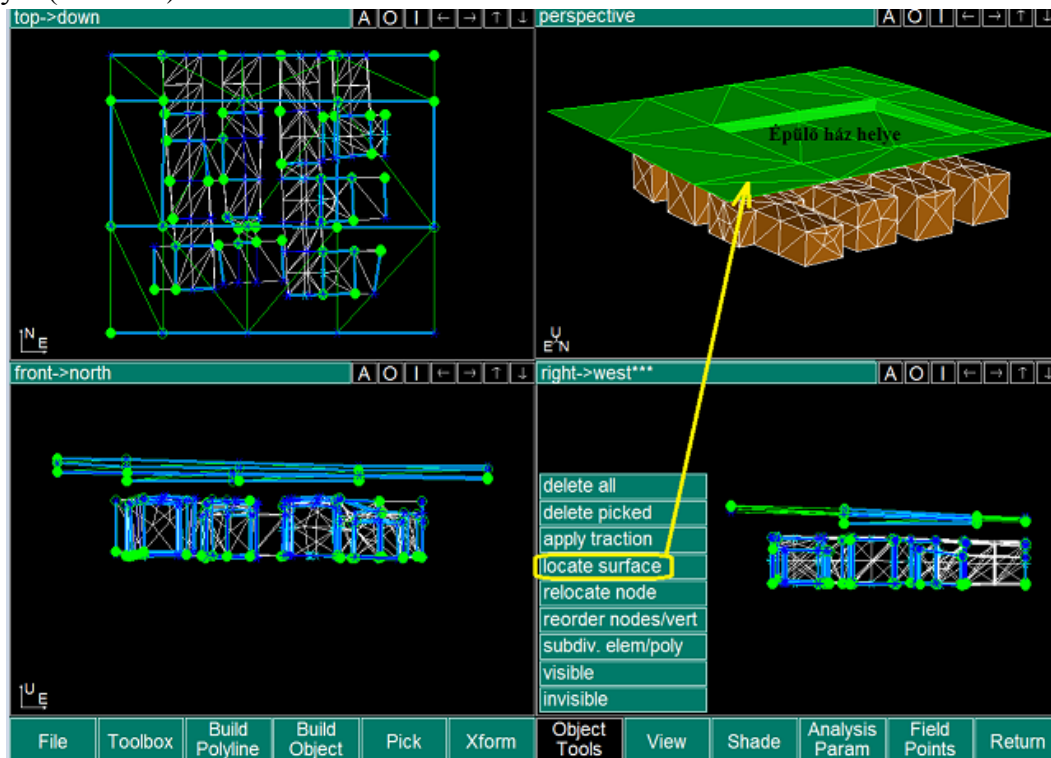
- Ezek után a keresztmetszetre felületeket építettem, és megalkottam az építendő ház alá eső pincerendszer 3D-s modelljét (54. ábra).



54. ábra. Felületek megépítése



- Következő lépésben elkészítettem a pincék feletti terepviszonyokat és az építendő ház helyét (55. ábra).



55. ábra. Terepviszonyok felvétele

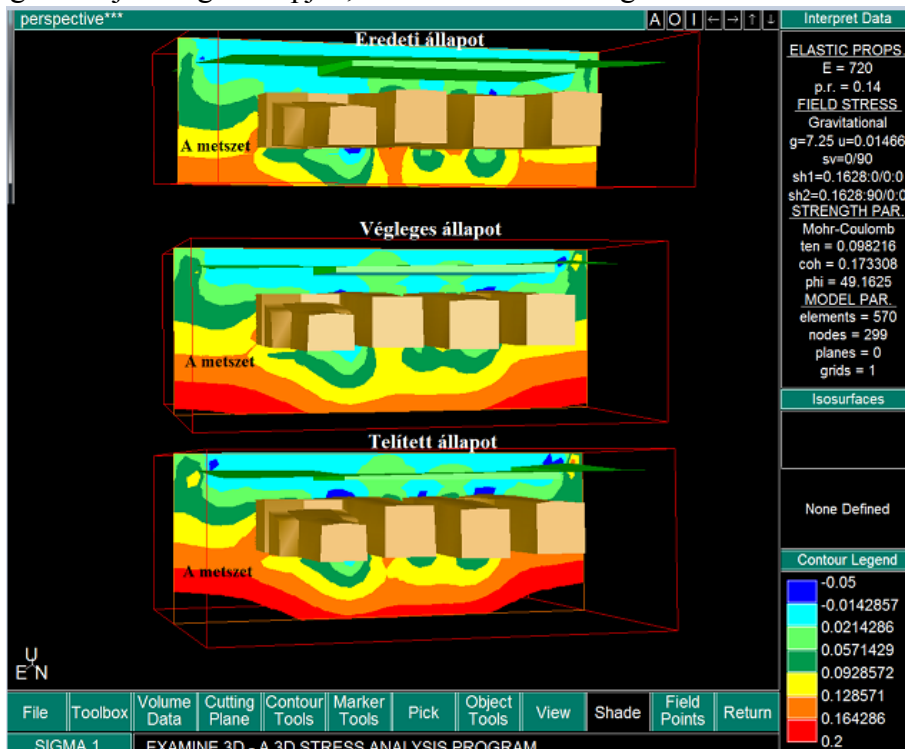
- A modell építés befejezése után megadtam a számításhoz szükséges paramétereket. A program hiányossága, hogy csak egy fajta talajt tudunk vele definiálni, ezért én a túlnyomó részben jelenlevő ép állapotban lévő durva mészkő paramétereit adtam meg (4-6. táblázat).
- A közet paramétereinek megadása után metszeteket hoztam létre, azokon a helyeken, ahol a számítás során mértékadó eredmények keletkezhetnek.
- Végezetül lefuttattam a számítást.

A 3D-s vizsgálat során, megvizsgáltam egy olyan keresztmetszetet, ami 2D-ben problémás volt (A), és megvizsgáltam azt a keresztmetszetet, ami megfelelt a 2D-s vizsgálat során (C). Mivel az Examine3D biztonsági tényezőket nem tud számolni, ezért csak a feszültségek, elmozdulások viszonyát tudom majd összehasonlítani. Továbbá nagymértékben befolyásolhatja az eredményeket, hogy csak 1 talajréteget tud a program kezelni, így az erősen és közepesen repedezett mészkő rétegeket hatását nem tudom vizsgálni.

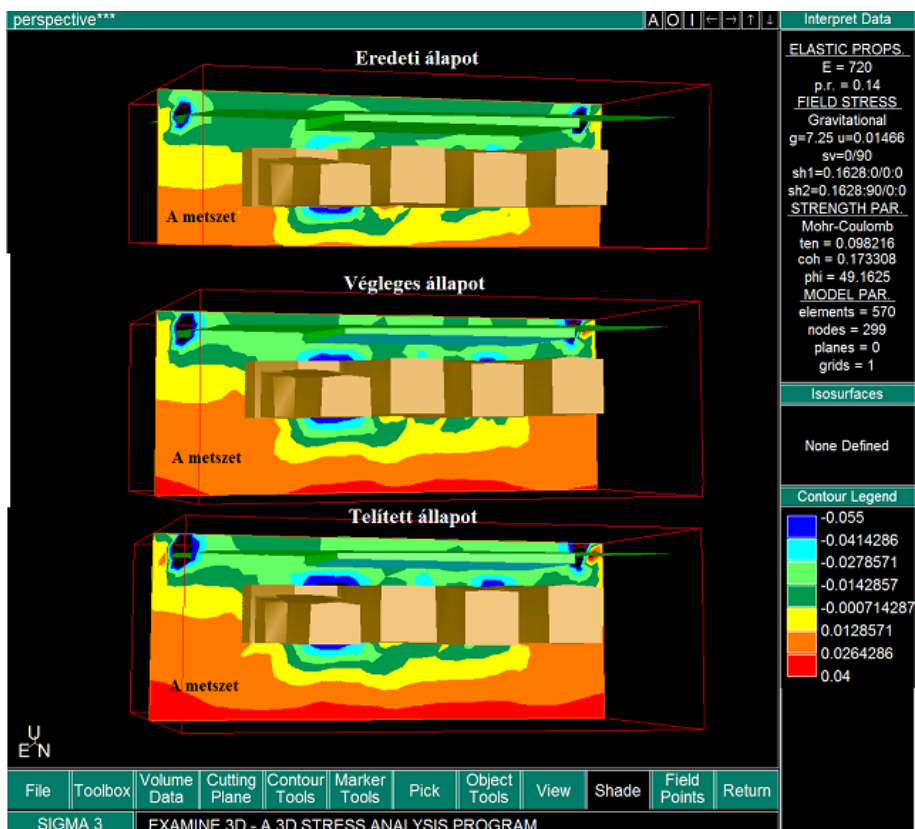
### 6.1.2 Az A jelű keresztmetszet vizsgálati eredményei

Az 56-57. ábrán a feszültségek alakulását láthatjuk,  $\sigma_1$ -nél folyamatos növekedés látható, míg  $\sigma_3$ -nál a főték feletti húzó feszültség növekedést figyelhetjük meg. Az elmozdulásoknál is természetesen növekedést tapasztalhatunk, amely a telített állapotban a

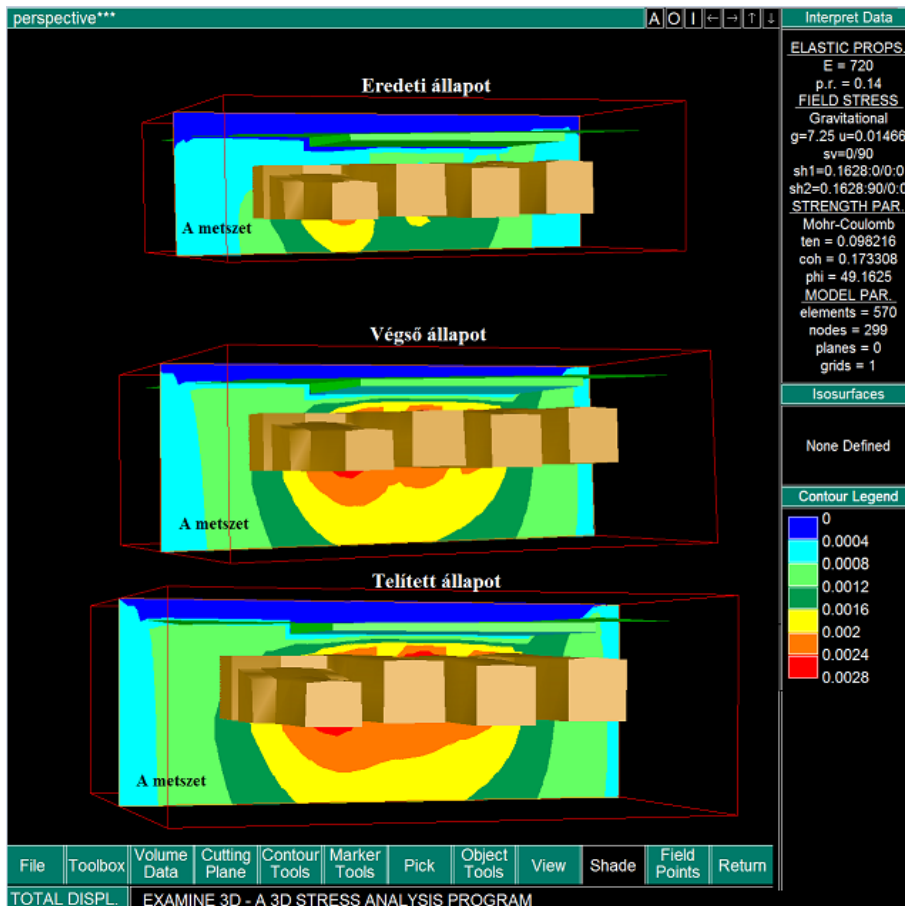
pince főték felett 3 mm körüli értékre emelkedik (58. ábra). Ha a valós közetrétegződést figyelembe tudnánk venni, akkor biztosan nagyobb süllyedéseket kapnánk ezeken a helyeken. A teherbírási tényező értéke sehol nem csökken 1 alá (59. ábra), még telített állapotban sem. Tehát a vizsgált tulajdonságok alapján, a keresztmetszet megfelelőnek tűnik.



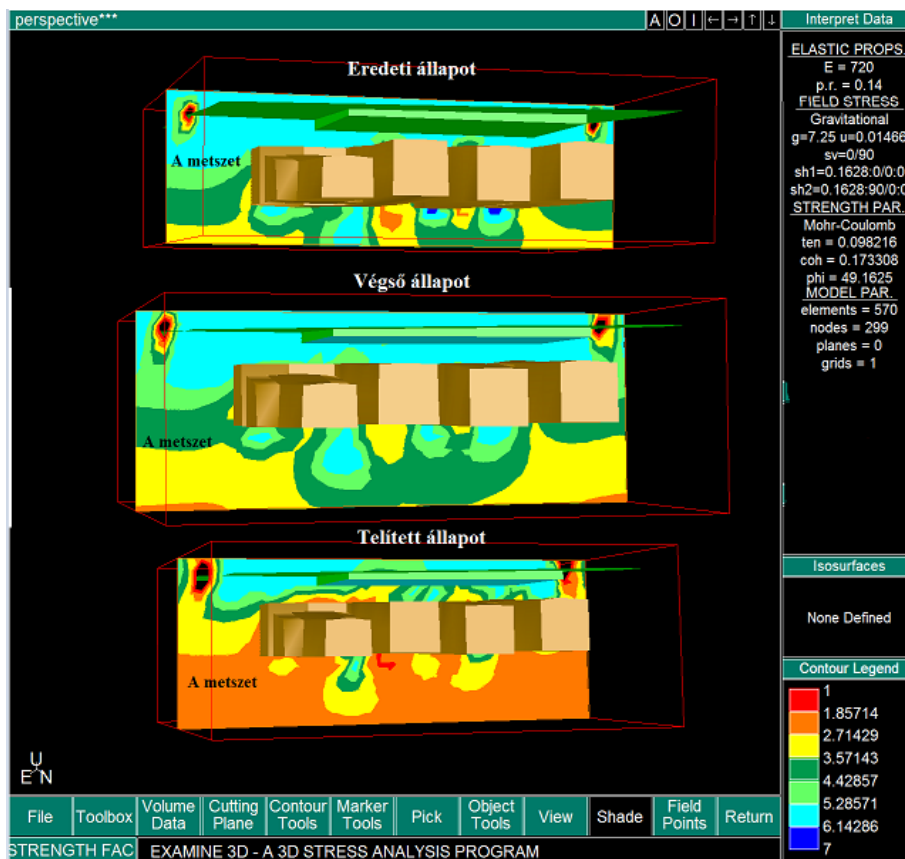
56. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség változása a különböző állapotokban



57. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség változása a különböző állapotokban



