



Hulladékok alakváltozási kérdéseinek vizsgálata



Készítették: Aipli Sándor Márk, Szarka Gábor

Konzulensek: Dr. Varga Gabriella, Kádár István

BME Geotechnikai Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

2013. Budapest

Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnénk megköszönni segítőkész témavezetőinknek, Dr. Varga Gabriellának és Kádár Istvánnak az állandó támogatást, kritikát, iránymutatást, ami nélkül valószínűleg nem készülhetett el ez a dolgozat. Továbbá nagy köszönettel tartozunk még Dr. Szabó Imrének, aki által elvégezhattük méréseinket a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának laboratóriumában, illetve Kántor Tamásnak, az odaadó segítségét a miskolci laborvizsgálatok alatt. Köszönjük a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai Tanszék dolgozóinak támogatását, Czap Zoltán és Dr. Mahler András segítségét a végeeselemes program kezelésében, Némethy Ferencnek a laboratóriumi munkáját. Végül, de nem utolsó sorban köszönjük mindenkinek, aki valahogyan, de segített bennünket a dolgozatunk megírásában.

Abstract

Dolgozatunk az egyre nagyobb ütemben növekvő lakosság által képződő hulladék elhelyezési problémájával foglalkozik. A felhalmozott hulladékot jelen előírások szerint szemétegetőkbe szállítják és elégetik, vagy 1:3-as rézsűszöggel kialakított depóniákban helyezik el, aminek hatalmas helyigénye van. A hulladék heterogenitása miatt egyes tulajdonságai, mint például az összenyomódási képessége a mai napig tisztázatlan, nincs pontosan leírva, folyamatosan kutatások tárgyát képezi. Célunk a kommunális hulladék alakváltozási paramétereinek pontosabb megismerése, melynek segítségével lehetőség nyílna meredekebb rézsűszöggel kialakított lerakók létesítésére, amely akár 20-30 százalékkal is megnövelné egy lerakó kapacitását. A lehetséges műszaki megoldások mellett, gazdasági szempontból is vizsgáljuk az egyes kialakításokat.

Az alakváltozási képességek megismerése érdekében laboratóriumi kísérleteket végeztünk. Hulladékmintákat a Hejőpáiban található kommunális hulladéklerakóból gyűjtöttünk, amiket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, és a Miskolci Egyetem geotechnikai laboratóriumaiban vizsgáltunk. A különböző méretű és összetételű mintákon, más-más méretű és kialakítású mérőeszközökkel vizsgáltuk az alakváltozási értékeket.

A kapott eredményekből kiszűrtük a mérési hibák anomáliáit, figyelembe vettük a berendezések méreteit, kiemelve a mérethatás szerepét az alakváltozásra, ami a hulladék inhomogenitását és modellezési nehézségeit szem előtt tartva kiemelten fontos kérdés. A kapott eredményeket összevetettük a szakirodalomban fellelhető adatokkal.

Végelelemes program segítségével modelleztük a hulladéktest állékonyságát egy hazai hulladéklerakó egyszerűsített modellének segítségével. A meglévő és egy meredekebb rézsűkialakítással tervezett lerakó állékonyságvizsgálatát is elvégeztük, ahol a biztonsági tényezőkön kívül a lehetséges tönkremeneteli módokat és süllyedéseket is vizsgáltuk. Mérési és modellezési eredményeinket kiértékeltek, majd gazdasági számítást végeztünk a többlet hulladék mennyiségére vonatkozóan.

Kulcsszavak: hulladék-elhelyezés, inhomogenitás, alakváltozási jellemzők, rézsűállékonyság.

Tartalom

1. Bevezetés.....	- 6 -
2. Laboratóriumi vizsgálatok.....	- 7 -
2.1. A vizsgálandó minta beszerzése	- 7 -
2.2. Mérési körülmények, használt laboratóriumi berendezések.....	- 8 -
2.2.1. Miskolci Egyetem geotechnikai laborjában használt berendezések, mérési körülmények	- 8 -
2.2.3. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem geotechnikai laborjában használt berendezések, mérési körülmények	- 10 -
3. Laborvizsgálatok elméleti háttere	- 12 -
3.1. Konszolidáció elmélete.....	- 12 -
3.1.1. Elsődleges konszolidáció	- 13 -
3.1.2. Másodlagos konszolidáció	- 14 -
3.2. Kompressziós görbe	- 15 -
3.3. Hulladékok felszínsüllyedései	- 16 -
3.4. Talajok nyírószilárdsága.....	- 19 -
3.5. Hulladékok nyírószilárdsági paraméterei	- 20 -
4. Laboratóriumi eredmények	- 22 -
4.1. Ödométeres vizsgálat.....	- 22 -
4.1.1. 1-es számú minta.....	- 23 -
4.1.2. 2-es számú minta.....	- 27 -
4.1.3. 3-as számú minta.....	- 29 -
4.2. Nyírószilárdsági vizsgálat.....	- 33 -
4.2.1. Közvetlen nyírás	- 33 -
4.3 A végeelemes programhoz felhasznált paraméterek.....	- 36 -
4.3.1. Ödométerből kapott értékek.....	- 36 -
4.3.2. Nyírószilárdsági paraméterek	- 36 -
4.3.2. Szakirodalomból felhasznált értékek	- 37 -
5. Végeelemes modellvizsgálat	- 37 -
5.1. PLAXIS - az általunk használt végeelemes program.....	- 37 -
5.1.1. A Mohr-Coulomb talajmodell.....	- 38 -
5.1.2. A Soft-Soil-Creep talajmodell	- 38 -
5.2. A modellezés	- 39 -

5.2.1. Bemenő adatok.....	- 40 -
5.2.2. A végeselemes program lefuttatása.....	- 40 -
6. Összefoglalás.....	- 42 -
6.1. Gazdasági vonatkozások.....	- 43 -
6.2. Értékelés, kitekintés.....	- 43 -
7. Irodalomjegyzék.....	- 46 -
8. Mellékletek.....	- 47 -
8.1. Laborvizsgálati melléklet	- 47 -
8.2. Plaxis melléklet.....	- 50 -

1. Bevezetés

Dolgozatunk témája a hulladékok alakváltozási kérdéseivel foglalkozik, a hulladéktestet, mint talajt vizsgáltuk meg, geotechnikai tulajdonságait szem előtt tartva.

Napjaink globális problémái közé tartozik a népességnövekedés, ami maga után vonja a lakosság életmódjának változását, magasabb életszínvonal elérésére való törekvést. Ez további termelésnövekedést eredményez, régi és új anyagfelhasználással és óriási mennyiségű hulladékkeletkezéssel jár (csak Magyarország évi hulladék-kibocsátása kb.: 114 millió tonna^[4]). Ilyen mennyiségű hulladék elhelyezése és ártalmatlanítása egyre nagyobb és összetettebb környezeti és gazdasági problémát és feladatot jelent. A fel nem dolgozott hulladék elhelyezése jelentős földterületeket fed le, nem megfelelő tárolása szennyezheti a talajt, a vizeket, levegőt, illetve tájromboló hatása is van. Emiatt az utóbbi években új feladatkörrel bővült a földművek tervezésének tudománya: hulladéklerakó depóniák építésével^[8]. Ezen építmények további felhasználása érdekében fontos a hulladéklerakók szakszerű lezárása, környezeti veszélyességének csökkentése, tájba illesztése, utógondozása, azaz a hulladéklerakók rekultivációja.

Ahhoz, hogy egy hulladéklerakót rekultiválni lehessen, ismerni kell a benne elhelyezett hulladékok tulajdonságait. Általános értelemben hulladéknak tekinthető az a bármely halmazállapotú, önállóan vagy hordozó közeggel megjelenő anyag és energia, ami az ember mindennapi életéből termelő, szolgáltató vagy fogyasztó tevékenységéből ered és az adott műszaki, gazdasági, társadalmi feltételek között tulajdonosa sem felhasználni, sem értékesíteni nem tud, illetve nem kíván sem kezelve, sem kezeletlenül, ezért átalakítással vagy anélkül történő elhelyezéséről átmenetileg vagy véglegesen gondoskodni kell^[36].

Rekultiválás szempontjából a hulladéktestet, mint talajt kell megvizsgálni. Ez nagyon összetett feladat, tekintetbe véve a hulladék tulajdonságait. A vizsgált hulladék összetétele nagyon változatos, egyaránt megtalálható benne nagy darabos építési hulladék, mint lebomlott szerves anyag illetve szervetlen anyagok is, továbbá ezen anyagok elhelyezkedése a hulladéktestben véletlenszerű, a rétegzettség nem ismert. Az említett körülmények nagyfokú inhomogenitást és anizotrópiát jelentenek.

Az inhomogén talajban nem egységesek a geotechnikai tulajdonságok, lokális eltérések jelentkezhetnek alakváltozási -, áteresztőképességi tulajdonságokban, nyírószilárdsági paraméterekben. Nem szabad figyelmen kívül hagyni a hulladékokban lezajló biológiai folyamatokat, a hulladék bomlását sem. A hulladék bomlási folyamat két fő terméke a depóniagáz és a csurgalékvíz képződése. A képződött anyagok saját kémiai és fizikai

tulajdonságukból kiindulva tovább változtatják az egész hulladéktest viselkedését. Mindezekon kívül a hulladéktömeg állapota, alakja és a bomlási folyamat az időben változik - lokálisan és globálisan is.^[10]

Ennek megfelelően a talajok konszolidációjára vonatkozó összefüggések a hulladékoknál nem alkalmazhatóak, a számítások, laboreredmények csak közelítő értékek, ebből csak következtetni lehet a várható alakváltozásokra, viselkedésre^[4]. Összetett feladat így építkezni a bezárt hulladéklerakókra, nagy körültekintést és kellő rutint kíván a tervezési folyamat. A nehézségek mellett azonban úgy gondoljuk, a jövőben egyre inkább előtérbe kerülnek a hulladékokkal kapcsolatos tervezési problémák, feladatok. Ennek fényében véleményünk szerint van létjogosultsága kutatásunk témájának.

Dolgozatunkban a hulladékok összenyomódási tulajdonságait vizsgáljuk, kitekintve a depóniák rézsűjének meredekségére, annak időbeni változására; továbbá egy közelítő összenyomódási modulust határozzunk meg a laboratóriumi méréseink felhasználásával.

2. Laboratóriumi vizsgálatok

2.1. A vizsgálandó minta beszerzése

A laborvizsgálatok elvégzéséhez szükséges mintákat a Hejőpapi működő regionális hulladéklerakóból tudtuk beszerezni. A lerakó területén a kommunális hulladékon kívül, más típusú hulladékokat is elhelyeznek, ebből fakadóan többféle hulladékból is mintát tudtunk venni. A mintavétel szempontjából kedvező körülményt jelentett, hogy a lerakó aljzatszigetelése kiszakadt, és ennek felmérése illetve javítása céljából a sérülés környékéről el kellett távolítani a hulladékot. Ezt kihasználva sikerült a depónia aljából érett, 2-3 éves kommunális hulladékmintát is venni.



2.1. ábra. Sérült aljzatszigetelés (Hejőpapi)

Összesen három, különböző tulajdonságú és összetételű hulladékmintát vizsgáltunk:

- érett kommunális hulladék,
- építési törmelék, - *A vizsgálatokat elvégeztük, azonban az eredményeket nem használtuk fel számításaink során.*
- szennyvíz ülepítéséből visszamaradt iszappal kevert komposzt. – *Gyors lebomlási folyamata miatt nem képezi a hulladéklerakó érdemi részét, ezért a laborban nem vizsgáltuk.*

Talajmechanikai laboratóriumi vizsgálatoknál a szabvány előírja, hogy a legnagyobb szemcse mérete nem haladhatja meg a mérőberendezés méretének 10 %-át, ennek megfelelően még a helyszínen eltávolítottuk a beszerzett mintákból a próbatest térfogatának 10%-ánál nagyobb elemeket. A méréseket a Miskolci Egyetem Hidrogeológiai Tanszékének laboratóriumában, illetve a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem geotechnikai laboratóriumában végeztük.

2.2. Mérési körülmények, használt laboratóriumi berendezések

2.2.1. Miskolci Egyetem geotechnikai laborjában használt berendezések, mérési körülmények

Hulladékok laboratóriumi körülmények közötti vizsgálata különösen nehéz feladat, hiszen a maximális szemcseátmérő gyakran deciméter nagyságrendű. A Miskolci Egyetem Geotechnikai Laboratóriumában található berendezés világviszonylatban is kiemelkedő, hiszen nagyon kevés helyen van lehetőség 300 x 300 mm-nél nagyobb alapterületű minta vizsgálatára.

A terhelésre felhasznált eszköz egy egyedi, az egyetem által kifejlesztett ödométeres vizsgálatra és nyírószilárdság mérésére is alkalmas berendezés volt. Az alkalmazott mérőberendezés többféle méretű minta terhelésére is alkalmas, így a mérethatás jelenségét is figyelemmel kísérhettük. A használt berendezések méretei:

- 400 x 400 x 267 mm nagyságú doboz ($V = 42,74 \text{ dm}^3$),
- 400 mm magas, 295 mm átmérőjű henger ($V = 27,34 \text{ dm}^3$).



2.2. ábra. Kommunális hulladék a laboratóriumi berendezésekben

Igyekeztünk a gép lehetőségeit minél jobban kihasználni, hiszen a berendezés hazánkban egyedülálló, mind méreteiben, mind tudásában. Vizsgálatainkhoz választottunk egy előre megírt programot: a konszolidációt megvárva, egy többlépcsős terhelés, tehermentesítés, majd egy ismételt többlépcsős újrateherelés mellett döntöttünk. A konszolidációs idő kivárásához szükség volt arra, hogy éjszakai is terheljen a gép. Mivel kézi úton terheltük a mintákat, kizártuk a számítógép leállításából adódó esetleges nem kívánt tehermentesítést, azonban az adatrögzítés ennek ellenére digitális maradt, így fennállt az adatvesztés veszélye. Szerencsénkre, a mérési idő alatt egyszer sem állt le az adatgyűjtés, így szinte minden másodpercről információt kaptunk.

A program három különböző adatot rögzített. Az eltelt idő mellett a terhelés nagyságáról és az elmozdulás mérő aktuális helyzetéről kaptunk információkat. Az adatrögzítés 2, 5 és 10 másodpercenként történt, attól függően, hogy a terhelés változásánál vagy a konszolidációs idő végénél jár a vizsgálat. A kapott eredményeket lentebb ismertetjük.

Mérés közben nehézségek akadtak: az elmozdulás mérő beállítása problémát jelentett. Ennek oka a hulladékok hézagterefogatában rejlik, ami sokkal nagyobb, mint a talajoknál, ezért a talajokhoz kifejlesztett berendezés rendszerint kiakadt a kezdeti vizsgálatok során, így több elmozdulás mérő alkalmazásával kaptunk használható eredményeket. A 0 – 24 órás terhelés technikai feltételeit beállítani is nehéz feladat volt, mivel a labor elektromos hálózata automatikusan áramtalanítani szerette volna a gépeket.



2.3. ábra. Építési hulladék a nyíródobozban

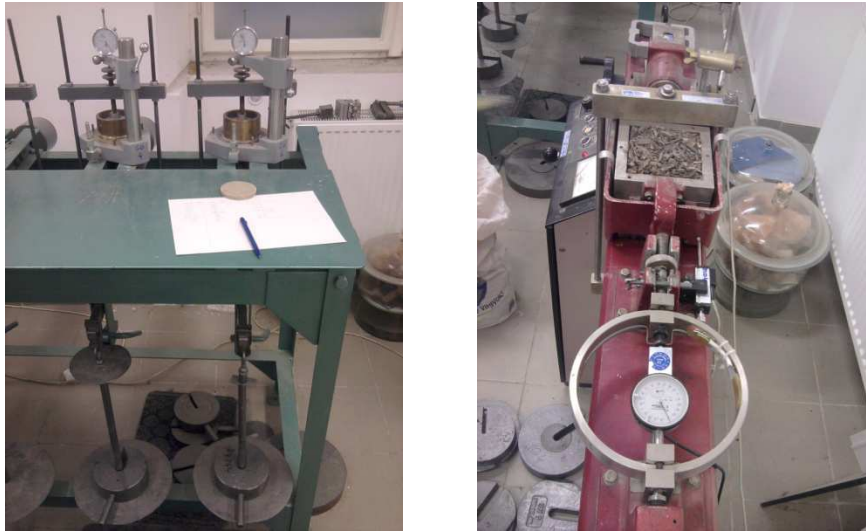
2.2.3. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem geotechnikai laborjában használt berendezések, mérési körülmények

Budapesten is lehetőségünk nyílt a minták vizsgálatára. Háromféle berendezést használtunk:

- 100 x 100 x 38,1 mm-es nyíródoboz ($V = 0,381 \text{ dm}^3$),
- 200 mm magas, 750 mm átmérőjű ödométer ($V = 88,36 \text{ dm}^3$),
- szárítószekrény.

A műszerek mérete, így a minták mérete is a miskolciakhoz képest szembetűnően kisebbek, amik hatással vannak a mérési eredményekre, így figyelemmel tudjuk kísérni a mérethatás jelenségét.

Megmértük a hulladékmintánk nedves tömegét, szárítószekrény használatával kiszáritottuk, így megkaptuk száraz tömegét is, majd ezekből kiszámoltuk a víztartalmát (w).



2.4. ábra. Ödométer és nyíródoboz mérés közben és előtt a budapesti laborban

Két ödométerben elhelyeztünk egy-egy mintát, majd kompressziós feszültségállapotban terheltek egy héten keresztül. Az eredményeket napi rendszerességgel feljegyeztük, illetve a feszültséget hasonlóan, a vizsgálat követelménye szerint - 100 kPa-os lépcsőkben - növeltük.

A nyíródobozban közvetlen nyírókísérlet alá vetettük a mintánkat. A kézi úton ráadott terhelés alapján több mérést is értékeltünk, melyek eredményét a berendezésre kapcsolt számítógép jegyezte fel. A program mérte az eltelt időt, a ráadott terhelést, a vízszintes és függőleges alakváltozást is. A kapott eredményeket lentebb ismertetjük.

Nehézségek Budapesten is akadtak, a problémák a nyíródoboz használata közben jelentkeztek. Több mérés is eredménytelenül vagy triviális eredménnyel zárult, de ezeket észrevettük és nem használtuk fel a továbbiakban. A problémák okai: rosszul felhelyezett, peremén beakadó fésűs fedőlemez, függőleges elmozdulás mérő kiakadása, sőt még egy megdöntött mozdulat miatt két mérés eredménye is kitört a számítógépből.



2.5. ábra. Nyíróberendezés a BME Geotechnikai laborjában

3. Laborvizsgálatok elméleti háttere

Dolgozatunkban a hulladékkal, mint talajjal foglalkoztunk, a laboratóriumi vizsgálatokkal a talajmechanikai paramétereit igyekeztünk meghatározni. Emiatt fontos a vizsgálatok - konszolidáció, nyírószilárdság - elméletét ismerni. Fejezetenként bemutatjuk a talajok vizsgálatát, annak elméletét, összehasonlítva a hulladékok viselkedésével hasonló körülmények között.

3.1. Konszolidáció elmélete

A talaj, a ráadott terhelés hatására alakváltozást szenved, süllyed. Ennek mértéke és időbeli lefutása többnyire a talaj tulajdonságaitól, a terhelés mértékétől, sebességétől és eloszlásától függ. Az így előálló süllyedést az határozza meg, hogy az alábbi négy típusú süllyedés közül melyik lesz a mértékadó^[5]:

- azonnali összenyomódás,
- elsődleges konszolidáció,
- másodlagos konszolidáció,
- oldalkitérés.

Az építmények süllyedési folyamatának, jelen esetben hulladéklerakók rézsűjének állékonyságának kérdésében nagy szerep jut a konszolidáció folyamatának. A Terzaghi-féle egydimenziós konszolidáció elmélete a következő feltételezések alapján vezethető le^[5]:

- a talaj hézagai vízzel telítettek,

- a szilárd szemcse és a víz összenyomhatatlan,
- érvényes a Darcy-törvény,
- süllyedés csakis a víz eltávozásából következik be,
- az összenyomható réteg oldalirányban határolt, bármely vízszintes metszetben, egy adott időpontban a semleges, a hatékony és a teljes feszültség konstans,
- a talaj homogén, izotróp,
- talaj összenyomódási modulusa (E_s) konstans.

A hulladékokra a felsorolt feltételezések nem mind igazak. Alapjaiban véve a hulladék inhomogén, anizotrop, a hulladéktest hézagjai nem telítettek vízzel, a süllyedés az pórusvíz távozásán kívül nagyobb részt az azonnali összenyomódás, a szemcseátrendeződés és a bomlási folyamatok eredménye [2].

A konszolidáció folyamatát kompressziós feszültségállapotban vizsgáljuk. Ekkor a terhelés hatására a talaj kizárólag függőleges alakváltozást szenved, összenyomódik. Az összenyomódás nem azonnal következik be, hanem kezdetben gyorsabban, később egyre lassabban, egyre kisebb mértékű lesz az alakváltozás és hosszú idő alatt éri el a végső állapotot. Ebből kifolyólag a konszolidációt két részre tudjuk bontani: elsődleges és másodlagos konszolidációra [5].

