

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

TDK dolgozat

Hulladéktest állékonyságának vizsgálata anizotróp viselkedés figyelembe vételével

2016/17/1 félév

Készítette:
Dessewffy Tamás
LZA1XS

Konzulens:
Dr. Varga Gabriella

Tartalom

Tartalom	2
Absztrakt	3
1. Bevezetés	4
2. A hulladék fogalma, hulladékgazdálkodás	4
3. Hulladékok vizsgálatának geotechnikai módszerei	7
3.1. Laboratóriumi vizsgálatok	8
3.2. In-situ (helyszíni) vizsgálatok	12
3.3. Back-analízis	14
4. Tervezéshez szükséges geotechnikai paraméterek szakirodalmi ajánlásai	14
4.1. Térfogatsűrűség	14
4.2. Nyírószilárdsági paraméterek	15
5. Szálerősítés hatása a rézsűállékonyságra:	21
6. A nagymodell kísérlet eredményei	26
7. A szálerősítés hatásának vizsgálata a magyarországi hulladékokra vége-selemes szoftverrel	28
7.1. Geometria	28
7.2. Talajfizikai jellemzők, anyagmodell	29
7.3. Peremfeltételek, vége-selemes háló	29
7.4. Terhek	30
7.5. Vizsgálatok menete	30
7.6. Futtatások	30
8. Összefoglalás és kitekintés	43
9. Jövőbeli célok	45
Irodalomjegyzék	45

Absztrakt

A hulladék mennyiségének növekedése a telekárak emelkedésével párosulva arra készítette a szakembereket, hogy a meglévő lehetőségeiket jobban kihasználva nagyobb, mélyebb és meredekebb lerakókat alakítsanak ki.

Az állékonyságvizsgálatok elvégzéséhez szükséges talajfizikai paraméterek meghatározására alkalmas laboratóriumi háttér gyakran nem áll rendelkezésre. A gyakorlatban a back analízis során korábban bekövetkezett csúszásokat, tönkremeneteleket modellezzük és visszaszámítjuk az események ismeretében a hulladéktest talajfizikai paramétereit. A valóságban lejátszódott események vizsgálatokor a csúszólap helyének az ismeretében következtetni tudunk a tönkremenetel jellegére, a gyenge síkok helyzetére is. Hulladéklerakókban végbement csúszások elemzésekor a kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a hagyományos talajmechanikai feltevésekkel végzett vizsgálatok a valóságtól jelentősen eltérő csúszólap alakokat és helyeket eredményeztek.

Megállapították, hogy a hulladékokban megtalálható ún. erősítő anyagok hatására a hulladéktest gyakorlatilag a vasalt talajhoz hasonlóan viselkedik. Az erősítő anyagok olyan elemek, amelyek jelentősebb húzást tudnak felvenni, azaz erősítő hatásuk az elmozdulások során mobilizálódik. Az erősítő anyagok fenti tulajdonságát kohézió jellegű tulajdonságként fogalmazták meg és fibrózus kohézióknak nevezték el. A hulladékok nyírási ellenállását a belső súrlódási szögből fakadó ellenállás és a húzási ellenállás összegeként jellemezték.

Ennek értelmében a hulladék egy anizotrop közeg, amely a hagyományos számítási eljárásokkal nehezen vizsgálható. A hulladékvizsgálat egyre szélesebb körben való elterjedésével, és a mintavételek számának növekedésével megállapítást nyert, hogy a hulladéklerakókban elhelyezett anyagok terítési technikájából adódóan a hulladék egy vízszintesen rétegzett szendvics szerkezetként fogható fel, ahol az erősítést adó szálak iránya is megegyezik a lerakási iránnyal. Laboratóriumban végzett közvetlen nyírókísérletek esetén a nyírási sík iránya a rétegzettség irányával párhuzamos, azaz gyakorlatilag a leggyengébb helyzetét tudjuk csak modellezni a hulladéknak. Ez magyarázza azt a tényt is, hogy azonos összetételű mintán elvégzett triaxiális és közvetlen nyíró kísérlet esetén a triaxiális kísérlet mindig valamivel nagyobb nyírószilárdságot mutat.

A valóságban egy esetleges csúszás bekövetkezésekor a nyírási sík az erősítő szálakkal egy α szöget zár be, nem párhuzamos velük. Az erősítő anyagokban egy jelentős nyírási ellenállás mobilizálódik. Egyes feltételezések szerint, az α szög 45° közelében van, így annak vizsgálata javasolt.

TDK dolgozatomban kommunális hulladék állékonyság vizsgálatát végeztem el a szálerősítés figyelembe vételével végeselemes program alkalmazásával.

1. Bevezetés

Napjaink társadalma rendkívüli, és egyre növekvő mennyiségű hulladékot termel, amelynek elhelyezése, ártalmatlanítása egyre nagyobb feladatokat állít az ezzel foglalkozó szakemberek elé. A keletkező szemét elhelyezéséhez újabb és újabb hulladéklerakókat kell építeni, amelyek sokszor már a tervezett idő előtt megtelnek. A telekárak növekedésével párhuzamosan ez súlyos gazdasági terheket ró az országokra. Ezért a szakemberek azon dolgoznak, hogy a meglévő lehetőségeket jobban kihasználó, nagyobb, mélyebb, és meredekebb oldalfalú hulladéklerakókat alakítsanak ki.

2. A hulladék fogalma, hulladékgazdálkodás

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 a nélkül történő elhelyezéséről átmenetileg vagy véglegesen gondoskodni kell. Annak megítélésében, hogy egy anyag, tárgy hulladéknak minősül-e vagy sem, az anyagi jellemzőkkel legalább azonos súlyú szerepet játszanak a társadalmi, gazdasági tényezők. [5.]

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 [6.]). 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 évtizedekben új feladatkörrel bővült a földművek tervezésének tudománya, ami nem más, mint a hulladéklerakó depóniák építése [7.]. Ezeknek a depóniáknak a környezettudatos, költséghatékony kialakítása, üzemeltetése az építőmérnöki feladatok részét képezi, ugyanis a lerakó állékonysága, stabilitása a geotechnikában használatos laborvizsgálatokkal, méretezési eljárásokkal értékelhető.

A nem megfelelően kialakított, vagy üzemeltetett hulladéklerakók nagy veszélyt rejtenek magukban mind az élővilágra, mind a növényzetre egyaránt. Az átlag működési időtartammal számolva 15 évig lehet tölteni a depóniát, majd a területet rekultiválni, újrahasznosítani szükséges. A jelenleg Magyarországon üzemelő lerakók több hektár alapterületűek, valamint 20-30 méter magasak is lehetnek a rekultiválás előtti állapotukban, így kellő odafigyeléssel, tudatos töltési tervvel kell működtetni, a környezetre, tájképre ekkora hatást kifejtő építményeket.

A lezárás után a hulladéktest környezetre gyakorolt hatása nagyon nehezen becsülhető, mégis növekvő tendenciát mutat a lezárt lerakók más célra történő felhasználása. Elsősorban a szilárd kommunális- illetve inert hulladéklerakókra jellemző a lezárás utáni hasznosítás, de más esetekben sem elképzelhetetlen. A már korábban átalakított és más céllal újra használatba vett lerakók üzemeltetési tapasztalatai segítik az újabb tervek megvalósítását. [15.]

A települési szilárd hulladéklerakók nagy része megfelelő rekultivációs réteg telepítése után különféle szabadidős és rekreációs célokra felhasználható, és fel is használják. A tengerentúlon, és egyes fejlettebb európai országok esetében a települési szilárd hulladéklerakókat tudatos feltöltés után, a hulladék fizikai, geotechnikai paramétereit jól ismerve (osztályozott, szelektíven gyűjtött hulladék) rekultivációs réteggel látják el, és

különféle szabadidős tevékenységek, vagy akár energianyerés céljából felhasználják a több hektáros területeket. Ezekkel a beruházásokkal a lerakó tájképromboló hatása teljes mértékben megszűnik (1. ábra, 2. ábra).



1. ábra: Playmobil vidámpark a Leichendorfi lerakón [19.]



2. ábra: Düsseldorf városában egy 270 m hosszú és 50 m széles, 13 m belmagasságú sí csarnokot építettek egy korábban hulladék lerakására használt területen [19.]

A helyes hulladékgazdálkodáson kívül sajnos negatív példák sokasága is rendelkezésünkre áll. Magyarországon az Európai Unióba lépés előtt szinte minden önkormányzatnak saját hulladéklerakója volt, melyeket az esetek döntő többségében semmilyen védelemmel (aljzatszigetelés hiánya) nem láttak el, szennyezve ezzel a lerakó közvetlen környezetét, többek között az édesvíz készletet. A környezet szennyezése mellett sajnos egyéb veszélyekkel is kell számolnunk egy nem megfelelően üzemeltetett, vagy rosszul megtervezett lerakó kapcsán. A világban számos lerakónál következett be tönkremenetel, ami a jelentős anyagi káron túl több esetben emberi áldozattal is járt (1. táblázat). A szakirodalomból 1997 és 2005 között hat nagy lerakó-tönkremenetel ismert, amelyek összesen több mint 600 halálos áldozatot követeltek (BLIGHT, 2006.). Ezek a példák is a hulladéktest állékonyságvizsgálatának fontosságát, a téma aktualitását támasztják alá.

Év	Lerakó helye	Lecsúsztott hulladék mennyisége (m ³)	Szerző
1984	É-Amerika	110000	Koerner, Soong (2000)
1988	Kettleman Hills	490000	Mitchell (1990), Seed (1990)
1989	É-Amerika	500000	Koerner, Soong (2000)
1989	Verona (Olaszország)	nincs adat	Mazzucato (1999)
1993	Isztambul (Törökország)	470000	Kocasoy, Curi (1995)
1994	Europa	60000	Koerner, Soong (2000)
1996	Rumke (USA)	1200000	Eid (2000)
1997	Bulbul Drive Landfill (Dél-Afrika)	300000	Blight (2004)
2000	Payatas (Fülöp-szigetek)	15000	Merry (2005) (59)
2005	Bandung (Indonézia)	2700000	Koelsch (2005) (39)

1. táblázat: Néhány jelentősebb lerakó-tönkremenetel [21.]



3. ábra: Légi felvétel a Payatas lerakóban bekövetkezett csúszásról [21.]



4. ábra: A Payatas lerakó csúszása több mint 200 emberéletet követelt [21.]

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 [1.].

Közös érdekünk, hogy egy adott alapterületű lerakó minél hosszabb ideig üzemeljen, és minél nagyobb mennyiségű hulladékot tudjon befogadni, így a szükséges lerakók száma csökkenthető legyen.

Ennek tükrében választottam TDK dolgozatom témájaként a hulladéktest állékonyságának vizsgálatát az anizotróp viselkedés figyelembe vételével.

3. Hulladékok vizsgálatának geotechnikai módszerei

A hulladéklerakók vizsgálata egy meglehetősen új tudományág, melynek fejlődése és kiteljesedése napjainkban zajlik. A hulladék heterogén szerkezete teszi igen nehézé a vizsgált anyagok mérnöki modellezését. Az egyes minták kora, térfogatsúlya, előválogatottsága, tömörítettsége jelentősen befolyásolják a vizsgált hulladék mechanikai tulajdonságait. [10.]

A hulladékok heterogén szerkezetének következtében a vizsgálati módszerek sokszínűsége jelentheti a megoldást a lerakók megfelelő (gazdaságos és biztonságos) méretezésének problémájára. Véleményem szerint a fizikai paraméterek minél pontosabb közelítésére kell a hangsúlyt helyeznünk a tervezés során. A végeselemes programok használata közben bebizonyosodott számomra, hogy az alkalmazott talajmodell nincs akkora hatással az állékonysági biztonságra, mint a bemenő paraméterek nagy szórása. A bemenő paraméterek pontosságának fontosságát igazolják mind a hazai, mind a külföldi gyakorlatban elterjedt hulladékok elemzését lehető tevő különféle geotechnikai vizsgálati módszerek, melyeket a következőképpen csoportosíthatunk:

- 1) Laboratóriumi vizsgálatok:
 - nyíróvizsgálatok,
 - kompressziós vizsgálatok,
 - szigetelő rétegek nyírószilárdsági vizsgálatai.
- 2) In-situ (helyszíni) vizsgálatok:
 - nyomószondázás,
 - verőszondázás.
- 3) Back-analízis:
 - korábbi tönkremenetek, csúszások vizsgálata. [12.]

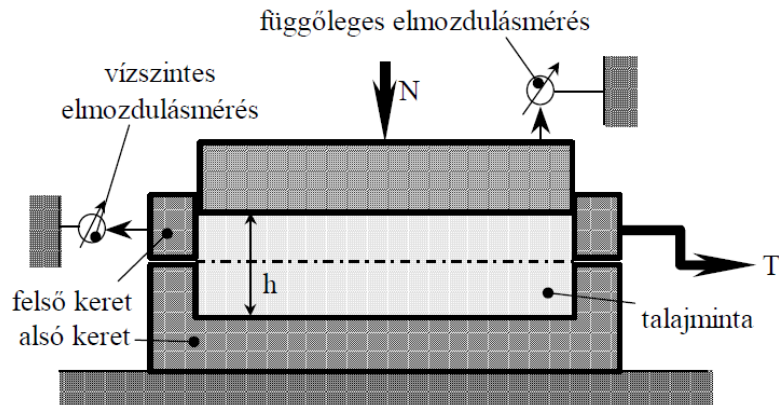
3.1. Laboratóriumi vizsgálatok

3.1.1. Nyíróvizsgálatok

Közvetlen nyírókísérlet

Az eddigiekben a legelterjedtebb vizsgálati módszer a közvetlen nyírási kísérlet volt, ugyanis az egyik legegyszerűbben kivitelezhető laboratóriumi kísérlet a nyírószilárdsági paraméterek meghatározására. Ezzel a módszerrel könnyebben lehetett elegendően nagyméretű mintát vizsgálni. Különböző alaprajzú (négyzetes, téglalap és kör) és méretű (63,5 mm átmérőtől 1,5 x 1,5 m alaprajzi méretig) nyíró berendezéseken végeztek vizsgálatokat a hulladék nyírószilárdsági paramétereinek meghatározása érdekében. [21.]

A vizsgálatához egy nyíródobozt használunk, amelynek van egy alsó és egy felső része, amelyek egymáshoz képest elcsúsztathatóak (**5.-6. ábra**). A talaj-, vagy esetünkben hulladékminta a doboz belsejébe, két fogazott szűrőkö vagy fésűs acél betét közé kerül. A vizsgálat során egy állandó függőleges irányú erővel terheljük a berendezést, miközben az elcsúsztatható részre vízszintes irányú erőt alkalmazunk, amelyet addig növelünk, míg a törés be nem következik a mintán. A vízszintes nyíróerőt fokozatosan, vagy lépcsősen növelve adhatjuk át. A törés síkja, azaz a csúszólap kialakulási helye ki van jelölve, a keretek közötti elmozdulási síkjában. A vizsgálat több normálfeszültség érték mellett megismételendő. [20.]



5. ábra: Közvetlen nyírás elvi vázlata [20.]



6. ábra: Közvetlen nyírókísérlethez használt berendezés [3.]

A kísérletet számos hiba terheli, a feszültségeloszlás a mintán belül nem egyenletes. A nyírási felület a vizsgálat során folyamatosan változik, a törési felület fokozatosan alakul ki, ezért az erő és felület hányadosa nem egyértelmű. A hulladékmintában található maximális szemcseméret a nyíródoboz méretének arányában korlátozva van. [20.]

Triaxiális vizsgálat

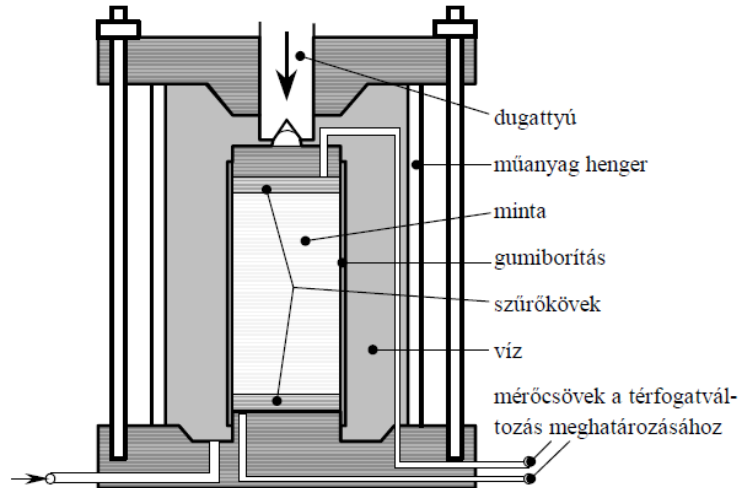
Háromtengelyű nyomóvizsgálat, amely során hidrosztatikus feszültségállapotot állítunk elő a talajmintában. Első lépésben a minta köré egy vékony gumimembrán kerül, amely megakadályozza a hidrosztatikus nyomás előállítására használt víznek a mintába jutását. A mérés egy cellában zajlik, ebben van elhelyezve az elkülönített hulladékminta (7.-8. ábra). A függőleges irányú erőt növelve érünk el a törésig.