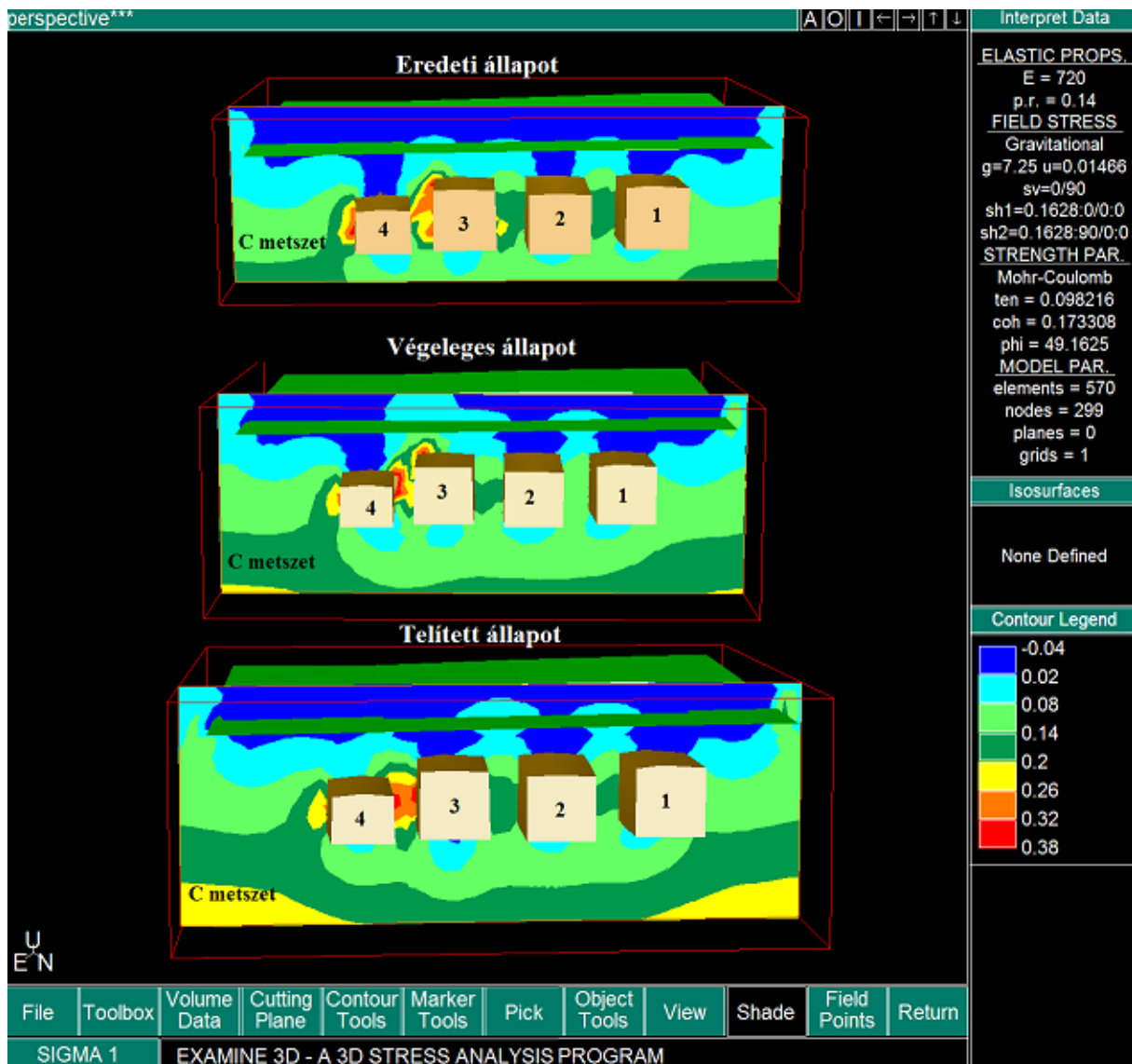
58. ábra. Az elmozdulások változása a különböző állapotokban

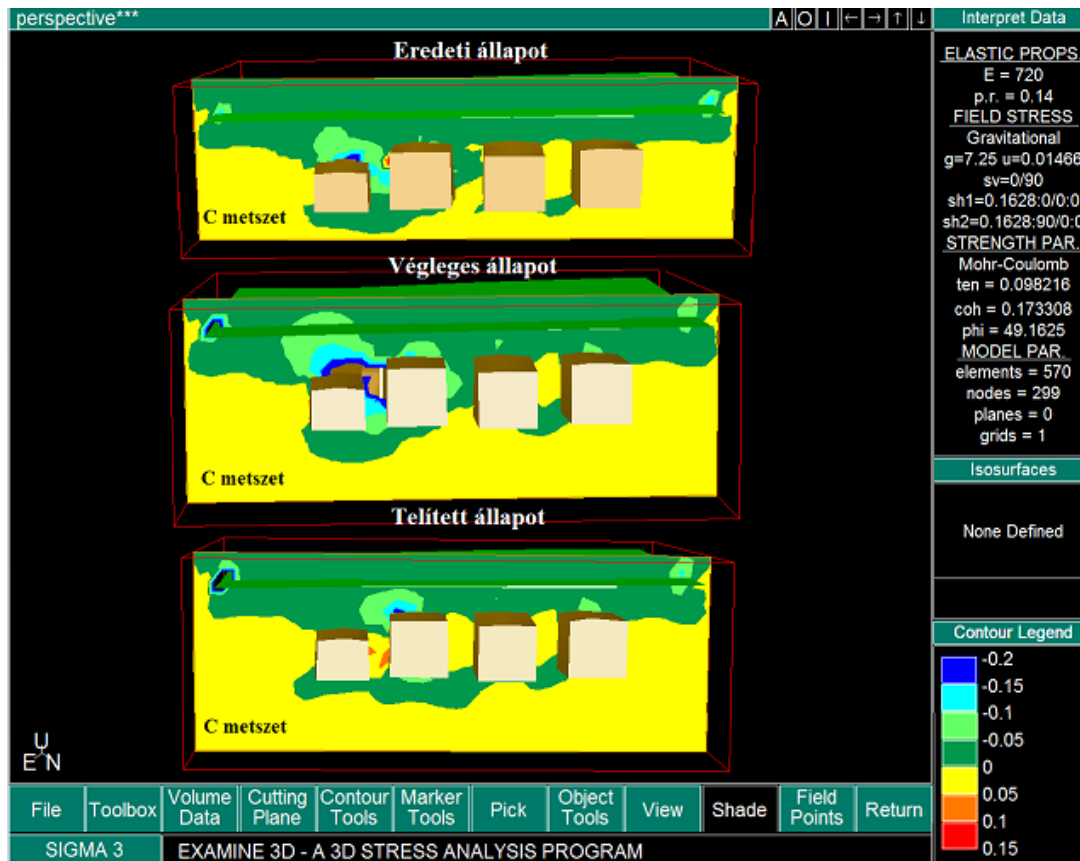


59. ábra. A teherbírási tényező változása a különböző állapotokban

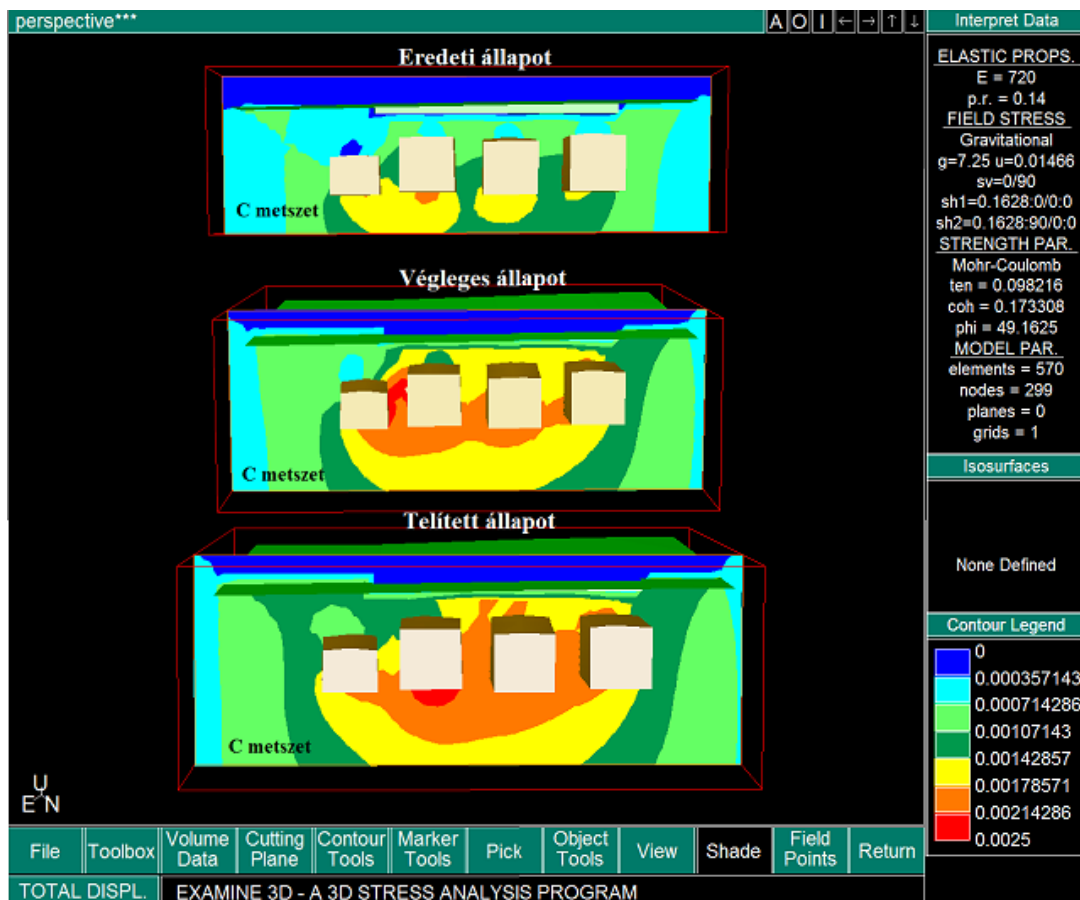
## 6.1.3 Az C jelű keresztmetszet vizsgálati eredményei

A C keresztmetszet eredményeiből (60-64. ábra) hasonló következtetéseket lehet levonni, mint a korábbi A jelű metszetéből. Különbségként jelentkezik, hogy a teherbírasi tényező a végső állapotban a 4-es pince közelében 1 alá csökken. Telített állapotban ez a rész tovább terjed. Ennek oka az lehet, hogy a 3-as és 4-es pince között van a legkeskenyebb fal, ami 1,6 méter széles és a feszültségek ide koncentrálnak, ahogy a 63. ábrán látható. A 64. ábrán azt is megfigyelhetjük, hogy az egész pincerendszer viszonylatában is csak ez az a hely ahol a teherbírasi mutató 1 alatt van.

60. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség változása a különböző állapotokban

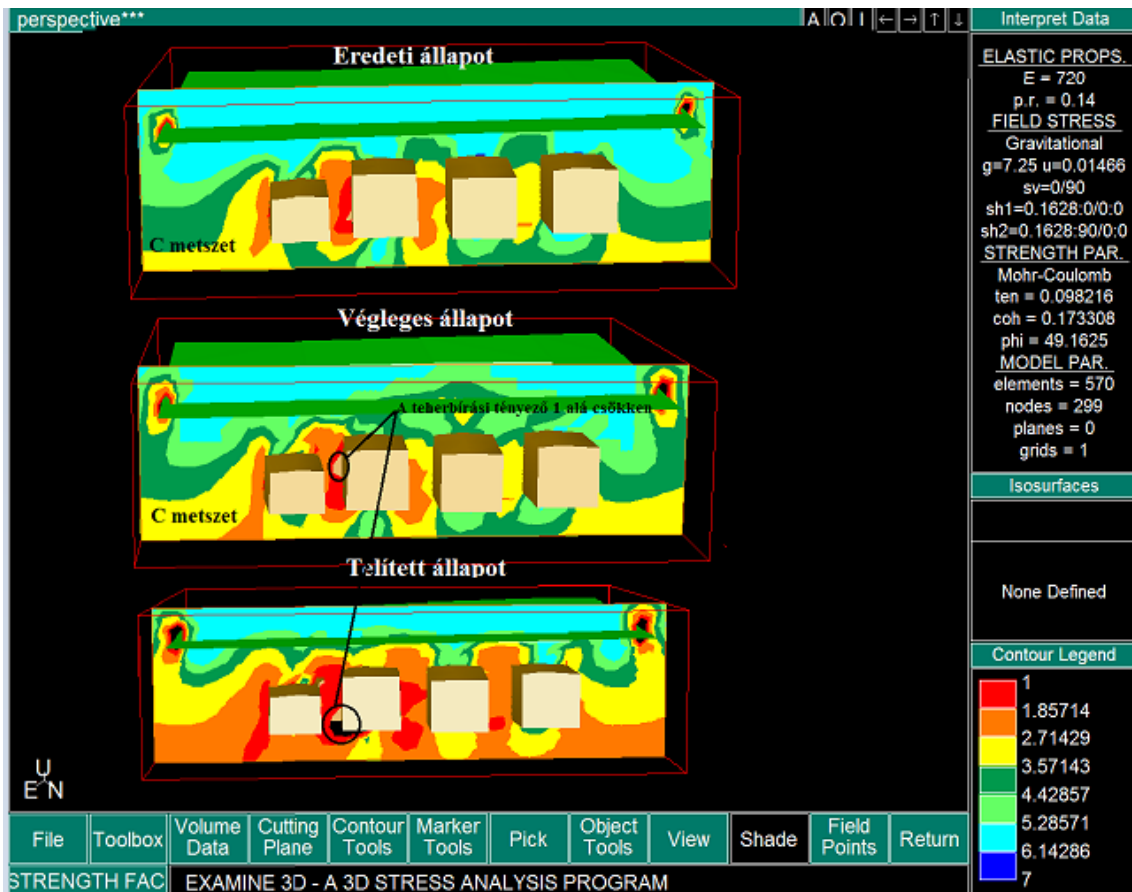


61. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség változása a különböző állapotokban