3.1.1. Elsődleges konszolidáció

Telített talajban a tömörödés csak úgy alakulhat ki, ha a pórusokban lévő víz eltávozik, ezzel megengedve a szemcseátrendeződést. A pórusvízben a terhelés hatására egyenlőtlen eloszlású többletnyomás keletkezik, ami vízmozgást hoz létre. Ez az áramlás kis átteresztőképességű talajokban nagyon lassan áll le. A talaj alakváltozási folyamatát, a terhelés pillanatától - pórusvíznyomás keletkezésétől, a pórusvíznyomás megszűnéséig - elsődleges konszolidációnak nevezzük [5].

A pórusvíz eltávozásával (Δh_∞) bekövetkezik a teljes összenyomódás. Egy tetszőleges időpontig bekövetkezett összenyomódás (Δh_t), és a végső állapot összehasonlítására, azaz az időbeli lefolyás szemléltetésére vezették be a konszolidáció fokának fogalmát (κ) [5]:

$$\kappa = \frac{\Delta h_t}{\Delta h_\infty} \cdot 100$$

Az elsődleges konszolidáció modell-törvénye arra mutat rá, hogy ha valamely esetben (k) és (E_s) konstans, akkor egy (H) vastagságú réteg (t) konszolidációs ideje alapján, egy (H_1) vastagságú réteg (t_1) konszolidációs ideje számítható. ^[5]

$$t_1 = t \frac{H_1^2}{H^2}$$

A törvény szerint azonos fizikai jellemzők mellett a konszolidációs idők a rétegvastagságok négyzetével fordítottan arányosak. Ez a törvény fontos, mert a laboratóriumi modell alapján a tényleges állapot egyszerűen elemezhető. Laboratóriumi vizsgálataink eredményeiből kiindulva megvizsgáltuk, hogy hulladékok esetén a konszolidáció modell-törvénye érvényes-e, a mérhető jelenséget figyelembe vettük.

3.1.2. Másodlagos konszolidáció

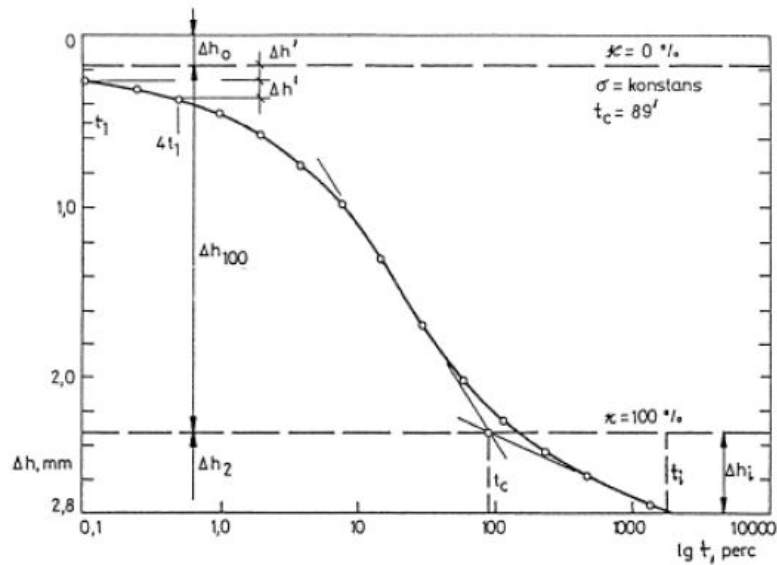
A másodlagos konszolidáció agyagok és szerves talajok alakváltozásának jellemző része. A pórusvíz távozása után, a süllyedés nem áll meg, a talajban megkezdődik az alkotók szerkezetének lassú átrendeződése, ami további összenyomódást eredményez ^[5]. A szerves alkotókat is tartalmazó talajokban, mint a kommunális hulladékban, a bomlási folyamatok is közrejátszanak.

Az összenyomódás folyamatának a jellemzésére a másodlagos összenyomódás indexét vezetjük be ^[5]:

$$c_m = \frac{\frac{\Delta h_i}{h}}{\lg \frac{t_i}{t_c}} = \frac{\Delta \varepsilon_i}{\lg \frac{t_i}{t_c}}$$

Ahol Δh_i a (h) magasságú minta összenyomódása t_i-t_0 időintervallumban, (t_i) tetszőleges idő, t_c az elsődleges konszolidációhoz tartozó idő, $\Delta \varepsilon_i$ a t_i-t_c időintervallumhoz tartozó fajlagos összenyomódás. A c_m értéke a víztartalommal szoros összefüggésben van.

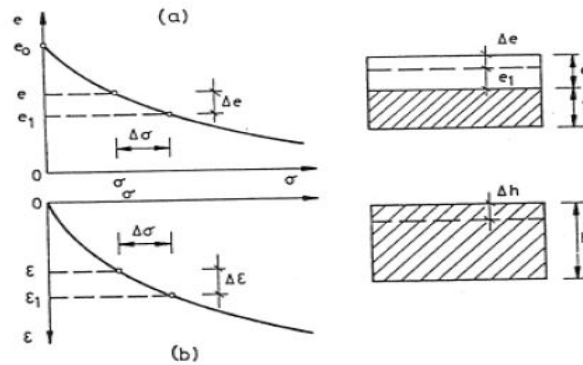
Casagrande megalkotott egy módszert, amin a teljes összenyomódást szemléltetni tudja. A süllyedéseket az idő logaritmusának függvényében ábrázolja. A kísérleti görbe középső és végső egyenes szakaszának a metszéspontja megadja a $\kappa = 100\%$ -hoz tartozó időt (t_c) .

3.1. ábra. Casagrande görbéje^[5]

3.2. Kompressziós görbe

A laboratóriumi vizsgálatok közben a talajok alakváltozását terhelés mellett vizsgáltuk. Meghatároztuk az elsődleges és másodlagos konszolidációból származó összenyomódást és a fajlagos összenyomódást a különböző nagyságú terhelések alatt. Ezt a terhelés - alakváltozás összefüggést ($\varepsilon = f(\sigma)$, $e = f(\sigma)$) kompressziós görbének nevezzük. A kompressziós görbét ödométerrel határoztuk meg. A terhelést lépcsősen végezzük: kivárjuk az elsődleges konszolidáció lefutását, majd megkétszerezzük a terhelés mértékét. Egy-egy konstans feszültség után megkapjuk a minta teljes összenyomódását (Δh), ami a kísérlet kezdetétől a (t_c) időpontig következik be. Ez vagy az azonnali összenyomódásnak és elsődleges konszolidációnak az összege, vagy csak az elsődleges konszolidációnak az eredménye^[5].

A kompressziós görbét ábrázolni tudjuk, ha ismert a minta kezdeti magassága (h), hézagtényezője (e), fajlagos alakváltozása (ε) és az állapotot előidéző konstans feszültség (σ). Ha a feszültséget megnöveljük, a minta magassága, hézagtényezője és fajlagos összenyomódása megváltozik. Így már ismerünk két pontot a görbén, amit szemléltetni tudunk kétféle koordináta rendszerben is:



3.2. ábra. Kompressziós görbe ábrázolása ^[5]

A talajok alakváltozás – feszültség összefüggésének a jellemzésére több fogalom áll rendelkezésünkre: összenyomódási modulus, kompressziós index, tömörödési együttható, melyek ugyanannak a folyamatnak más-más definíciói. Hazánkban az összenyomódási modulus használata a gyakori.

Összenyomódási modulus (E_s): a rugalmassági modulusnak megfelelő viszonzszámot talajoknál összenyomódási modulusnak nevezzük. Az összenyomódási modulus nem konstans, hanem a terhelés függvénye, tehát nem talajállandó. ^[5]

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Az összenyomódási modulus a feszültséggel arányosan növekszik. Ezért várható, hogy az a saját súlya alatt konszolidálódott talajrétegekben a mélységgel arányosan növekszik. Emiatt a depóniákban a több éves érettebb hulladék, ami a lerakó belsejében helyezkedik el, jobban van tömörödve, mint a frissebb feltöltés.

3.3. Hulladékok felszínüllyedései

A rekultiváció miatt nagyon fontos a hulladékdepónia-felszín várható süllyedésének ismerete, mivel azzal számolni kell a csurgalékvíz elvezető rendszer, a szigetelőrendszer és a gázgyűjtő berendezések méretezésénél is. Az összenyomódást elméletileg a talajmechanikából ismert konszolidációs elmélettel közelíthetjük (*gyakorlatilag kiderült, hogy nem érvényes rá*), de figyelembe kell venni, hogy a hulladék egyes tulajdonságokban igen eltér a talajoktól: ^[15]

- heterogenitás,
- anizotrópia,
- fizikai paraméterei időben nem állandók, a bomlási folyamatok során változnak.

Ezen tulajdonságokból láthatjuk, hogy a hulladéktest konszolidációja nem csak terhelés hatására következik be, hanem - talajoktól eltérően - a biológiai folyamatok miatti térfogatcsökkenés eredménye is. Mivel az alakváltozást nagyon sok tényező befolyásolja, a lerakó süllyedésének modellezése összetett feladat. Közrejátszik a konszolidációban a lerakott hulladék kezdeti tömörsége, hézagtenyezője, térfogatsűrűsége; a feltöltés magassága; a biológiai folyamatok; a szerves és szervesetlen anyagok elhelyezkedése, mennyisége. A felsorolt hulladéktulajdonságokon kívül fontos még a depónia üzemeltetéséből és a környezeti hatásokból adódó körülmények (pl.: csurgalékvíz elvezetése, szigetelőanyagok, éghajlat).^[12]
[15]

Korábbi kutatások szerint a lerakók felszínének süllyedése öt különböző fázisra bontható:^[7]

1. összenyomódás és kúszás az önsúly hatására,
2. szemcseátrendeződés,
3. viszkózus tulajdonságokból adódó összenyomódás,
4. szerves alkotók biodegradációja,
5. szervesetlen alkotók fizikai-kémiai átalakulása.

Figyelembe kel venni azt is, hogy a hulladékoknál az elsődleges konszolidáció gyakorlatilag kimarad, hiszen a hulladéktest nem telített, a nagy hézagtenyező miatt az azonnali összenyomódásnak sokkal nagyobb szerep jut, mint a talajoknál.^[15] Ödométeres vizsgálatnál az elsődleges konszolidáció ideje alatt már a másodlagos konszolidáció szakaszában járhat a vizsgálat.

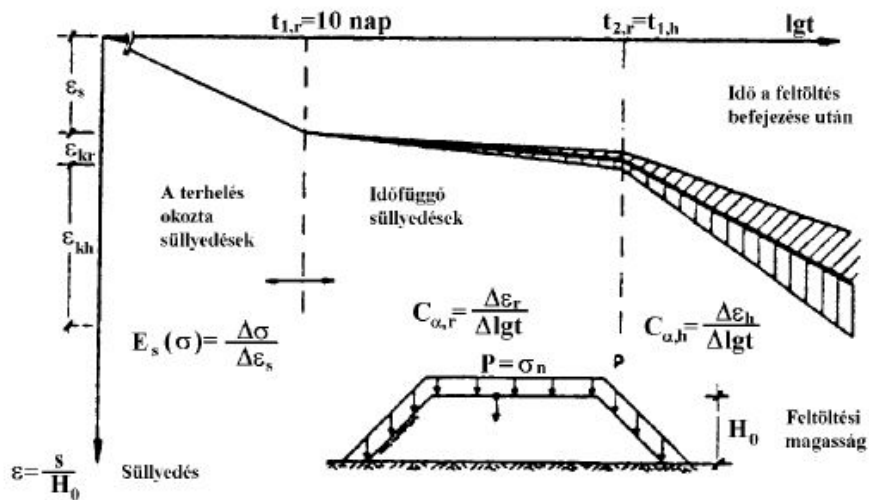
Más-más eredményekre vezetnek az elméleti és gyakorlati vizsgálatok. Általánosságban a kidolgozott modellek két részből állnak: egy terhelésfüggő és egy időfüggő szakaszból. Viszont, a különböző modellek között is eltérő eredmények születnek. A legproblémásabb tulajdonság a hulladéktest heterogenitása és a biológiai bomlásból fakadó változások^[2]. Ezek miatt a vizsgálatokra csak becslésként szabad tekinteni, az eredmények csak közelítő jellegűek. Dolgozatunkban a talajmechanikai alapú modellekre támaszkodunk, ehhez szükséges paraméterekkel, elméleti háttérrel számolunk.

König és munkatársai a kommunális hulladékokra készítettek egy idealizált süllyedés-idő görbét, lezárt lerakókon végzett mérések alapján^[7]. Ezen látszódik, hogy a kezdeti szakaszban a süllyedések az önsúlyból fakadnak, azaz gyorsan lezajlanak (s_s). Majd a másodlagos konszolidációs szakasz következik, aminek érintője laposabb, időben jobban elnyúlik. Ezt két részre bonthatjuk: rövid ($s_{k,r}$) és hosszú idejű ($s_{k,h}$) másodlagos

konzolidációra. A rövid szakasznak görbéjének érintője laposabb, a hosszú idejűnek meredekebb. Különbséget a kettő között az eltérő, friss vagy érett másodlagos konszolidációs együttható ($C_{\alpha,r}, C_{\alpha,h}$) adja. A teljes süllyedés e tényezők összegeként kapható. [7]

$$S_0 = S_s + S_{k,r} + S_{k,h}$$

Érdeemes összevetni a hulladék és a talaj összenyomódási görbéit. Látható, hogy mindkét anyagnál fontos az idő és a terhelés szerepe, viszont a különbségek is észrevehetőek. A hulladék tulajdonságaiból fakadóan (hézagtényező) az azonnali összenyomódásnak sokkal nagyobb szerepe van, és az időfüggő alakváltozások is máshogyan zajlódhatnak le, mint talaj esetében (bomlási folyamatok). [6]



3.3. ábra. Kommunális hulladékok idealizált süllyedés-idő görbéje [7]

A terhelés okozta süllyedések számításához összenyomódási modulus értékére van szükség, ugyanúgy, mint a talajoknál. Nagyméretű laboratóriumi mérések eredményéből, saját mérésekből illetve korábbi eredményekből gazdálkodhatunk – ezek közül mindegyik rendelkezésünkre áll. Hulladékok összenyomódási modulusa erősen függ a terheléstől és a minta méretétől. Általánosságban felírható [7]:

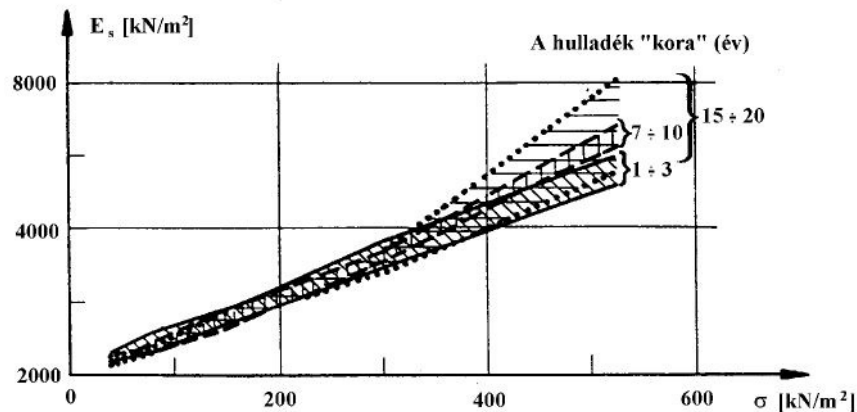
$$E_s = a + b \cdot \sigma_n$$

König vizsgálatai alapján [7]:

$$E_{s,\min} \text{ (MPa)} = -0,294 + 10,9 \cdot \sigma_n$$

$$E_{s,\max} \text{ (MPa)} = -0,106 + 12,5 \cdot \sigma_n$$

ahol, σ_n az alkalmazott normálfeszültség.



3.4. ábra. Összenyomódási modulus értékek ^[7]

König a másodlagos konszolidáció alatt bekövetkező felszínüllyedések becslésére szolgáló másodlagos konszolidációs együttható és intervallumok értékére javaslatot tett statisztikai alapon:

<i>A másodlagos konszolidáció együtthatójának és szakaszainak jellemző értékei helyszíni mérések alapján (KÖNIG, 1996.)</i>			
	$C_{\alpha, \epsilon}^r$ (-)	$C_{\alpha, \epsilon}^h$ (-)	$t_{2,r} = t_{1,h}$ (nap)
A mérések száma	16	20	20
Átlag	0,03	0,102	425
Szórás	0,017	0,077	472
A 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó felső érték	0,039	0,138	645
A 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó alsó érték	0,021	0,066	204

3.5. ábra. König táblázata a másodlagos konszolidációs együtthatók értékeihez ^[7]

3.4. Talajok nyírószilárdsága

Külső igénybevétel hatására, a talaj struktúrájától függő belső ellenállás alakul ki. A terhelés hatására a talaj egy idő után eléri a belső ellenállás csúcspontját, azt a határállapotot, amikor már több feszültséget nem képes elviselni, törési állapot jön létre. Ez a jelenség vagy egy elhatározott felületen - csúszólapon - alakul ki, vagy a terhelt talajtömeg minden pontjában képlékeny határállapot következik be ^[5]. A törést létrehozó feszültségekkel szembeni legnagyobb ellenállást nevezzük a talaj nyírószilárdságának, ami a talajok legfontosabb fizikai jellemzője.

Ebből kifolyólag, a talajmechanika egyik kulcsfontosságú feladata, a nyírószilárdság meghatározása, amihez a szilárdságtanból ismert, Mohr-féle törési elmélet, Coulomb szerinti egyszerűsített feltételét használhatjuk. Ilyen esetben a középső főfeszültségnek nincs befolyása a törésre, azt az anyag részecskéi között fennálló belső súrlódást és kohéziót a kimerítő nyírófeszültség túllépése idézi elő ^[5]. Talajtörés esetén valamely felületelemen működő normális és nyírófeszültség között lineáris kapcsolat áll fenn:

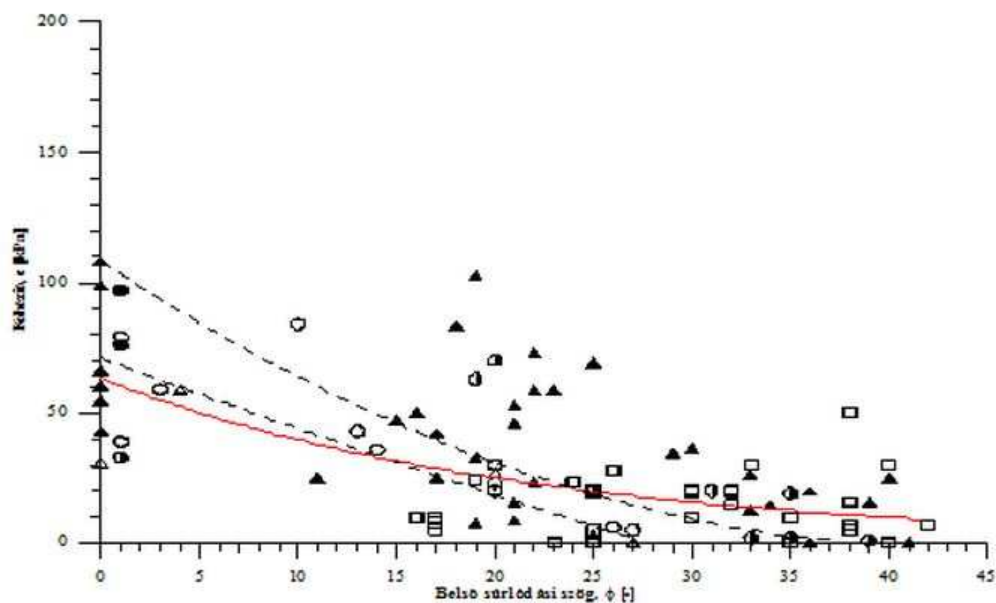
$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

A képletben szereplő φ a talaj belső súrlódási szögét, c a talaj kohézióját [kPa] jelöli, melyek állandó értékek és ezek tudtában a talaj nyírószilárdságát ismerjük. Azt a felületet, amelynek minden pontjában fellépő nyíró- és normálfeszültségek kielégítik az összefüggést, csúszólapnak nevezzük ^[5]. Csúszólap alapján csúszási típusokat definiálhatunk:

- csúszások nagy vastagságú homogén talajtömegben (létrejöhetnek mind töltés, mind bevágás esetén),
- csúszások rétegzett talajoknál (általában bevágásrészsúknél, vagy több ütemben kiépült inhomogén töltéseknél, mint hulladéklerakó depónia). ^[8]

3.5. Hulladékok nyírószilárdsági paraméterei

Hulladékok nyírószilárdsági paramétereinek nagyon nagy a szórása. Különböző összetételű, eredetű, korú hulladékok más-más értéket adnak, amiket tovább módosít a feldolgozás módszere is. Függenek továbbá a lerakási módszertől, körülményektől, technológiától is. Emiatt kutatók arra jutottak, hogy a hulladékokat nem lehet egyetlen $\varphi - c$ értékkel jellemezni, a nyírószilárdsági érték függ a nyírószilárdság mobilizációjától, a deformáció mértékétől. Továbbá a hulladék nyírószilárdsági paraméterei erősen függenek annak degradációs fokától ^[18]. Ezért a $\varphi - c$ párok is becsült értékek lesznek, amikre többféle ajánlás is létezik ^[14].