A vizsgálat során különböző hidrosztatikus feszültségállapothoz tartozó törési állapotokat modellezünk. Mérhetjük a mintában kialakuló pórúsvíznyomást, tehát a konszolidáció folyamata szabályozhatóvá válik. [20.]

A mérés jobban modellezi a valóságos állapotokat, az így kapott nyírószilárdsági paramétereket megbízhatóbbnak tekinthetjük. A tönkremenetel valóban a minta leggyengébb síkján következik be, nem pedig egy (a mérőműszer által meghatározott) kényszersíkon. Ennek

ellenére a triaxiális tesztekben kevesebbet végeztek, mivel elegendően nagy triaxiális berendezés kevés helyen áll rendelkezésre.

Hátrány a vizsgálati elrendezés bonyolultsága, a mintáknak zavartalanoknak kell lenniük, a mérések időigényesek és drágák. A triaxiális vizsgálatokat $d=100-300$ mm átmérőjű és $h=200-700$ mm magas méretű mintákon végezték el. [21.] [20.]



7. ábra: Triaxiális vizsgálat vázlata [20.]



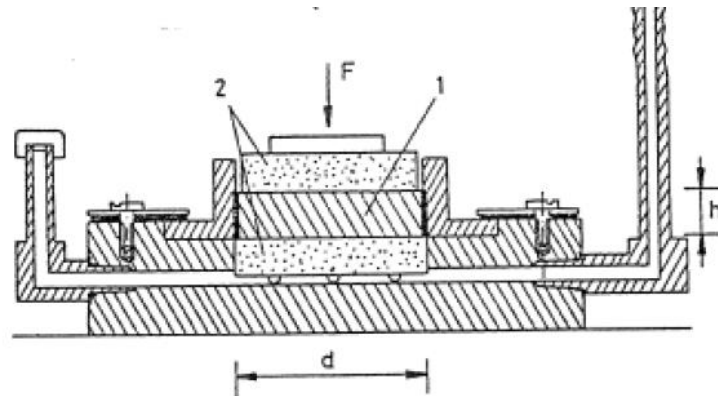
8. ábra: Nagyméretű triaxiális cella [3.]

A hulladék jellegéből fakadóan laboratóriumi nyírókísérleteknél a csúcsértéket csak igen ritka esetben lehet elérni, ezért a nemzetközi gyakorlatban az elmozdulások és az összenyomódások egy adott határértékénél fejezik be a kísérletet. Közvetlen nyírókísérletek esetén egy felvett elmozdulás értékhez (jellemzően a minta méretének 10 %-a vagy 1/6 része) tartozó nyírási ellenállást tekintik a maximális értéknek, triaxiális kísérleteknél pedig a 10-20%-

os (ritka esetben 30 %-os) függőleges deformációhoz tartozó értéknél határozzák meg a legnagyobb nyírási ellenállást [13.].

3.1.2. Kompressziós vizsgálatok

Segítségükkel az hulladéktest várható süllyedéséről kaphatunk képet. A vizsgálatokat ödométerben szokták végezni, szabványos előírás szerint (**9. ábra**). A különböző normálfeszültségek mellett mérjük a minta összenyomódását, ennek eredményeképpen egy erő-elmozdulás diagram rajzolható fel, ebből pedig számolható a hulladékra vonatkozó összenyomódási modulus.



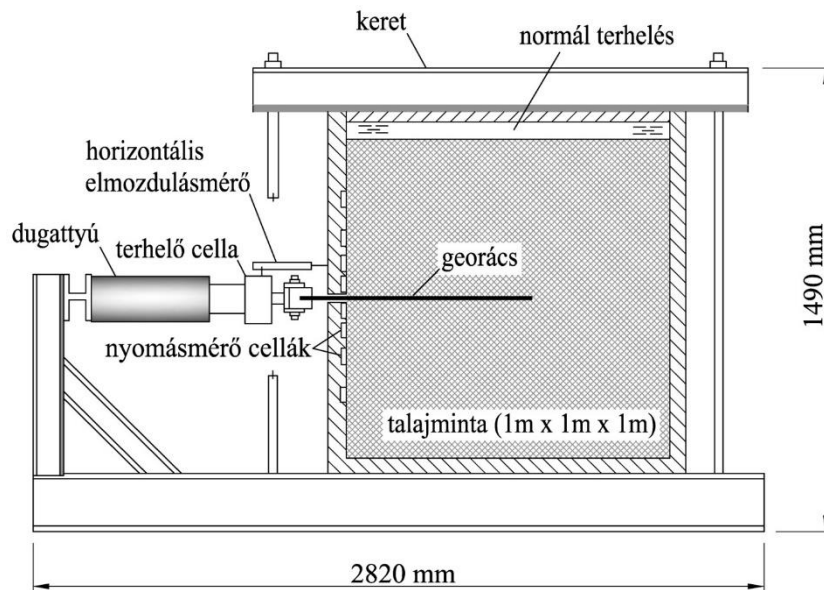
9. ábra: Ödométeres berendezés vázlata [20.]

3.1.3. Szigetelő rendszerek nyírószilárdságának meghatározása

A geoműanyagok és a talaj, illetve a geoműanyag-geoműanyag közötti súrlódási szöget általában közvetlen nyírással (ld. 2.1.1. pont) és kihúzóvizsgálattal határozzák meg.

A geoszintetikus anyagok elterjedésével a hulladéklerakóknál alkalmazott laboratóriumi vizsgálatok kiegészültek a műanyagok egymás és a hulladéktesten való elmozdulásának elemzésével. A műanyag fóliák, lemezek alakváltozási tulajdonsága nagyrészt ismertek, a gyártók kellő pontossággal meghatározzák az egyes elemek közti súrlódási szög értékeket, azonban a hulladék inhomogenitásából következően maga a hulladék és a műanyag közötti elmozdulások további laborvizsgálatokat kívánnak meg.

A kihúzóvizsgálat elvét a **10. ábra** szemlélteti. A vizsgálat során a hulladékban elhelyezett geoműanyagot különböző normálfeszültségek mellett húzzuk ki, miközben mérjük az elhúzáshoz szükséges erőt, valamint az elmozdulást.



10. ábra: Kihúzódás vizsgálatának elve (PALMEIRA, 2004; FARRAG – MORVANT, 2004) [16.]

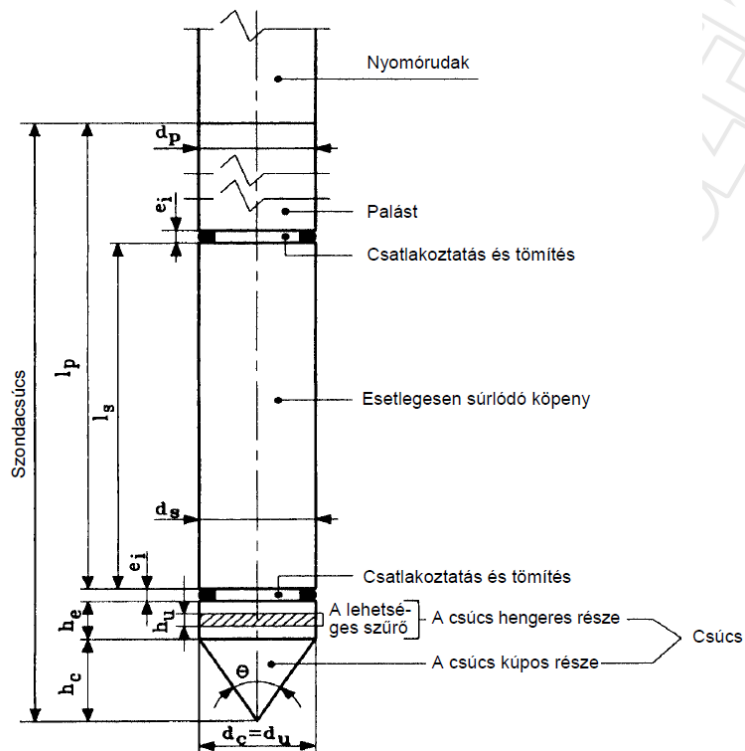
3.2. In-situ (helyszíni) vizsgálatok

A helyszíni vizsgálatok során lehetőség nyílik zavartalan mintavételre, a hulladék lerakott állapotban való megvizsgálására és nagymodell kísérletek elvégzésére is. A kísérletek azonban csak bonyolult és igen költséges berendezésekkel végezhetőek el, így azokat csak ritkán alkalmazzák [21.].

Szintén viszonylag ritkán nyílik lehetőség szondázások elvégzésére.

3.2.1. Nyomószondázás (CPT)

A vizsgálat során egy szondafejet juttatunk a talajba (esetünkben a hulladéktestbe), amely során mérhetjük a szondafej kúpos végén a csúcscellenállást, a kúpos rész feletti palástszakaszon a köpenysúrlódást, és a kúp és a palást határán pedig a pórusvíznyomást. A szonda fej geometriája és a mérés mente szabványosított (**11. ábra**). A vizsgálat során fontos, hogy a szondacsúcsot lassan, függőlegesen, egyenletes sebességgel juttassuk a talajba. A hulladéklerakóknál a CPT szonda lejuttatása előtt célszerű verőszondát levérni a vizsgálati helyen, ugyanis a CPT szonda feje könnyen elakadhat, sérülhet a hulladéktestben [20.].

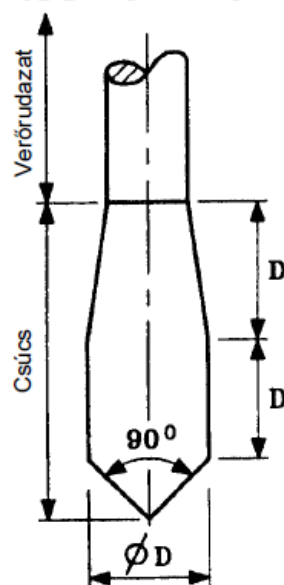


11. ábra: Elektromos szondacsúcs felépítése [20.]

3.2.2. Verőszondázás

A talajnak egy kúp dinamikus behatolásával szembeni ellenállását mérhetjük ezzel a módszerrel. A kúp beverésére verőkost használunk, az eljárás szabványosítva van (5.9. ábra). A behatolási ellenállást a szondának egy meghatározott hosszra való lejutásához tartozó ütésszáma jelenti. Többféle eljárás létezik: könnyű verőszondázás, közepes verőszondázás, nehéz verőszondázás, nagyon nehéz verőszondázás.

Hulladéklerakóknál a verőszonda alkalmazásának elsődleges célja, hogy a sérülékeny CPT szondafaj számára megfelelő mérési helyet találjon a hulladéktestben [20.].



12. ábra: Verőszonda csúcsa [20.]

3.3. Back-analízis

Mivel a laboratóriumi vizsgálatok elvégzéséhez szükséges, megfelelő háttér csak kevés helyen áll rendelkezésre, és azok eredményeit az alkalmazott berendezések jellege is erősen befolyásolja, napjainkban a back analízis alkalmazása került előtérbe. A back analízis során korábban bekövetkezett csúszásokat, tönkremeneteleket modellezzünk és visszszámítjuk az események ismeretében a hulladéktest talajfizikai paramétereit. A valóságban lejátszódott események vizsgálatakor a csúszólap helyének az ismeretében következtetni tudunk a tönkremenetel jellegére, a gyenge síkok helyzetére is [21.].

A **2. táblázatban** 4 jelentősebb, bekövetkezett csúszás és a mozgás után számolt fizikai paraméterek kerülnek bemutatásra.

2. táblázat: Korábbi csúszások back analízise során meghatározott paraméterek [11.]

Lerakó megnevezése	$\gamma, \gamma_{\text{sat}}$ [kN/m ³]	Maximális magasság	σ'_n * [kPa]	τ [kPa]
Gnojna Gropa (Varsó)	17	26	106	40,7
Isztambul (Törökország)	11	45	65	72,5
Hiriya (Izrael)	8 ; 9	60	32	46
Payatas (Fülöp-szigetek)	10 ; 14	33	62 (vagy 45)	59 vagy 35)

* σ'_n : = súlyozott átlaga az effektív normálfeszültségeknek

4. Tervezéshez szükséges geotechnikai paraméterek szakirodalmi ajánlásai

Az állékonyságvizsgálatoknál a geotechnikai gyakorlatban általánosan alkalmazott, bevált módszerek (BISHOP, JANBU) használhatók, az elsődleges probléma a méretezésnél használt nyírószilárdsági paraméterek minél pontosabb meghatározása. A lerakott hulladék utólagos állékonyságvizsgálata, ellenőrzése elsősorban a dombépítéssel kialakított és a lejtőnek támaszkodó depóniáknál fontos.

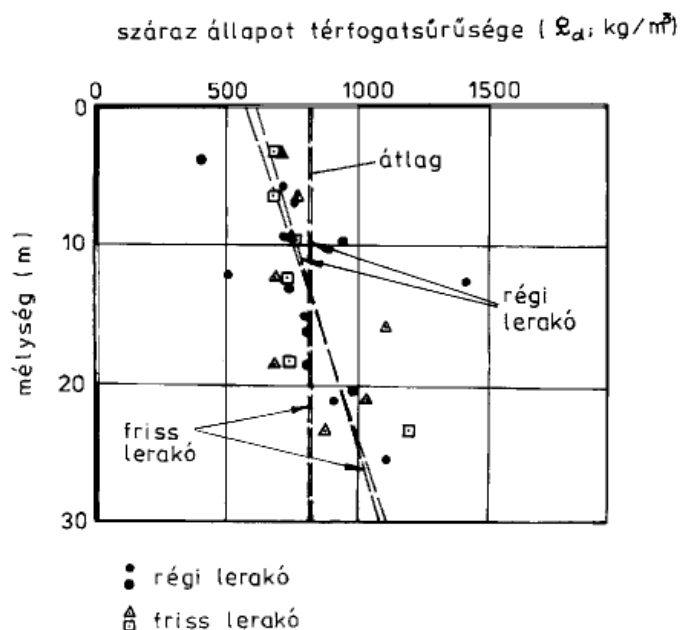
Az állékonyságvizsgálatokhoz feltétlenül ismernünk kell a lerakott hulladéknak az alábbi paramétereit:

- térfogatsűrűség;
- kohézió;
- belső súrlódási szög.