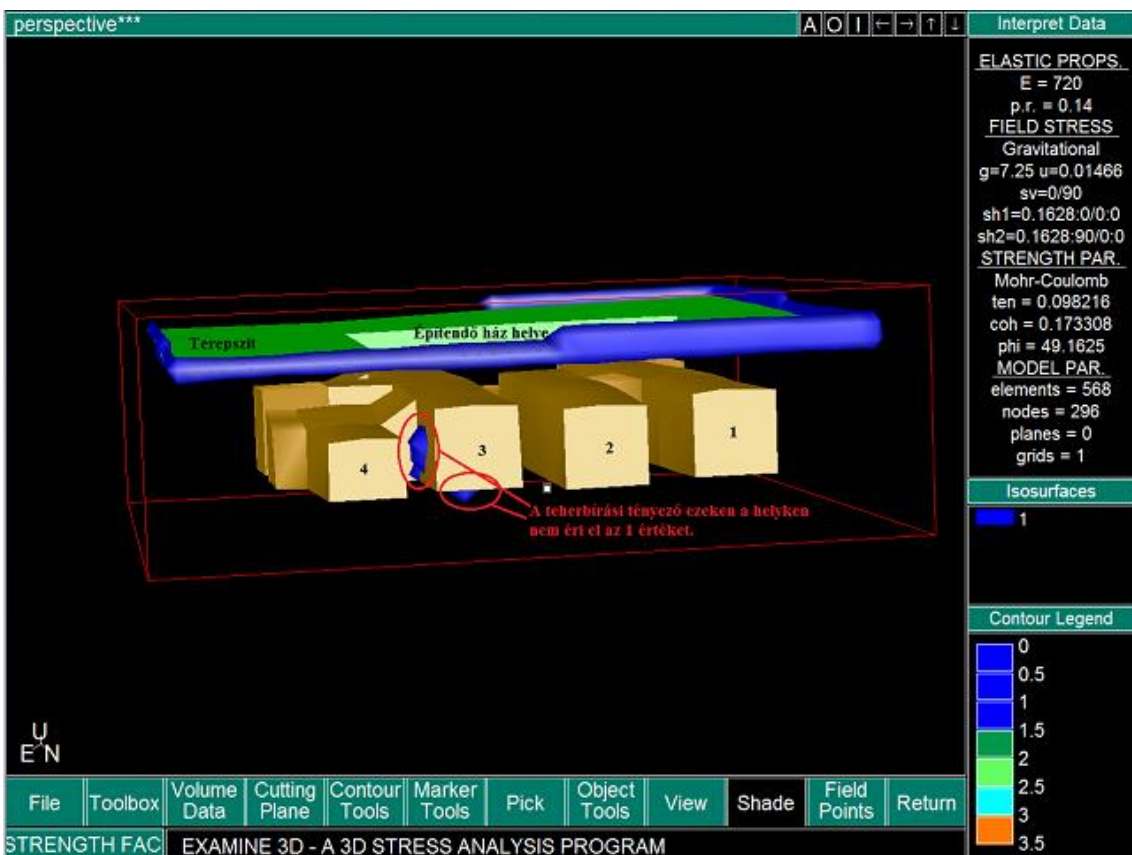


62. ábra. Az elmozdulások változása a különböző állapotokban





63. ábra. A teherbírás tényező változása a különböző állapotokban



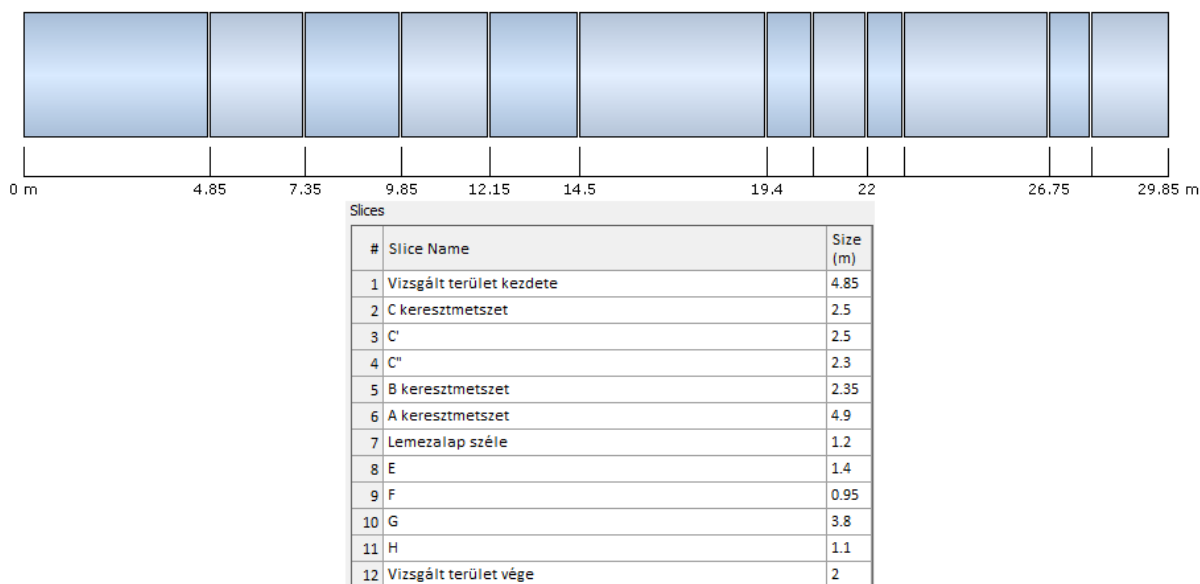
64. ábra. A teherbírás tényező 1 alatti értékeinek helye

### 6.3 Modellvizsgálat $RS^3$ alkalmazásával

#### 6.3.1 A modell építés fő lépései

A következőkben az előző szoftverekhez hasonlóan néhány pontban összefoglalom a modell létrehozásának lépéseit, majd bemutatom a legfontosabb eredményeket.

- Keresztmetszet geometriájának felvétele, talajrétegződések és a modell határainak megadása. A korábban bemutatott Phase2-höz hasonlóan történik ennél a szoftvernél is. A nehézséget az okozta, hogy minden esetben ahol, a pince geometriájában lényeges változás van, ott új keresztmetszetet kellett létrehozni, így összességében 12 keresztmetszetet definiáltam (65. ábra). A program hiányosságának tartom, hogy egy modellen belül csak egy keresztmetszetet lehet beimportálni. Ezáltal a korábban kétdimenzióban megalkotott keresztmetszetekből csak egyet tudtam felhasználni. Ezt Phase2-ből importáltam a közetrétegződés, lemezalap elhelyezkedése és a terhekkel együtt és ezeket átvéve készítettem el a többi metszeteket.



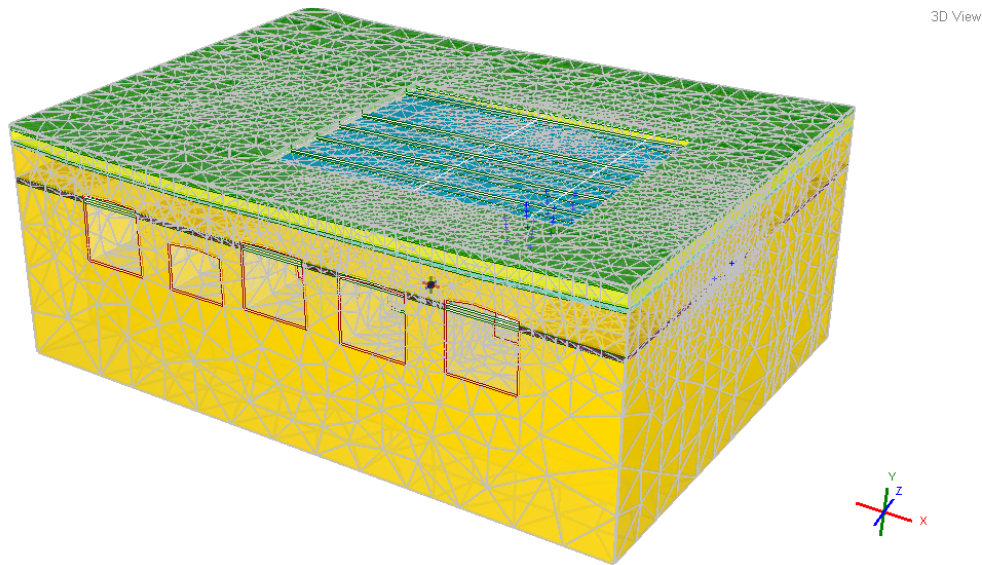
65. ábra. A definiált keresztmetszetek és a hosszaik

- Talajok, kőzetek definiálása, paramétereinek megadása. Ez a 4-6. táblázat adatai alapján végeztem, amik a RocLab1.0 program által kiszámított értékeket tartalmazzák. Az egyszerűség kedvéért ezeket is átimportáltam a Phase2-ből.
- Az építési fázisok megadása. A korábbiakkal ellentétben csak 2 építési állapotot vettem fel. Ennek több oka is van, az egyik hogy a korábban használt másik két állapot nem adott mértékadó eredményeket, illetve hogy a számítási időt csökkenthessem.



Vizsgálati állapotok:

1. Eredeti állapot: A pincék és a terepviszonyok jelenlegi, háborítatlan állapota.
  2. Végleges állapot: A lemezalap beépítése és a megépített ház terheinek aktiválása, amit a lemezalapon egyenletesen megoszló teherrel vettem figyelembe.
- Végeselemes háló generálása és sűrítése, majd a számítás lefuttatása. A vizsgált pincerendszer nagysága és bonyolultsága miatt a háló generálása is elég sok időt vett igénybe. A háló elkészítése után több mint 130 ezer elemből álló modellt kaptam eredményül (66. ábra). A számítási idő csökkentését és az eredmények pontosságának növelését úgy próbáltam elérni, hogy egy kezdeti lefuttatás után, az eredmények függvényében a háló sűrítést csak azokra a helyekre alkalmaztam, ahol a mértékadó értékek keletkeztek.

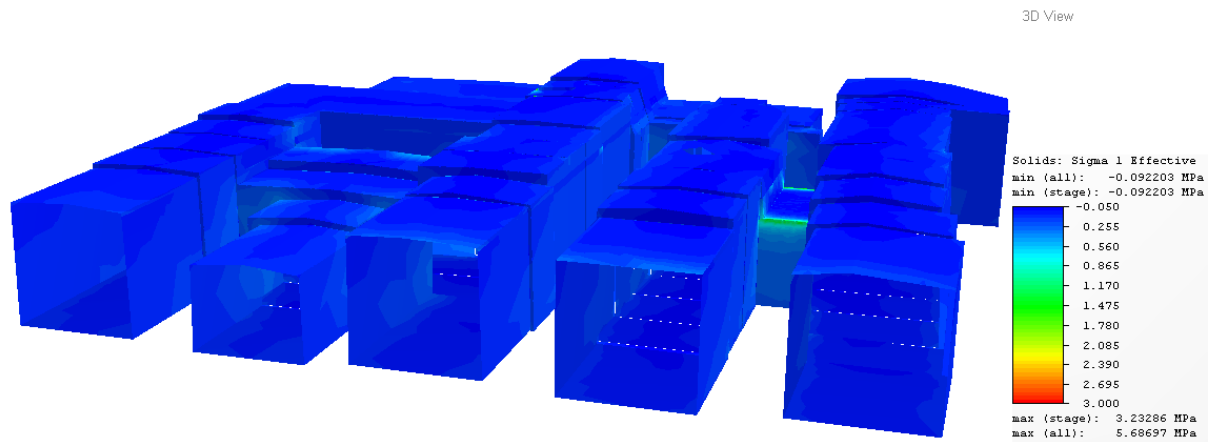


66. ábra. A 3D-s modell és a végeselem háló

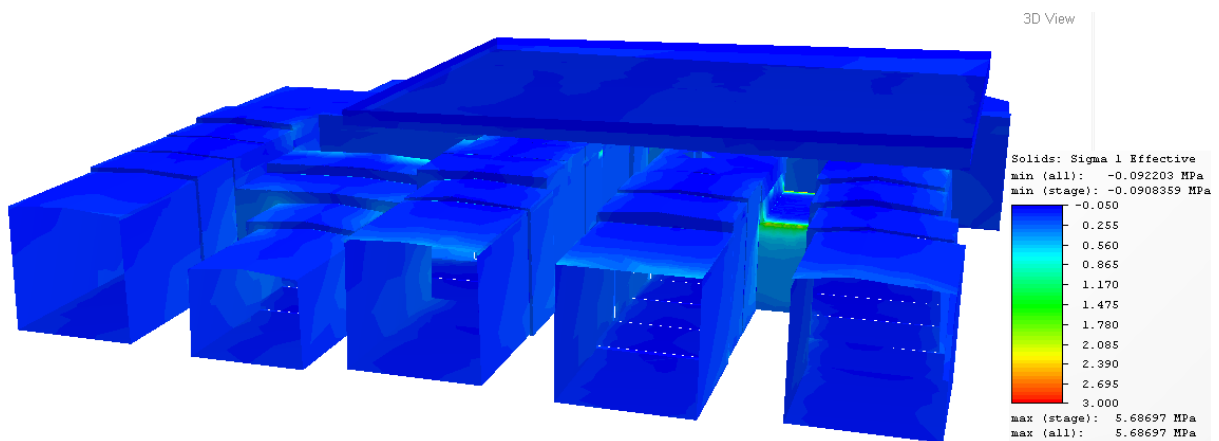
- Eredmények értékelése. Az előzőekben is használt színskálát használva először a teljes pincerendszer globális eredményeit mutatom be, majd a következő fejezetben a korábban vizsgált A, B és C jelű metszeteknél kapott eredményeket hasonlítom össze a 2D-s modellvizsgálatban ugyanazon a helyen kapott értékekkel.

### 6.3.2 A vizsgálat eredményei

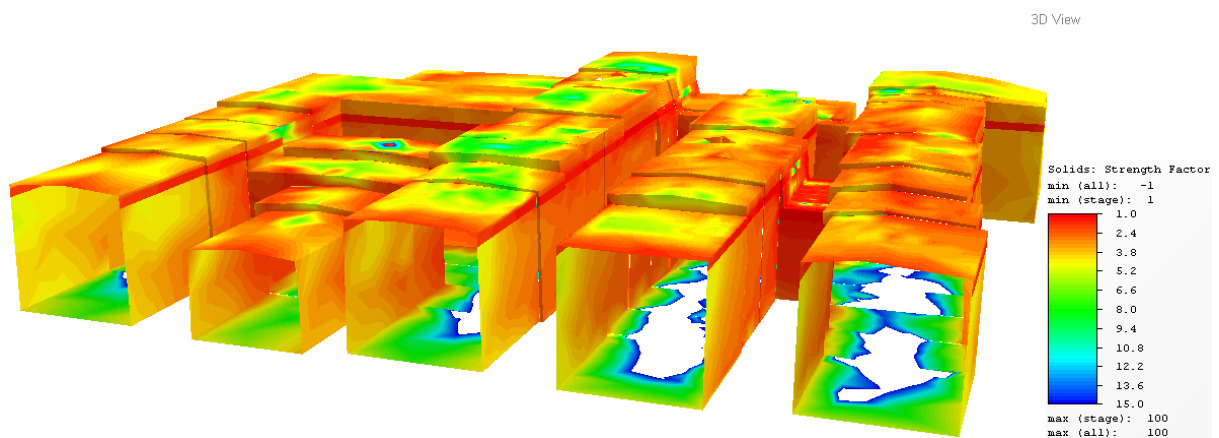
Végig nézve a következő eredményeket, az megállapítható, hogy minden esetben jobbról az első két pince közötti átjáró fötájánél kaptam a legrosszabb értékeket. A feszültségek esetében a pincerendszer 95%-ban 0.01-0.5 MPa intervallumon kaptam eredményeket. Feszültségcsúcsok csak az előbb említett helyen tapasztalhatók, ahol is a kezdeti 3.23 MPa értékről a terhelés hatására 5.69 MPa értékre nő a feszültég (67-68. ábra). Ez a teherbírási tényezőben is jelentkezik és ezen a helyen 1 vagy kicsit az alá esik az értéke, de alapvetően a pincerendszer legnagyobb részében 2-es érték felett alakul ez a tényező. (69-70. ábra)