3.6. ábra. Különböző nyírószilárdsági paraméterek laboratóriumi, helyszíni mérések és irodalmi adatok alapján.^[3]

Manassero ajánlása a nyírószilárdsági paraméterekre, a várható normálfeszültség függvényében:^[9]

- nagyon kis normálfeszültségek esetén ($0 < \sigma_v < 20$ kPa): $c=20$ kPa; $\varphi=0^\circ$,
- kis-közepes normálfeszültségek esetén ($20 < \sigma_v < 60$ kPa): $c=0$ kPa; $\varphi=38^\circ$,
- nagyobb normálfeszültségeknél ($60 < \sigma_v$): $c=20$ kPa; $\varphi=30^\circ$.

Osztrák gyakorlati érték (ÖNORM):^[13]

- $c = 5$ kPa; $\varphi = 25^\circ$.

Jassberger ajánlását az alábbi táblázat mutatja:^[7]

Különböző hulladékokra jellemző nyírószilárdsági paraméterek irodalmi adatok alapján (JESSBERGER, 1990)				
Nyírószilárdsági paraméterek		Térfogat- sűrűség (t/m ³)	Peremfeltételek	Szerző
Súrlódási szög (φ ; fok)	Kohézió (c; kPa)			
30-40	0	0,8-1,2	Megbecsült összetétel: háztartási hulladék (beleértve salak, hamu, gumisbronc sfb.)	Cassina (1979.)
30-35	10-20	0,3-0,7		Gondolla et al., (1979.)
30	-	-	kb. 30 éves hulladék meghatározás: direkt nyírás	Rettenberger et al., (1980.)
15-17	10	0,7-1,1	visszaszámolással meghatározott paraméterek	Spillmann (1980.)
38	7	1,0-1,2	háztartási hulladék	Gay et al., (1978.)
26,5 26 42	28 28 7	0,8-1,1 0,9-1,2 0,9-1,2	friss hulladék csurgalékvizzel friss hulladék szennyvízzel szemét-szennyvízzel 9 hónappal a lerakás után	Gay et al., (1981.)
25-35	0 (1-20)	0,7-1,1	települési hulladékosztlet (tapasztalatok alapján)	Müller (1981.)
24 38 19	23 16 24	- - -	aprított települési hulladék (papír, műanyag) idős hulladék kutató és irodalom alapján (konyhai hulladék)	Landva et al., (1984.)
17,5	7,5	1,0	lerakó szennyvízzel	Salomo (1985.)
33 32	30 20	0,9-1,3 1,3-1,6	kb. 40 éves települési hulladék kommunális jellegű ipari hulladék	Henke (1985.)
32-38 30-35	5-15 0-10	1,2-1,6 1,2-1,4	terepi- és labormérések és rézstállékonysági számítások alapján települési hulladék települési és ipari hulladék	Schuhmann (1989.)
38-40 17-23	30-50 0-10	0,4-1,0 0,8-1,2	friss háztartási hulladék idősebb háztartási hulladék	Turczynski (1990.)
30 25 20-25	20 0 0	1,0(1,3) 1,5 1,5	települési hulladék (friss) idősebb települési hulladék előkezelt települési hulladék	Drescher (1990.)
25 17,5	5 5	1,0 1,0	települési és ipari hulladék hulladék szennyvízzel	Pregl (1988.)
30-40 25-32	0-10 -	1,0-1,6 1,5-1,8	építési törmelék szennyezett talaj	Turczynski (1990.)

3.7. ábra. Jassberger ajánlása a nyírószilárdsági paraméterekre

4. Laboratóriumi eredmények

4.1. Ödométeres vizsgálat

A mérhető vizsgálatához három különböző méretű mintát helyeztünk ödométeres készülékbe. Az 1. és 2. minta terhelésénél lehetőségünk volt az idő pontos mérésére, így ebből a mérésből szemléletesebb eredményeket kaptunk. A minta magasságát pontosan tudtuk ábrázolni az idő függvényében, ezáltal jól láthatóak a konszolidáció fázisai, a különböző normálfeszültségekhez tartozó terhelési lépcsők.

A 3.1.1-es pontban ismertettük a talajokra jellemző konszolidációs modell törvényt, vizsgálatainkkal ennek hulladékokra történő alkalmazhatóságát is ellenőriztük. A labormérések tükrében kijelenthető, hogy ez a modell törvény a hulladékokra nem alkalmazható. A hulladék réteg vastagsága és a konszolidációs idő között nem találtunk négyzetes kapcsolatot.

A 3.1.1-es pontban ismertetett összefüggés:

$$t_1 = t \frac{H_1^2}{H^2}$$

A konszolidációs idő meghatározása nehézkes feladat, tekintve a hulladékok lassú alakváltozását. Méréseink során konszolidáltnak tekintettük a hulladékmintát, ha az alakváltozás sebessége 0,01 mm/h alá csökkent. A konszolidációs idő bizonytalansága ellenére azonban igazolható, hogy az összefüggés (ahogy kezdetben gondoltuk) a hulladékoknál nem áll fenn.

Minta száma	1	2	3/A,B
h [mm]	222	310	20
A [cm ²]	1600,00	2732,59	44,16
V_0 [cm ³]	35520,00	21177,53	88,31
ρ_s [g/cm ³]	1,00	1,00	2,00
m_d [g]	11635,80	7471,51	68,80
w [%]	5,40	5,40	6,50
ρ_d [g/cm ³]	0,328	0,350	0,780
s	0,328	0,350	0,390
e_0	2,05	1,83	1,57

4.1. ábra. A vizsgált minták jellemzői

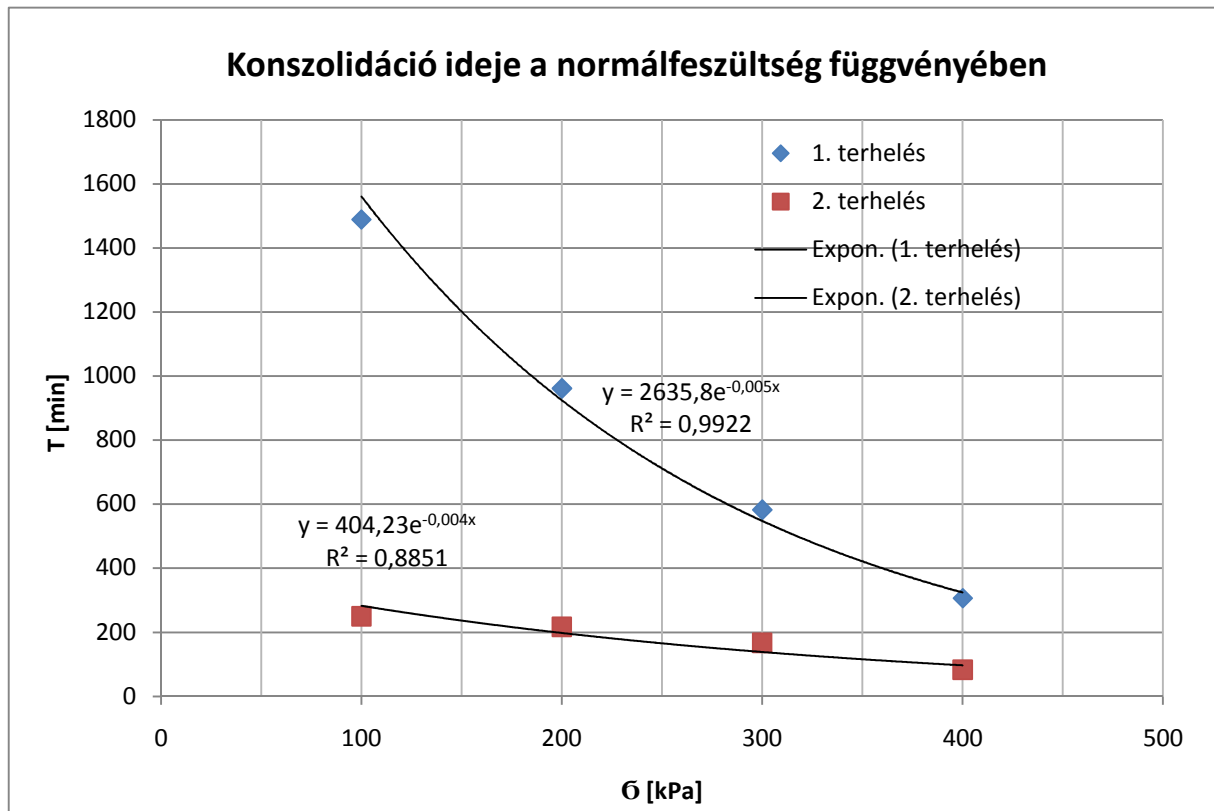
4.1.1. 1-es számú minta

Az fizikai paraméterek után álló 1-es érték a terhelést, míg a 2-es az újrateherelést jelenti.

σ [kPa]	ε_1 [-]	ε_2 [-]	$\Delta\varepsilon_1$ [-]	$\Delta\varepsilon_2$ [-]	Δe_1 [-]	Δe_2 [-]	T_{konsz1} [h]	T_{konsz2} [h]
0	0,000	0,162	0	0,162	0	0,495	-	-
100	0,103	0,208	0,103	0,208	0,314	0,635	62,04	10,42
200	0,172	0,224	0,172	0,224	0,526	0,684	40,08	9,04
300	0,217	0,238	0,217	0,238	0,662	0,727	24,29	6,96
400	0,241	0,249	0,241	0,249	0,736	0,760	12,79	3,46

4.2. ábra. 1-es számú minta alakváltozása

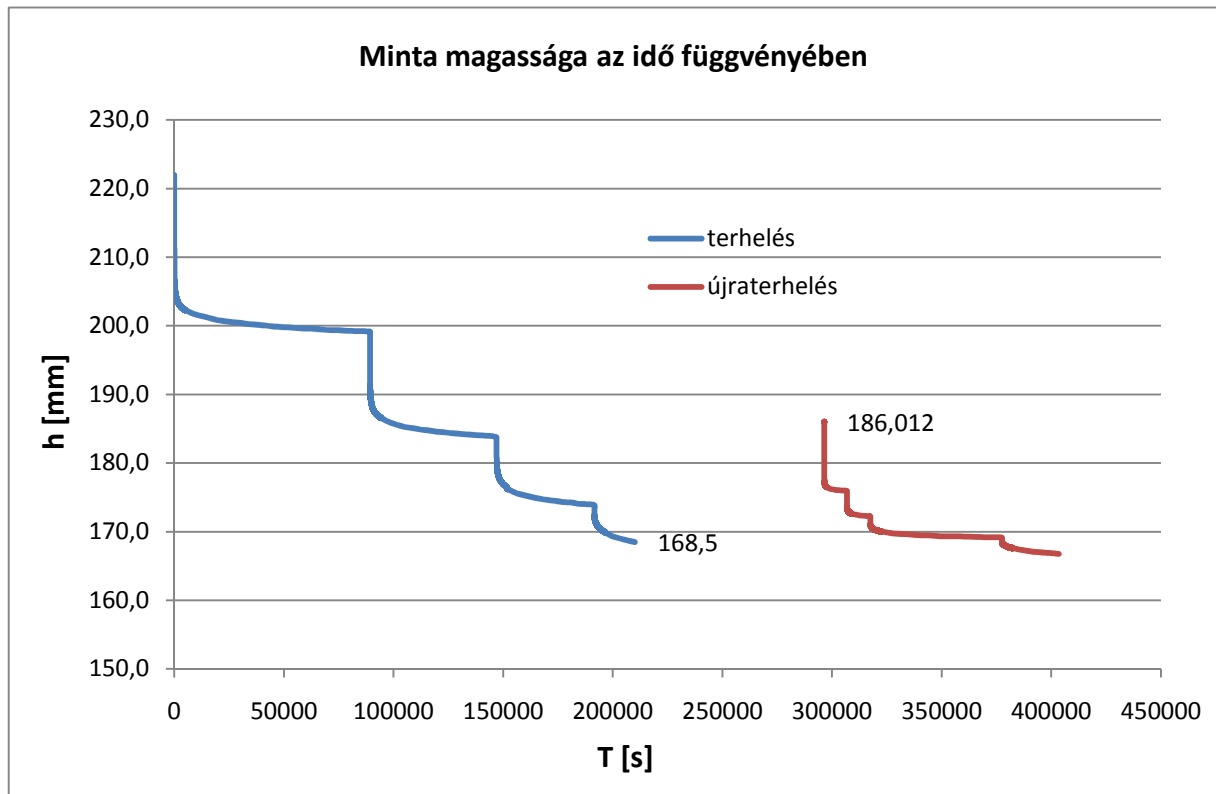
Az 1-es számú (legnagyobb) mintát az Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának laborjában a már bemutatott nagyméretű nyíródobozban, 4 lépcsőben, 100 kPa-tól 400 kPa-ig terheltek. A terhelés után egy lépcsőben tehermentesítettünk majd ugyanezen az elven visszaterheltek, kivárva az egyes terhelési lépcsőknél az alakváltozási sebesség lecsökkenését (0,01 mm-nél kisebb változás). Az így definiált konszolidáció eléréséhez egyre kevesebb időre volt szükségünk, ahogy emeltük a normálfeszültség értékét (4.3. ábra).



4.3. ábra. Minta magassága az idő függvényében

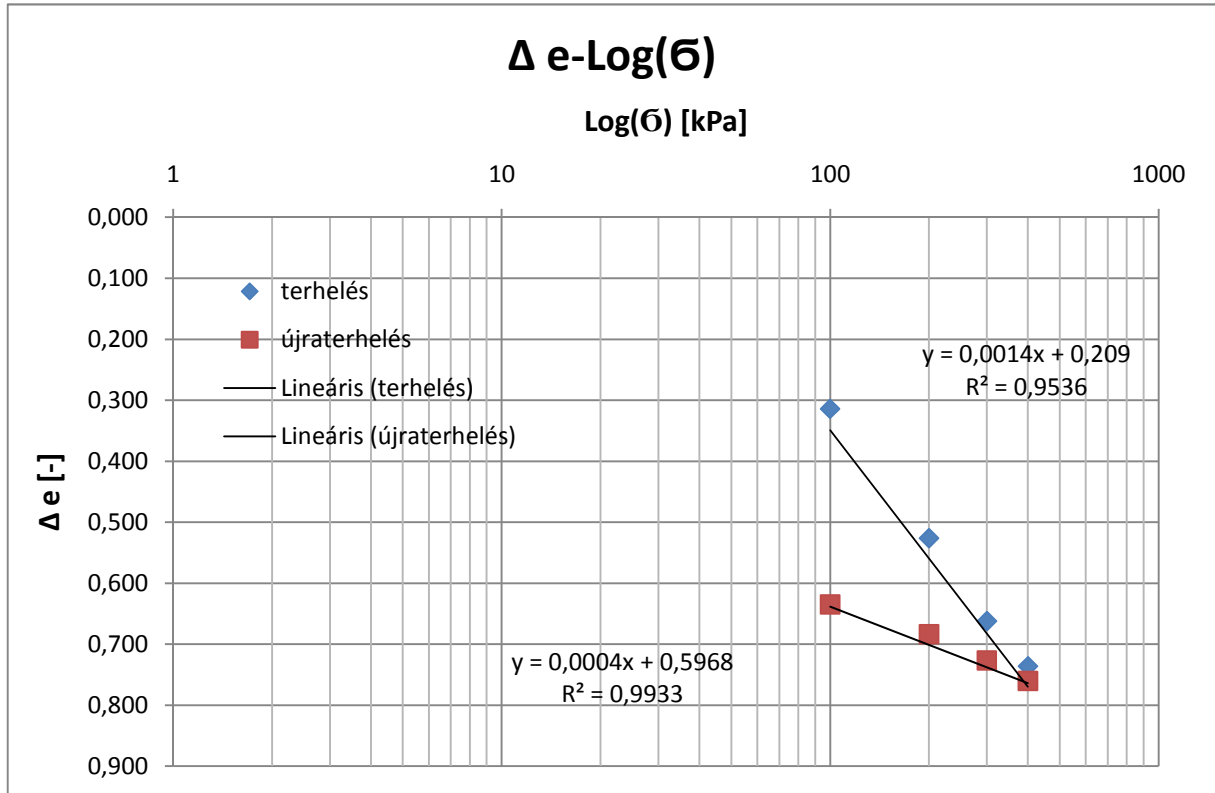
A minta magasságát vizsgálva az idő függvényében meghatározható egy kezdeti és egy másodlagos alakváltozás. A görbe jellege azonban az összes terhelési lépcső esetében hasonlóan alakul (4.4 ábra).

A fajlagos alakváltozási diagramból is látható, hogy a terhelés hatására a hulladék nagymértékű maradó alakváltozásokat szenved (4.5 ábra).

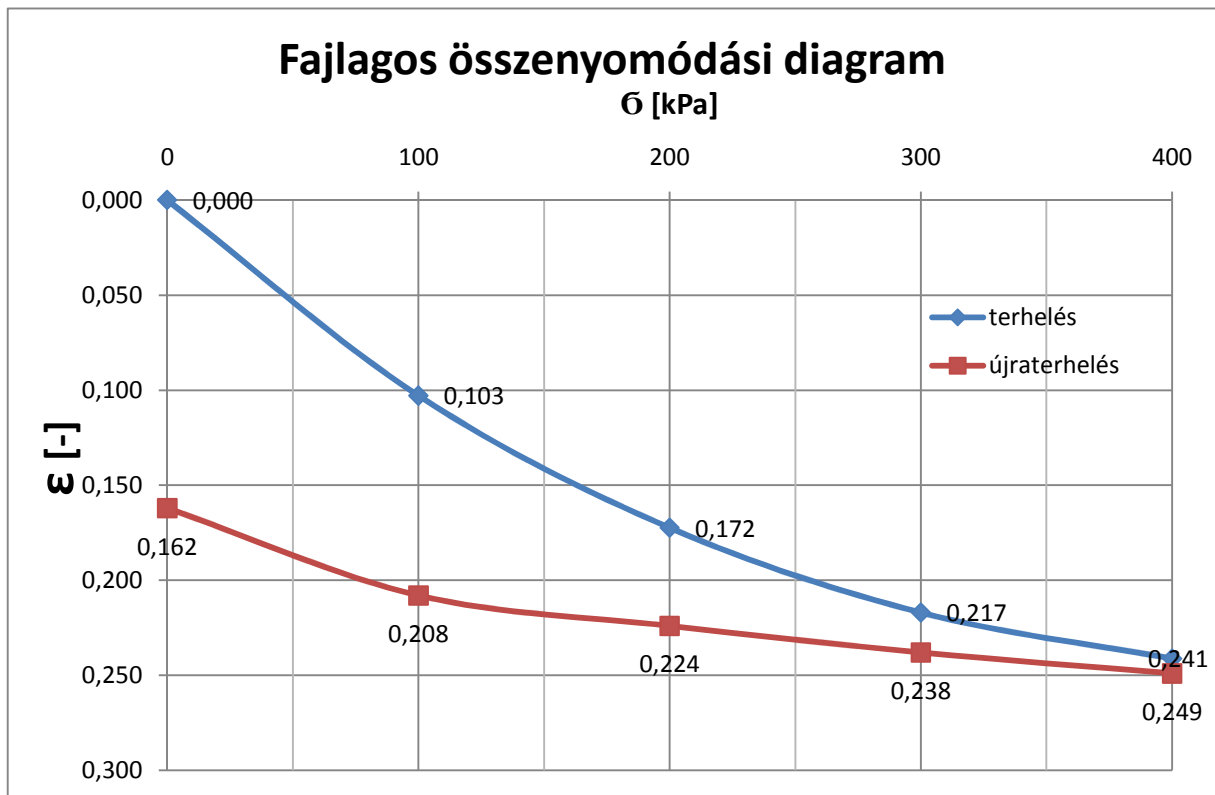


4.4. ábra. Minta magassága az idő függvényében

A hézagtényező értékét az idő logaritmikus léptékében ábrázolva mind a terhelésre, mind az újrateherelésre egyenest tudunk illeszteni. Ezeknek az egyeneseknek a meredeksége a hulladék terheléséhez és újratehereléséhez tartozó kompressziós index értékét szolgáltatja (lásd 4.6 ábra).