4.1. Térfogatsűrűség

A térfogatsűrűség értéke igen tág határok között változik és függvénye a hulladék összetételének, nedvességtartalmának, a lebomlás fokának, a napi takarás vastagságának, a lerakás módjának, az alkalmazott tömörítő eszköznek, a depónia magasságának, az egyszerre lerakott hulladék terítési vastagságának, a hulladék korának, stb.. Egy jól üzemelő lerakó esetében a terítési rétegvastagság kb. 0,5-0,7 m, így a tömörítés során átlagosan 500-600 kg/m³-es térfogatsűrűség érték érhető el. Nagyobb rétegvastagság esetén az elérhető tömörség értéke csökken. A lerakott hulladék sűrűsége a lerakóban értelemszerűen a mélységnek is függvénye. Minél mélyebben lévő réteget vizsgálunk, annál nagyobb a térfogatsűrűség, mivel a hulladék egyre konszolidáltabb. A **13. ábrán** helyszíni vizsgálatokkal meghatározott térfogatsűrűség

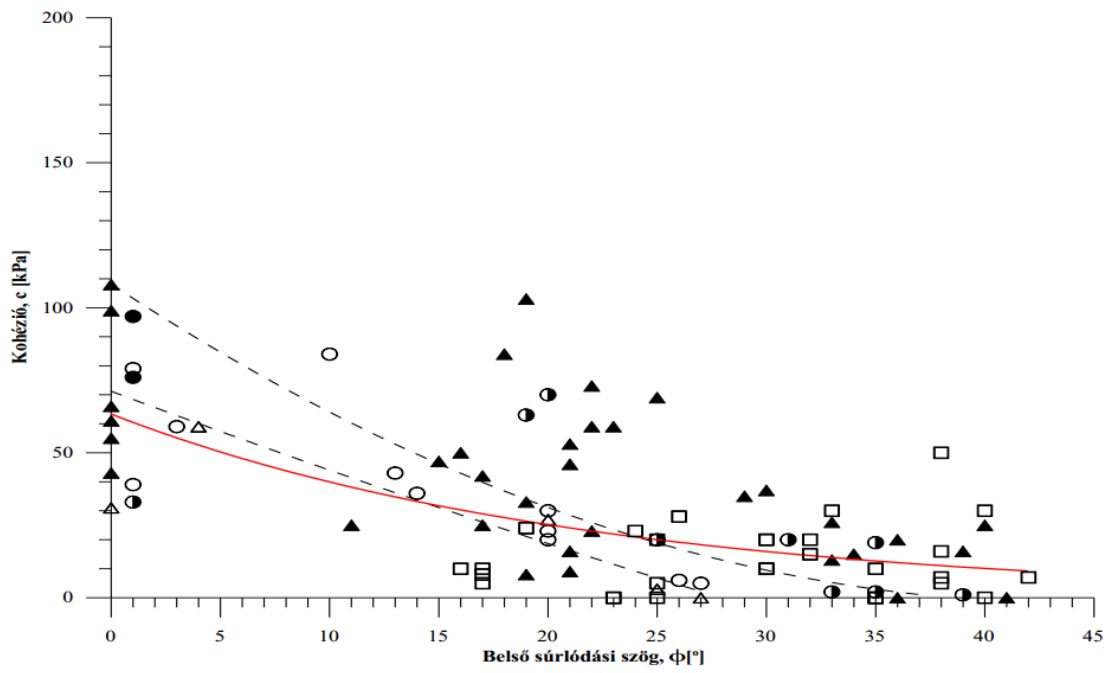
értékek láthatók, különböző korú hulladékok esetén. Mint látható átlagosan $750\text{-}800\text{ kg/m}^3$ térfogatsűrűség értéket mértek, és $20\text{-}30\text{ m}$ mélységben $1200\text{-}1300\text{ kg/m}^3$ volt a jellemző érték. Az állékonyagsvizsgálatoknál $1000\text{-}1200\text{ kg/m}^3$ értékkel vehetjük figyelembe a hulladék súlyából adódó tömeget.



13. ábra: Helyszíni vizsgálatokkal meghatározott térfogatsűrűség értékek [17.]

4.2. Nyírószilárdsági paraméterek

A nyírószilárdsági paramétereknek talán még a térfogatsűrűség értékeknél is nagyobb a szórása. A **3. táblázat** és a **14. ábra** különböző eredetű és összetételű hulladékok különböző módszerekkel meghatározott kohézió és belső súrlódási szög értékeit tünteti fel. Mint látható az értékpárok igen széles tartományban fordulnak elő, s meglehetősen nehéz állást foglalni, hogy a tervezésnél, méretezésnél mely értékpárokkal dolgozzunk, hiszen az értékek jelentősen függenek a lerakás körülményeitől, a technológiától, a lerakott hulladék korától, stb. [17.]



14. ábra: A hulladék nyírószilárdsági paramétereirei irodalmi adatok, laboratóriumi és helyszíni mérések alapján (JESSBERGER,1990, SINGH-MURPHY, 1990, SZABÓ, 1999, VILAR ÉS CARVALHO, 2002, CAICEDO, 2002) [17.]

3. táblázat: Különböző hulladékokra jellemző nyírószilárdsági paraméterek [17.]

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, gumiabroncs stb.)	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 csurgalékvízzel friss hulladék szennyvízzel szemét-szennyvíziszap 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 kutatás 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 rézsúállékonysági 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.)

MANASSERO és szerzőtársai (1996) abból a több kutató által is javasolt megközelítésből indultak ki, hogy a laboratóriumi és helyszíni mérésekből nyert, valamint meglévő lerakók állékonyságvizsgálati adataiból visszaszámított nyírószilárdsági paraméterek feldolgozását célszerű az átlagos normálfeszültség és a mobilizált nyírószilárdság figyelembevételével elvégezni.

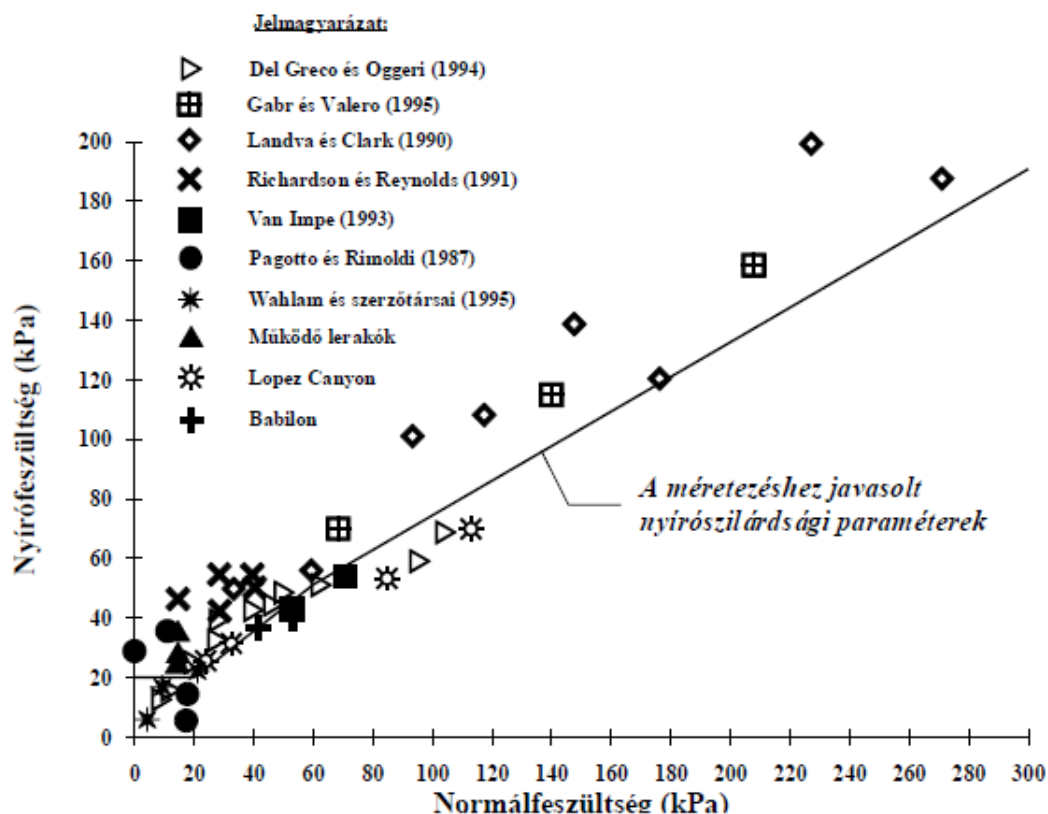
Számos mérés és esettanulmány eredményét foglalták össze a **15. ábrán**. 300 mm átmérőjű triaxiális vizsgálatok alapján. KÖNIG-JESSBERGER (1997) arra a következtetésre jutott, hogy *a kommunális hulladékok általában nem jellemezhetők egyetlen φ-c; értéppárral, a nyírószilárdsági paraméterek értéke nagymértékben függ a deformáció mértékétől, azaz a nyírószilárdság mobilizációjától.*

A fent leírtakból megállapítható, hogy az állékonyságvizsgálatoknál figyelembe vett nyírószilárdsági paraméterek erősen becsült értékek, mivel konkrét vizsgálatok elvégzésére ritkán nyílik lehetőség.

MANASSERO és szerzőtársai a **15. ábrán** feltüntetett adatok szakaszos kiegyenlítése alapján a tervezésnél a várható átlagos normálfeszültség (v) függvényében javasolja a nyírószilárdsági paraméterek megválasztását, az alábbiak szerint:

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

Az osztrák gyakorlat általában $c = 5$ kPa; $\varphi = 25^\circ$ értékkel számol. Ezzel az értékpárral számolva pl. a hódmezővásárhelyi kommunális hulladék-lerakónál (30 m magasság, 1:2 oldalhajlás, 10 m-ként egy-egy 3 m széles padkával) a minimális biztonsági tényező 1,41; $c = 20$ kPa és $\varphi = 20^\circ$ esetén 1,57 értékre adódott (SZABÓ, 1994.).

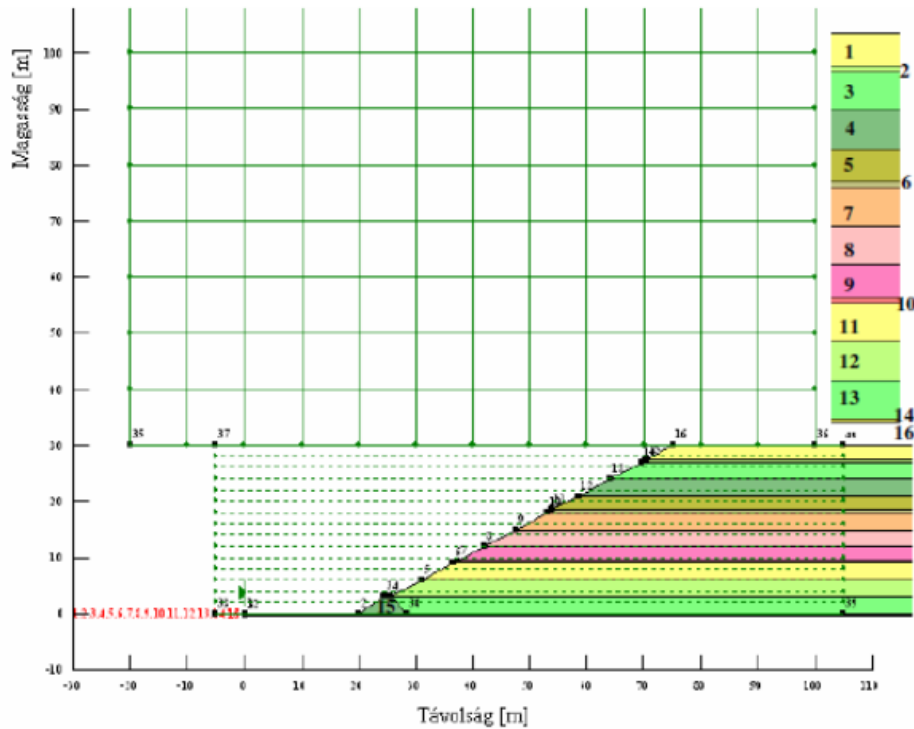


15. ábra: Kommunális hulladékok nyírószilárdsági vizsgálatainak összefoglaló eredményei [17.]

Az osztrák gyakorlattal összhangban van SANCHEZ-ALCITURRI és szerzőtársainak (1993.) javaslata, amely a helyszíni és laboratóriumi vizsgálatokkal egyaránt megerősített értékpárok figyelembevételét javasolja a **17. ábra** szerint. [17.]

Amint azt a **14. ábra** is mutatja a nyírószilárdsági paraméterek szórása a hulladék inhomogenitásából adódóan elegendően nagy ahhoz, hogy különböző φ - c értékpárokkal modellezhessük a lerakó állékonyságvizsgálata során kialakított rétegeket.

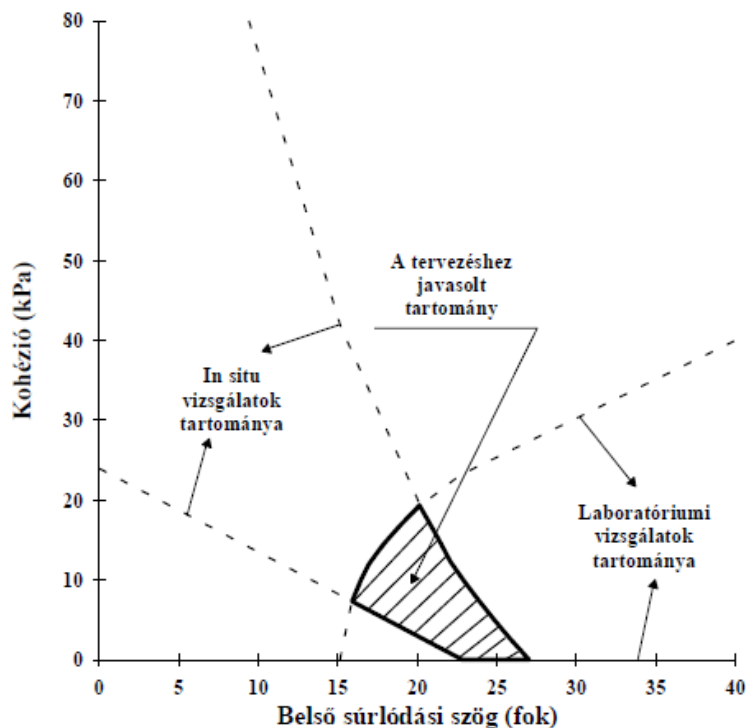
Dr. Szabó Attila 10 eltérő súrlódási szög-kohézió értékpárt vett fel a gyáli lerakó üzem közbeni állékonyság vizsgálatánál. A rétegek véletlenszerűen kaptak egy-egy értékpárt, majd a Geoslope program segítségével elvégezte a különböző modellek állékonyság vizsgálatát. Ezzel a módszerrel statisztikai alapon tudta értékelni a különböző kialakításokra kapott biztonsági tényezők összességét, meghatározva a biztonságok átlagát, szórását, minimumát, stb. A **16. ábrán** a Geoslope programban megalkotott 13 különböző rétegből álló modellt illusztrálta. Látható, hogy a különböző színűek az egyes rétegek, jelölve ezzel a **4. táblázatból** véletlenszerűen kiválasztott eltérő értékpárokat. Az elvégzett vizsgálatok során kapott biztonsági tényezők statisztikai értékelését a **18. ábra** szemlélteti.



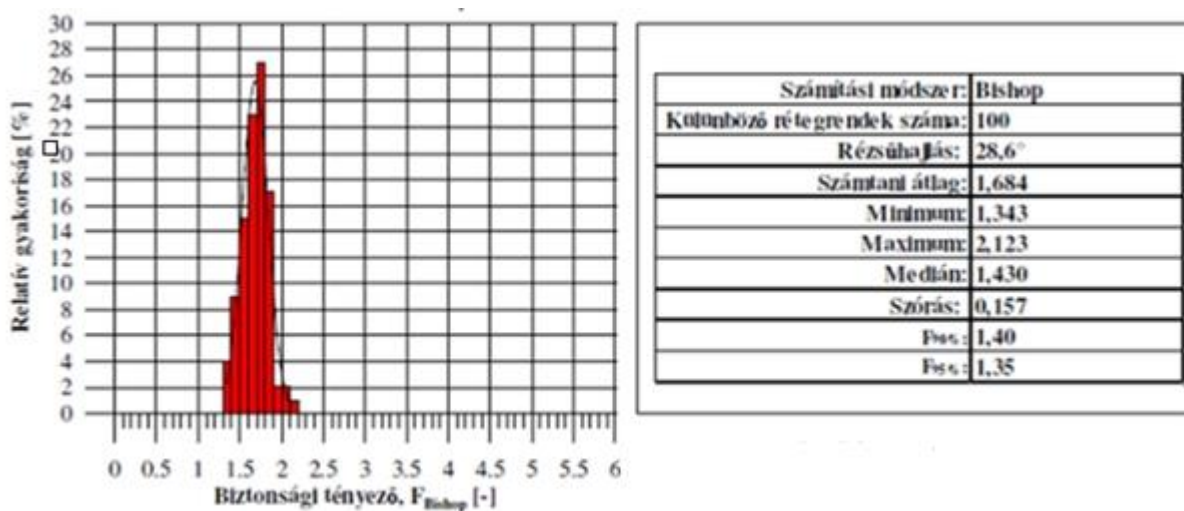
16. ábra: A vizsgált kialakítás (13 réteg) [18.]

4. táblázat: Az alkalmazott 10 különböző ϕ -c értékpár [18.]

<i>Az állékonyságvizsgálatoknál a hulladékrétegekre meghatározott azonos valószínűséggel előforduló nyírószilárdsági értékpárok</i>		
A réteg sorszama	Belső súrlódási szög, ϕ [°]	Kohézió, c [kN/m ²]
1	0	61
2	4	76
3	8	43
4	15	26
5	19	43
6	21	38
7	25	21
8	31	18
9	35	13
10	40	15



17. ábra: A kommunális hulladékok nyírószilárdsági paramétereinek a tervezéshez javasolt tartománya [17.]