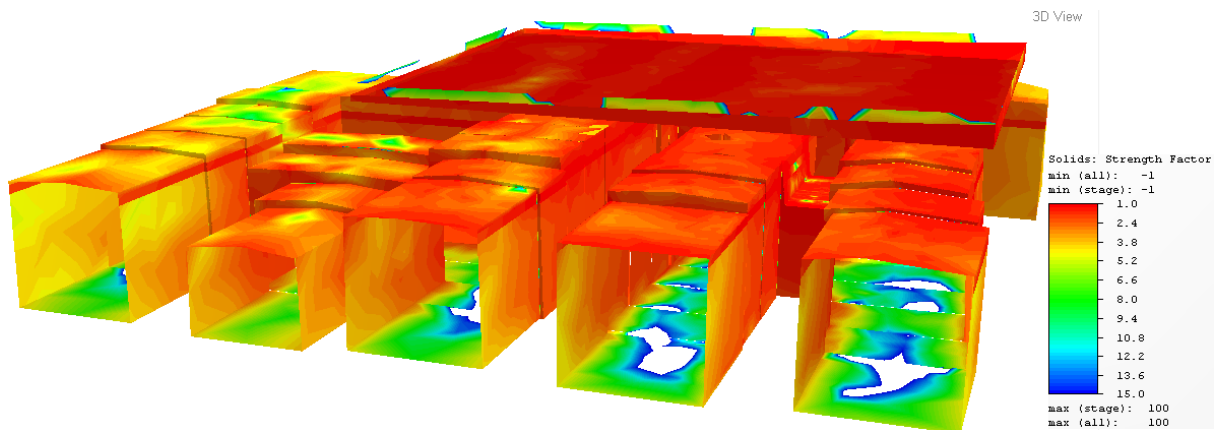
67. ábra. A feszültségek alakulása eredeti állapotban



68. ábra. A feszültségek alakulása végső állapotban

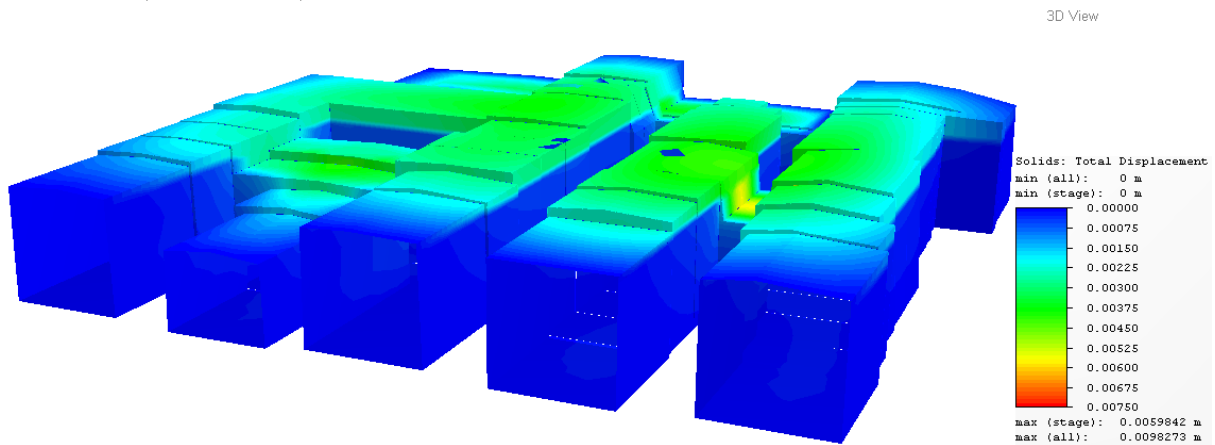


69. ábra. Az teherbírési tényező alakulása eredeti állapotban

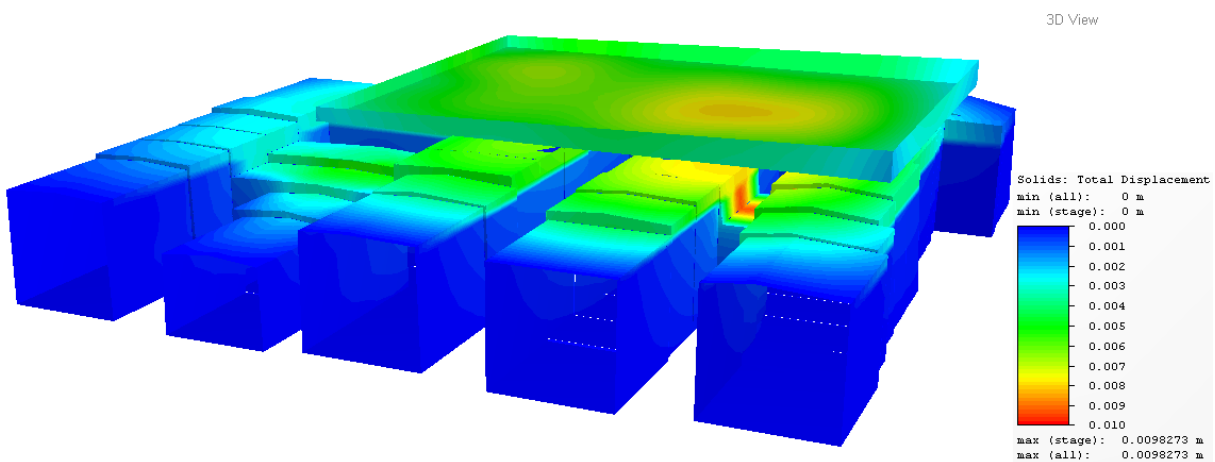


70. ábra. Az teherbírési tényező alakulása végső állapotban

Az elmozdulások alakulásánál szintén az 1-es és 2-es pince közötti átjáró környezetében kaptam a legnagyobb értékeket, de ez is csak 10 mm körüli, amiből a kezdeti elmozdulást levonva 3.85 mm körüli süllyedést feltételezhetünk, ami mindenképp jó eredménynek mondható (71-72. ábra).



71. ábra. Az elmozdulások alakulása eredeti állapotban



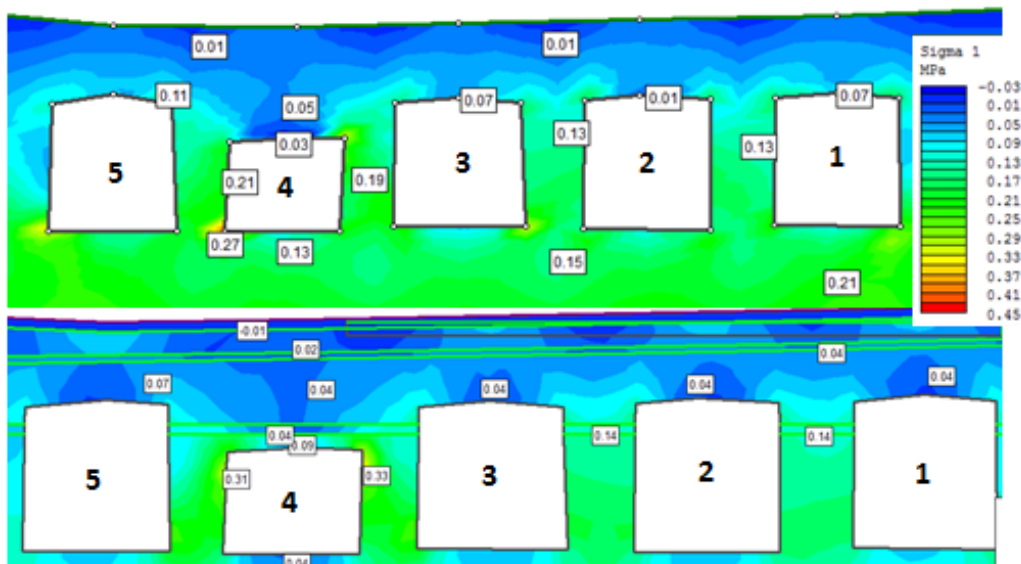
72. ábra. Az elmozdulások alakulása végső állapotban

## 7. A 2D-s és a 3D-s vizsgálatok összehasonlítása

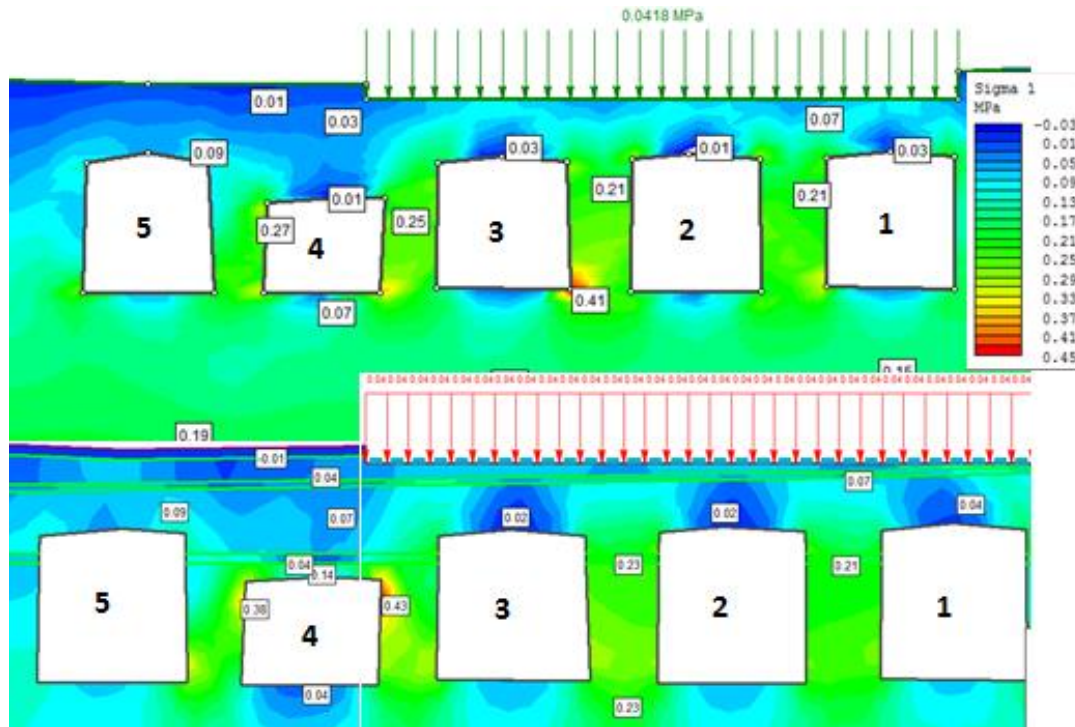
### 7.1 A peremelem és végeleemes módszer eredményeinek összehasonlítása

#### 7.1.1 A kétdimenziós modellek összehasonlítása

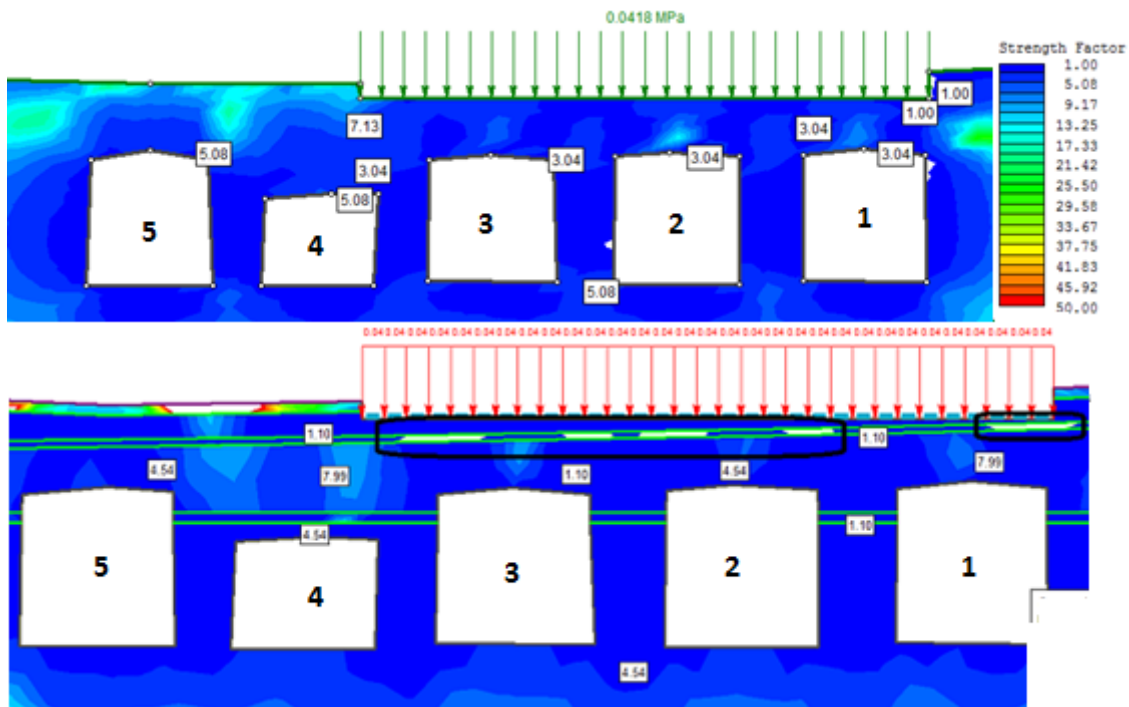
A két módszer eredményeinek összehasonlítását, a hasonló tendencia és dolgozat terjedelmének korlátozása miatt csak az egyik keresztmetszeten fogom bemutatni. A következő ábrákon a C jelű keresztmetszet eredményei láthatók, minden esetben a felső részen az Examine 2D az alsó részen a Phase2 modell ugyanazon tulajdonságai vannak feltüntetve. Az eltérő módszerek használata miatt a közet rétegződés csak a Phase2 modellnél vehető fel, tehát a másik szoftver esetén ez a hatás elhanyagolódik. A peremelem módszer ismertetésekor leírtak alapján ennek használata akkor célszerű, ha nincs a tartományon belüli változás sem geometriai, sem szilárdsági értelemben. A következő összehasonlításoknak az is a célja, hogy az itt jelenlévő közetrétegződés elhanyagolása milyen hatással lesz az eredményekre. A feszültségek alakulásánál mindkét modellben nagyon hasonló értékeket kaptam, különbséget az eredeti és a végleges állapotnál is csak a 4-es pince falaiban tapasztalható (73-74. ábra). Ez betudható a 4-es pince feletti bentonit rétegnek. Mivel a feszültségek alakulásában nincs nagy differencia, ezért a teherbírasi tényező értékei is hasonlóak a tömör mészkőnél. Persze a közetrétegződés figyelembevételével a Phase2 modellnél a felső repedezett és emiatt gyengébb szilárdsági paraméterekkel rendelkező mészkő rétegeknél a teherbírasi tényező jóval kisebbre adódik, sőt valahol az 1-es érték alá is csökken (75. ábra).