4.5. ábra. $\Delta e - \log(\sigma)$ összefüggés



4.6. ábra. Fajlagos összenyomódási diagram

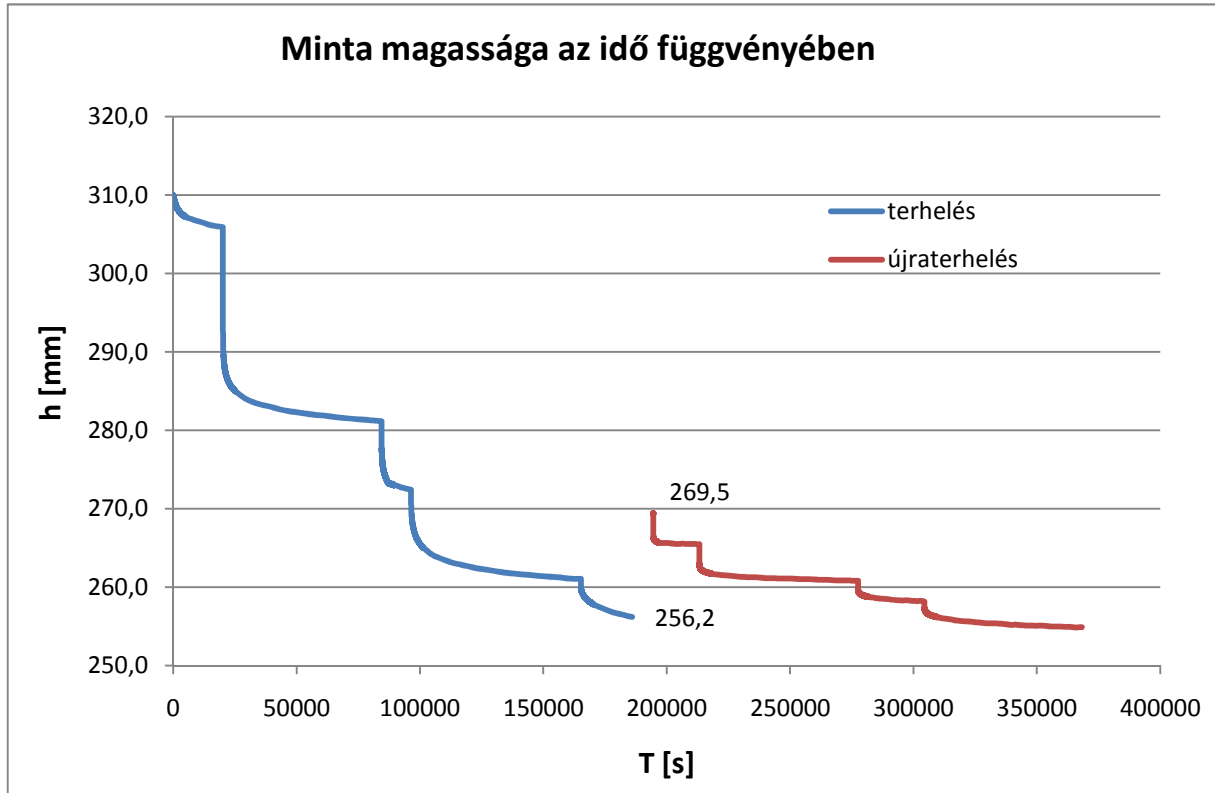
4.1.2. 2-es számú minta

Az fizikai paraméterek után álló 1-es érték a terhelést, míg a 2-es az újrateherelést jelenti.

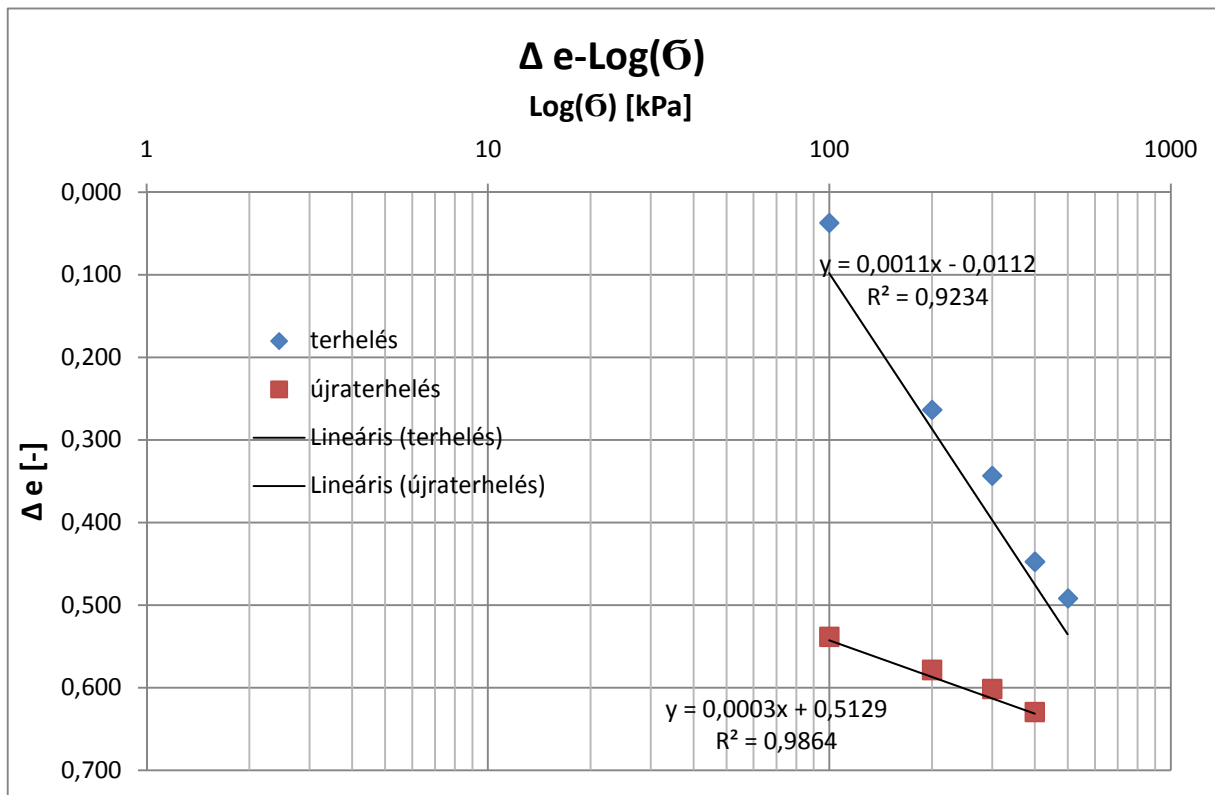
σ [kPa]	ε_1 [-]	ε_2 [-]	e_1 [-]	Δe_1 [-]	e_2 [-]	Δe_2 [-]
0	0,000	0,131	1,834	0,000	1,331	0,503
100	0,013	0,144	1,797	0,037	1,296	0,538
200	0,093	0,159	1,571	0,264	1,256	0,578
300	0,121	0,167	1,491	0,343	1,233	0,601
400	0,158	0,178	1,387	0,448	1,205	0,629
500	0,174		1,343	0,492		

4.7. ábra. 2-es számú minta alakváltozása

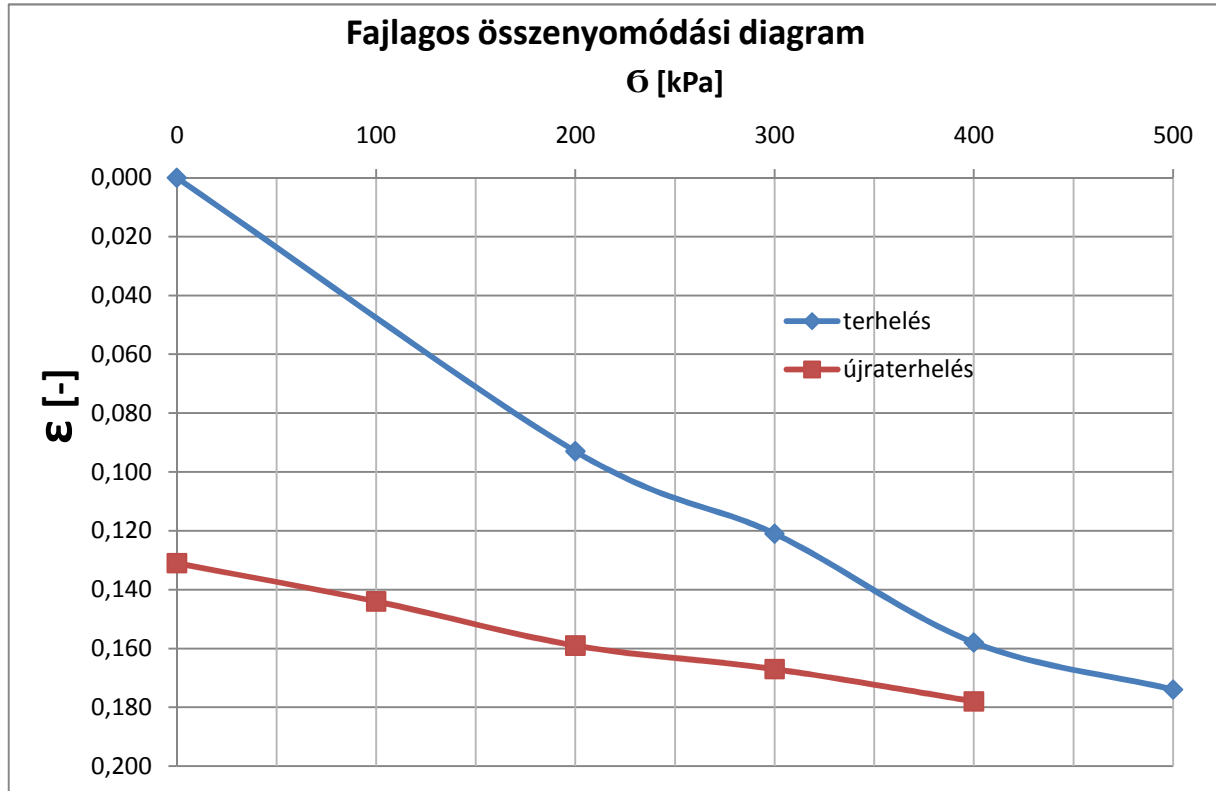
Ezt a mintát is a Miskolci Egyetem laborjában vizsgáltuk a nagyméretű nyíródoboz segítségével. Szűkítő idomok segítségével redukálni tudtuk a doboz befoglaló méreteit, ezzel létrehozva egy kisebb térfogatú, hengeres mintatestet. A 2-es számú minta estében is 100 kPa-os lépcsőkben helyeztünk terhelést a mintára, azonban terheléskor 500, míg újrateherléskor technikai okok miatt csak 400 kPa normálfeszültségig emeltük a nyomást. A minta magassága (4.8 ábra) és alakváltozás jellege (4.9. ábra, 4.10 ábra) az 1-es számú mintához hasonlóan alakult.



4.8 ábra. Minta magassága az idő függvényében



4.9 ábra. $\Delta e - \log(\sigma)$ összefüggés



4.10 ábra. Fajlagos összenyomódási diagram

4.1.3. 3-as számú minta

A 3-as számú mintát a BME Geotechnikai Tanszékének laborjában egy kisebb ödométeres készülékben vizsgáltuk. Az adatgyűjtés kézi úton történt, így nem volt lehetőség a folyamatos mérésre. A nagyobb méretű minták egyes terhelési lépcsőjéhez tartozó konszolidációs időket megvizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy ennél a mintánál elegendő 1 napig terhelni azonos normálfeszültség mellett. Az egy nap elegendő arra, hogy a fentebb definiált alakváltozási sebesség (0,01 mm) végbemenjen és a többi mintával azonos terhelési lépcsők alakuljanak ki. A 3-as számú mintához tartozó vizsgálatot kettő db azonos geometriai méretekkel rendelkező ödométeres készülékben végeztük el, így lényegében 3/A és 3/B mintáról beszélhetünk. Ehhez a vizsgálatához tartozó részletes eredményeket a következő táblázatok szemléltetik.

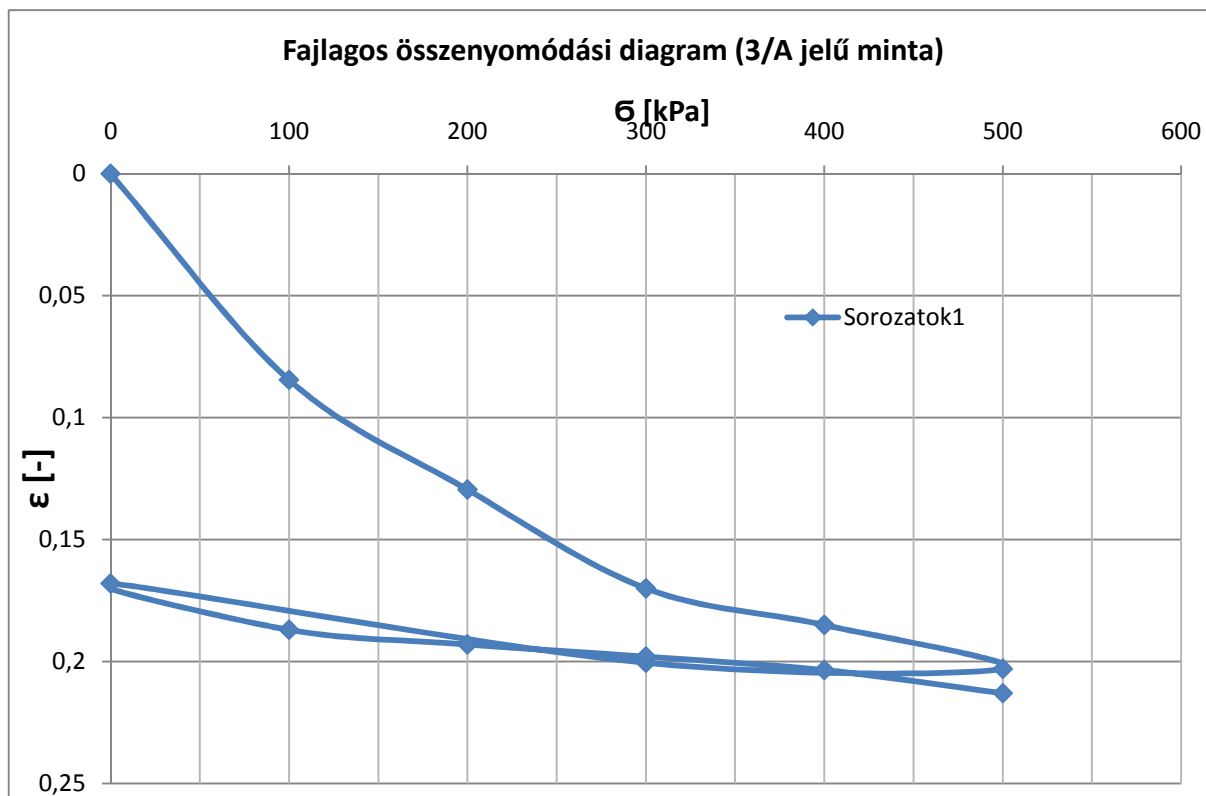
3/A jelű minta								
T, nap	F1, kPa	ΔL , mm	ϵ , -	H, mm	V, cm ³	e, %	$\Delta \epsilon$, -	Δe , -
0	0	0	0	20	88,31	1,57	0,000	0,000
1	100	1,69	0,0845	18,31	80,85	1,35	0,085	0,217
2	200	2,59	0,1295	17,41	76,88	1,23	0,130	0,332
3	300	3,4	0,17	16,6	73,30	1,13	0,170	0,436
4	400	3,7	0,185	16,3	71,97	1,09	0,185	0,475
5	500	4,06	0,203	15,94	70,39	1,05	0,203	0,521
6	300	4,01	0,2005	15,99	70,61	1,05	0,201	0,515
7	0	3,36	0,168	16,64	73,48	1,14	0,168	0,431
8	100	3,74	0,187	16,26	71,80	1,09	0,187	0,480
9	200	3,86	0,193	16,14	71,27	1,07	0,193	0,495
10	300	3,96	0,198	16,04	70,83	1,06	0,198	0,508
11	400	4,07	0,2035	15,93	70,34	1,04	0,204	0,522
12	500	4,26	0,213	15,74	69,50	1,02	0,213	0,547

1.11 ábra 3/A minta alakváltozása számokban

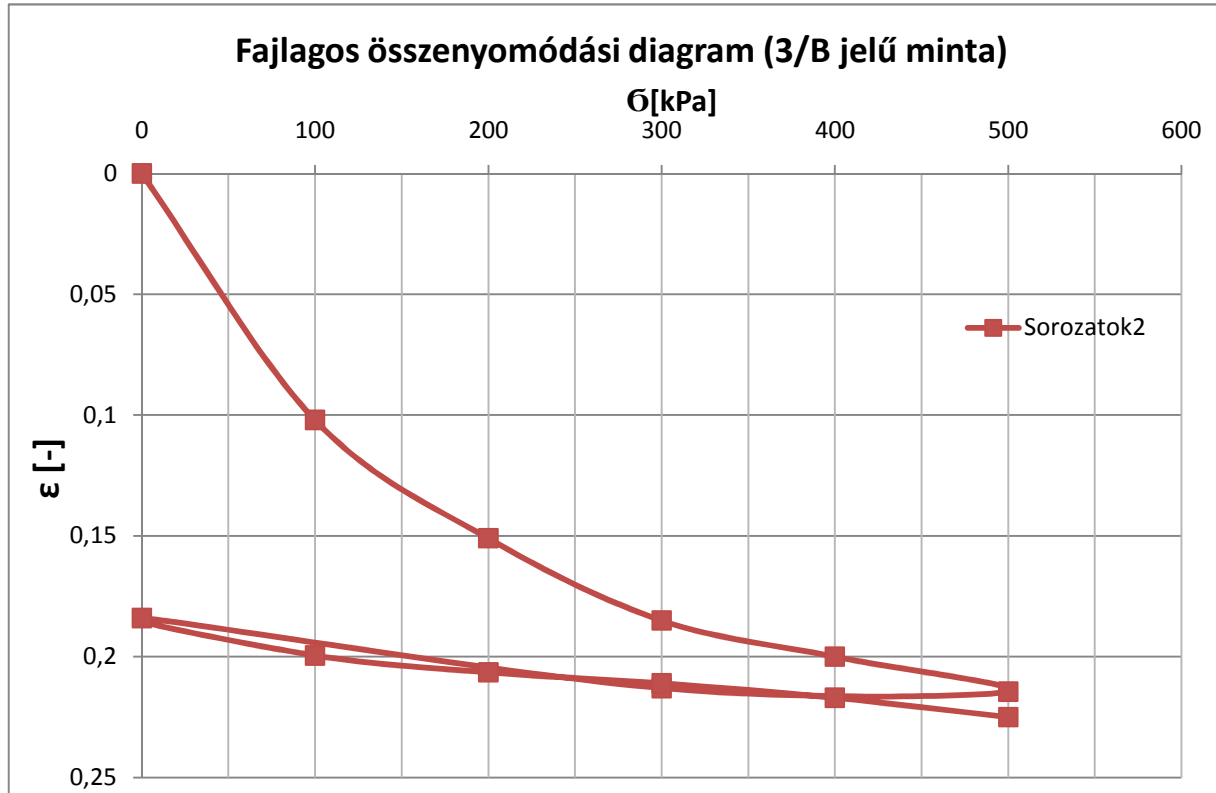
3/B jelű minta								
T, nap	F1, kPa	ΔL , mm	ϵ , -	H, mm	V, cm ³	e, %	$\Delta \epsilon$, -	Δe , -
0	0	0	0	20	88,31	1,57	0,000	0,000
1	100	2,04	0,102	17,96	79,30	1,31	0,102	0,262
2	200	3,02	0,151	16,98	74,98	1,18	0,151	0,388
3	300	3,7	0,185	16,3	71,97	1,09	0,185	0,475
4	400	4	0,2	16	70,65	1,05	0,200	0,513
5	500	4,29	0,2145	15,71	69,37	1,02	0,215	0,551
6	300	4,26	0,213	15,74	69,50	1,02	0,213	0,547
7	0	3,68	0,184	16,32	72,06	1,09	0,184	0,472
8	100	3,99	0,1995	16,01	70,69	1,06	0,200	0,512
9	200	4,13	0,2065	15,87	70,08	1,04	0,207	0,530
10	300	4,22	0,211	15,78	69,68	1,03	0,211	0,542
11	400	4,34	0,217	15,66	69,15	1,01	0,217	0,557
12	500	4,5	0,225	15,5	68,44	0,99	0,225	0,578

4.12 ábra 3/B minta alakváltozása számokban

A fajlagos összenyomódási- és a $\Delta e - \log(\sigma)$ diagramot a kézi adatgyűjtés ellenére ennél a mérésnél is elő tudtuk állítani. A 4.13- és 4.14 ábra is az előző mintákkal megegyező alakú szigma-epszilon görbét mutat, a hiszterézis hurkok igazolják a hulladékok kezdetben feltételezett, nagymértékű maradó alakváltozását.



4.13 ábra. Fajlagos összenyomódási diagram (3/A jelű minta)



4.14 ábra. Fajlagos összenyomódási diagram (3/B jelű minta)

4.2. Nyírószilárdsági vizsgálat

4.2.1. Közvetlen nyírás

A hulladékmintát a BME Geotechnikai Tanszékének laborjában egy közvetlen nyíróvizsgálattal is vizsgáltuk. A vizsgálat során három különböző normálfeszültség mellett nyírtuk el a hulladéktestet (lásd 4.16 diagram) mindaddig, amíg az elmozdulás el nem érte a 10 mm-t. A normálfeszültségekhez tartozó nyírófeszültségeket (nem végérték) külön diagramon ábrázoltuk (4.17 diagram).