18. ábra: A biztonsági tényező eloszlása [18.] és az eredmények statisztikai kiértékelése [18.]

A korábban tapasztalt rézsúmozgások rávilágítottak arra, hogy a tönkremenetel nem minden esetben a hulladéktestben kialakuló csúszólapon megy végbe. Az aljzat- és zárószigetelés állékonysága is épp olyan fontos, mint a lerakott hulladéktömegé. Ahhoz, hogy elkerüljük a hulladék aljzatszigetelésen, vagy a rekultivációs réteg zárószigetelésén történő megcsúszását, esetleg a különböző geoszintetikus rétegek egymáson történő elcsúszását a tervezés során jól kell modelleznünk ezen anyagok viselkedését. A geoszintetikus anyagok esetében egymás és a talaj közötti súrlódási szög értékekre Manassero adott ajánlást, melyet a **5.-** és a **6. táblázatban** szemléltetnek.

5. táblázat: Geoszintetikus anyagok és a talaj közötti súrlódási szög értékek [16.]

<i>A geoszintetikus anyagok és a talaj közötti jellemző súrlódási szög értékek (MANASSERO et al., 1997.)</i>	
Az egymással érintkező felületek	Súrlódási szög (δ; fok)
Geomembrán (HDPE) – homok	15-28
Geomembrán (HDPE) – agyag	5-29
Geotextília – homok	22-44
GCL – homok	20-25
GCL – agyag	14-16
Texturált HDPE – tömörített agyag	7-35 a=20-30 kPa
Texturált HDPE – gyöngykavics	20-25
Texturált HDPE – homok	30-45
Geotextília - agyag	15-33

6. táblázat: Geoszintetikus anyagok közötti súrlódási szög értékek [16.]

<i>A geoszintetikus anyagok közötti jellemző súrlódási szög értékek (MANASSERO et al., 1997.)</i>	
Az egymással érintkező felületek	Súrlódási szög (δ; fok)
Geomembrán (HDPE) – geonet	6-10
Geomembrán (HDPE) – geotextília	8-18
Geotextília – geonet	10-27
GCL – texturált HDPE	15-25
GCL – geomembrán	8-16
GCL - GCL	8-25 a=8-30 kPa
Texturált HDPE – geonet	10-25
Texturált HDPE – geotextília	14-52

A hulladékdepók stabilitása tehát a geotechnikában szokásos rézsűállékonysági módszerekkel vizsgálható. Ezek a földműveknél alkalmazott módszerek (Janbu, Bishop) alapján véve a talajokból épített rézsűk elemzésére lettek megalkotva, azonban a települési szilárd hulladék inhomogenitását és bizonytalan fizikai paramétereit tekintve elegendően pontosak a hulladékok alakváltozásainak jellemzéséhez.

5. Szálerősítés hatása a rézsűállékonyságra:

Dr. Varga Gabriella a doktori értekezésének (Hulladéklerakók állékonysági kérdései, PhD értekezés 2010) 4. tézisében a szálerősítés szerepét vizsgálta a lerakó tönkremenetelével kapcsolatban.

Mivel a laboratóriumi vizsgálatok elvégzéséhez szükséges, megfelelő háttér csak kevés helyen áll rendelkezésre, és azok eredményeit az alkalmazott berendezések jellege is erősen befolyásolja, napjainkban a back analízis alkalmazása került előtérbe [14.]. A back analízis

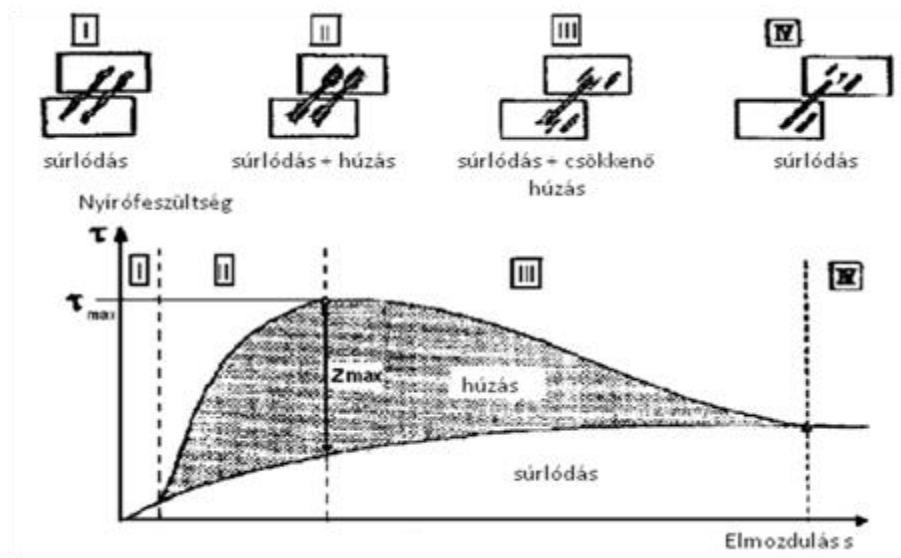
során korábban bekövetkezett csúszásokat, tönkremeneteleket modellezünk és visszaszámítjuk az események ismeretében a hulladéktest talajfizikai paramétereit [2.]. A valóságban lejátszódott események vizsgálatok a csúszólap helyének az ismeretében következtetni tudunk a tönkremenetel jellegére, a gyenge síkok helyzetére is. Hulladéklerakókban végbement csúszások elemzésekor a kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a hagyományos talajmechanikai feltevésekkel végzett vizsgálatok a valóságtól jelentősen eltérő csúszólap alakokat és helyeket eredményeztek. Erre jó példa a 2005-ben Indonéziában, Bandungban bekövetkezett csúszás back analízise [22.], ahol a hagyományos talajmechanikai modellekkel elvégzett számítások talpponti csúszólapot eredményeztek, a valóságban azonban jóval nagyobb hulladéktömb indult mozgásnak (lásd **19. ábra**). [21.]



19. ábra: A Bandungi Műszaki Intézet felvétele a bekövetkezett csúszásról

A biztonság értéke sem felelt meg a tapasztaltaknak. Ezen ellentmondások feloldására a hulladék szerkezetének alaposabb tanulmányozása kezdődött meg.

Az eltérések vizsgálatok Dr. Kölsch [8.] arra a következtetésre jutott, hogy a hulladékokban megtalálható ún. erősítő anyagok hatására a hulladéktest gyakorlatilag a vasalt talajhoz hasonlóan viselkedik. Az erősítő anyagok olyan elemek, amelyek jelentősebb húzást tudnak felvenni [9.], azaz erősítő hatásuk az elmozdulások során mobilizálódik. Az erősítő anyagok fenti tulajdonságát kohézió jellegű tulajdonságként fogalmazta meg és fibrózus kohézióknak nevezte el. A hulladékok nyírási ellenállását a belső súrlódási szögből fakadó ellenállás és a húzási ellenállás összegeként jellemezte (**20. ábra**). [21.]



20. ábra: Hulladékok nyírófeszültségének alakulása az elmozdulás függvényében

Ennek értelmében a hulladék egy anizotrop közeg, amely a hagyományos számítási eljárásokkal nehezen vizsgálható. A hulladékvizsgálat egyre szélesebb körben való elterjedésével, és a mintavételek számának növekedésével megállapítást nyert, hogy a hulladéklerakókban elhelyezett anyagok terítési technikájából adódóan a hulladék egy vízszintesen rétegzett szendvics szerkezetként fogható fel, ahol az erősítést adó szálak iránya is megegyezik a lerakási iránnyal [4.]. Laboratóriumban végzett közvetlen nyírókísérletek esetén a nyírási sík iránya a rétegzettség irányával párhuzamos, azaz gyakorlatilag a leggyengébb helyzetét tudjuk csak modellezni a hulladéknak. Ez magyarázza azt a tényt is, hogy azonos összetételű mintán elvégzett triaxiális és közvetlen nyíró kísérlet esetén a triaxiális kísérlet mindig valamivel nagyobb nyírószilárdságot mutat. [21.]

A valóságban egy esetleges csúszás bekövetkezésekor a nyírási sík az erősítő szálakkal egy α szöget zár be, nem párhuzamos velük. Az erősítő anyagokban egy jelentős nyírási ellenállás mobilizálódik. Egyes feltételezések szerint, az α szög 45° közelében van, így annak vizsgálata javasolt. [21.]

Annak érdekében, hogy a hulladéktestben elhelyezkedő nagyobb kiterjedésű és szilárdságú anyagok nyírószilárdságra vonatkozó erősítő hatását meg lehessen állapítani, mesterségesen beépített mintákat nyírt el $200 \times 200 \times 150$ mm-es nyíródobozban. Vizsgálatai során az erősítő anyagok tömegszázalékát, anyagát és dimenzióját is változtatta, 1D és 2D irányú erősítéseket is beépített. A vizsgálatok során az erősítő anyagok nyírási síkkal bezárt szögét is változtatta. [21.]

Szálerősítés hatásának figyelembe vételekor a hulladék összetételének vizsgálataiból indult ki. Az általa vizsgált hulladék nagy részét papír, műanyag és 16 mm-nél kisebb szemcsék alkották. Az erősítő hatást jellemzően papír, műanyag (lágy és kemény), fém és textil alkotók jelenléte okozhatja. Hazánkban a fém hulladék előválogatása következtében, annak jelenléte nem túl jelentős. Vizsgálatai során a legnagyobb arányban jelen levő papír és műanyag alkotók nyírási teherbírásra gyakorolt hatását kutatta. A nyírási síkkal bezárt szög három értékét (0° - 45° - 90°) vizsgálta. Az erősítést okozó szálak tömegszázalékát $0,05\%$ - $0,5\%$ - 2% -ban határozta meg. A papír és a műanyag kis súlyának köszönhetően, a 2 tömegszázalékos erősítés esetén a minta szinte tele volt rakva erősítő anyaggal. [21.]

A kísérleti eredmények összehasonlíthatósága érdekében a hordozó közeg (hulladék) egységes összetétele elengedhetetlen. Ezért vizsgálatainak során a hulladékot 8 mm átmérőjű szitán leszitálta. Az így kapott apró szemű hulladék közel homogénnek tekinthető. Az erősítő anyagokat ebbe a homogén öszletbe építette be az általuk létrehozott nagy nyíróládába (500 x 500 x 400mm) vízszintesen rétegezve. A beépített mintákat a hidraulikus sajtó segítségével betömörítették, majd az így elkészült mintából a vizsgálat jellegének megfelelően a nyírási síkkal 0-45-90 fokos szöget bezárva, ferdén vágták ki a 200 x 200 x 150 mm-es mintát. Ezzel a technológiával kvázi zavartalan minta vehető és biztosítható, hogy a vizsgált minták tömörsége azonos legyen, a nyírási síkkal bezárt szög a beépítési folyamat, a tömörítés során ne torzuljon. [21.]

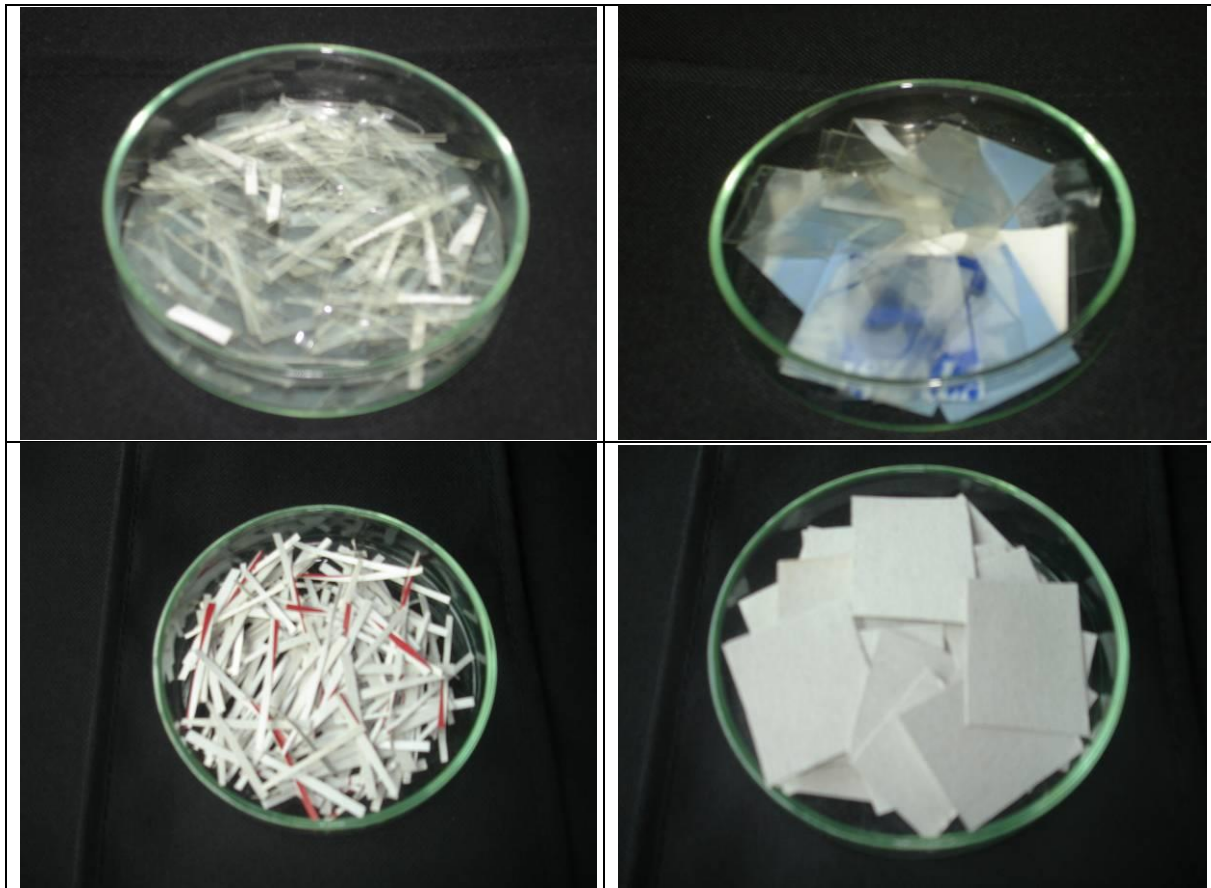
A beépített mintákat 50-100-200 kPa normálfeszültség mellett vizsgálta. Ennél a kísérletsorozatnál az alsó dobozrész maradt fix és a felsőt tolták el. A vizsgálati berendezés a **21. ábrán** látható.



21. ábra: Szálerősítés hatásának vizsgálata közvetlen nyírókísérlettel [21.]

Vizsgálatainak során a mintát nem lehetett törésig terhelni, mivel az elmozdulás maximális értékét már korábban elérte. Ez a jelenség hulladékok vizsgálatakor igen gyakori a minták összetételéből, jellegéből fakadóan. Mivel közvetlen nyírókísérlet során a beépített erősítő elemek nem nyíródnak el, csak jelentősen alakváltoznak, így egy nagyobb tönkremeneteli zóna alakul ki. A nyírás tehát feltehetően ezen zóna alsó és felső határa mentén megy végbe. [21.]

Az 1 és 2 dimenziós beépített erősítő anyagok fényképét a következő ábrák mutatják:



22. ábra: 1 és 2 dimenziós erősítő anyagok (műanyag és papír) közvetlen nyírókísérlethez [21.]

Az eredmények kiértékelésekor a szálerősítés hatását a korábbi ajánlásoknak megfelelően kohézió jellegű mennyiségként értelmezte. Ennek megfelelően egy erősített minta nyírószilárdságát az erősítés nélküli nyírószilárdság és a szálak által felvett feszültség összegeként határozta meg:

$$\tau = \sigma * \text{tg}(\varphi) + c + E$$

ahol E, az erősítő szálak által felvett nyírófeszültség értéke. [21.]