73. ábra. Az feszültségek összehasonlítása eredeti állapotban



74.ábra. Az feszültségek összehasonlítása végleges állapotban

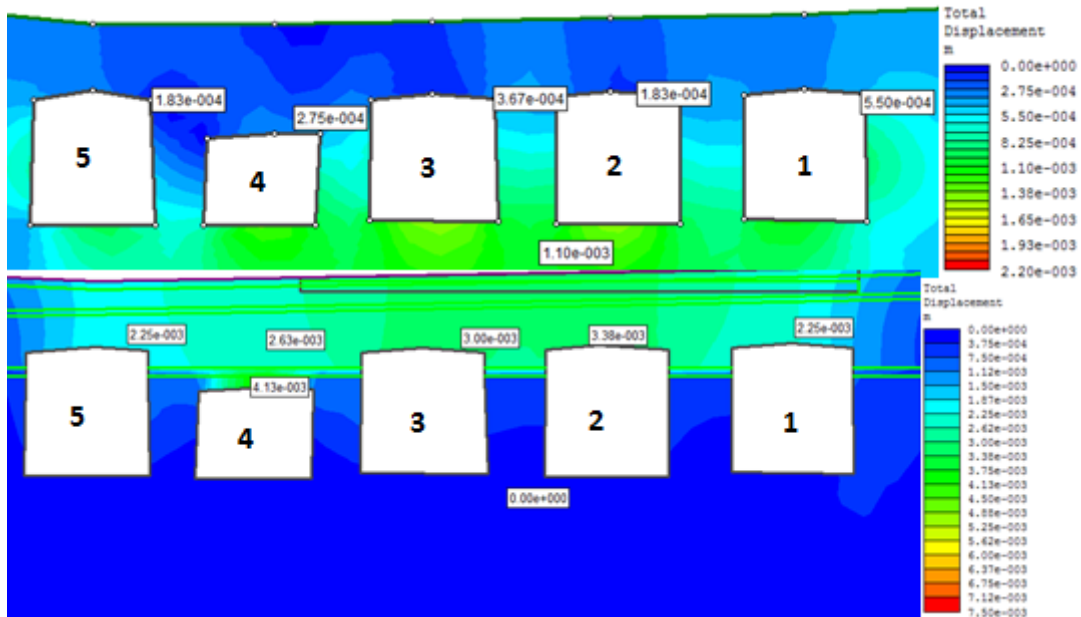


75.ábra. A teherbírési tényező összehasonlítása végleges állapotban

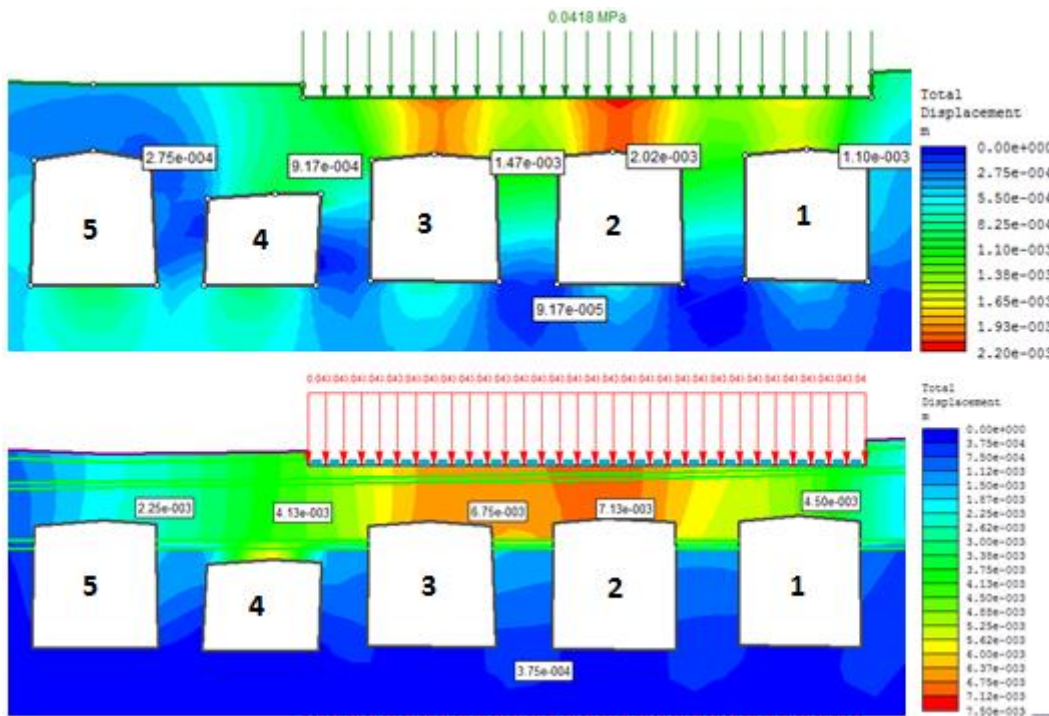
Az elmozdulások alakulásánál már sokkal jelentősebb különbségeket tapasztalhatunk (76-77.ábra). Az Examine 2D eredményeihez képest a Phase2-nél 2-3-szor nagyobb értékeket kapunk. Például a 2-es pince feletti süllyedés az első esetben 1.8 mm-re adódik, míg a másikkban 3.75 mm-re. A 78. ábrán egy még drasztikusabb esetet is bemutatok, ami a B jelű keresztmetszetenél adódott. Itt az látható, hogy az 1-es és 2-es pince közötti átjáró fötője felett az Examine 2D esetében mindössze 8.25 mm, míg a Phase2 esetén 18 cm süllyedés alakul ki. A 3D-s modellvizsgálat eredményeiből kiderül ugyan, hogy az Examine 2D-vel kapott érték



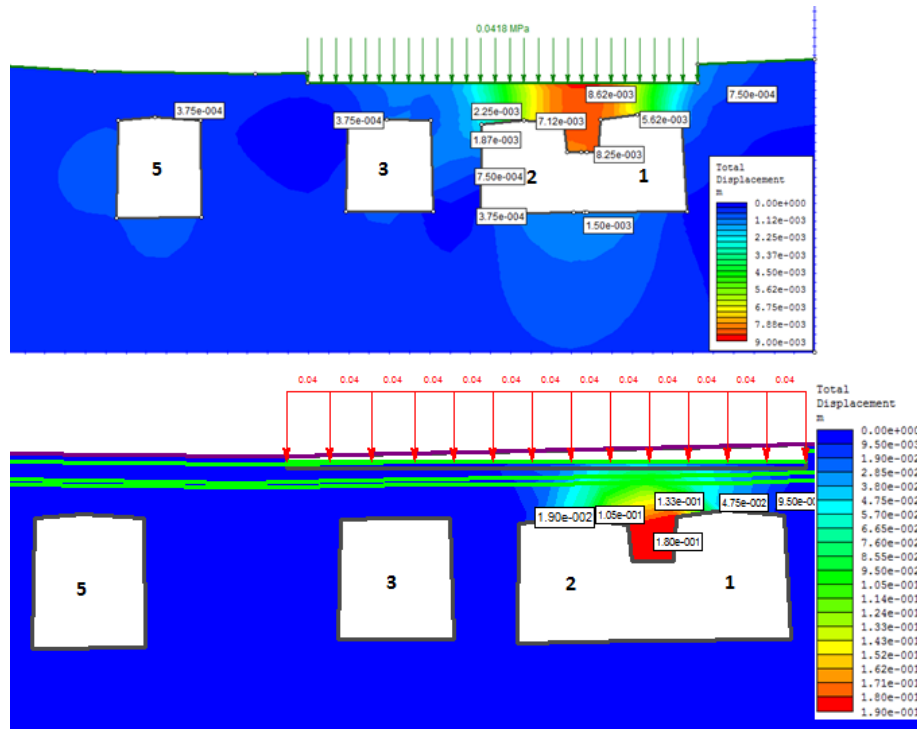
sokkal inkább reális, de ezt azért helyén kell kezelni, mivel ha csak kétdimenzióban vizsgálódunk, akkor az itt található geometriai kialakítás hatására, (mivel az átboltozódást nem lehet figyelembe venni) a 18 cm süllyedés, vagyis az állékonyságvesztés is elképzelhető lenne.



76.ábra. Az elmozdulások összehasonlítása eredeti állapotban



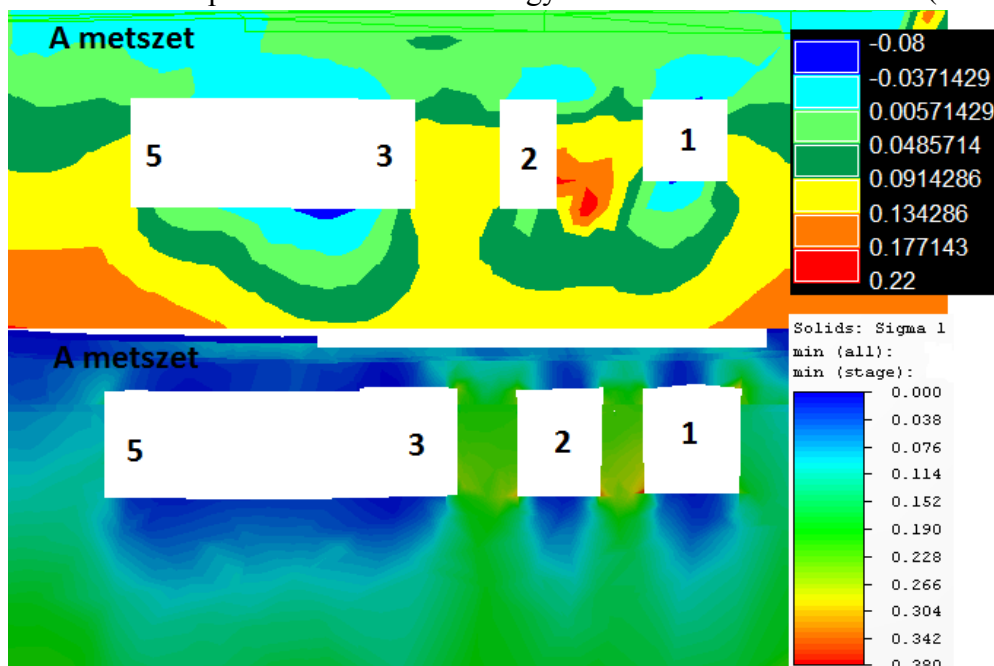
77.ábra. Az elmozdulások összehasonlítása végleges állapotban (C km)



78.ábra. Az elmozdulások összehasonlítása végleges állapotban (B km)

### 7.1.2 A háromdimenziós modellek összehasonlítása

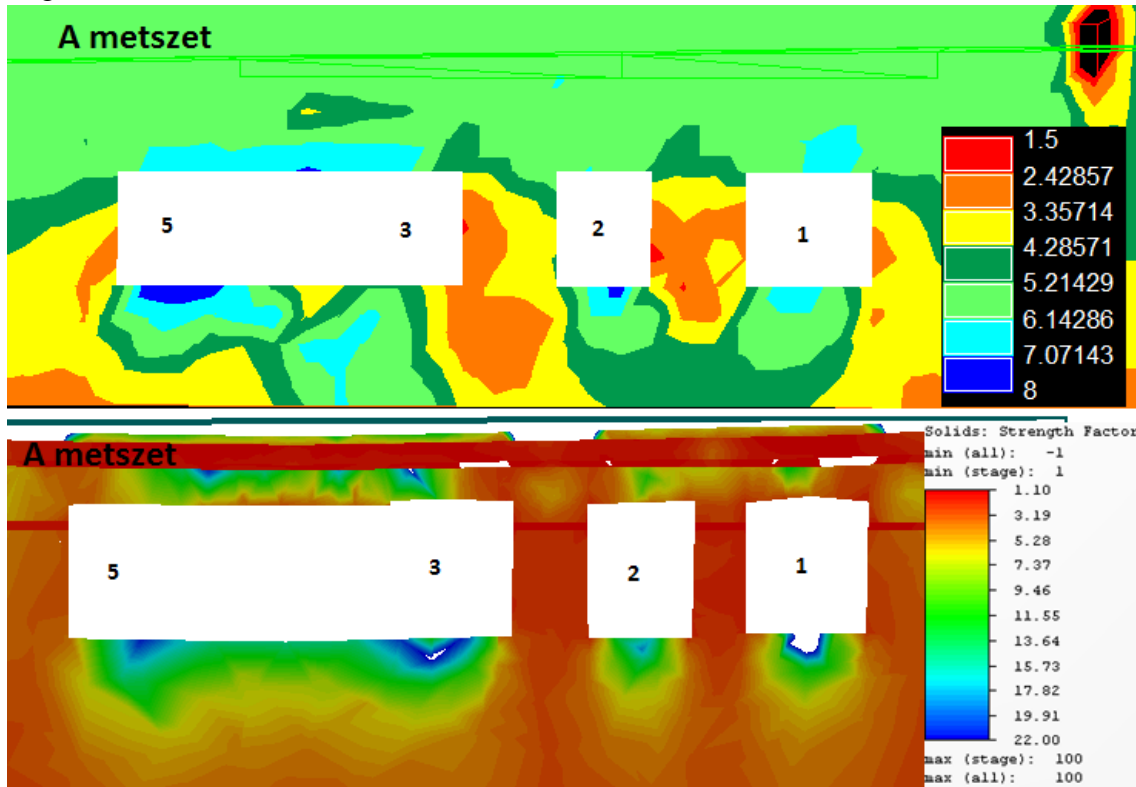
A háromdimenziós modellvizsgálat eredményeinek összehasonlítását az A keresztmetszetenél fogom bemutatni. A következő ábrákon minden esetben a felső részen az Examine 3D az alsó részen a RS<sup>3</sup> modell ugyanazon tulajdonságai vannak feltüntetve. Az eltérő módszerek használata miatt a közettrétegződés csak a RS<sup>3</sup> modellnél vehető figyelembe, tehát a korábbi kétdimenziós esethez hasonlóan ez a hatás szintén elhanyagolódik a peremelemmódszert alkalmazó Examine 3D-nél. A végső állapotban kapott feszültségek összehasonlításánál a kapott értékek alakulása nagyon hasonló tendenciát mutat (79. ábra).