A nyíróvizsgálat az alábbi hulladékra jellemző fizikai paramétereket szolgáltatta:

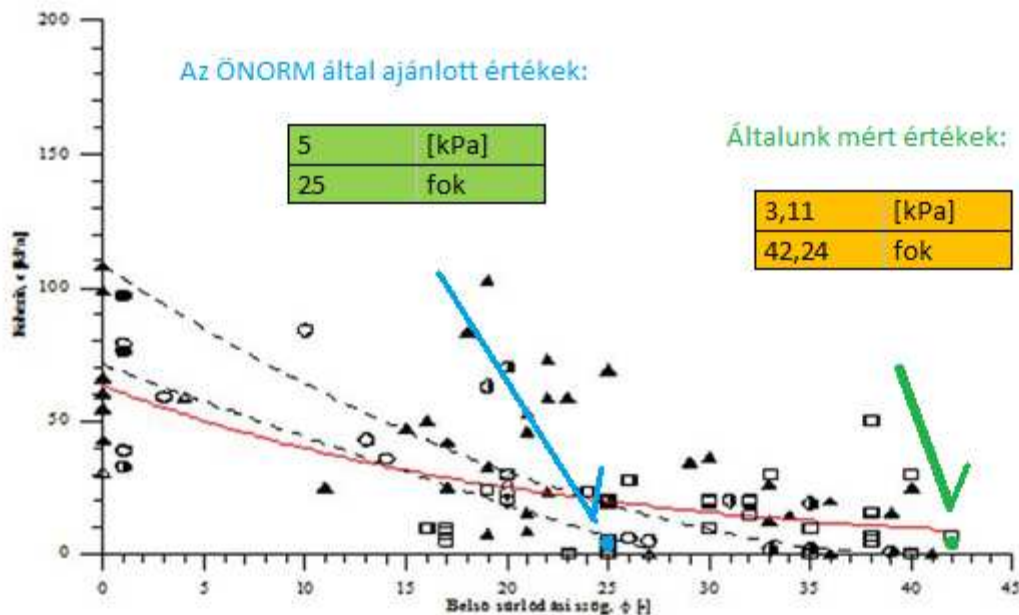
kohézió	3,11 [kPa]
belső súrlódási szög	42,24 fok

A ÖNORM által meghatározott értékek:

kohézió	5 [kPa]
belső súrlódási szög	25 fok

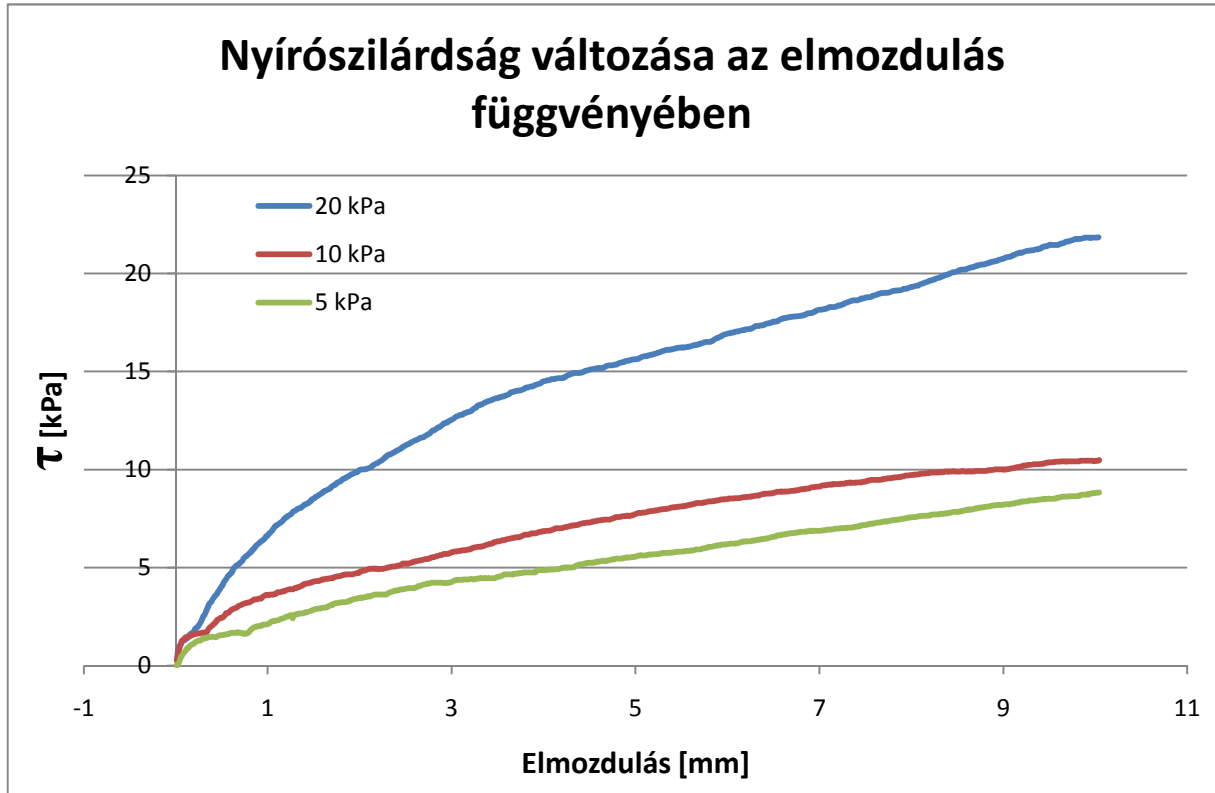
Összevetve a szabványban meghatározott értéket az általunk mért eredménnyel jelentős különbséget tapasztaltunk. A nyírás során nem értük el a nyírófeszültségnek egy jellegzetes csúcsertékét (lásd 4.16 diagram). Véleményünk szerint a hulladékmintának nagyobb elmozdulásokra lett volna szüksége ahhoz, hogy a nyírószilárdsági paraméterekre szokványos eredményeket kapjunk. A közvetlen nyíráshoz általunk használt 10 cm x 10 cm alapterületű terhelő keret nem elegendő nagyságú a kommunális hulladékok ilyen nemű vizsgálatához, ugyanis a minta kialakításánál sajnos osztályozni kellett a kommunális hulladékot (nagyobb darabok eltávolítása).

A szakirodalomból vett adatokkal is összevetve az általunk mért paramétereket jól látható, hogy szélsőséges értékek adódtak a vizsgálat során (lásd 4.15 ábra).

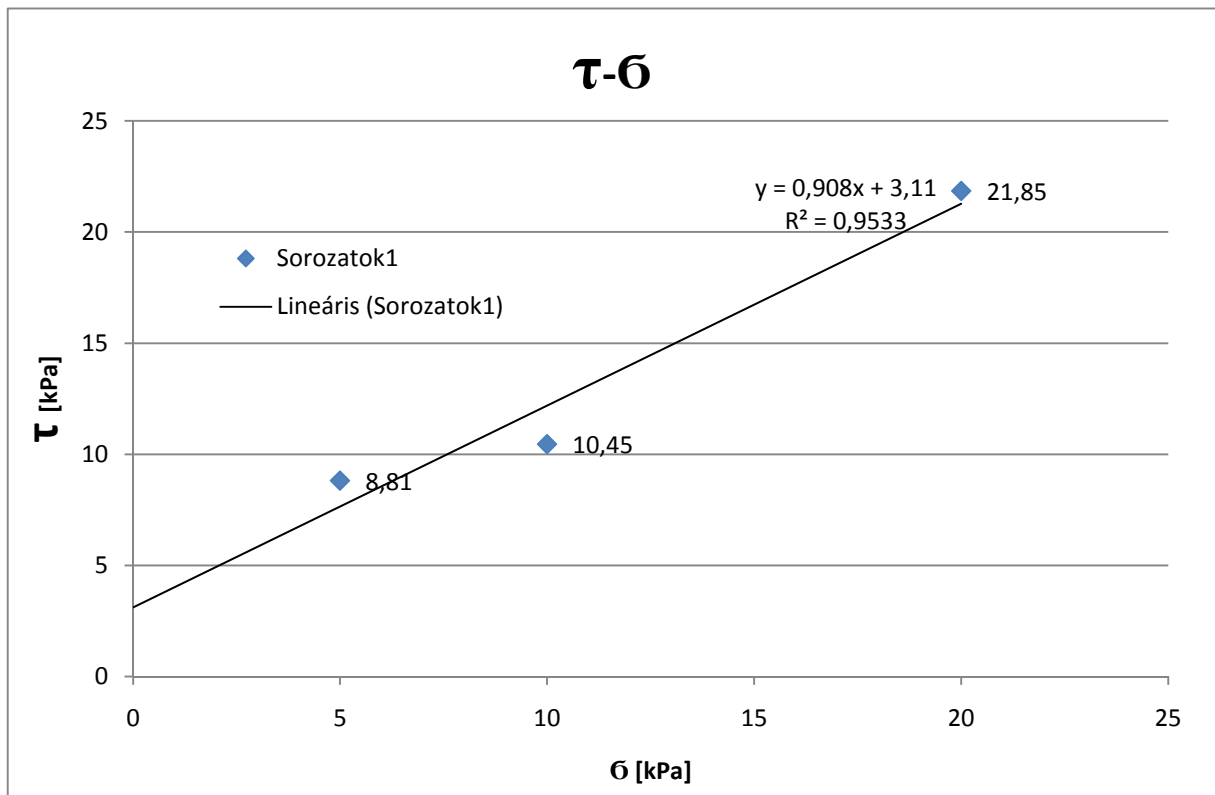


4.15. ábra. Különböző nyírószilárdsági paraméterek laboratóriumi, helyszíni mérések és irodalmi adatok alapján.

A közvetlen nyírás eredményeit a következő ábrák szemléltetik:



4.16. ábra. Nyírószilárdság változása az elmozdulás függvényében



4.17. ábra. τ – σ összefüggés

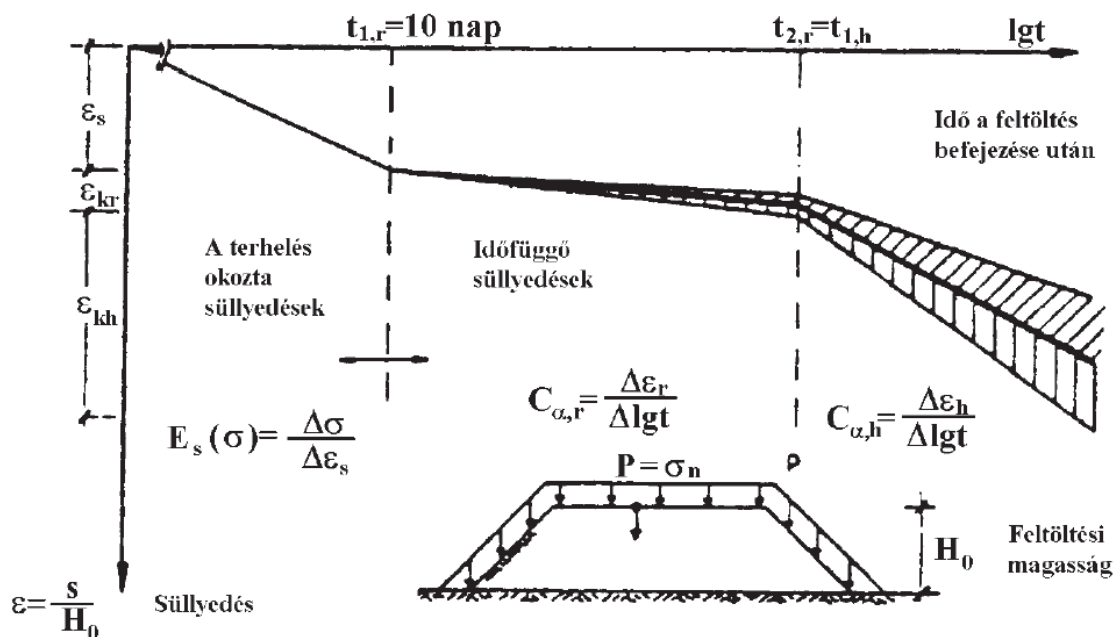
4.3 A végeselemes programhoz felhasznált paraméterek

4.3.1. Ödométerből kapott értékek

A konszolidáció kezdeti, első fázisát jellemző C_c – terheléshez, míg C_s – újratehereléshez tartozó kompressziós együtthatókat a saját mérési eredményeinket felhasználva határoztuk meg (lásd 4.18. ábra), és használtuk fel a Plaxis programban történő számításnál. A hulladékok konszolidációja három szakaszra bontható, melynek jellemzőit a már korábban bemutatott ábra mutatja (4.19. ábra)

Minta száma	C_c értéke	C_s értéke	e_0
1	0,229	0,068	2,05
2	0,23	0,056	1,83
3/A	0,745	0,166	1,57
3/B	0,788	0,152	1,57

4.18 ábra. Alternatív kompressziós paraméterek



4.19. ábra. A kommunális hulladékok idealizált süllyedés-idő görbéje

4.3.2. Nyírószilárdsági paraméterek

A nyírószilárdsági paramétereket az ÖNORM által ajánlott értékek felhasználásával adtuk meg.

kohézió	5	[kPa]
belső súrlódási szög	25	fok

4.3.2. Szakirodalomból felhasznált értékek

A nedves és a telített térfogatsúlyt a szakirodalomból vett 12 kN/m^3 -es átlagértékkel vettük figyelembe. A hulladéklerakók üzemeltetésének feltétele, hogy ne legyen víz a hulladéktestben. A csurgalékvizet és a csapadékot az erre a célra kiépített csurgalékvíz-gyűjtő rendszer elvezeti, a lerakó alján lévő szigetelőrétegek pedig meggátolják a talajvíz mindennemű hatását a hulladéokra. Ebből kifolyólag a talajvizet nem vettük figyelembe a lerakó mozgásvizsgálatánál.

A másodlagos konszolidációhoz tartozó együtttható értékét a szakirodalomból vett átlagértékkel vettük figyelembe: $C_{\alpha,r}=0,030$ $C_{\alpha,h}=0,102$

<i>A másodlagos konszolidáció együttthatójának és szakaszainak jellemző értékei helyszíni mérések alapján (KÖNIG, 1996.)</i>			
	$C_{\alpha,e}^r$ (-)	$C_{\alpha,e}^h$ (-)	$t_{2,r} = t_{1,h}$ (nap)
A mérések száma	16	20	20
Átlag	0,03	0,102	425
Szórás	0,017	0,077	472
A 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó felső érték	0,039	0,138	645
A 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó alsó érték	0,021	0,066	204

4.20. ábra. König táblázata a másodlagos konszolidációs együttthatók értékeihez

5. Végeelemes modellvizsgálat

5.1. PLAXIS - az általunk használt végeelemes program

A saját laboratóriumi méréseink eredményeit, a korábbi méréseket és a szakirodalmi ajánlásokat felhasználva alkottuk meg a lerakó depónia oldalrészűjének végeelemes modellét. A modell megalkotásához Plaxis 8.2 2D programot használtuk.

A végeelemes vizsgálatok (finite element method) az egyik legelterjedtebb módszere a geotechnikai problémák elemzésére. ^[1] A legkülönbözőbb geometriákat, paramétereket, környezeti tényezőket lehet a programmal kezelni, többféle anyagmodell felhasználásával, 3D

vagy 2D vizsgálat esetén is, legyen az mélyalapozás tervezése, vagy alagút hatása a környező talaj deformációira. Dolgozatunk számára előnyt jelentett a Plaxis 8.2 különböző lehetőségei: anyagmodellek összehasonlítása, szigetelőréteg figyelembe vétele és időfüggő anyagjellemzők kezelése. Vizsgálatok során a Mohr-Coulomb és a Soft-Soil-Creep anyagmodellt használtuk.

5.1.1. A Mohr-Coulomb talajmodell

Ez a modell a legegyszerűbb talajmodell, ami követi a szilárdságtanból és talajmechanikából ismert alapfeltevéseket. Lineárisan rugalmas –ideálisan képlékeny modell, azaz a nyírószilárdság kimerülése után rugalmas viselkedésből képlékeny viselkedésbe vált át. Állékonyságvizsgálatokhoz használják főként, mivel a modell állandó merevséggel rendelkezik, ezáltal pontos eredményt ad. Használatához kezdeti feszültségállapotot és talajparamétereket kell megadni ^[1]:

- E: rugalmassági tényező [kN/m²],
- ν : Poisson tényező [-],
- φ : belső súrlódási szög [°],
- c: kohézió [kN/m²],
- ψ : dilatációs szög [°].

5.1.2. A Soft-Soil-Creep talajmodell

A Soft-Soil-Creep anyagmodell bemutatásához, szükséges ismerni a felkeményedő anyagmodell (Hardening soil model) alapjait. Ezt a modellt használva az elsődleges terhelések hatására egyszerre tapasztalhatunk rugalmas és képlékeny viselkedést, azaz a terhelés után a talaj maradandó alakváltozásokat szenved. Ez a jelenség a felkeményedés, ami alatt a talaj egyes tulajdonságai megváltozhatnak. A felkeményedés a terhelések talajmerevségre gyakorolt hatásából következik, azaz a modell a kezdeti modulusokat a feszültségek függvényével kezeli. ^[1]

A Soft-Soil-Creep talajmodell a felkeményedő modellhez hasonlóan viselkedik, azzal a fontos különbséggel, hogy figyelembe veszi a feszültség hatására bekövetkező kúszást, azaz a másodlagos konszolidáció időfüggő részét. A kúszás több éven keresztül tartó maradandó alakváltozás, ami nem elhanyagolható tulajdonság gátak, földművek vagy esetünkben hulladéklerakók felszínüllyedésének tekintetében. Ahogy azt korábban említettük, a hulladékoknál nagy szerep jut az azonnali összenyomódásnak, az elsődleges konszolidáció

gyorsan lezajlik, ebből kifolyólag a lerakás után szinte csak másodlagos konszolidáció működik a depóniatestben, amit kúszás jelenségként definiálhatunk. Ilyen esetben fontos a rézsű végeselemes vizsgálata, hiszen ez lehetővé teszi az időfüggő hatások kezelését. A felkeményedő modellhez hasonlóan ez a modell is feszültségfüggő merevséget használ (logaritmikus), továbbá kiküszöböli a Morh-Coulomb talajmodell másodlagos konszolidáció miatti nem megfelelő viselkedését, ami fontos a hulladéklerakók felszínüllyedésének vizsgálatánál. ^{[1][2]}

A Plaxis 8.2-ben, a Morh-Coulomb modellhez hasonló bemenő nyírószilárdsági paraméterei vannak a Soft-Soil-Creep modellnek is, viszont a merevséget terhelésfüggő úton adhatjuk meg, az alábbi két módszer szerint: ^[37]

- elsődleges merevségi mutatók:
 - κ^* - módosított duzzadási index [-],
 - λ^* - módosított kompressziós index [-],
 - μ^* - módosított kúszási index [-].
- alternatív merevségi mutatók:
 - C_c – kompressziós együttható [-],
 - C_s – duzzadási együttható [-],
 - C_α – másodlagos kompressziós együttható [-],
 - e_{mit} – kezdeti hézagtenyező [-].

A hulladéklerakó modellezéséhez a saját laboratóriumi méréseink eredményeit, és szakirodalmi ajánlott értékeket használtunk. A hulladéktest merevségét alternatív mutatók segítségével adtuk meg, hiszen ez jobban követi a hulladékok viselkedését időfüggő terhelés alatt.

5.2. A modellezés

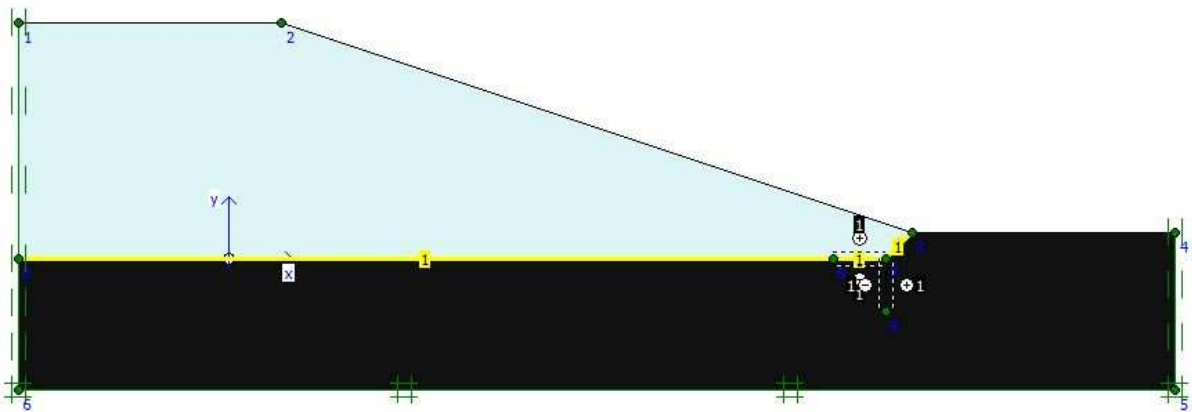
Ahogy azt elterveztük, készítettünk egy modellt, a lerakó vizsgálatára. Geometriánk egyszerű, egy réteget alakítottunk ki, mint hulladékot, aminek paramétereinek megadására a saját méréseink eredményét használtuk fel. Kerestük a kellő biztonsággal megálló kialakítást. Ezt szem előtt tartva háromféle kialakítást vizsgáltunk:

- 1:2 meredek rézsű,
- 1:2,5 meredek rézsű,
- 1:3 meredek rézsű.