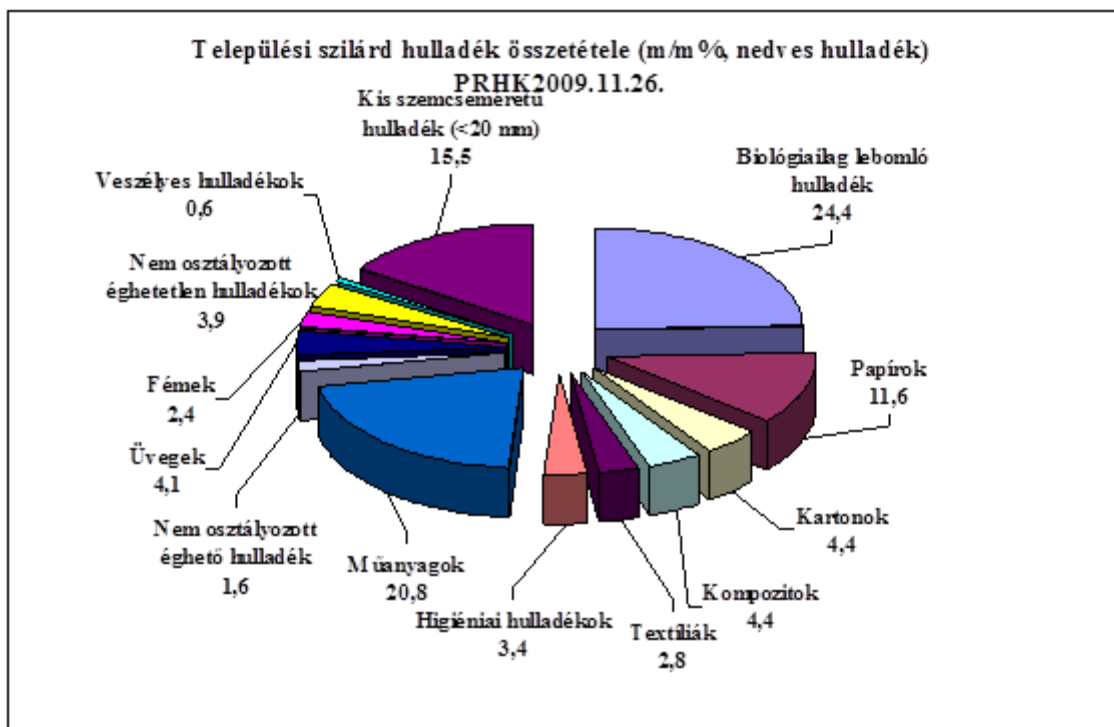
A kísérleti eredmények alapján megállapította, hogy egydimenziós erősítő anyagok alkalmazásakor az erősítést okozó szál anyaga nem befolyásolja jelentősen az eredményeket, azaz a műanyag és a papír szálak is hasonló módon viselkedtek. Ennek oka, hogy vonalszerű elemek estén a felületi kialakítás hatása nem igazán tud érvényesülni, a papír és a műanyag húzószilárdsága között pedig a vizsgált esetben nem volt jelentős különbség. Ezt a jelenséget az is magyarázhatja, hogy a vizsgálat alacsony víztartalmú hordozó közegben készült el, ahol a papír felpuhulása, elázása és lebomlása nem következett be. [21.]

2 dimenziós elemek esetében a papír erősítés hatása jelentősebb volt, mint a műanyag hatása. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy nagy kiterjedésű (lapszerű) elemeknél a felületi kialakítás hatása jóval erősebben érvényesül, mint vonalszerű (1D) alkotóknál. A gyűrődő papír érdesebb felületébe a környező hulladékszempék bele tudtak kapaszkodni, ami jelentősen megnövelte a közeg elmozdulással szembeni ellenállását. A műanyag lapok azonban sima felszínükkel nem tudtak kötéseket kialakítani a környező elemekkel, csak az éleik mentén tudtak ellenállást kifejteni. 2D esetben tehát, - az 1D-nél tapasztaltaktól eltérően - az erősítés anyaga befolyásolta a minta nyírószilárdságának alakulását. [21.]

Mindezek alapján megállapítható, hogy a szálerősítés beépítése minden esetben a kohézió jelentős emelkedését vonta maga után. Az erősítő anyagok által felvett húzóerő valóban, mint kohéziós többlet jelentkezik a hulladéktestben. [21.]

6. A nagymodell kísérlet eredményei

A hazánkban a lerakóba kerülő hulladék összetételét a következő ábra szemlélteti:



23. ábra: A települési szilárd hulladék összetételének alakulása 2009-ben [21.]

Az ábrából jól látható, hogy a műanyagok, papírok, kartonok, textíliák részaránya igen jelentős, mintegy 30%-os. A korábbi tanulmányok alapján ilyen mennyiségben jelen lévő anyagoknak a hulladéktest állékonyságára gyakorolt hatása is számottevő.

Dolgozatomban a hazai hulladékviszonyokra szeretném meghatározni a szálerősítés hatását, így a korábban a Pusztazámori hulladéklerakóban létesített nagy modell kísérlet tapasztalatait kíséreltem meg számszerűsíteni végeselemes program használatával.

A kísérletet 2013. október végezték a II. ütem medencéjében. A kísérleti hulladéktest az 1:3-as rézsűvel kialakított hulladékreghez támaszkodott, amely a napi homoktakarással volt lefedve. A domb magassága 6 méter, szélessége körülbelül 10 méter, a beépítési rézsűszöge pedig 85° volt. A hulladékösszlet heterogén képet mutatott, autógumi darabok, ágymatrac, játékok, műanyag zacskók mutatkoztak benne teljesen rendszertelenül.



24. ábra: A kísérleti hulladéktest képe

A kísérlet során az épített hulladéktest tetejére homokot hordtak fel. A teljes terhelés nagyjából 10 kN/m^2 értékű felszíni tehernek felelt meg, így a modellezés során ezzel az értékkel számoltam.

A terhelési folyamatot geodéziai műszerekkel követték, és rögzítették a hulladéktest elmozdulásait. A rézsűhomlokokon jelentős elmozdulásokat mértek, a terhelés végén közel 1 méteres függőleges elmozdulás volt tapasztalható. A törési állapot előidézése érdekében további terhelést vittek a hulladéktestre, egy a telephelyen dolgozó kompaktossal álltak rá az épített dombra, azonban ez sem vezetett töréses tönkremenetelhez, csak az elmozdulások értéke nőtt meg. Ez azt jelenti, hogy a 85° -os rézsűszöggel épített hulladékdomb még a teher ráhordása után is állékony maradt.

A törés előidézése érdekében kotrógéppel elkezdték elszedni a rézsű lábát. Ennek során azt tapasztalták, hogy a már két hetes hulladéktest szárazhulladék összetétele jelentősen megváltozott, sokkal homogénebbé vált. A kotrás során érzékelhető volt, hogy a hulladéktest anyagai között jelentős kölcsönhatások lépnek fel, az anyag tömörítési rétegenként egyben mozgott.

A kotrás nyomán elérték, hogy a hulladékrézsű szöge 90° legyen. Ekkor már az előzőeknél sokkal nagyobb elmozdulásokat tapasztaltak, ezért biztonsági okokból a kísérletet leállították. A vizsgálatok után a hulladéktest még közel 20 napig állékony maradt, azonban jelentős alakváltozások mutatkoztak rajta. Körülbelül három hét után a hulladék elhelyezése a kísérleti területen is tovább folytatódott, így az épített hulladékdomb széthordásra került.



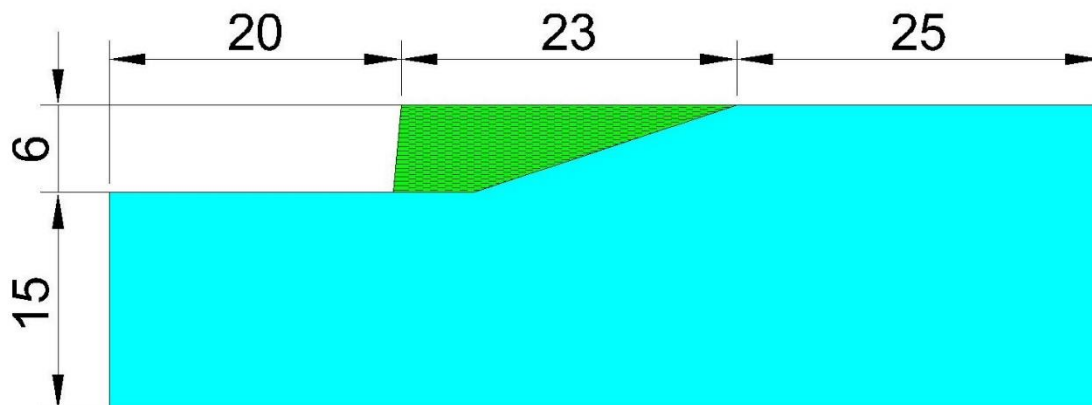
25. ábra: A rézsúláb kotrása

7. A szálerősítés hatásának vizsgálata a magyarországi hulladékokra végelemes szoftverrel

A kísérlet által szolgáltatott eredményeket végelemes szoftver segítségével dolgoztam fel. A vizsgálatok során a Plaxis 2D modulját alkalmaztam.

7.1. Geometria

A kiinduló geometriai jellemzőket a 85°-os rézsűvel, 6 m magasságúra felépített hulladéktest szolgáltatotta. A modellben alkalmazott méreteket (méterben) a következő ábra mutatja be:



26. ábra: Geometriai jellemzők

Az ábrán türkizkék színnel szerepel a már régebben a helyszínen lévő, tömörített hulladéktest, míg az épített depóniát a zöld szín jelzi.

A geometriai kialakítást a számítások során többször változtattam, amelyet a következő pontokban részletezek.

7.2. Talajfizikai jellemzők, anyagmodell

A talajfizikai jellemzők felvételénél két talajréteget különböztettem meg: az új depóniát, és a korábbi hulladéktestet. Az értékek felvételénél az ÖNORM homogén hulladéktestekre vonatkozó ajánlásait vettem figyelembe. A következő táblázat a kezdeti talajfizikai paramétereket tartalmazza:

7. táblázat: A hulladékok talajfizikai paraméterei

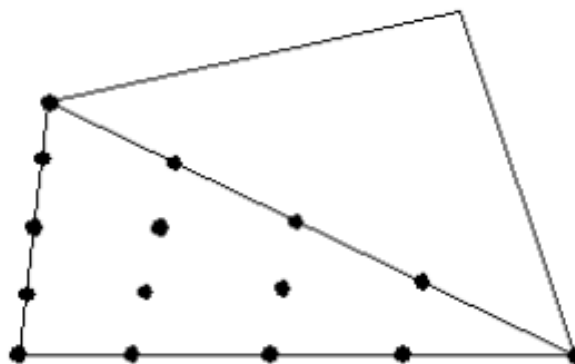
Réteg neve	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kPa]	E_s [kPa]
Új hulladék	9	10	25	5	3000
Régi hulladék	10	12	25	5	4500

7.3. Peremfeltételek, végeleemes háló

A vizsgálatok során Mohr-Coulomb anyagmodellt alkalmaztam. A hulladéklerakókat csurgalékvízgyűjtő rendszerrel üzemeltetik, és a külső csapadék bejutása az átmeneti illetve végleges zárószigetelésnek köszönhetően gátolt. A biológiai folyamatok során keletkező, valamint a hulladék természetéből fakadó vizek gyűjtésére és elvezetésére drénhálózat kerül kiépítésre. A talajvíz depóniába jutását az aljzatszigetelő rendszer gátolja meg. Mindezeket figyelembe véve a modellezés folyamán talajvizet, csurgalékvizet nem vettem figyelembe.

A hulladéktest külső kényszereit a dobozmodell megkötéseivel alakítottam ki. Ez egy elmozdulás jellegű kényszer, a függőleges határok mentén megengedi az elmozdulásokat, vízszintes irányban pedig fix támaszként működik.

A hálógenerálás során a 15 pontos háromszögelemeket használtam. A program a talajt (anyagot) 15 pontos finomított háromszögelemekre bontja fel. Az elemtípusnak 30 szabadságfoka van, és teljes negyedrendű elmozdulásmezőt ír le.



27. ábra: Az alkalmazott végelelem típus

7.4. Terhek

A modellezés során két terhelési esetet vettem figyelembe: egyikben csak a hulladéktestek önsúlya működött, a másikban pedig 10 kN/m² értékű felszíni terhet is működtettem az új hulladéktest tetején. Ez a terhelés modellezi a helyszíni kísérlet során a hulladékrezsű tetejére hordott terhet, illetve azt, hogy a beépített hulladéktestre a későbbiek folyamán további hulladékot hordhatnak, ami szintén teherként jelentkezik a korábban beépített depónián.

7.5. Vizsgálatok menete

A hulladékrezsű építését nem bontottam szakaszokra, a modellben csak egy építési fázis szerepel, amelyből kiindulva egy Safety típusú számítással az állékonysági biztonságot határoztam meg.

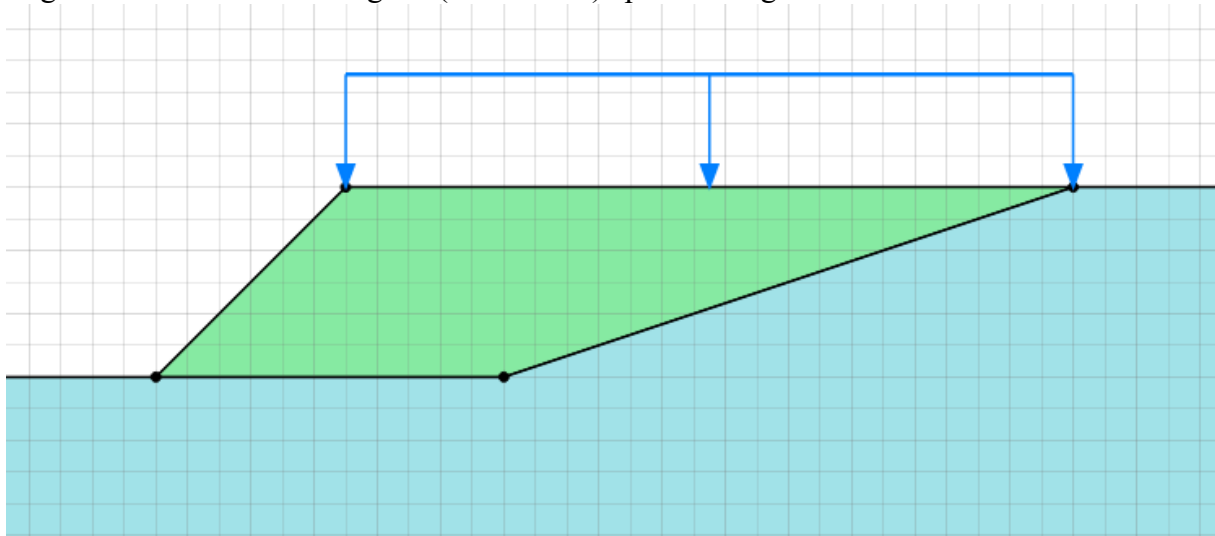
A globális állékonyság ellenőrzésére a Plaxis beépített számítási módját, a ϕ -c redukciót alkalmaztam. Ez megegyezik az Eurocode stabilitásvizsgálati eljárásával. A módszer folyamatosan csökkenti a talaj nyírószilárdsági paramétereit, az alakváltozások megengedése mellett. Az eljárás végét az alakváltozások korlátlan növekedése adja.