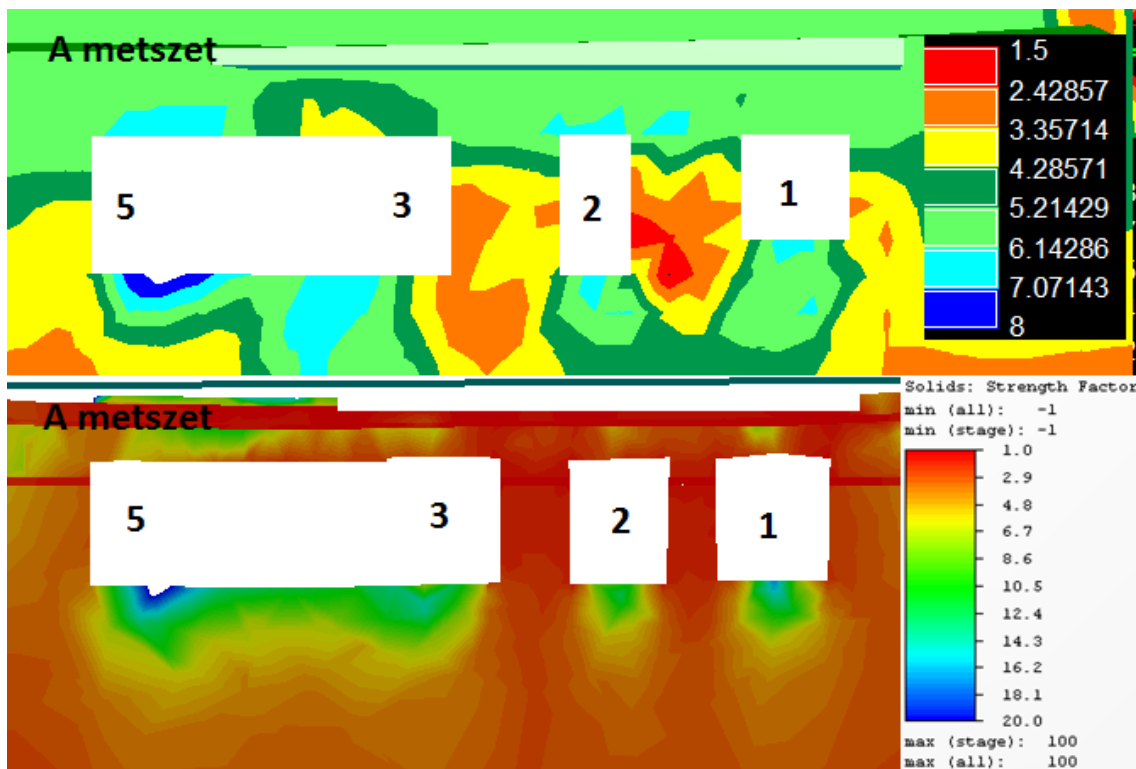
79.ábra. A feszültségek összehasonlítása végleges állapotban (A km)



Az RS<sup>3</sup> modell esetén kicsit nagyobb feszültségeket kapunk. A teherbírési tényező vizsgálatánál, a gyengébb kőzetrétegekben 1-1.5 közötti értékeket kapunk az RS<sup>3</sup> modell esetén, de ezt nem lehet összehasonlítani a másik modellel, ahol nincs is rétegződés (80-81. ábra). Általánosságban azonban az tapasztalható, hogy a kapott értékek hasonló tartományban mozognak.

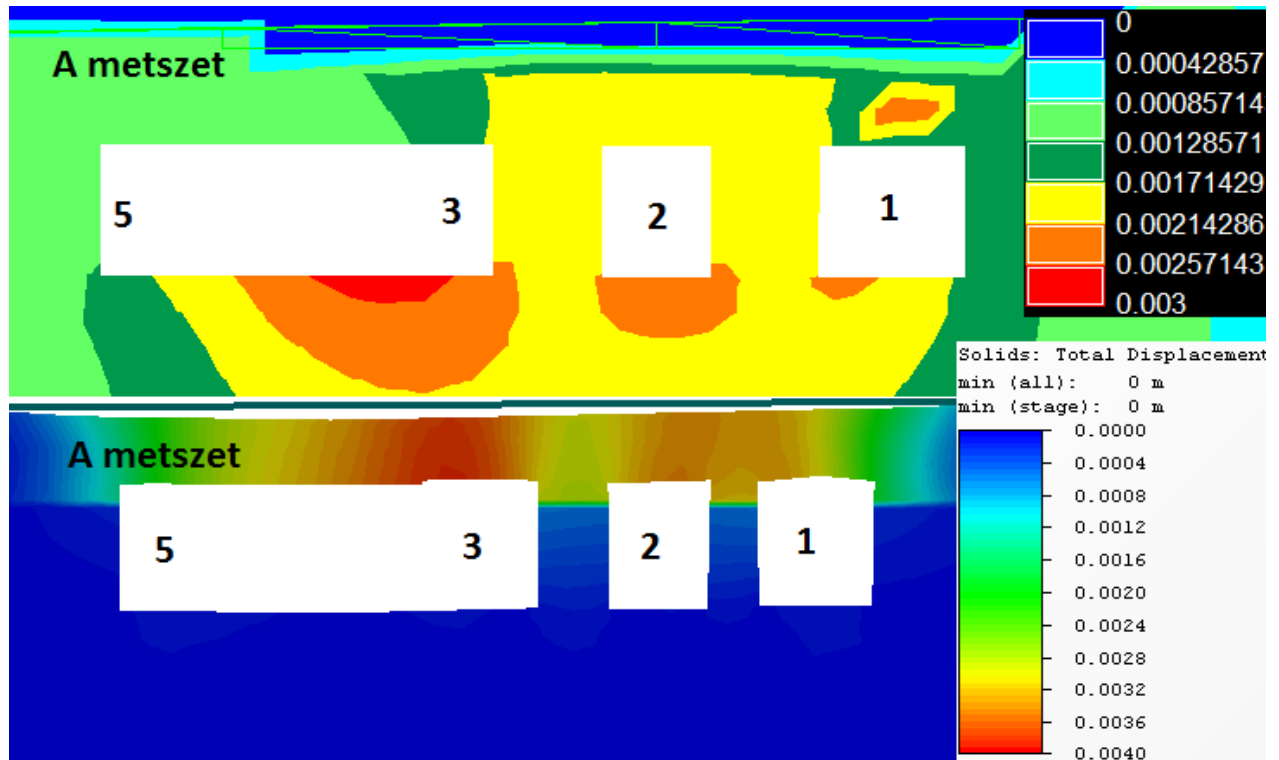


80. ábra. A teherbírési tényező összehasonlítás eredeti állapotban (A km)

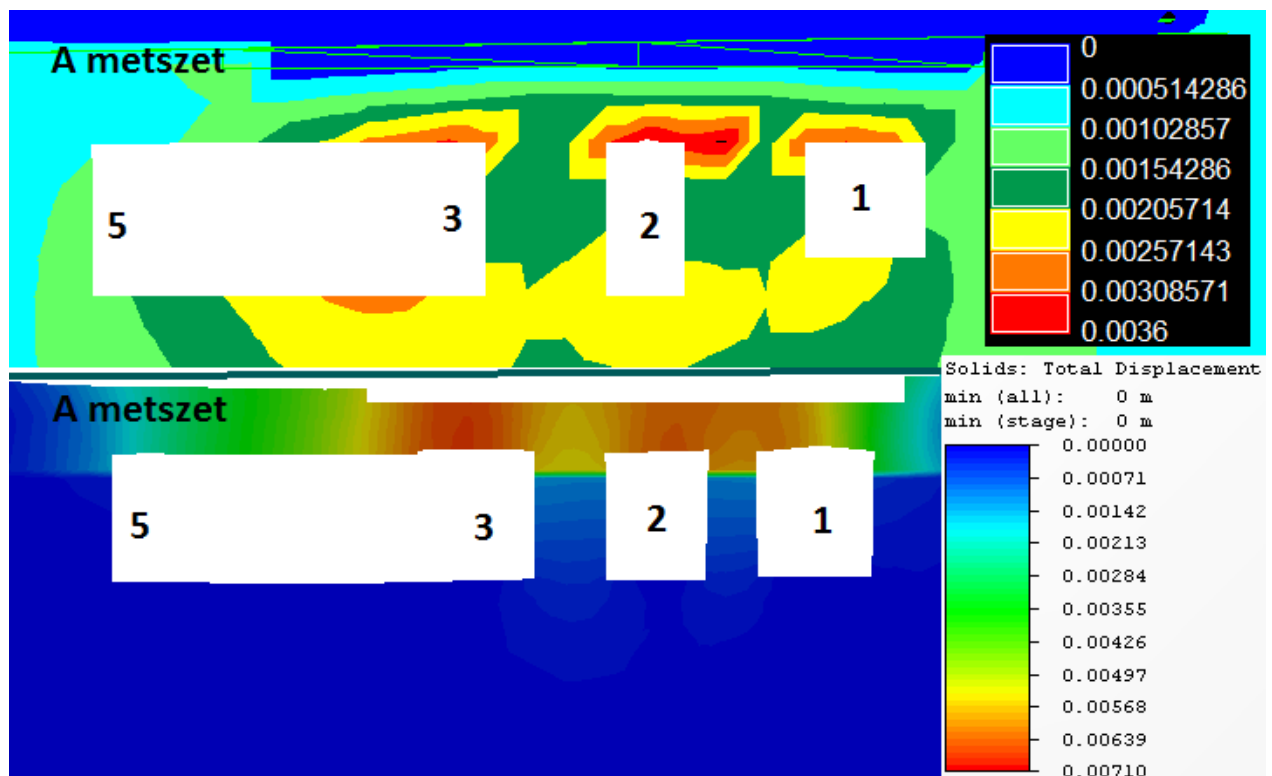


81. ábra. A teherbírési tényező összehasonlítás végleges állapotban (A km)

Az elmozdulások alakulásánál az eredeti állapotban a pincék feletti részen 2-4 mm, míg a végleges állapotban 4-7 mm süllyedés keletkezik az RS<sup>3</sup> modell esetén. Ezeket az értékek az Examine 3D modellnél 0.8-1.5 mm és 1-3.6 mm nagyságúra adódnak. Az első esetben tehát 2-3 mm, a második esetben 0.5-2.1 mm süllyedés állapítható meg (82-83. ábra).



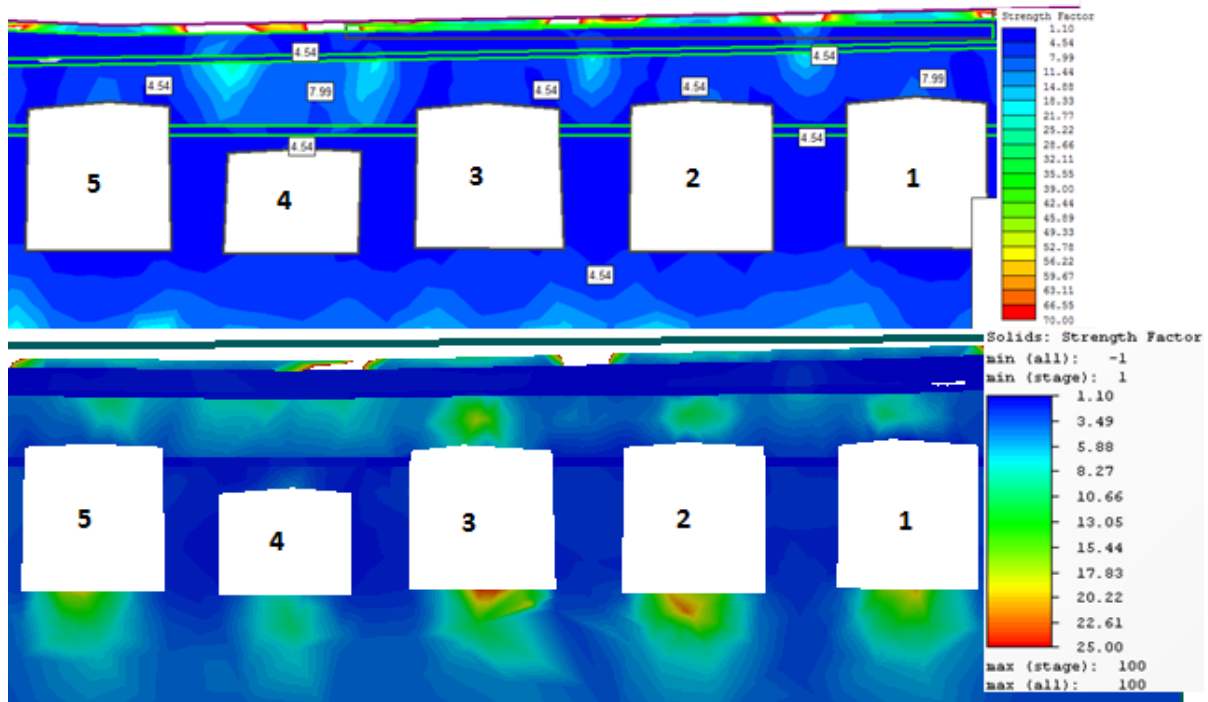
82. ábra. Az elmozdulások összehasonlítás eredeti állapotban (A km)



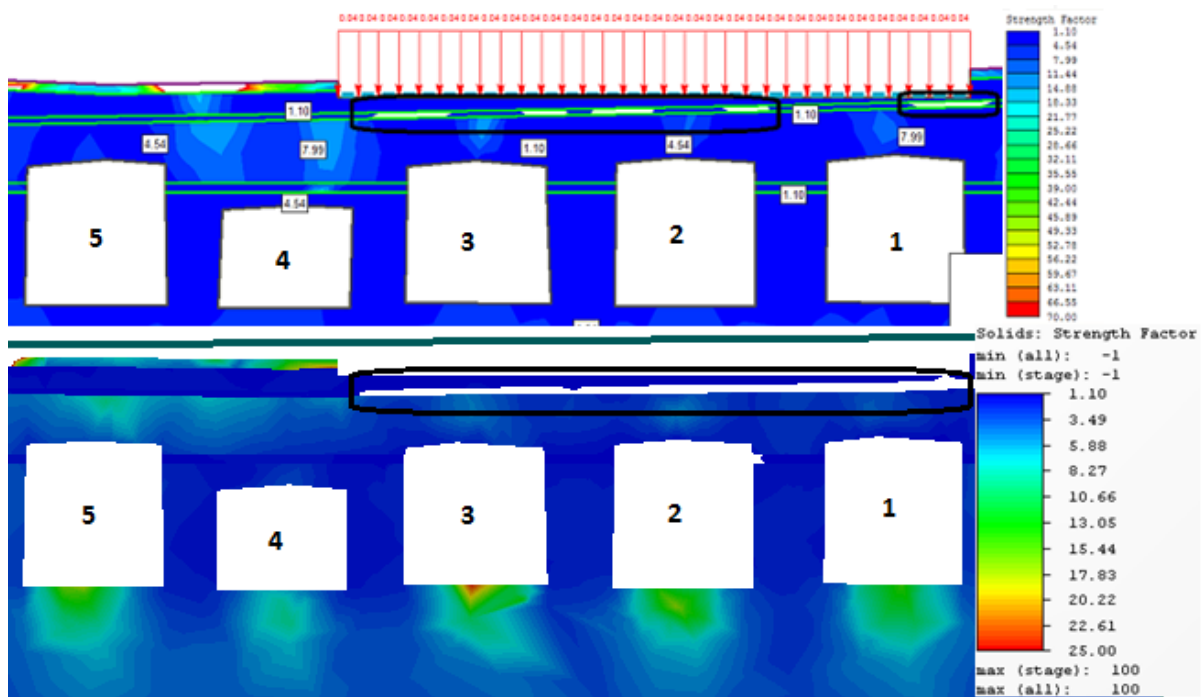
83. ábra. Az elmozdulások összehasonlítás végleges állapotban (A km)

## 7.2 A 2D és 3D-s modellek eredményeinek összehasonlítása

Az összehasonításhoz azért használom a C keresztmetszetet, mert ez a kétdimenziós vizsgálatban is megbízható eredményeket adott és így reális képet kaphatunk a két- és háromdimenzióban történő modellezés közti eltérésekről. A következőkben bemutatott ábrákon felül rendre a Phase2 modell, míg alul az RS<sup>3</sup> modell eredményei láthatók. A teherbírási tényező alakulása mind a két állapotban nagyon jó egyezést mutat. A végső állapotban az erősen repedezett mészkő rétegben mindkét esetben 1.1 alá csökken a teherbírás (84-85. ábra).