A rendelkezésünkre álló végesesemes program anyagmodellei közül elvégeztük a vizsgálatot egyaránt Mohr-Coulomb és Soft-Soil-Creep anyagmodellel is. Figyelembe vettük az idő hatását, így a beállított lefutási idő is kétféle volt: 10 nap illetve 10 év. Összesen 18 modell készült el, 18 biztonsági tényező értékkel.

5.2.1. Bemenő adatok

A geometria két anyagból állt: hulladékból és vízzáró agyagból. Az agyagréteget szorító töltéssel alakítottuk ki. A két réteg között definiáltunk egy húzószilárdsággal rendelkező, plasztikus *geogrid* elemet, ezzel biztosítva, hogy a szigetelőréteg is jelen legyen a modellben. Az iránytörésben *interface* elemet definiáltunk.



5.1. ábra. 1:3-as rézsű geometriája

A hulladék paramétereit a 4. *Laboratóriumi eredmények* című fejezetben kerültek ismertetésre, a számítás során az ott leírtakat használtuk fel. Az vízzáró agyag paramétereit:

- $c = 90 \text{ kPa}$,
- $\varphi = 12^\circ$,
- $\gamma_n = 19 \text{ kN/m}^3$,
- $\gamma_n = 21 \text{ kN/m}^3$,
- $E_{\text{oed}} = 22 \text{ MPa}$,
- $\nu = 0,35$.

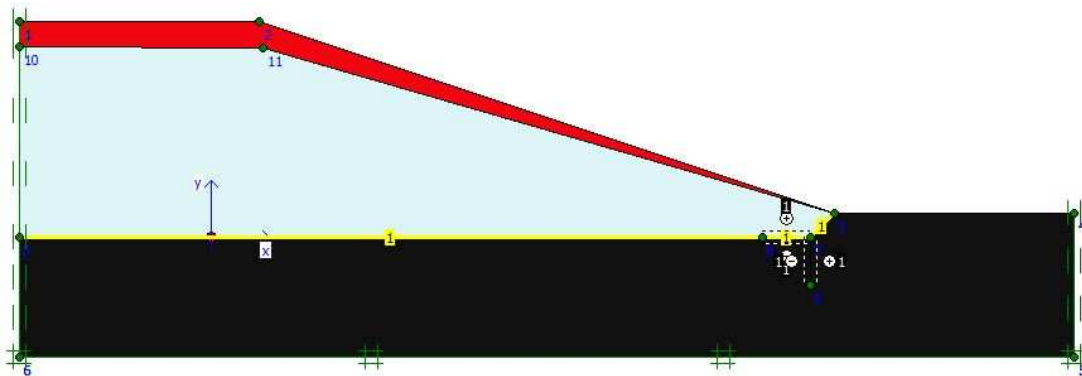
5.2.2. A végesesemes program lefuttatása

A bemenő adatok és a geometria megadása után rátérhettünk a számolásra, az állékonyság meghatározására. A Plaxis több fázisban tud dolgozni, de a biztonsági tényező számításához, ezeket a következőképp adtuk meg:

1. Kezdeti fázis: plaszkitus analízis, építési fázis, nulladik nap, tízedik nap illetve tíz év megadása időintervallumként, *interface* és *geogrid* elemek bekapcsolása.
2. Biztonsági tényező: ϕ -c redukció.

Az fenti kalkulációs fázisokat mind Mohr-Coulomb, mind Soft-Soil-Creep talajmodellnél beállítottuk. A különbség a két modell között a merevségi beállításokból fakad: míg az első modell egy egyszerűsített modell, itt csak összenyomódási modulust adtunk meg, addig a második modell figyelembe veszi az idő és terhelés hatását, ezáltal változtatja az anyag merevségét. Utóbbi segítségével a hosszú távú alakváltozások követhetők. Mivel a biztonsági tényező értékét a program a kezdeti állapotból számolja, két lépésben kellett azt meghatározni. ^[11]

Három időpontban figyeltük a biztonsági tényező értékét: a lerakás pillanatában, 10 napos korban illetve 10 éves korban. Ezt a Plaxis lineárisan rugalmas – ideálisan képlékeny modellt felhasználva, ϕ – c redukció útján határozza meg. A nulladik napi állékonyságot a program a kezdeti állapotból számolja, ekkor az anyagmodell tulajdonságainak nincs hatása a végső nyírószilárdsági paraméterekre. Az idő múlásával újra állékonyságot számoltunk, viszont ekkor már figyelembe kellett vennünk a felszínsüllyedések hatását. Ehhez használtuk fel a Soft-Soil-Creep talajmodellt. Új, megváltozott geometriákat kellett alkalmazni, majd ezekkel elvégezni a kalkulációkat. Az alakváltozott geometria pontjait a Plaxis Curves modullal tudtuk megvizsgálni, ahol a számítás elején kijelölt pontok (*Nodes*) megváltozott helyzetét le tudtuk olvasni, majd megrajzoltuk az új rézsűket. ^[11]



5.2 ábra. 1:3-as rézsű és a megváltozott geometria

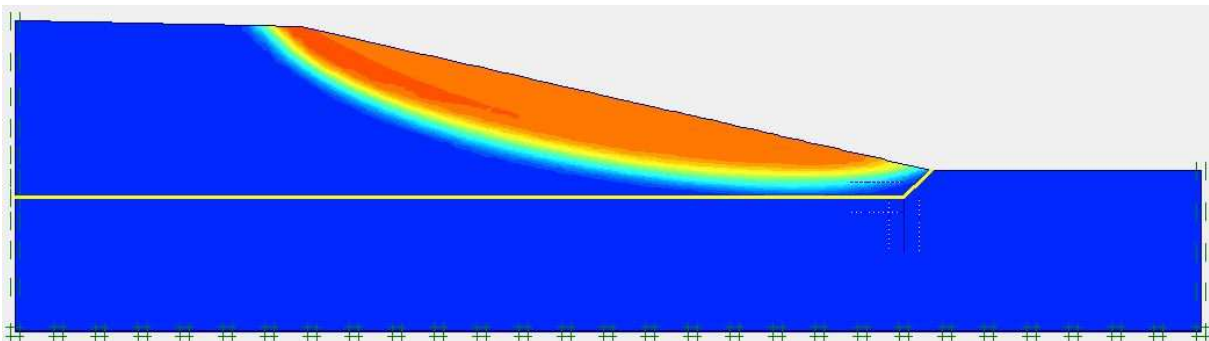
Az elmozdult állapotból kiindulva újra számolhatott a program, de ekkor már a különböző talajmodellek hatása is befolyásolta a végértéket. A biztonsági tényező alakulása érdekes eredményt hozott:

Biztonsági tényező alakulása

Rézsű	Modell					
	Mohr-Coulomb			Soft-Soil-Creep		
	lerakás	10 nap	10 év	lerakás	10 nap	10 év
1:2	1,13	1,13	1,13	1,13	1,15	1,35
1:2,5	1,38	1,38	1,38	1,38	1,40	1,66
1:3	1,62	1,62	1,63	1,62	1,66	2,04

5.3. ábra. A biztonsági tényező értékei különböző modellek esetében

Megfigyelhetjük, hogy a Mohr-Coulomb talajmodell állékonysága az időben szinte nem is változik, míg a Soft-Soil-Creep modell biztonsági értéke az idő múlásával növekedő tendenciát mutat. Ennek oka az, hogy az utóbbi modell figyelembe veszi az idő merevségre gyakorolt hatását.



5.4. ábra. Az 1:3-as rézsű potenciális csúszólapja 10 éves korban (SSC talajmodell)

A Plaxis további eredményeit a II. számú melléklet tartalmazza.

6. Összefoglalás

Mivel a nyírószilárdsági paraméterek tervezési értékeivel számoltunk, mindhárom rézsűkialakítás megfelel az Eurocode 7-szerinti $v \geq 1,0$ előírásnak ^[16]. Észrevehetjük, hogy a kritikus állapot a lerakás pillanatában jön létre, viszont az idő múlásával konszolidálódik a hulladéktest az önsúly és az általunk figyelembe nem vett gépek súlya alatt, a rézsű ellaposodik. Ez a már korábban vizsgált tézist igazolja, miszerint a lerakó geometriája jelentősen befolyásolja a biztonsági tényező értékét ^[18]. Az ajánlott 1,35-ös biztonsági tényezőt az 1:2-es rézsű már csak 10 éves korában - kellő felszín-süllyedés után - produkál, tekintetbe véve a hulladéklerakók 10-15 éves életkorát, ez az érték kellő biztonságot jelent a rekultiváláshoz. A másik két kialakítás állékonysága ezt az értéket már korábban eléri.

6.1. Gazdasági vonatkozások

A jelenlegi 1:3-as dőlésszögű lerakókhoz képest a meredekebb rézsűvel megépülteknek nagyobb a tárolókapacitásuk. Elméleti példán bemutatjuk, a hasznát a meredekebb oldalfalú lerakóknak. A fiktív depóniák térszíni alapterülete legyen egy hektár, azaz 100 m x 100 m. Magasságukat az oldalfal dőlésszöge adja, a lerakó tetején 10 m x 10 m-es plató kerül kialakításra. Így a térfogata egy csonka gúlaként számítható. A térszín alatt lévő szorítótöltés a szigetelőréteggel, 1:1-es rézsűvel, 5 m mélyen helyezkedik el. Ez mindhárom rézsűkialakításnál megegyezik, így térfogata nem képezi a számítás részét. A két különböző geometriájú depónia befogadóképességének számolása:

$$V = (T_{a1} * m_1 / 3) - (T_{a2} * m_2 / 3)$$

ahol T_{a1} a térszíni alapterület (10000 m²), m_1 az ehhez tartozó magasság, T_{a2} a plató területe (100 m²), m_2 pedig a platóhoz tartozó magasság. Az eredmények:

- 1:3-as rézsű – $V \approx 55\,500 \text{ m}^3$,
- 1:2,5-ös rézsű – $V \approx 66\,600 \text{ m}^3$,
- 1:2-es rézsű – $V \approx 83\,250 \text{ m}^3$.

Szembetűnő, hogy a meredekebb dőlésszög miatt jóval nagyobb tömegű hulladékot lehet elhelyezni. Összehasonlításképp az 6.1-es ábra mutatja a kapacitásokat. Gazdasági szempontból ez már jelentős többlet, ami kellő biztonsággal megáll. Sokkal több hulladékot lehet elhelyezni, ami növeli a lerakó működési idejét. Mivel az idő múlásával a biztonsági tényező növekszik, a depónia állékonysága jobb lesz, így a kármentesítési költségektől is el lehet tekinteni.

Rézsű	Felszín feletti térfogat	Kapacitás az 1:3-as rézsűhöz képest	Többlet m ³ -ben
1:2	83 250 m ³	150%	27 750 m ³
1:2,5	66 600 m ³	120%	11 100 m ³
1:3	55 500 m ³	100%	-

6.1. ábra. A különböző rézsűszögű depóniák tároló képessége

6.2. Értékelés, kitekintés

Dolgozatunk célja a kommunális hulladéklerakók rézsűjének meredekebb dőlésszögű kialakítása, és részletes vizsgálata volt, hogy ez által nagyobb befogadóképességű, így

gazdaságosabb depóniák legyenek kialakíthatóak. Lehetőségünk volt érett hulladékmintát feldolgozni, az abból nyert paraméterekkel és szakirodalmi adatokkal kiegészítve modellezni az elképzelésünket. Úgy tűnik elértük a kitűzött célt, viszont nem szabad figyelmen kívül hagyni az egyszerűsítésekből adódó pontatlanságokat és egyéb körülményeket a feladat feldolgozása közben:

- a végeselemes geometriánk egyszerű, a tervezés ennél sokkal kifinomultabb modelleket kíván,
- a hulladéktestünket homogénként kezeltük, a heterogenitást nem vettük figyelembe,
- a nyírószilárdság és a víztartalom közti összefüggést, amivel nem foglalkoztunk a modellezéskor^[17]
- a rekultiválandó lerakók összetettebb szerkezetűek, mint a mi modellünk (pl.: lépcsők, plató, alapok, szigetelés),
- lerakók működési közbeni folyamatokat nem vettük figyelembe (pl.: csurgalékvíz visszaforgatás, gázbefúvás, kompaktorok súlya),
- biodegradációs folyamatok nem állnak le 10 év elteltével sem,
- a szakirodalmi adatok ajánlások,
- országonként más-más előírás van a hulladéklerakó depóniák biztonsági tényezőinek értékére (pl.: $v \geq 1,5$).

Ezeket összevetve számításaink szerint kellő biztonsággal megáll az 1:2,5-ös, rézsű; az ennél meredekebb 1:2-es is hasonlóan, viszont annak biztonsági tényezője a kezdeti időszakban nem éri el az ajánlott értéket. Célszerű átgondolni a tervezés és kialakítás menetét, figyelembe véve dolgozatunk eredményét, annak gazdasági vonatkozásait. A meredekebb rézsűkialakítás további lehetőségeket, eseteket vonhat maga után, de ez már nem képezi dolgozatunk részét. Az általunk tervezett kialakítás csak ajánlás, nem bizonyított tézis, ellenben további kutatások és modellezések alapját képezheti.

Mivel a hulladéktermelés globális problémává nőtte ki magát, úgy gondoljuk, hogy egy pontosabb modell megalkotása elengedhetetlenül szükségessé vált a fejlettebb, környezetbarát hulladék-elhelyezés szempontjából. Dolgozatunkkal elértük az általunk kitűzött célt, egy meredekebb, kellően állékony rézsűkialakítási lehetőség igazolását. Vizsgálataink alatt tudatosult bennünk, hogy a témánknak mekkora gyakorlati haszna van, tapasztalhattuk a szakszerűen és a szakszerűtlenül elhelyezett hulladék mennyiségét, táj- és

környezetromboló hatását. Napjaink robbanásszerű ipai növekedése miatt, szinte már most is késében van a világ a megfelelő hulladékgazdálkodás kialakításával. Mérnöki feladat ennek megtervezése, hiszen egy műtárgy 100 éves élettartama mellett egy hulladéklerakó 10-15 éves működése eltörpülhet, viszont utóbbinak Földünkre gyakorolt hatásai drasztikusak is lehetnek. Ökológia lábnyomként évszázadokig környezete meghatározó eleme marad, ezért mindenképpen tudatosan kell terveznünk a jelenben, hogy egy élhetőbb jövőt kapjunk.

Reméljük, TDK munkánk felhívja a figyelmet a hulladékok ártalmatlanításának fontosságára, annak gazdasági, mérnöki és környezetvédelmi szempontjaira.

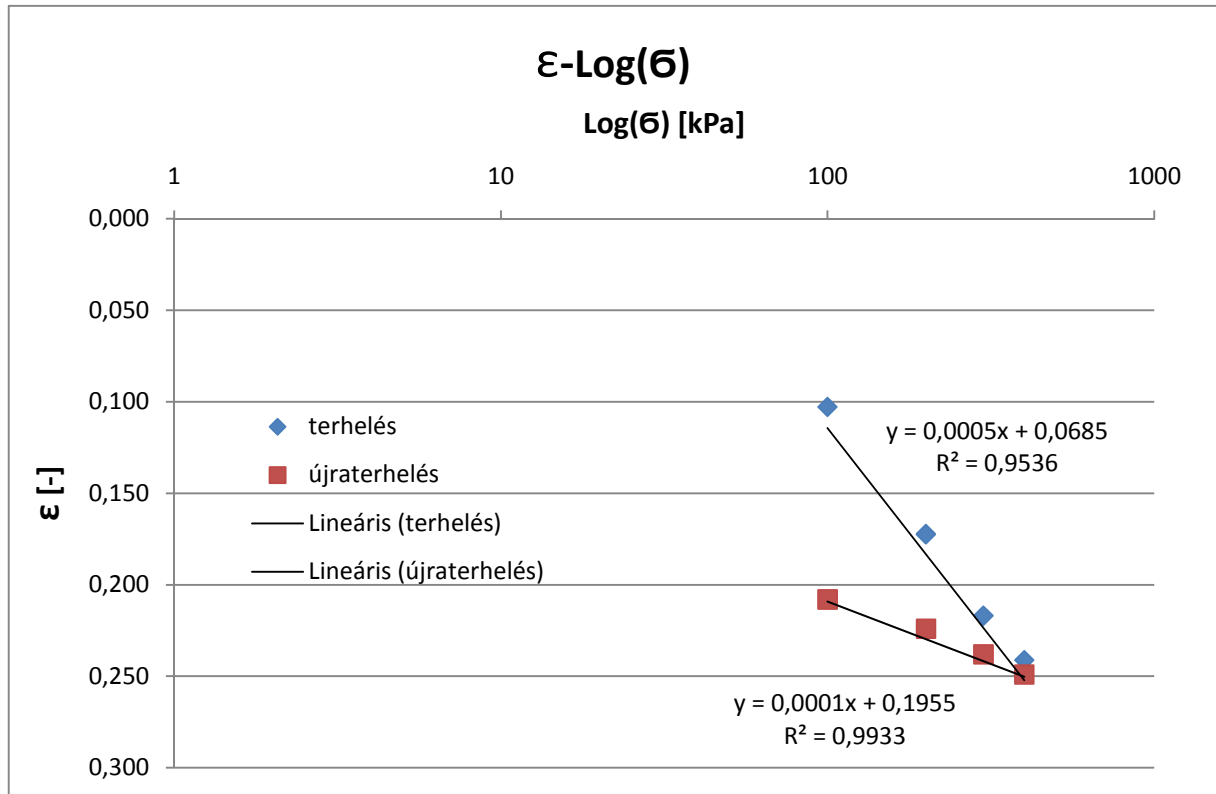
7. Irodalomjegyzék

- [1] Czap Z. (2012), Geotechnikai numerikus módszerek, egyetemi jegyzet, Véges elemek módszere
- [2] Dixon, N – Russel, V. J. (2004), Engineering properties of Municipal Solid Waste
- [3] Faur K. B. (2012), Hulladéklerakók magasztási lehetőségeinek ellenőrzése állékonyságvizsgálattal, Szakdolgozat
- [4] Független Ökológiai Központ Alapítvány, Grafikonok a magyarországi hulladékgazdálkodás állapotáról, www.foek.hu
- [5] Kabai I. (2005), Geotechnika I.
- [6] Kavazanjian E. K. (2001), Mechanical properties of municipal solid waste.
- [7] König, D. – Kockel, R. - Jessberger, H. L. (1996), Zur Beurteilung der Standsicherheit und zur Prognose von Mischabfalldeponien
- [8] Kovács, M. (2009), Földművek, BME egyetemi jegyzet
- [9] Manassero, M. (1996), Waste disposal and containment
- [10] Molnár Tamás Géza (2012), Környezeti hatások a depóniagáz mennyiségi, illetve minőségi jellemzőire, PhD értekezés
- [11] Plaxis Version 8. (2006), Material Models Manual
- [12] Singh, M. K. (2008), Characterization of stress-deformation behaviour of municipal solid waste. PhD thesis
- [13] Szabó I. (1994), A hódmezővásárhelyi kommunális hulladéklerakóhely talajmechanikai szakvéleménye, Kézirat
- [14] Szabó Imre (1998), Hulladékékelhelyezés
- [15] Szabó I. – Szabó A. (2012), Hulladéklerakók rekultivációja, utógondozása
- [16] Szepesházi R. (2008), Geotechnikai tervezés – Tervezés az Eurocode 7 és a kapcsolódó európai geotechnikai szabványok alapján
- [17] Varga G., Czap Z., Mahler A. (2009), Stability of cut slopes in cohesive soils
- [18] Varga G. (2010), Hulladéklerakók állékonysági kérdései, PhD értekezés