A számítás során a biztonság az alábbi képlettel írható le: $n = \frac{\tan \phi}{\tan \phi'} = \frac{c}{c'}$

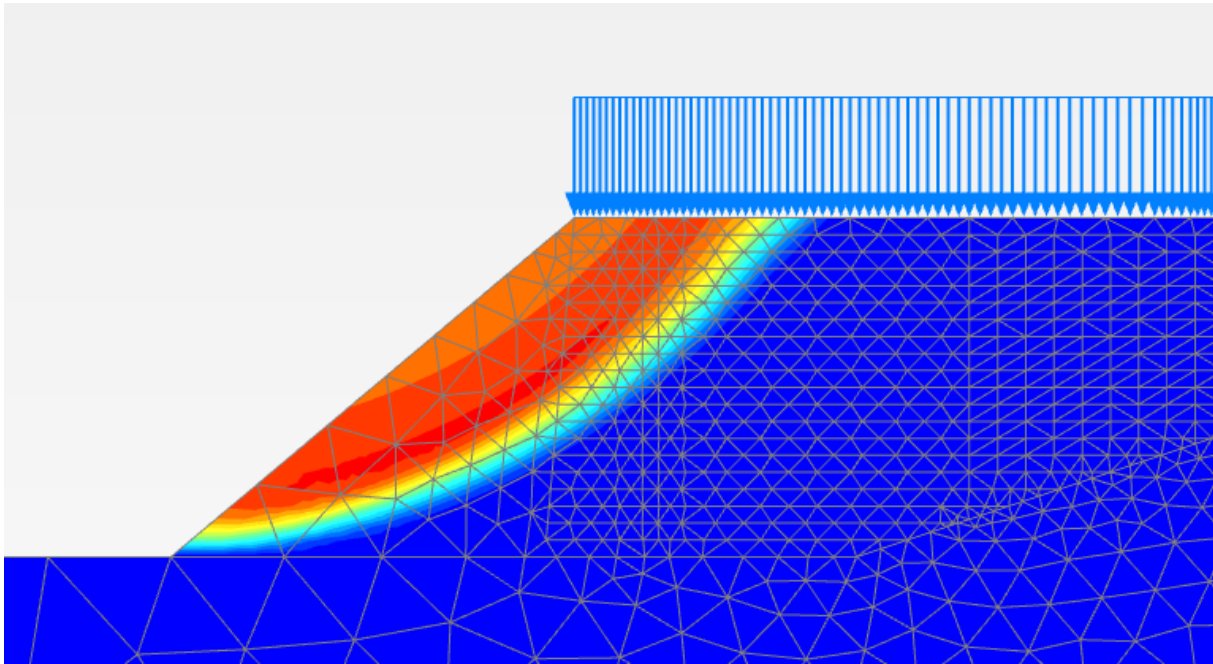
7.6. Futtatások

Az első futtatást a kezdeti geometriával, és az ÖNORM által megadott talajfizikai paraméterekkel futtattam le, terhelt és terheletlen részsűvel. Mindkét futtatás eredménye azt mutatta, hogy a részsű leomlik, a globális biztonság 0,67-re, illetve 0,54-re adódott.

Ezután három irányba indultak el a vizsgálataim. A részsűszöget 5°-onként csökkentve, iterációval meghatároztam, hogy az ÖNORM-ban ajánlott paraméterek alkalmazása esetén milyen α szögben épített részsű teljesíti az Eurocode 1,35-ös biztonsági követelményét. Ezt a szöget leterhelt illetve terheletlen hulladéktest esetén is meghatároztam. Terhelt állapotban 40, míg terheletlenül 45°-os szögben (ld. 28. ábra) építhető meg a részsű.

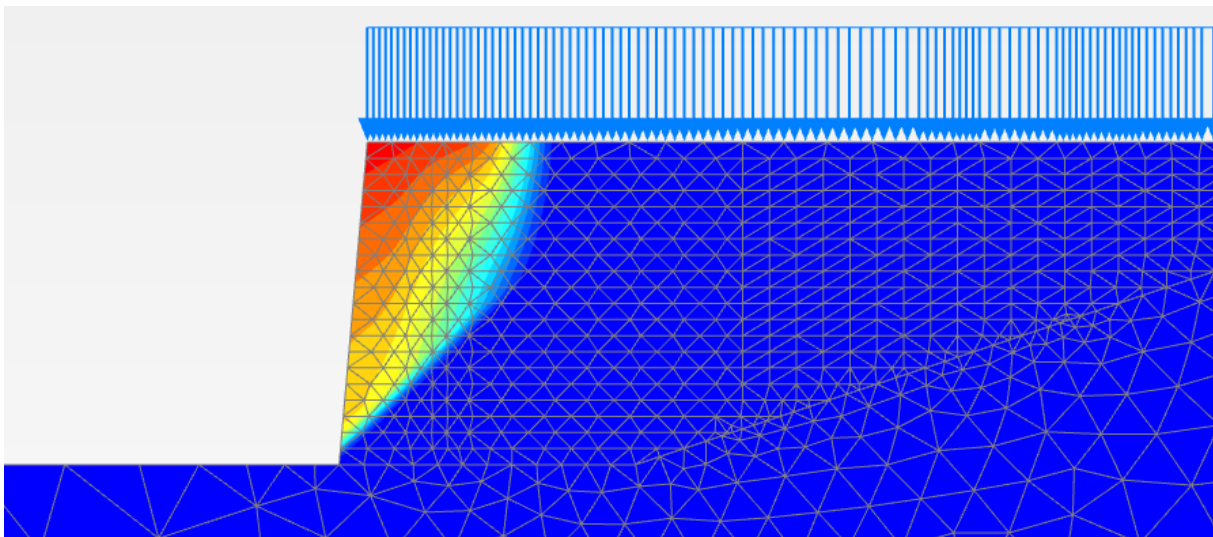


28. ábra: A 45°-os részsű



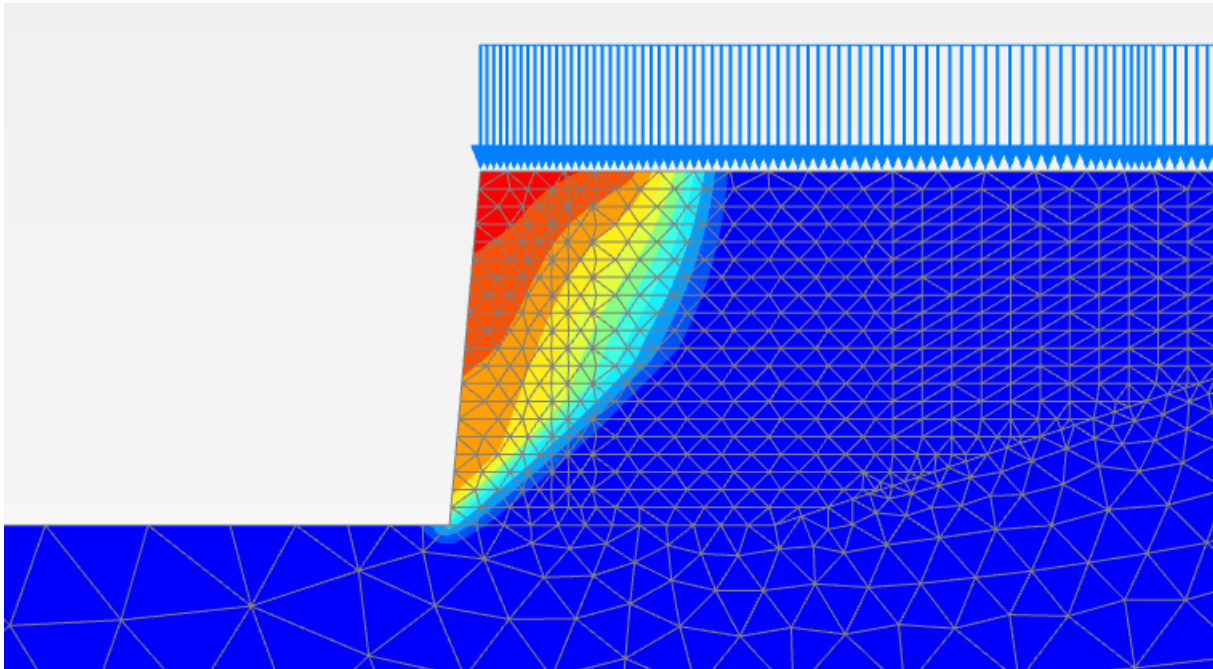
29. ábra: A 45°-os részsű tönkremenetele

A nagy modellkísérlet alapján látható volt, hogy a 85°-ban felépített hulladékrcsű állékony volt, még terhelés működtetése esteén is. A vizsgálataim második részében elfogadva az ÖNORM 25°-os belső súrlódási szögre vonatkozó ajánlását, azt modelleztem, mekkora kohéziótöbbletet nyújtanak a hulladéktestben lévő szálak. Ezt szintén iterációval végeztem el, a futtatások során folyamatosan növelve a hulladéktest kohézióját. Az állékonyságot terheletlen hulladéktest esetén 11 kPa, míg felszíni teherrel terhelt anyag esetén 13 kPa kohézió tudta biztosítani (ld. 30. ábra), így terheletlen esetben a kohéziótöbblet 6 kPa, leterhelve pedig 8 kPa értékű az ÖNORM előírásaiban szereplő értékhez képest.



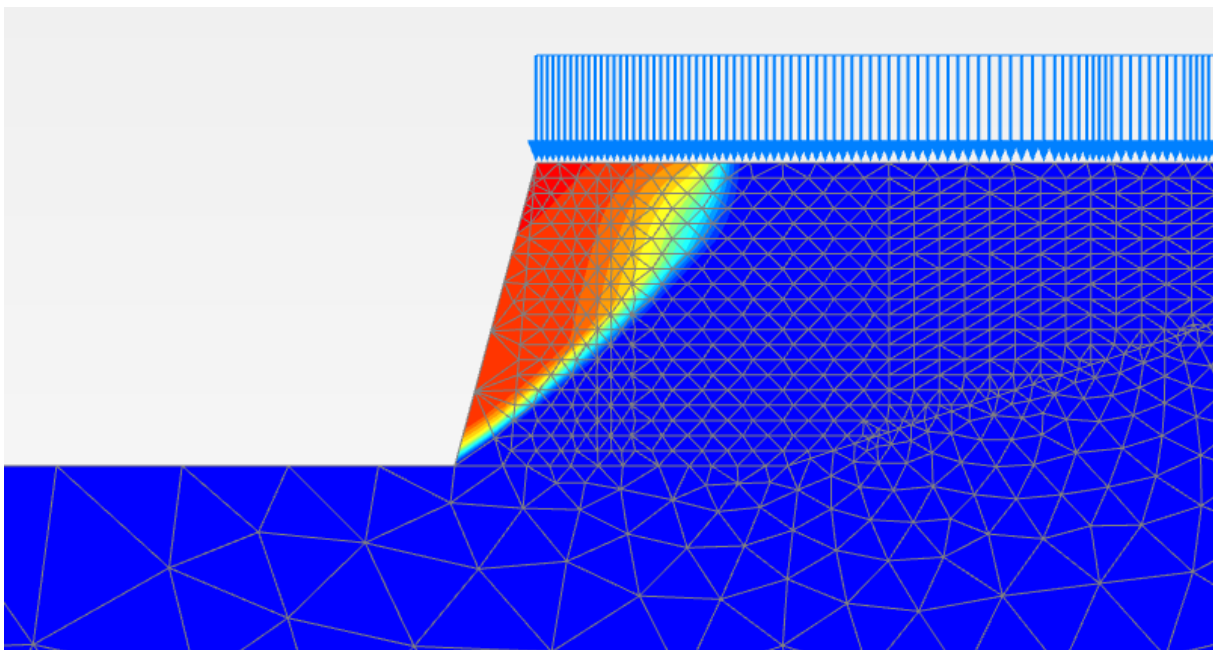
30. ábra: A 85°-os részsű esetén kialakuló csúszólap $c=13$ kPa esetén

A következő fázisban a kohézió értékét tovább növelve meghatároztam az 1,35-ös biztonsági érték teljesítéséhez szükséges kohézió mennyiségét, ami terheletlenül 13 kPa, leterhelve pedig 18 kPa értékű volt (ld. 31. ábra).



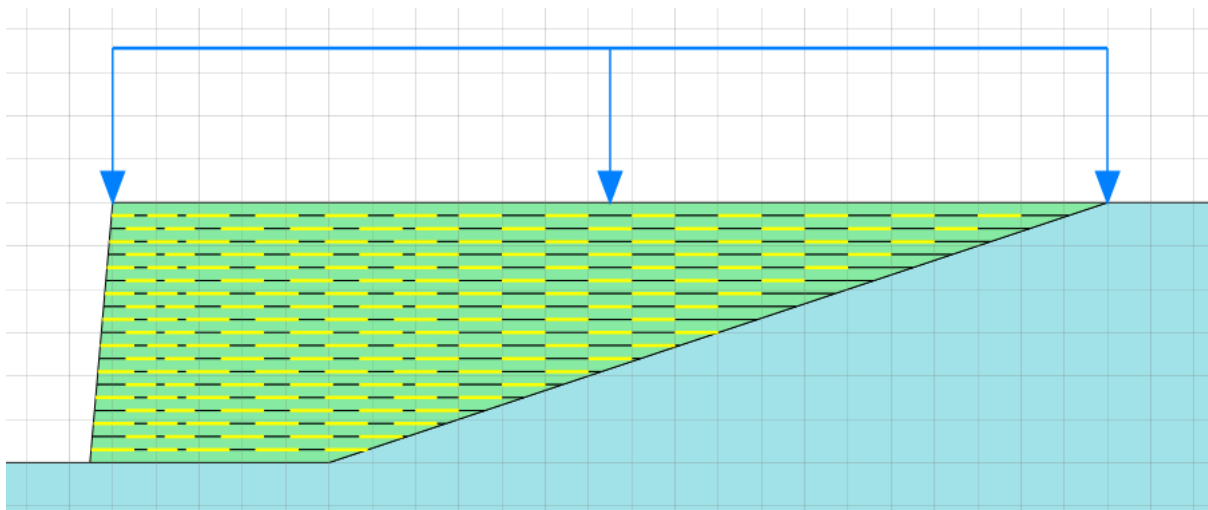
31. ábra: A 85°-os rézsű csúszólapja $c=18$ kPa esetén

A többletkohézió értékét figyelembe véve, azaz a hulladéktestet $c=13$ kPa kohézióval feltételezve meghatároztam azt a rézsűszöget, amivel a hulladéktestet felépítve annak állékonysága eléri az 1,35-ös értéket. A futtatások eredménye alapján a leterhelt rézsű 70° -ban (ld. 32. ábra), a terheletlen pedig 75° -os szögben építve teljesíti a kritériumot.



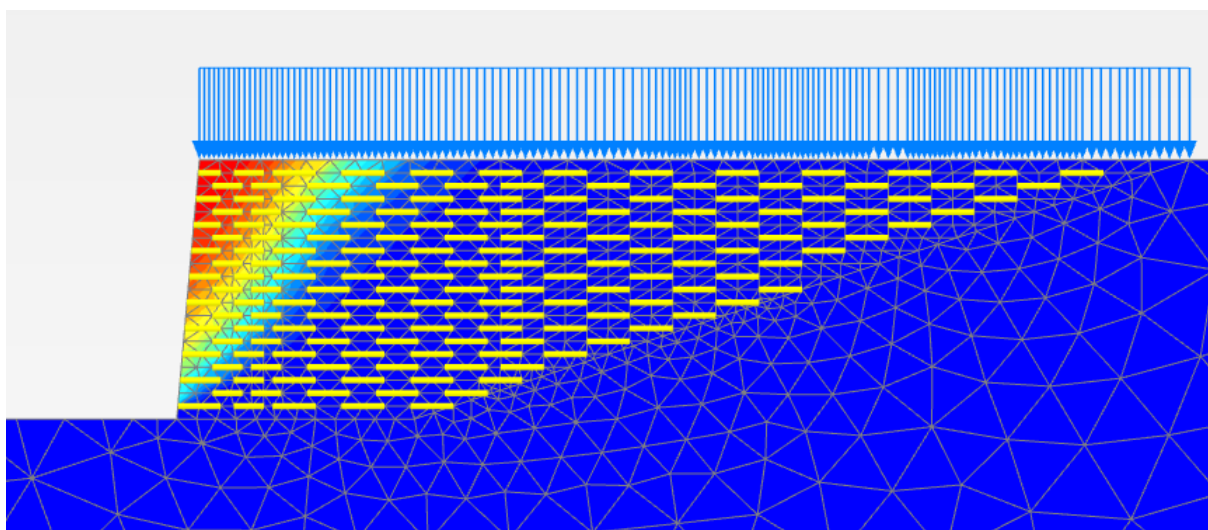
32. ábra: Az 1,35-ös biztonságot teljesítő 70° -os rézsű csúszólapja

A továbbiakban az állékonyságvizsgálatokat úgy végeztem, hogy a hulladéktestet nem homogénként kezeltem. A hulladék talajfizikai paramétereit az ÖNORM ajánlásokban szereplő értékekkel vettem figyelembe, a szálerősítés hatását pedig $EA=10$ kN/m merevségű geogrid elemekkel próbáltam figyelembe venni. A 70-100 cm hosszúságú erősítő elemek kiosztását úgy végeztem el, hogy függőlegesen egymástól 60 cm távolságban legyenek, a várható csúszólap helyén 20 cm átlapolással, mögötte a modell kezelhetősége érdekében ritkább kiosztásban. Elhelyezkedésüket a következő ábra szemlélteti:



33. ábra: Az erősítő elemek kiosztása (sárga)

A bevitt erősítés jól modellezte a kohéziós többletet, a rézsű biztonsága 1,00-ra adódott. Itt is célom volt, hogy meghatározzam az 1,35-ös biztonsághoz tartozó rézsűszöget. Azonban a rézsűszög változtatásával párhuzamosan nem feltétlenül nőtt a biztonság értéke. Az elmozdulási képek nem utaltak lokális tönkremenetelre, így a modellezés arra az eredményre vezetett, hogy az erősítő szálaknak lokális hatása biztosan van, azonban a globális állékonyságra való kihatásuk még további vizsgálatokat igényel. Ezeket a későbbiekben célszerű lenne több geometriai elrendezés esetében is megvizsgálni.