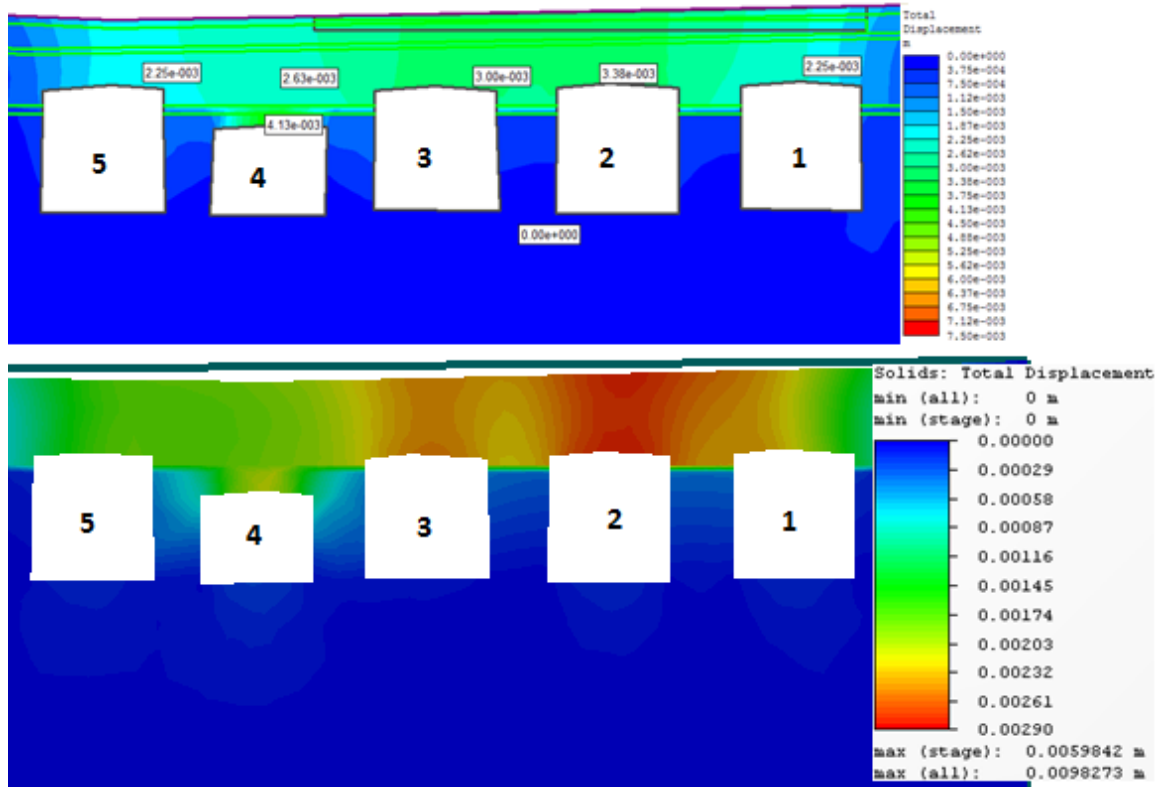


84. ábra. A teherbírási tényező összehasonlítás eredeti állapotban (C km)

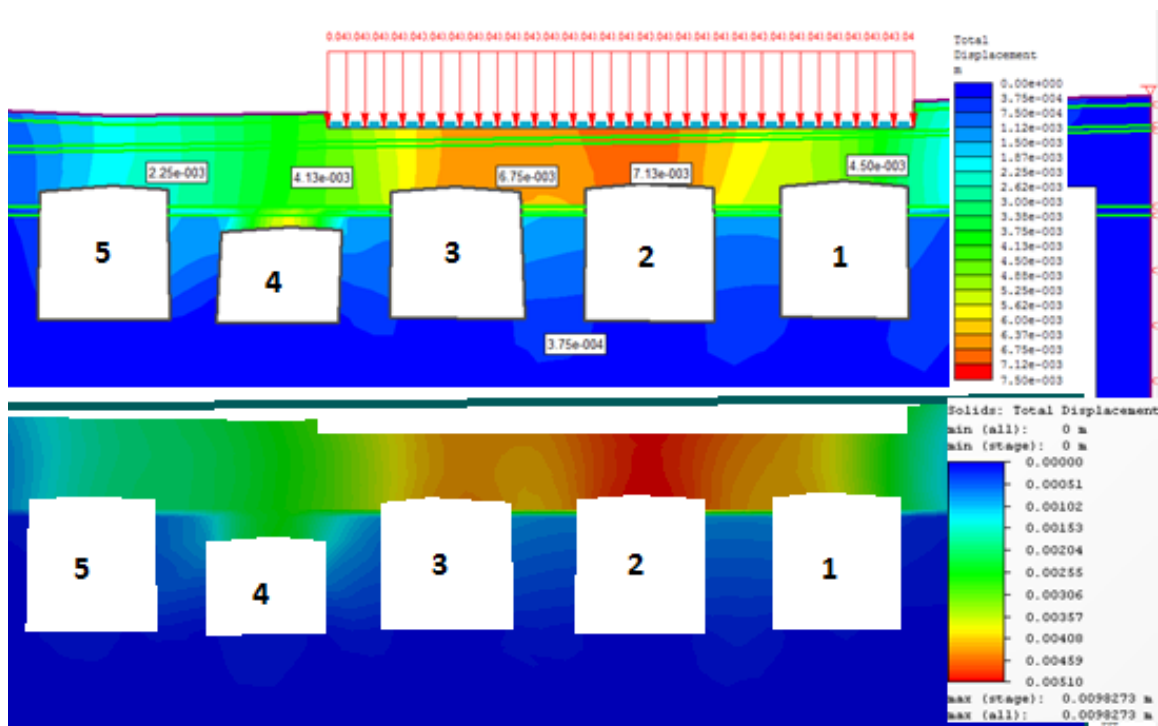


85. ábra. A teherbírási tényező összehasonlítás végleges állapotban (C km)

Az elmozdulások esetén is szinte mindenhol ugyanúgy alakulnak a süllyedések. Eredeti állapotban például mindkét esetben a 2-es pince felett keletkezik a legnagyobb érték. Ez Phase2 esetén 3.38mm, míg az RS<sup>3</sup> modellnél 2.9 mm (86. ábra). Végso állapotban ugyanezen a helyen elsónél 7.13 mm, míg a másodiknál 5.1 mm-re adódik a süllyedés (87. ábra). Tehát a valós süllyedés Phase2-nél 3.75 mm, míg az RS<sup>3</sup>-nál 2.2 mm.



86. ábra. A elmozdulások összehasonlítása eredeti állapotban a (C km)



87. ábra. Az elmozdulások összehasonlítása végleges állapotban (C km)

## 8. Eredmények értékelése

A vizsgálat első fázisában a pincerendszer 3 mértékadó keresztmetszetében, az építendő ház közepe és két széle alatt végeztem el az ellenőrzést. Ez az ellenőrzés az említett keresztmetszetek 2D-s vizsgálatát jelentette. Ennek eredményei bizonyos keresztmetszetekben nem adtak megfelelő eredményeket. Ez önmagában még nem jelenti a pincék állékonyságvesztését, csak a 2D-s modellezés hiányosságait. A felmerülő problémák miatt elvégeztem a pincerendszer 3D-s vizsgálatát is. A 3D-s vizsgálatot két különböző módszert használó szoftverrel is elvégeztem. Az egyik az Examine 3D program, ami a peremelem módszeren alapul, a másik az RS<sup>3</sup> ami végelesemes módszert használ. A következő pontokban az egyes keresztmetszetek eredményeit foglalom össze.

### 8.1 Az A jelű keresztmetszet értékelése

Az A jelű keresztmetszet 2D-s vizsgálat során nem felelt meg. Az állékonysággal szembeni biztonság 1,3-ra adódott, ami telített állapot esetén tovább csökkent. Az itt jelenlévő 2 pince közötti hosszú átjáró miatt a süllyedések is irreálisan nagyra adódtak. Mivel már eredeti állapotban 12 cm körüli süllyedés jelentkezett, az eredményeket a 2D-s modell hiányosságainak tudhatjuk be. Ennél a keresztmetszetenél mindenképp szükséges a 3D-s modell eredményeinek értékelése. A két háromdimenziós szoftverrel kapott eredményeknél minden esetben az RS3 eredményei a kedvezőtlenebbek, ezért ezeket veszem figyelembe. A teherbírási tényezőre kapott értékek megfelelőnek mondhatók, hiszen csak a 20-30 cm vastag erősen repedezett mészkő rétegben csökkennek 1-es érték közelébe. Az elmozdulásoknál kapott 2-3 mm abszolút süllyedés szintén megfelelő. Ezekből arra következtetek, hogy állékonysággal szemben is megfelelő a biztonság. Tehát a 3D-s modell eredményei alapján, a keresztmetszet megfelelő.

### 8.2 A B jelű keresztmetszet értékelése

A B jelű keresztmetszet a kétdimenziós vizsgálat során csak bizonyos geometriai átalakítással lehetett vizsgálni, de így többnyire megfelelt. Az állékonysággal szembeni biztonság 2,41-re adódott, de még telített állapotban is a megfelelőnek mondható 1,64-es értéket kaptam. Az alakváltozások szempontjából szintén még elfogadható a 14 mm körüli maximális süllyedés, annak tudatában, hogy a 2D-s modellezés hiányosságai nagymértékben befolyásolták ezt az eredményt. Ez a teherbírási tényezőnél is megmutatkozik, hiszen már eredeti állapotban sem felel meg a közepesen és erősen repedezett réteg egyes szakaszaiban. Telített állapotban pedig az ép durva mészkőnél is látható a teherbírás-vesztés. A 3D-s modell alapján viszont ellenőrizni tudtam a teherbírási tényező alakulását és itt is azt tapasztaltam, hogy az erősen repedezett mészkőrétég egyes szakaszaitól eltekintve sehol sem csökken 1.1 érték alá. A terhelés hatására a legnagyobb süllyedés 5 mm-re adódott, ami egyben a legnagyobb elmozdulás is a pincerendszerben az RS<sup>3</sup> modellvizsgálat alapján. Tehát a 2D-ban kapott biztonsági értékek és a 3D-ben kapott teherbírási és elmozdulási értékek alapján a keresztmetszet megfelelő. A következő három táblázat a keresztmetszet néhány kitüntetett pontjában történő változásokat foglalja össze, a különböző szoftverek alkalmazása esetén.

A B keresztmetszet 1. pontjának eredményei					
Vizsgált tulajdonság	Vizsgálati állapot	Alkalmazott szoftverek			
		Examine 2D	Phase 2	Examine 3D	RS <sup>3</sup>
Feszültség [MPa]	Eredeti	0,18	0,24	0,10	0,16
	Végleges	0,38	0,39	0,11	0,24
	Változás	0,20	0,15	0,01	0,08
Teherbírási tényező [-]	Eredeti	1,83	1,65	3,70	2,40
	Végleges	1,33	1,30	3,50	1,85
	Változás	-0,50	-0,35	-0,20	-0,55
Elmozdulás [mm]	Eredeti	0,75	2,20	1,90	0,45
	Végleges	1,09	2,30	2,10	1,10
	Változás	0,34	0,10	0,20	0,65

7. táblázat. A B jelű keresztmetszet 1. pontjának eredményei

A B keresztmetszet 2. pontjának eredményei					
Vizsgált tulajdonság	Vizsgálati állapot	Alkalmazott szoftverek			
		Examine 2D	Phase 2	Examine 3D	RS <sup>3</sup>
Feszültség [Mpa]	Eredeti	0,06	0,01	-0,01	0,08
	Végleges	0,16	0,02	-0,04	0,13
	Változás	0,10	0,01	-0,03	0,05
Teherbírási tényező [-]	Eredeti	2,88	2,65	6,50	2,50
	Végleges	0,93	3,55	6,40	1,20
	Változás	-1,95	0,90	-0,10	-1,30
Elmozdulás [mm]	Eredeti	2,85	24,20	1,90	3,95
	Végleges	8,34	39,60	3,40	7,40
	Változás	5,49	15,40	1,50	3,45

8. táblázat. A B jelű keresztmetszet 2. pontjának eredményei



A B keresztmetszet 3. pontjának eredményei					
Vizsgált tulajdonság	Vizsgálati állapot	Alkalmazott szoftverek			
		Examine 2D	Phase 2	Examine 3D	RS <sup>3</sup>
Feszültség [Mpa]	Eredeti	0,21	0,45	0,02	0,13
	Végleges	0,44	0,66	0,04	0,22
	Változás	0,23	0,21	0,02	0,09
Teherbírási tényező [-]	Eredeti	2,67	2,20	6,00	4,10
	Végleges	1,60	1,75	5,50	2,40
	Változás	-1,07	-0,45	-0,50	-1,70
Elmozdulás [mm]	Eredeti	0,45	6,60	1,40	1,90
	Végleges	2,17	8,80	2,10	4,00
	Változás	1,72	2,20	0,70	2,10

9. táblázat. A B jelű keresztmetszet 3. pontjának eredményei

### 8.3 A C jelű keresztmetszet értékelése

A C jelű keresztmetszet a kétdimenziós vizsgálat során minden szempontból megfelelt. Az állékonysággal szembeni biztonság 2,57-re adódott, de még telített állapotban is a megfelelőnek mondható 1,67-es értéket kaptam. Az alakváltozások szempontjából szintén teljesen elfogadható a 4 mm körüli maximális süllyedés és a teherbírási tényező is megfelelő értékeket mutat a 20-30 cm erősen repedezett réteg egyes szakaszainak kivételével. A 3D-s eredmények még inkább ezt támasztják alá, mivel jóval kisebb süllyedés adódott (2.2 mm), így ezt a keresztmetszetet is megfelelőnek találtam. A 10-13. táblázatban a keresztmetszet, néhány kitüntetett pontjában szintén összefoglaltam a feszültségek, teherbírási tényező és az elmozdulások alakulását.