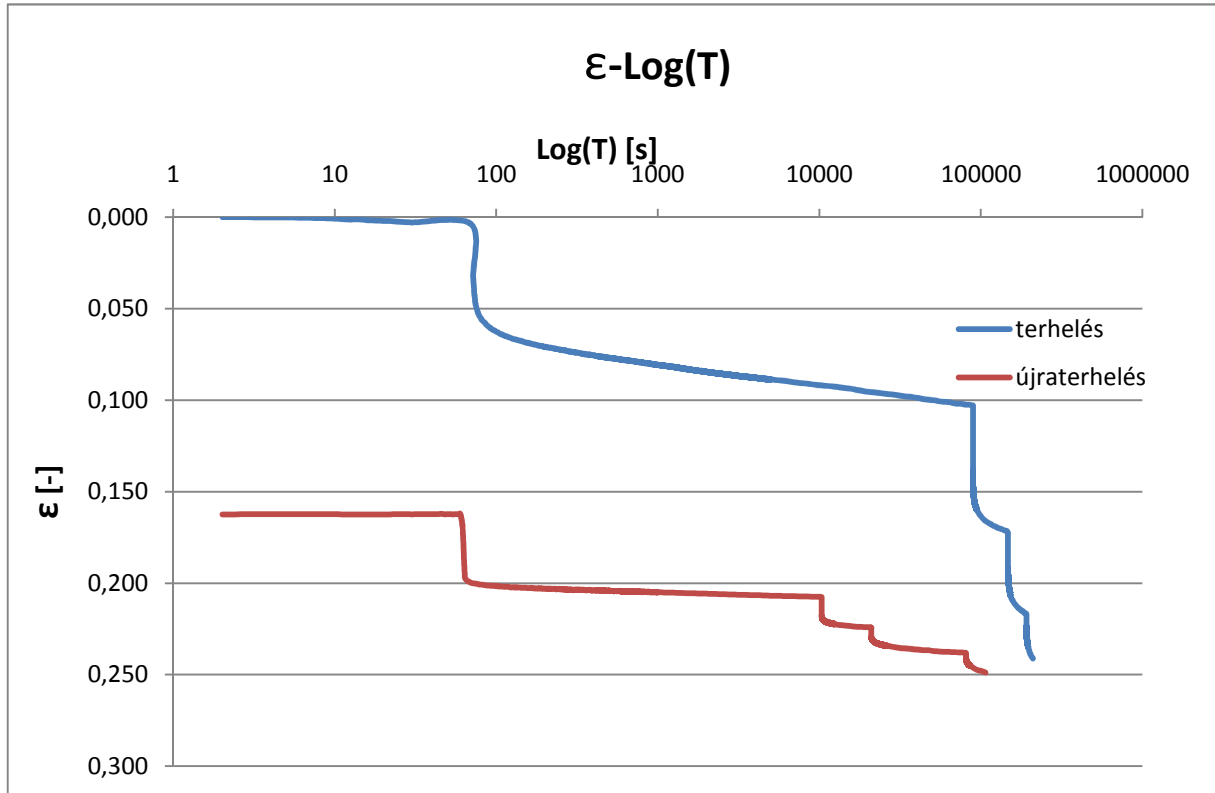
8. Mellékletek

8.1. Laborvizsgálati melléklet

8.1.1. 1-es számú mintához tartozó diagramok

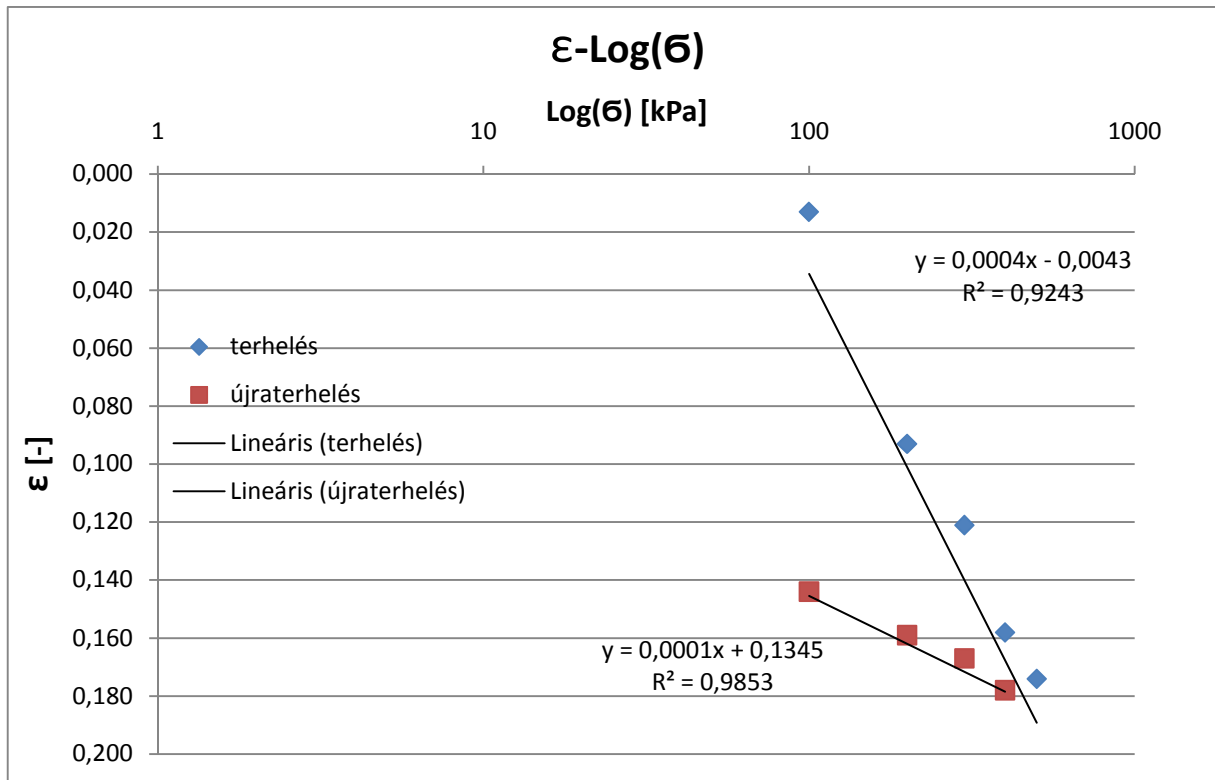


8.1. ábra. $\varepsilon - \log(\sigma)$ összefüggés

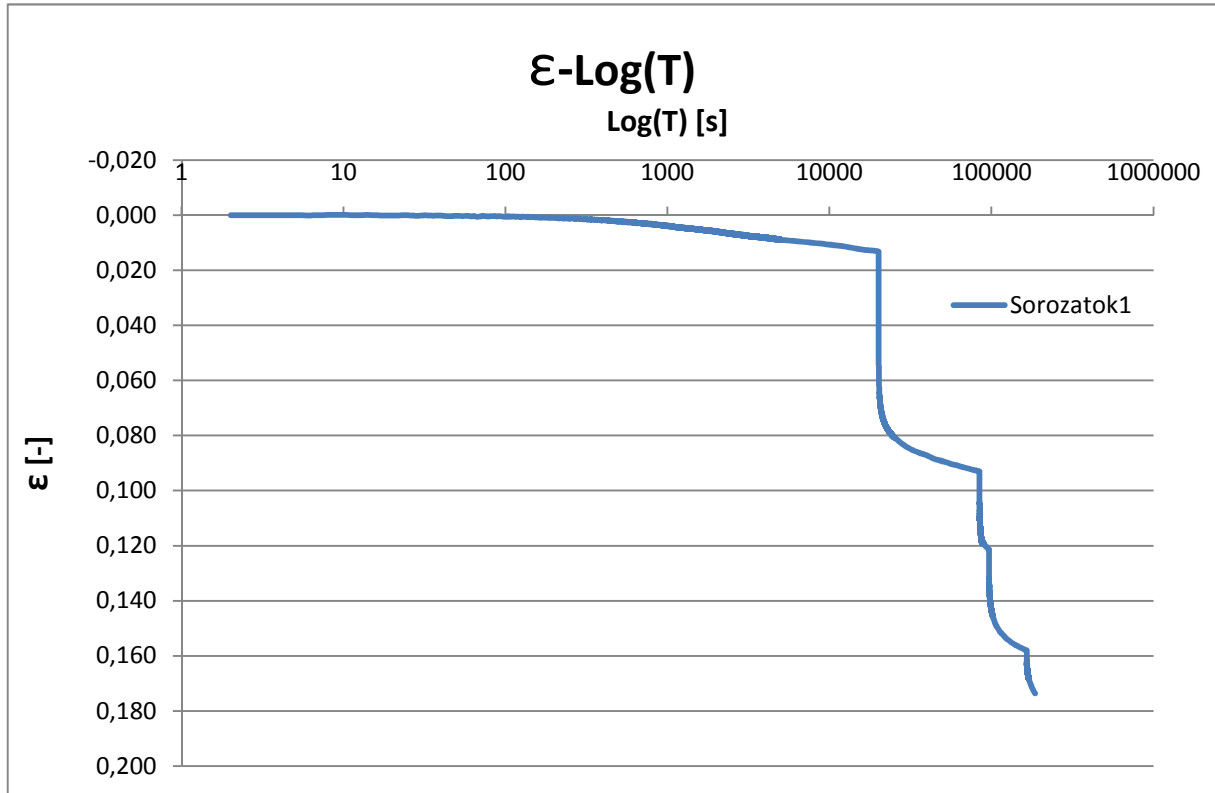


8.2. ábra. $\varepsilon - \log(t)$ összefüggés

8.1.2. 2-es számú mintához tartozó diagramok

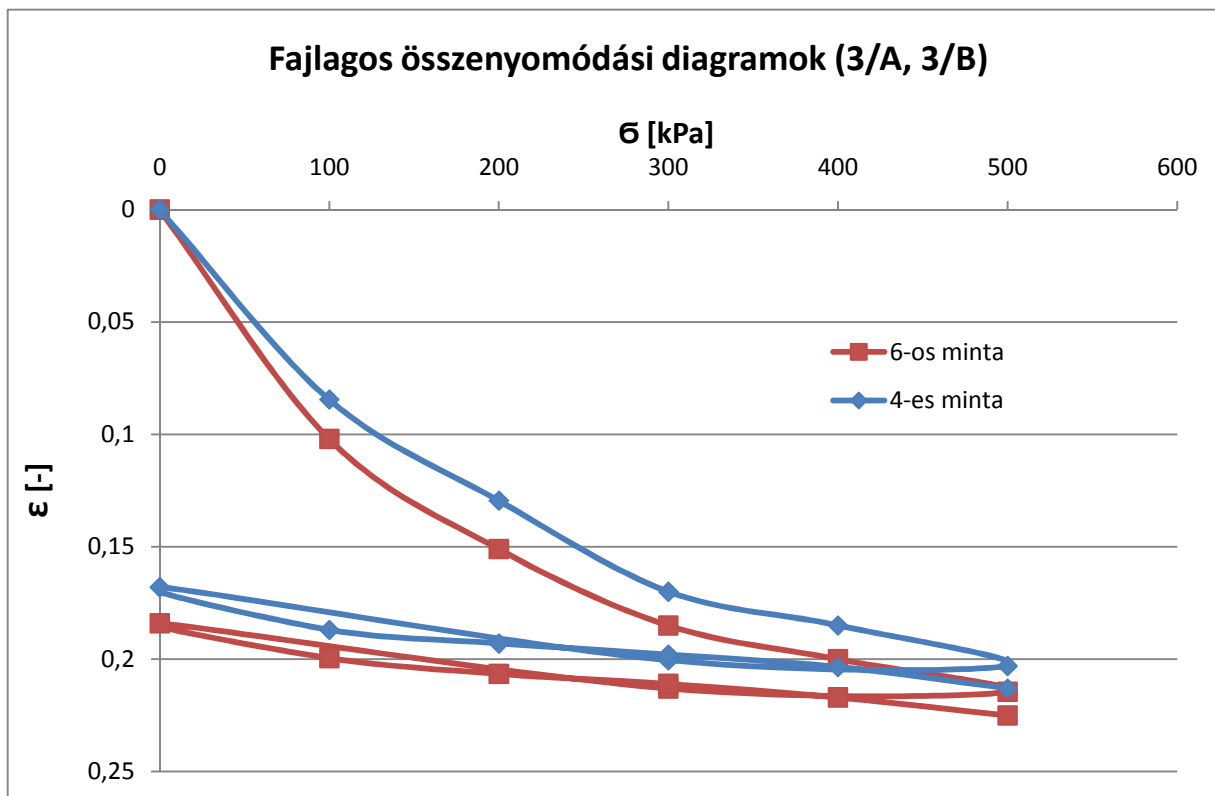


8.3. ábra. $\varepsilon - \log(\sigma)$ összefüggés



8.4. ábra. $\varepsilon - \log(t)$ összefüggés

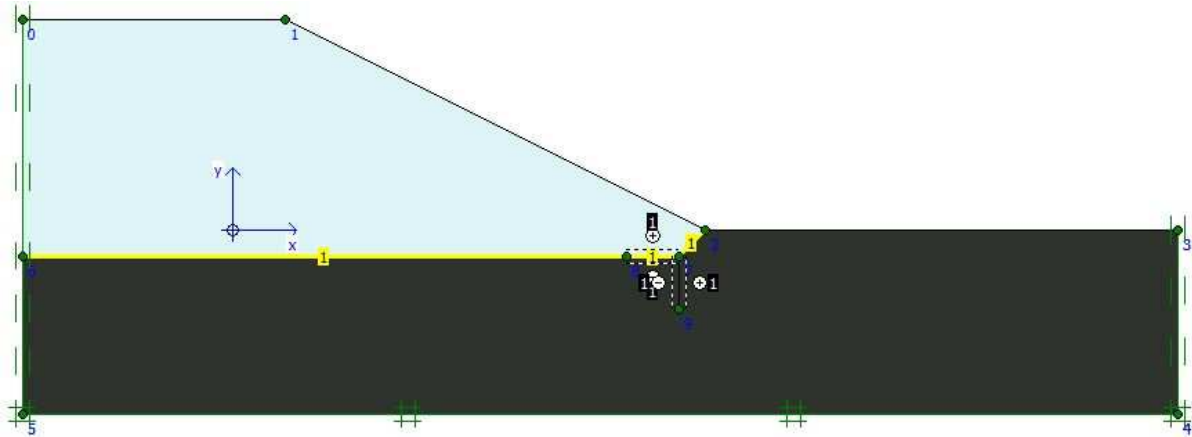
8.1.3. 3-as számú mintához tartozó diagramok



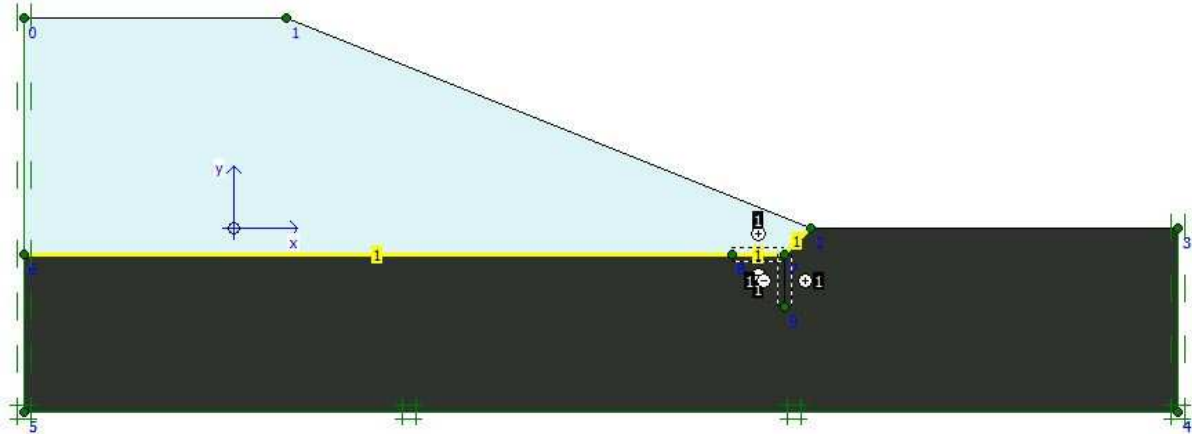
8.5. ábra. Fajlagos összenyomódási diagramok

8.2. Plaxis melléklet

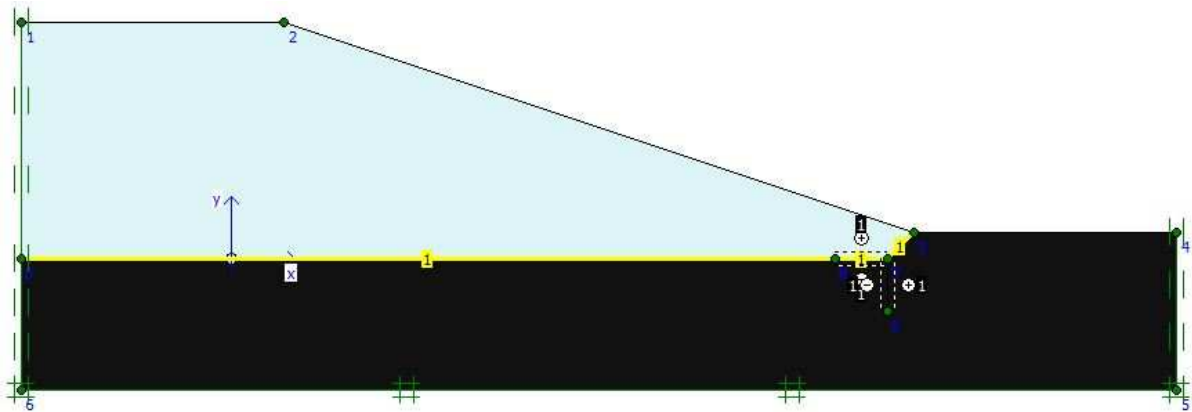
8.2.1. Kiindulási geometriák



8.1. ábra. 1:2-es részsűkialakítás

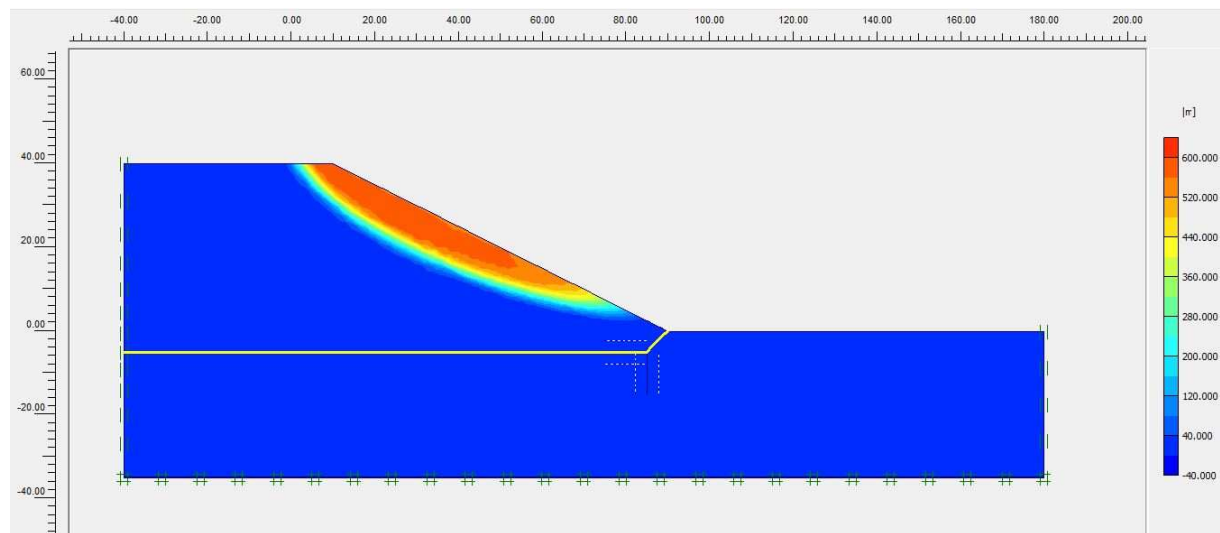


8.2. ábra. 1:2,5-ös részsűkialakítás

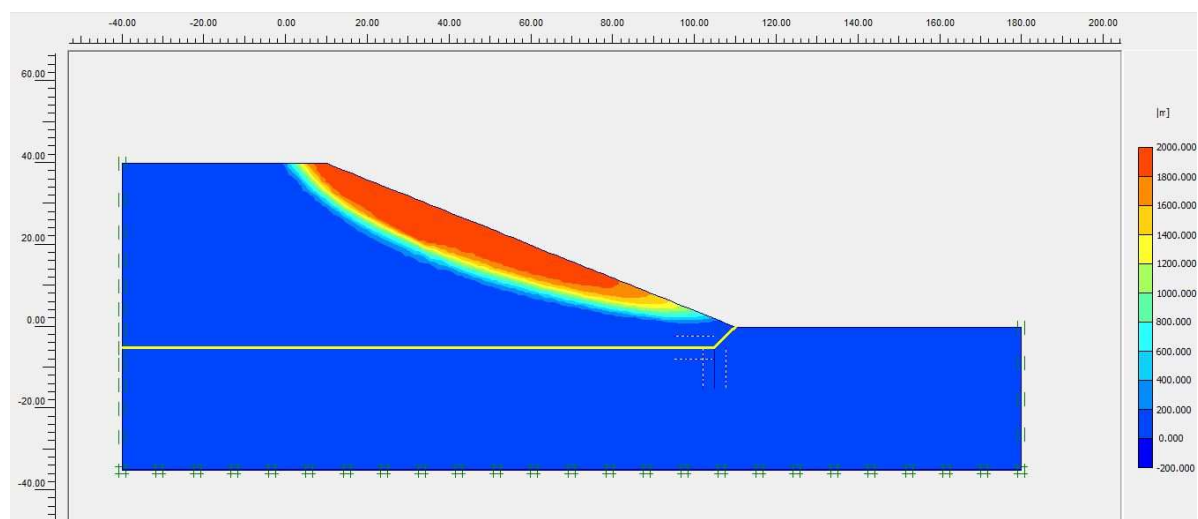


8.3. ábra. 1:3-as részsűkialakítás

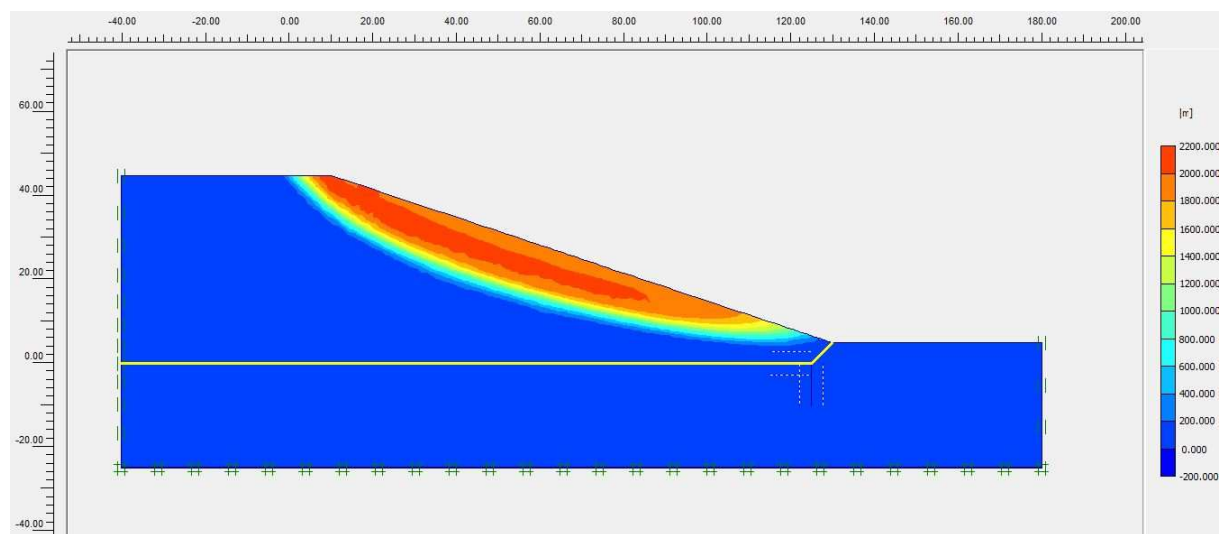
8.2.2. Nulladik napi állékonysághoz tartozó csúszólapok