34. ábra: Az erősítő elemekkel kialakított 85° hajlású rézsű csúszólapja, 1,00 biztonság esetén

A következő táblázat a lefuttatott vizsgálatokat foglalja össze:

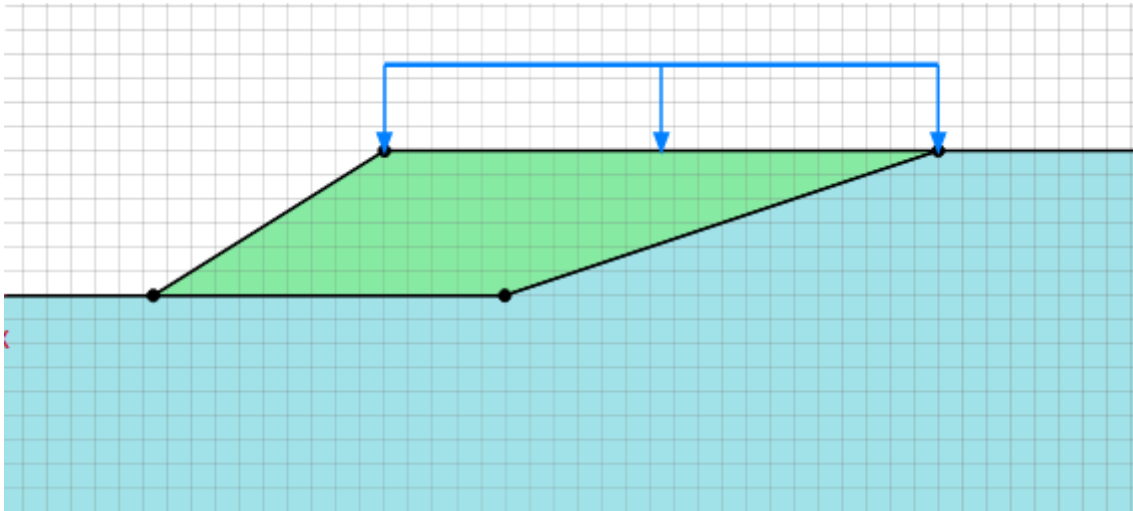
8. táblázat: A futtatások eredményei

rézsűszög	φ	c	biztonság	teher (10 kN/m)	geogrid (10 kN/m)
85	25	5	0,67	nem	nem
85	25	5	0,54	igen	nem
55	25	5	1,18	nem	nem
50	25	5	1,25	nem	nem
40	25	5	1,48	nem	nem
45	25	5	1,36	nem	nem
40	25	5	1,35	igen	nem
85	25	11	1,01	nem	nem
85	25	13	1,00	igen	nem
85	25	13	1,35	nem	nem
85	25	17	1,54	nem	nem
85	25	18	1,37	igen	nem
85	25	21	1,43	igen	nem
80	25	13	1,12	igen	nem
75	25	13	1,24	igen	nem
70	25	13	1,36	igen	nem
80	25	13	1,28	nem	nem
75	25	13	1,42	nem	nem
85	25	5	1,08	nem	igen
85	25	5	1,00	igen	igen
80	25	5	1,10	igen	igen
70	25	5	1,05	igen	igen
65	25	5	1,06	igen	igen
60	25	5	1,11	igen	igen
55	25	5	1,18	igen	igen

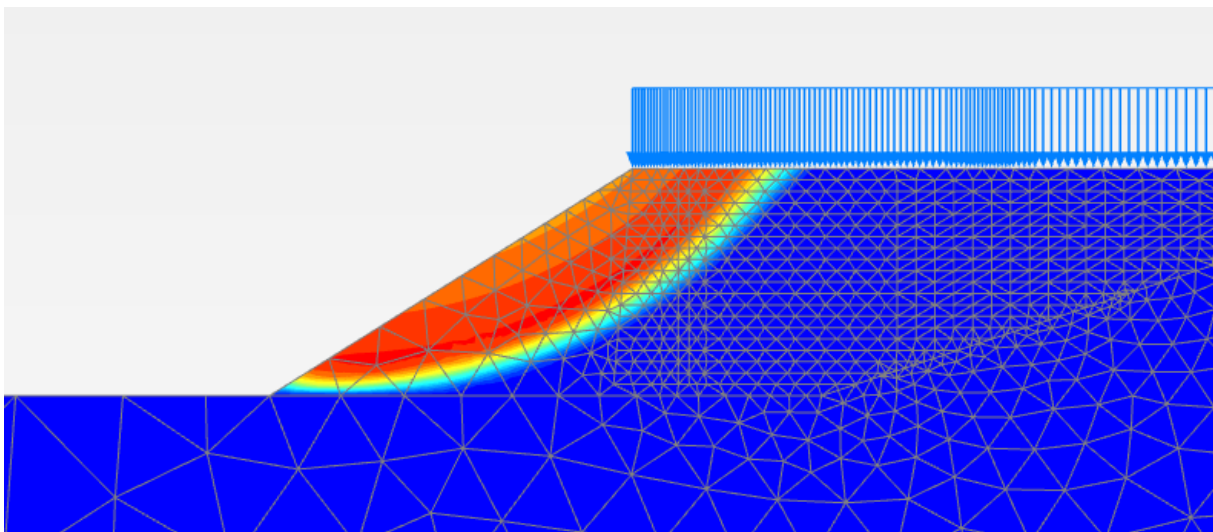
A második futtatást is a kezdeti geometriával, de az ÖNORM által megadott talajfizikai paramétereket módosítva kezdtem el, terhelt és terheletlen rézsűvel. A belső súrlódási szöget ebben a sorozatban 20°-ra feltételeztem, és így vizsgáltam meg az állékonyságot.

Az első két futtatás eredménye azt mutatta, hogy a rézsű leomlik, a globális biztonság 0,61-re, illetve 0,51-re adódott, tehát a várakozásoknak megfelelően kisebb lett, mint 25° súrlódási szög esetében.

Ezután ismét három irányba indultak el a vizsgálataim. A rézsűszöget fokozatosan csökkentve, iterációval meghatároztam, hogy a $\varphi=20^\circ$, $c=5\text{kPa}$ paraméterek alkalmazása esetén milyen α szögben épített rézsű teljesíti az Eurocode 1,35-ös biztonsági követelményét. Ezt a szöget leterhelt illetve terheletlen hulladéktest esetén is meghatároztam. Terhelt állapotban 32, míg terheletlenül 38°-os szögben építhető meg a rézsű.

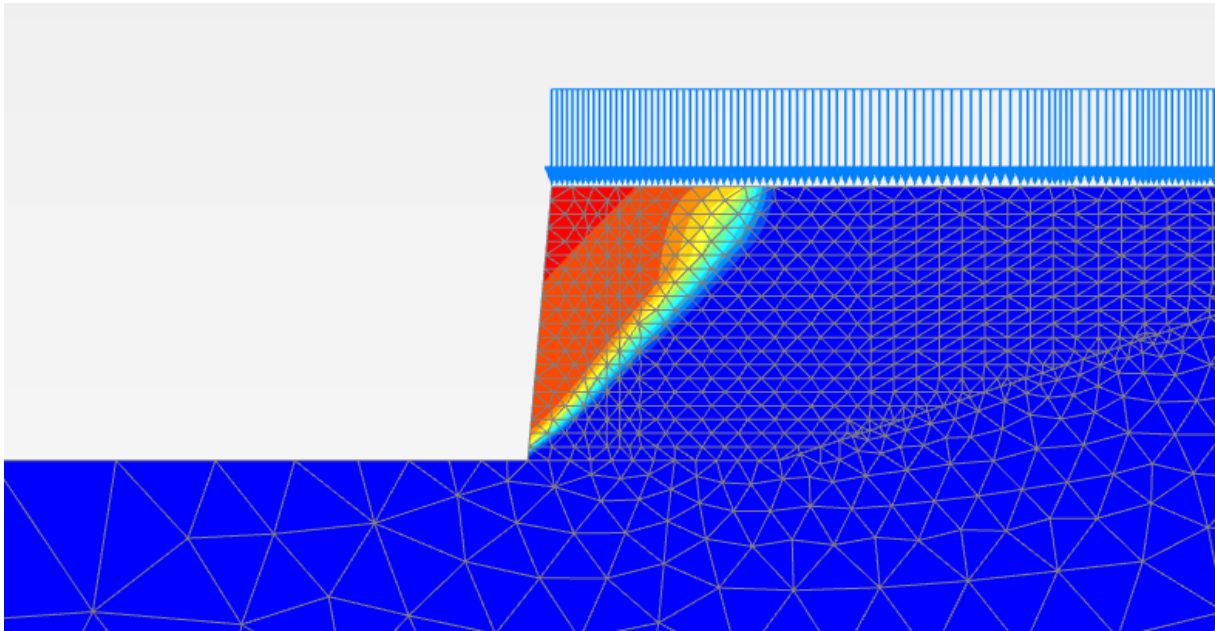


35. ábra: A 32° hajlású rézsű



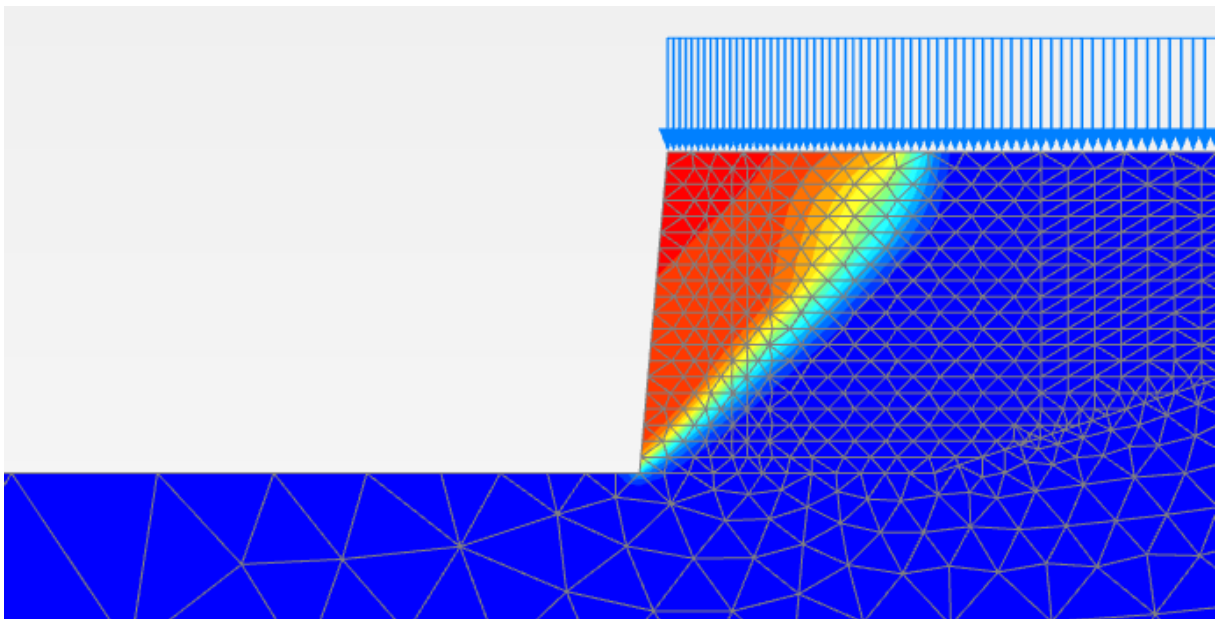
36. ábra: A 32° hajlású rézsű tönkremenetele

Ezután megkerestem, milyen kohézió szükséges az 1,00-s biztonság eléréséhez, azaz az állékonysághoz. A kohézió fokozatos növelésével eljutottam terheletlen rézsű esetén a 10 kPa-os, terhelt rézsűnél pedig a 12 kPa-os értékhez.



37. ábra: A 85° hajlású rézsű esetén kialakuló csúszólap $c=12$ kPa esetén

A következő fázisban a kohézió értékét tovább növelve meghatároztam az 1,35-ös biztonsági érték teljesítéséhez szükséges kohézió mennyiségét, ami terheletlenül 15 kPa, leterhelve pedig 20 kPa értékű volt.



38. ábra: A 85° hajlású rézsű csúszólapja $c=20$ kPa esetén

A továbbiakban a könnyebb kezelhetőség érdekében a szálerősítést geogrid elemekkel nem vizsgáltam, csak kohéziós többletként vettem figyelembe.

A következő táblázat a lefuttatott vizsgálatokat foglalja össze:

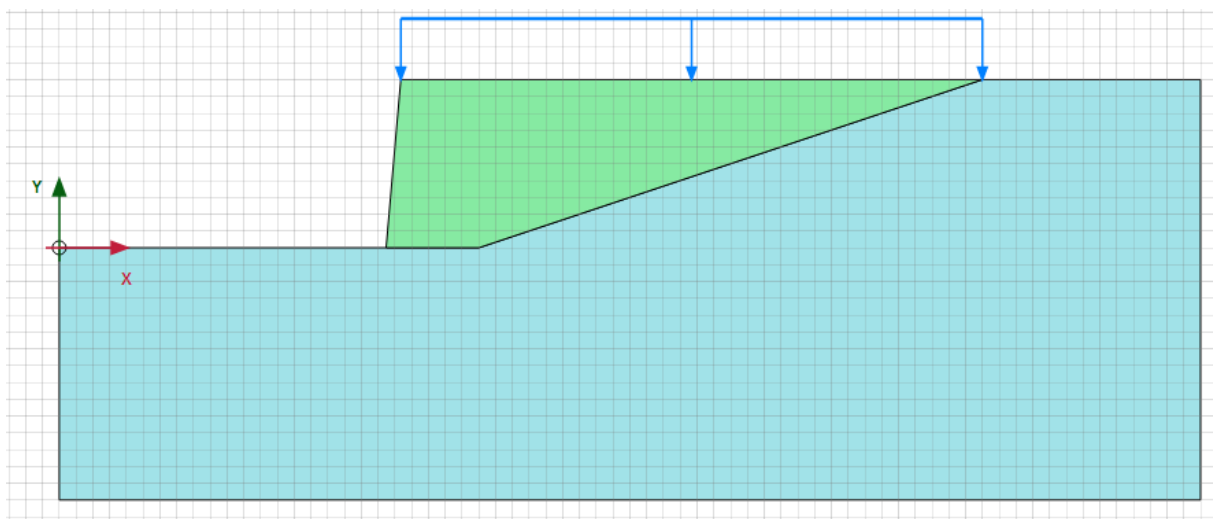
9. táblázat: A futtatások eredményei

rézsűszög	φ	c	biztonság	teher (10 kN/m)	geogrid (10 kN/m)
85	20	5	0,61	nem	nem
85	20	5	0,51	igen	nem
40	20	5	1,31	nem	nem
38	20	5	1,36	nem	nem
35	20	5	1,44	nem	nem
35	20	5	1,27	igen	nem
32	20	5	1,36	igen	nem
30	20	5	1,42	igen	nem
85	20	12	0,98	igen	nem
85	20	10	1,04	nem	nem
85	20	11	1,10	nem	nem
85	20	12	1,03	igen	nem
85	20	15	1,36	nem	nem
85	20	18	1,30	igen	nem
85	20	20	1,38	igen	nem

A modellezést ezután a hulladéktest magasságának változtatásával folytattam, annak érdekében, hogy meghatározzam, magasabb hulladékrezsűk esetén milyen kohéziós paraméterek szükségesek az állékonysághoz, illetve milyen rézsűszög alkalmazható biztonságosan ezen depóniák esetén. Mivel az eddigi vizsgálatok során a kedvezőtlenebb esetet azok a kialakítások mutatták, amelyekben felszíni teher működött a depóniára, a továbbiakban leterheletlen rézsűket nem vizsgálok, a felszíni terhet minden esetben működtetem.