<b>A C keresztmetszet 3. pontjának eredményei</b>					
Vizsgált tulajdonság	Vizsgálati állapot	Alkalmazott szoftverek			
		Examine 2D	Phase 2	Examine 3D	RS <sup>3</sup>
Feszültség [MPa]	Eredeti	0,01	0,02	0,00	0,01
	Végleges	0,03	0,02	-0,01	0,03
	Változás	0,02	0,00	-0,01	0,02
Teherbírási tényező [-]	Eredeti	9,75	8,70	3,80	6,40
	Végleges	3,33	3,80	6,40	2,90
	Változás	-6,42	-4,90	2,60	-3,50
Elmozdulás [mm]	Eredeti	0,30	3,38	1,30	2,85
	Végleges	2,10	7,13	1,40	5,50
	Változás	1,80	3,75	0,10	2,65

12. táblázat. A C jelű keresztmetszet 3. pontjának eredményei

<b>A C keresztmetszet 4. pontjának eredményei</b>					
Vizsgált tulajdonság	Vizsgálati állapot	Alkalmazott szoftverek			
		Examine 2D	Phase 2	Examine 3D	RS <sup>3</sup>
Feszültség [MPa]	Eredeti	0,03	0,02	-0,02	0,01
	Végleges	-0,02	0,03	-0,02	0,02
	Változás	-0,05	0,01	0,00	0,01
Teherbírási tényező [-]	Eredeti	5,67	8,70	6,90	5,20
	Végleges	4,50	3,80	6,80	2,20
	Változás	-1,17	-4,90	-0,10	-3,00
Elmozdulás [mm]	Eredeti	0,23	2,25	0,80	2,20
	Végleges	1,65	4,88	1,46	3,80
	Változás	1,43	2,63	0,66	1,60

13. táblázat. A C jelű keresztmetszet 4. pontjának eredményei

#### 8.4 Általános tapasztalatok és megjegyzések

A vizsgálatok tapasztalataként levonható, hogy víz hatására a kőzetnél jelentős szilárdság csökkenés figyelhető meg, ami a teherbírási és a biztonsági tényező alakulásánál is megmutatkozik. Ezért a felszíni vizek elvezetésére, illetve a közművezetékek tervezésére és kivitelezésére fokozott figyelmet kell fordítani. Egy esetleges nagy mennyiségű csapadék, beázás, csőtörés hatása nagymértékben veszélyezteti a pincék állékonyságát. Javasolt az alapozási munkák száraz időben történő elvégzése is, mert egyébként a földkiemelés után a csapadék egyenesen a pince kőzetanyagába áramolhat. A kőzet szilárdsági tulajdonságainak romlása nemcsak víz hatására következhet be, hanem hosszútávon a pincék karbantartásának hiánya miatt is kialakulhat. 30-40 év elteltével, a most kapott szilárdsági értékek kedvezőtlen irányba változhatnak és az akkori tulajdonos tudta nélkül a pincerendszer stabilitása veszélybe

kerülhet. A hosszú távú viselkedést előre nagyon nehéz modellezni, mert nem tudjuk milyen hatások fogják érni a pincerendszer sok év távlatában.

A vizsgálataim során nem vettem figyelembe a pincék főtéjénél kialakított boltívek hatását. Ezek építése utólag történt megerősítés céljából, de a kivitelezésük minősége kérdéses. Ezek jótékony, teherátadó hatása csak az építés közben, a terhelés hatására történő befeszülésük esetén jelentkezik. Ezt a hatást, a bizonytalansága miatt a biztonság javára elhanyagoltam.

Összességében tehát a pincerendszer megfelel az állékonysági követelményeknek, de az építkezés során folyamatos megfigyelést igényel. Az építkezés megkezdése előtt fel kell mérni (jegyzőkönyvbe foglalni) és meg kell jelölni a repedések helyét, számát, tágasságát és ezeket az építkezés során, napi szinten ellenőrizni kell. Javasolt lehet az elmozdulások mérése a kritikus helyeken. Új repedések megjelenése vagy a meglévő repedések terjedése, tágulása esetén az építkezést szüneteltetni kell a további vizsgálatok vagy esetleges megerősítések idejére.

A végeselemes és peremelemes szoftverek összehasonlításának egyik tanulsága, hogy az elmozdulások alakulásánál, a peremelemes módszer két- és háromdimenzióban is sokkal kisebb mértékű süllyedéseket eredményezett. Ez annak a következménye, hogy a gyengébb közetrétegekben, ahol amúgy is nagyobb elmozdulások keletkeznek nem tudta figyelembe venni a szoftver a süllyedéseket. Az eredmények alakulásából a legfontosabb tapasztalat, hogy ha rétegződés van a vizsgált területen, akkor a peremelem módszert alkalmazó szoftverek eredményei csak gyors elemzés céljából használhatók fel, de tervezéshez nem alkalmasak.

## 9. Összefoglalás

Dolgozatomban egy budatétényi teleken lévő pincerendszer állékonyságvizsgálatával foglalkoztam. A telek tulajdonosa családi ház építését tervezi a pincék fölé. A megoldandó feladatot, ennek a háznak a pincerendszerre gyakorolt hatásának vizsgálata és a stabilitás igazolása jelentette. Ennek bizonyítása mellett, a végeselem- és a peremelem módszer elvét és ezek alapján a két- és háromdimenziós modellvizsgálatok összehasonlítását is tartalmazza a tanulmány.

A feladatot megoldását a helyszínbemérésével, helyszíni vizsgálatokkal kezdtem. Először végigjártam a pincerendszer folyosóit, felmértem a repedezettség mértékét a pincék azon szakaszain, ahová a tervezett ház épül majd. Továbbá megvizsgáltam a pince feletti terepviszonyokat és a pince szellőzőkürtői alapján fel tudtam venni a közetrétegződések vastagságát. Ebből arra a következtetésre jutottam, hogy a kőzetkörnyezet zömében durva mészkő, amelynek felső rétegei erősen illetve közepesen tagoltak. A legközelebbi helyszínbemérés alkalmával kőzetmintákat vettem a pince ép, repedezetlen mészkőfalaiból. A fúrás eredményeként 20 db 60 mm átmérőjű magmintát kaptam, amelyekből a laboratóriumban 2:1 és 1:1 magasság:átmérő arányú próbatesteket készítettem. A próbatestek méretezése után, a szilárdsági és rugalmassági tulajdonságok meghatározásának céljából számos egyirányú nyomószilárdsági és közvetlen húzószilárdsági vizsgálatot hajtottam végre, száraz illetve telített állapotban.

A laborvizsgálatok eredményei alapján RocLab1.0 szoftver segítségével meghatároztam a numerikus modellekben használt anyagmodellek paramétereit (alakváltozási

modulus, kohézió, súrlódási szög, húzószilárdság). A durva mészkő rétegek repedezettségének változását a Geológiai Szilárdsági Index (GSI) változtatásával vettem figyelembe. A zömében jelenlevő ép, repedezetlen durvamészkőre  $GSI=90$ , a közepesen illetve erősen repedezett felső rétegekre  $GSI=55$  ill.  $GSI=35$  értéket vettem fel. A kőzet és talajrétegek paramétereinek összegzés után, megkezdtem a modellvizsgálatokat.

A modellvizsgálatokat négy féle módon végeztem el. Létrehoztam két kétdimenziós és két háromdimenziós modellt és ezeket hasonítottam össze különböző szempontok alapján. Megvizsgáltam a végeelem és a peremelem módszerből kapott eredmények eltéréseit és azok okait. Továbbá azt is értékeltem, hogy azonos módszer alkalmazása esetén a két- és háromdimenziós modell milyen eltéréseket mutat. Végül a 2D-s és 3D-s modellezés eredményeit külön-külön és együtt is értékelve, azok hiányosságait mérlegelve, a pincerendszer állékonyságát megfelelőnek találtam. Ugyanakkor az építkezés csak a korábbiakban leírt biztonsági intézkedések betartás mellett hajtható végre.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönöm Dr. Görög Péter szakmai tanácsait, a helyszínbejárás megszervezését és a korábbi laborvizsgálatoknál nyújtott segítségét, továbbá a modellezésre használt szoftverek biztosítását.

Köszönöm a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló Laboratórium vezetőinek, hogy helyet biztosítottak a kísérletimhez.

Köszönöm az anyagvizsgáló laboratóriumba dogozók segítségét, köztük leginkább Kovács Gáborét, aki nélkül a közetminta vétel nem jöhetett volna létre és Emszt Gyuláét, aki szintén sok hasznos tanácsokkal látott el a labormunkám során.



## Felhasznált irodalom

[1] **Dura L.** (2009): *Geotechnikai szakvélemény a Budapest XXII. kerület Kápolna utca, Hűség utca, Erzsébet királyné út által határolt terület alatt elhelyezkedő volt Budatétényi Bentonitbánya részleges felhagyásáról, tömedékeléses technológia alkalmazásával.*

[2] <http://kohazak.uw.hu/b4.htm>

[3] <https://www.me.bme.hu/sites/default/files/courses/VEM-Matematikai%20alpok-Harmadik%20el%C5%91ad%C3%A1s.pdf>

[4] [https://www.me.bme.hu/sites/default/files/courses/vem-matematikai\\_alpok-tizenegyedik\\_eloadas.pdf](https://www.me.bme.hu/sites/default/files/courses/vem-matematikai_alpok-tizenegyedik_eloadas.pdf)

[5] <http://www.rockscience.com/products/3/Phase2>

[6] <http://www.rockscience.com/products/16/RS3>

[7] <http://www.rockscience.com/products/11/Examine2D>

[8] <http://www.rockscience.com/products/2/Examine3D>

## Ábrajegyzék

1. ábra. Budafok-Tétény vázlatos geológiai térképe
2. ábra. A pincék feletti terepviszonyok
3. ábra. Az építendő ház elhelyezkedése a pincerendszer felett
4. ábra. Az 1-es hosszmetset
5. ábra. A „B” keresztmetset
6. ábra. Pincék belső nézete és a bentonit réteg
7. ábra. 1-es és 2-es szellőző közötti rétegszelvény.
8. ábra. Mintavétel állványos, vízöblítéses fúróval
9. ábra. Kézi HILTI típusú fúrógép
10. ábra. Mintavételi helyek és a kinyert magminták
11. ábra. Examine 2D beállításai
12. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség eredeti állapotban
13. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség végleges állapotban
14. ábra. Az elmozdulások eredeti állapotban
15. ábra. Az elmozdulások végleges állapotban
16. ábra. Az teherbírasi tényező eredeti állapotban
17. ábra. A teherbírasi tényező végleges állapotban
18. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség eredeti állapotban
19. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség végleges állapotban
20. ábra. Az elmozdulások eredeti állapotban
21. ábra. Az elmozdulások végleges állapotban
22. ábra. Az teherbírasi tényező eredeti állapotban
23. ábra. A teherbírasi tényező végleges állapotban
24. ábra. Az elmozdulások végleges állapotban
25. ábra. A teherbírasi tényező végleges állapotban
26. ábra. A pincék geometriájának módosítása
27. ábra. A pincék keresztmetsetzei és talajrétegződések importálása Dxf fájlból
28. ábra. A modell lehatárolása, lemezalap helyének felvétele
29. ábra. A különböző rétegek felvétele, pince üregek kiemelése
30. ábra. A talajok és kőzetek paramétereinek megadása a 4-6. táblázat alapján
31. ábra. Az építési fázisok létrehozása
32. ábra. Eredeti állapot
33. ábra. Földkiemelés
34. ábra. Alaplemez építés
35. ábra. Végleges állapot
36. ábra. Végeselemes háló generálása
37. ábra. A számítás végrehajtása
38. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség eredeti állapotban
39. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség végső állapotban
40. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség eredeti állapotban
41. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség végső állapotban
42. ábra. Az teherbírasi tényező eredeti állapotban
43. ábra. A teherbírasi tényező végső állapotban
44. ábra. Az elmozdulások eredeti állapotban
45. ábra. Az elmozdulások végső állapotban
46. ábra. A biztonsági tényező eredeti állapotban
47. ábra. A biztonsági tényező végső állapotban
48. ábra. Az elmozdulások eredeti állapotban
49. ábra. Az elmozdulások végső állapotban
50. ábra. Az teherbírasi tényező végső állapotban
51. ábra. A biztonsági tényező végső állapotban

52. ábra. Biztonsági tényezők alakulása különböző esetekben
53. ábra. Geometria bevétel
54. ábra. Felületek megépítése
55. ábra. Terepviszonyok felvétele
56. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség változása a különböző állapotokban
57. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség változása a különböző állapotokban
58. ábra. Az elmozdulások változása a különböző állapotokban
59. ábra. A teherbírasi faktor változása a különböző állapotokban
60. ábra. A  $\sigma_1$  feszültség változása a különböző állapotokban
61. ábra. A  $\sigma_3$  feszültség változása a különböző állapotokban
62. ábra. Az elmozdulások változása a különböző állapotokban
63. ábra. A teherbírasi tényező változása a különböző állapotokban
64. ábra. A teherbírasi tényező 1 alatti értékeinek helye
65. ábra. A definiált keresztmetszetek és hosszai
66. ábra. A 3D-s modell és a végeelem háló
67. ábra. A feszültségek alakulása eredeti állapotban
68. ábra. A feszültségek alakulása végső állapotban
69. ábra. Az teherbírasi tényező alakulása eredeti állapotban
70. ábra. Az teherbírasi tényező alakulása végső állapotban
71. ábra. Az elmozdulások alakulása eredeti állapotban
72. ábra. Az elmozdulások alakulása végső állapotban
73. ábra. Az feszültségek összehasonlítása eredeti állapotban
74. ábra. Az feszültségek összehasonlítása végleges állapotban
75. ábra. A teherbírasi tényező összehasonlítása végleges állapotban
76. ábra. Az elmozdulások összehasonlítása eredeti állapotban
77. ábra. Az elmozdulások összehasonlítása végleges állapotban (C km)
78. ábra. Az elmozdulások összehasonlítása végleges állapotban (B km)
79. ábra. A feszültségek összehasonlítása végleges állapotban (A km)
80. ábra. A teherbírasi tényező összehasonlítás eredeti állapotban (A km)
81. ábra. A teherbírasi tényező összehasonlítás végleges állapotban (A km)
82. ábra. Az elmozdulások összehasonlítás eredeti állapotban (A km)
83. ábra. Az elmozdulások összehasonlítás végleges állapotban (A km)
84. ábra. A teherbírasi tényező összehasonlítás eredeti állapotban (C km)
85. ábra. A teherbírasi tényező összehasonlítás végleges állapotban (C km)
86. ábra. A elmozdulások összehasonlítása eredeti állapotban a (C km)
87. ábra. Az elmozdulások összehasonlítása végleges állapotban (C km)

## Táblázatjegyzék

1. táblázat. A száraz állapotban végzett vizsgálatok eredményei
2. táblázat. A telített állapotban végzett vizsgálatok eredményei
3. táblázat. Közvetlen húzóvizsgálatok (brazil vizsgálat) eredményei
4. táblázat. A modell vizsgálatához szükséges talajok tulajdonságai
5. táblázat. A modell vizsgálatához szükséges közetek tulajdonságai száraz állapotban
6. táblázat. A modell vizsgálatához szükséges közetek tulajdonságai telített állapotban
7. táblázat. A B jelű keresztmetszet 1. pontjának eredményei
8. táblázat. A B jelű keresztmetszet 2. pontjának eredményei
9. táblázat. A B jelű keresztmetszet 3. pontjának eredményei
10. táblázat. A C jelű keresztmetszet 1. pontjának eredményei
11. táblázat. A C jelű keresztmetszet 2. pontjának eredményei
12. táblázat. A C jelű keresztmetszet 3. pontjának eredményei
13. táblázat. A C jelű keresztmetszet 4. pontjának eredménye