8.4. ábra. 1:2-es rézsűkialakítás

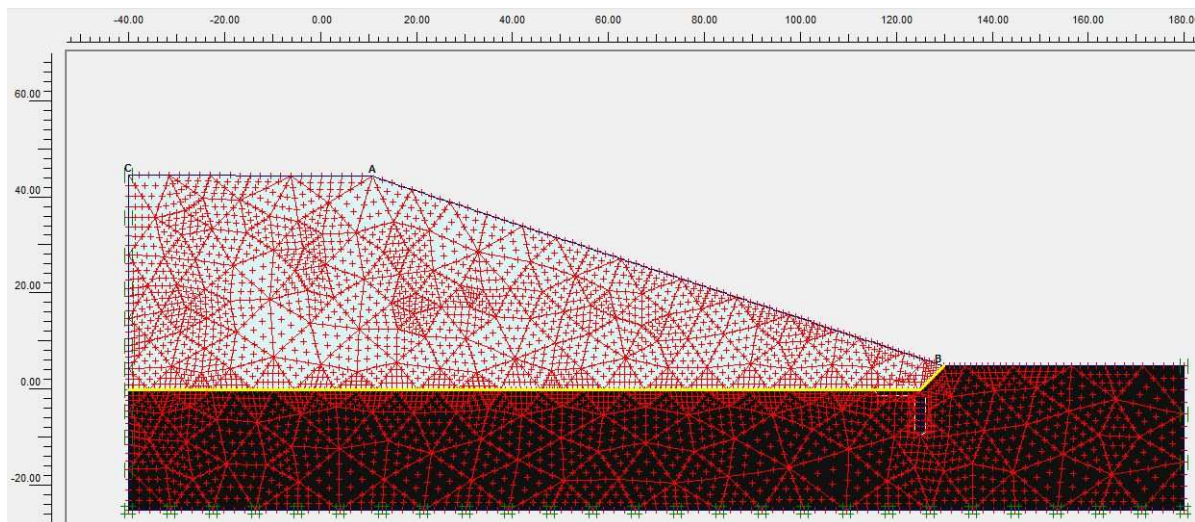


8.5. ábra. 1:2,5-ös rézsűkialakítás



8.6. ábra. 1:3-as rézsűkialakítás

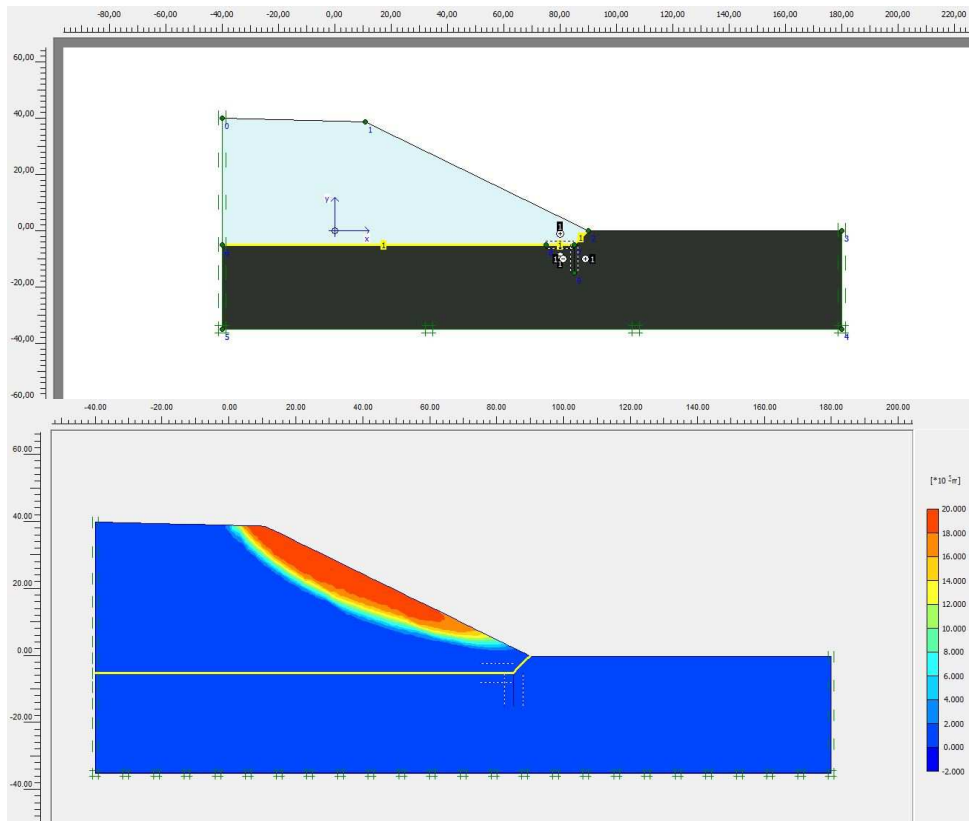
8.2.3. Megváltozott geometriák és a tönkremeneteli zónák



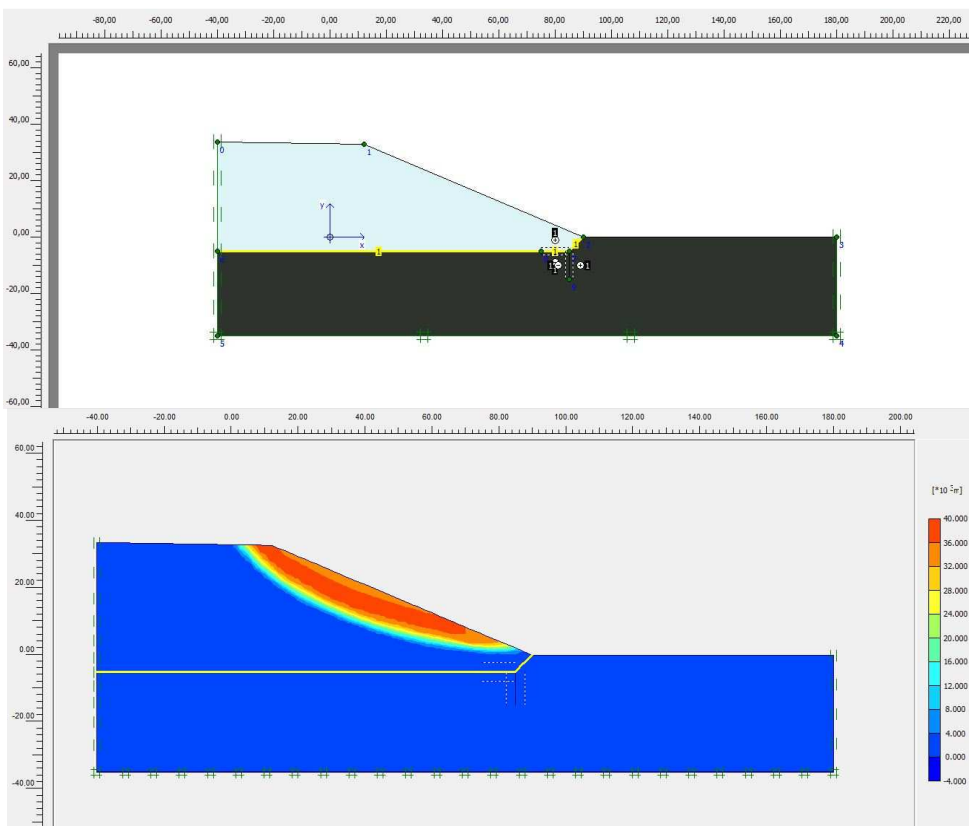
8.7. ábra. Vizsgált pontok és a hálógenerálás

Megváltozott geometria									
Vizsgált pontok		A _x	A _y	C _x	C _y	Új koordináták			
		10,00	40,00	-40,00	40,00				
Rézsű	Idő	Változás				A _x	A _y	C _x	C _y
		A _x	A _y	C _x	C _y				
1 : 2	lerakás	0,80	-0,50	0,00	-0,20	10,80	39,50	-40,00	39,80
	10 nap	0,80	-1,20	0,00	-0,80	10,80	38,80	-40,00	39,20
	10 év	2,23	-7,24	0,00	-6,35	12,23	32,77	-40,00	33,65
1 : 2,5	lerakás	0,80	-0,50	0,00	-0,20	10,80	39,50	-40,00	39,80
	10 nap	0,58	-0,99	0,00	-0,76	10,58	39,01	-40,00	39,24
	10 év	1,76	-6,80	0,00	-6,10	11,76	33,20	-40,00	33,90
1 : 3	lerakás	0,80	-0,50	0,00	-0,20	10,80	39,50	-40,00	39,80
	10 nap	0,52	-0,92	0,00	-0,77	10,52	39,08	-40,00	39,23
	10 év	2,99	-13,30	0,00	-12,20	12,99	26,70	-40,00	27,80

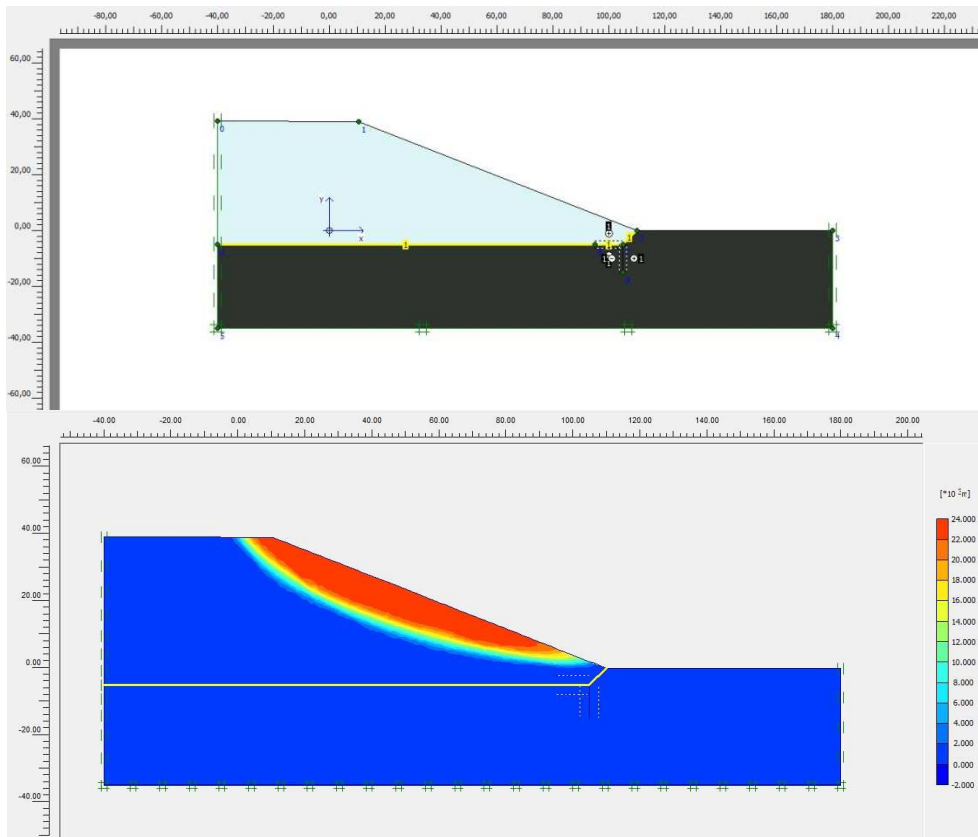
8.8. ábra. Koordinátajegyzék



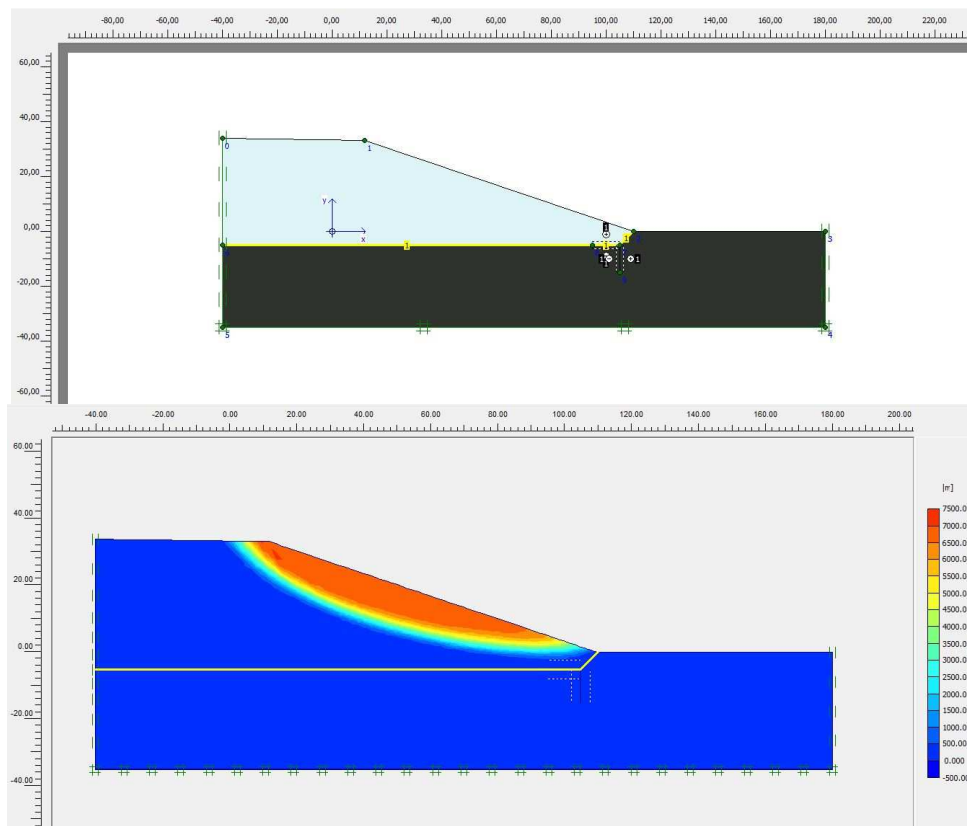
8.9. ábra. 1:2-es részsűkialakítás 10 napos korban és a potenciális csúszólap



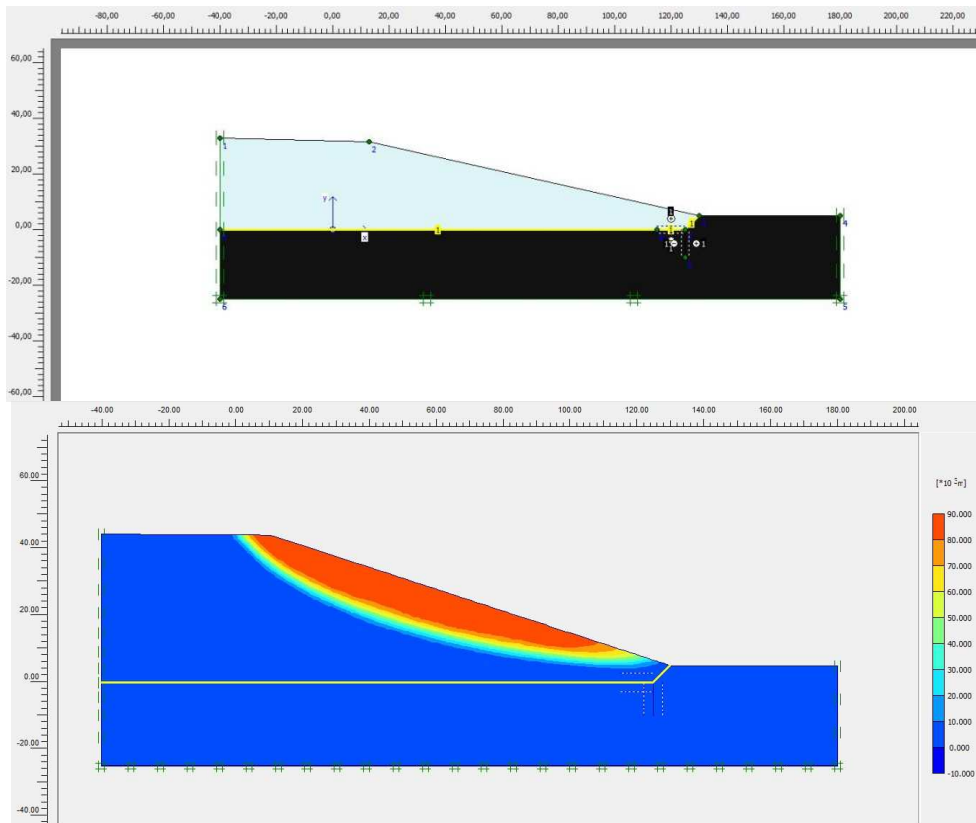
8.10. ábra. 1:2-es részsűkialakítás 10 éves korban és a potenciális csúszólap



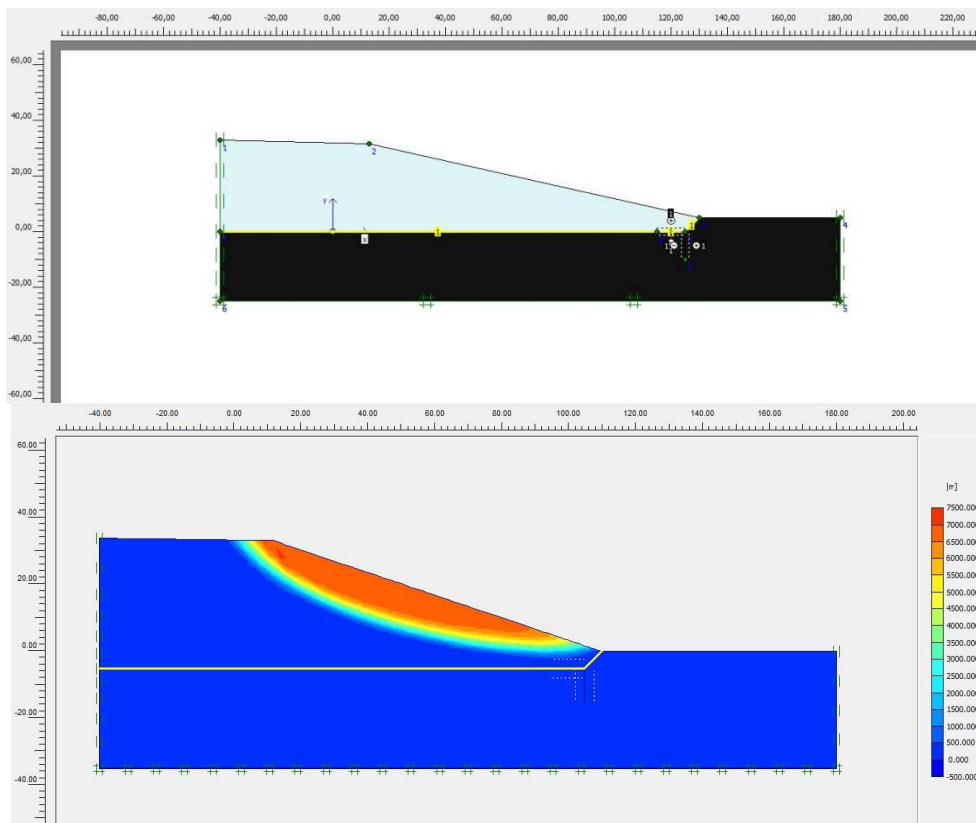
8.11. ábra. 1:2,5-ös rézsűkialakítás 10 napos korban és a potenciális csúszólap



8.12. ábra. 1:2,5-ös rézsűkialakítás 10 éves korban és a potenciális csúszólap



8.13. ábra. 1:3-as rézsűkialakítás 10 napos korban és a potenciális csúszólap



8.14. ábra. 1:3-as rézsűkialakítás 10 éves korban és a potenciális csúszólap