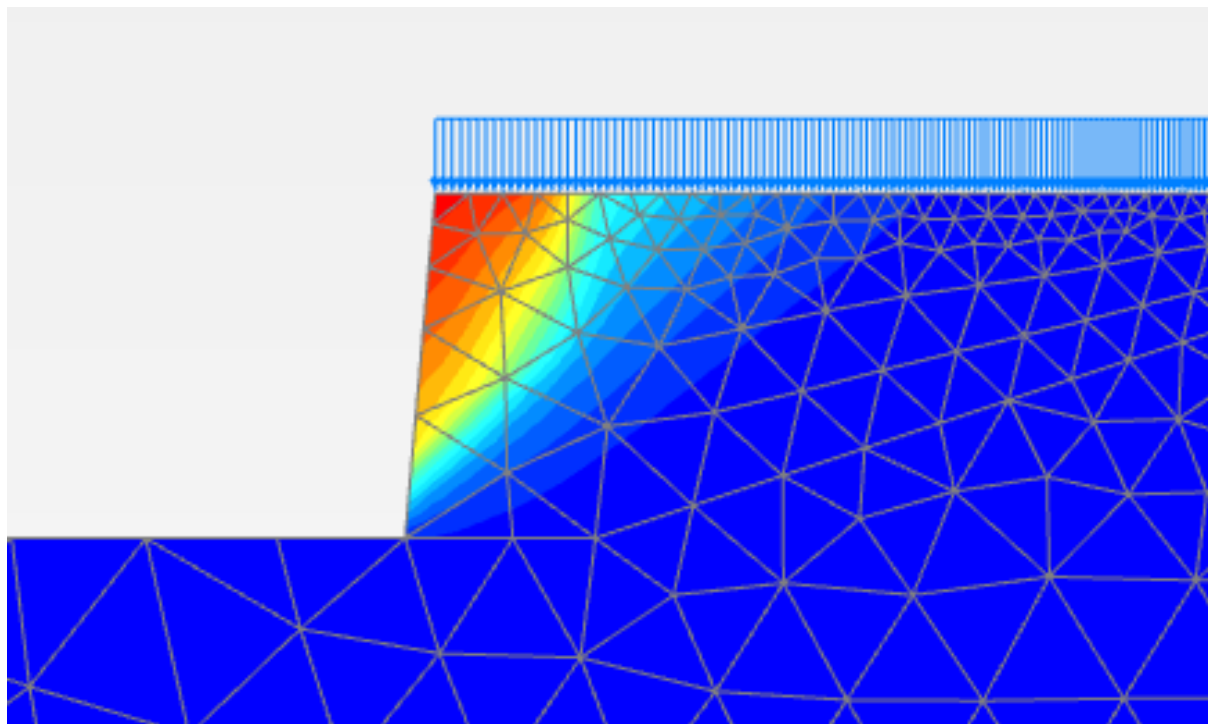
A talajfizikai paraméterek közül ezután csak a kohézió értékét változtattam. A belső súrlódási szöget továbbra is az ÖNORM-ban megadott 25° -ban feltételeztem.

Először 10 méter magasságúra változtattam a hulladéktestet. Ennek geometriáját a következő ábra mutatja:



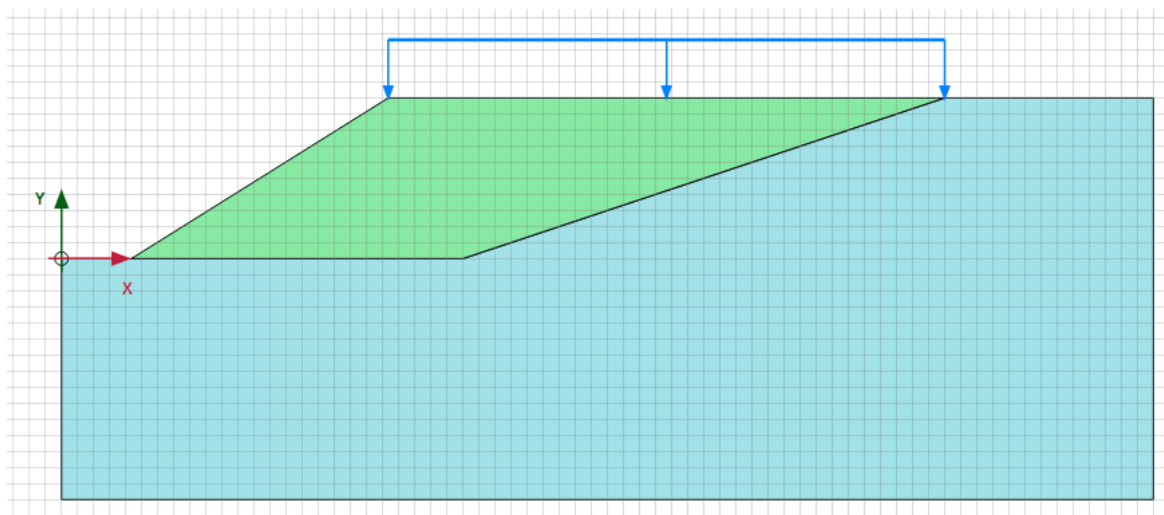
39. ábra: A 10 méter magas rézsű 85° építési szöggel

Ez a kialakítás az ÖNORM-ban szereplő hulladék paraméterekkel még kisebb biztonságot (0,45) mutatott, mint a 6 m magasságú rézsú (0,54). Ez megfelelt a várakozásoknak, ugyanis egy lényegesen nagyobb hulladéktestet vizsgáltam.

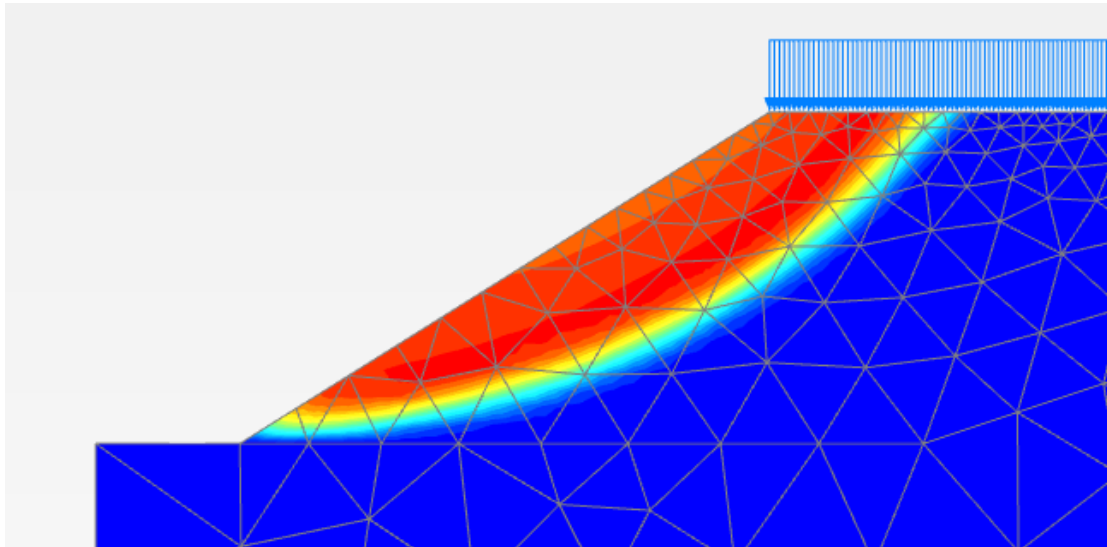


40. ábra: A 10 m magas rézsú tönkremenetele $c=5$ kPa esetén

A hulladéktest szabványban előírt 1,35-ös állékonysági biztonságát a 32° -os rézsűszög tudta biztosítani, melyet a következő ábra szemléltet:

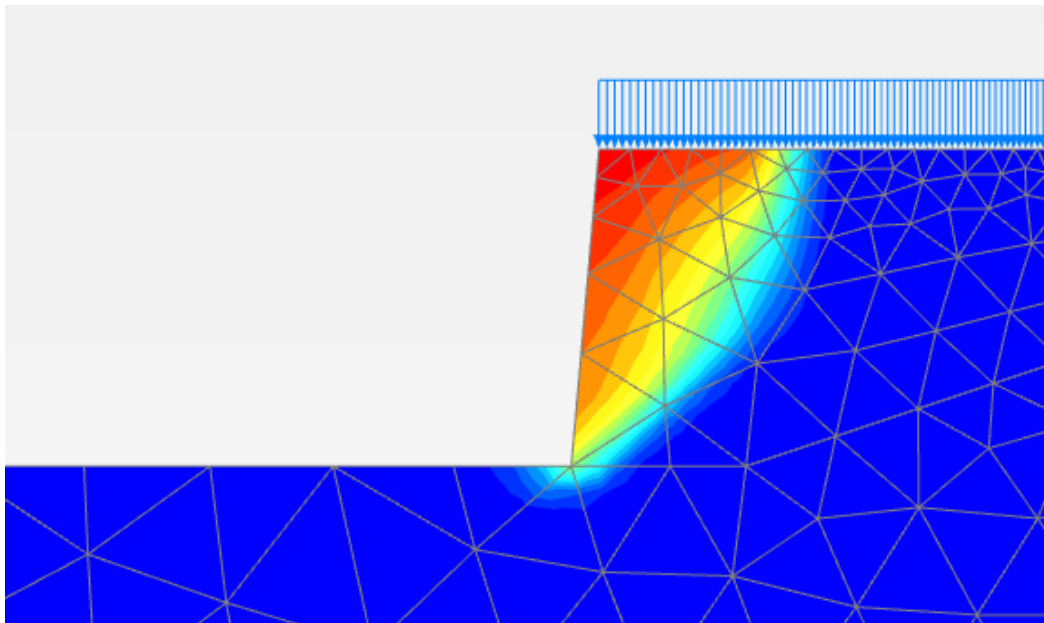


41. ábra: A 32° -os rézsű



42. ábra: A 32° hajlású rézsű tönkremenetele

A későbbi összevethetőség érdekében meghatároztam, hogy a 85° rézsűszögű hulladéktest állékonyságát milyen kohézió tudja biztosítani. A számítások szerint az 1,00 biztonsághoz $c=20$ kPa, az 1,35-höz pedig $c=32$ kPa kohézió szükséges.



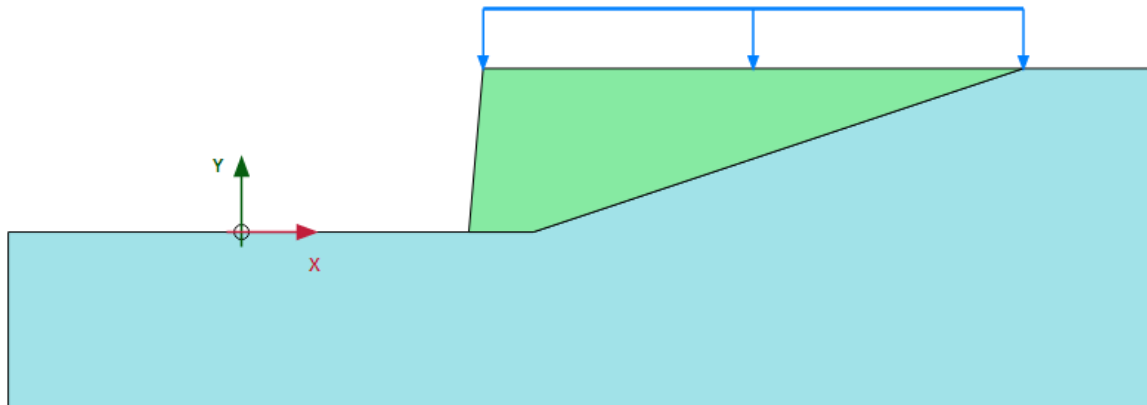
43. ábra: A $c=32$ kPa értékhez tartozó tönkremenetel

A 10 m magas hulladéktesten lefuttatott számításokat a következő táblázatban foglaltam össze:

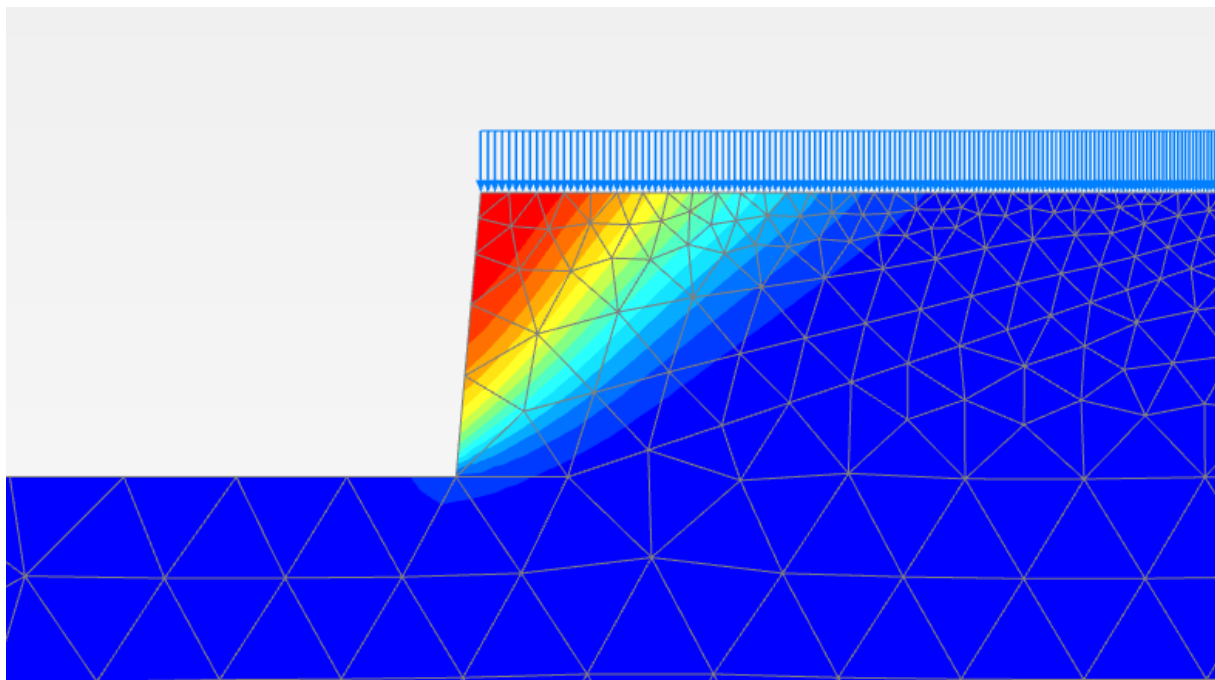
10. táblázat: A 10 m magas rézsú vizsgálatai

rézsűszög	φ	c	biztonság	teher (10 kN/m)
85	25	5	0,45	igen
45	25	5	1,00	igen
30	25	5	1,42	igen
32	25	5	1,35	igen
85	25	20	1,01	igen
85	25	25	1,18	igen
85	25	30	1,31	igen
85	25	32	1,35	igen

A rézsú magasságát végül 14 méterre változtattam. Így ismét kisebb biztonságot (0,35) kaptam, mint az előző két kialakítás.

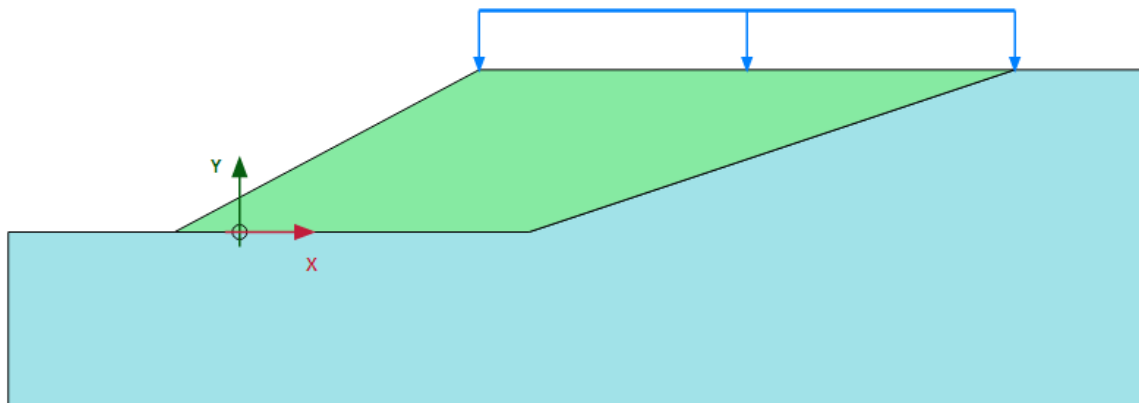


44. ábra: A 14 m magas rézsú 85°-os szögben

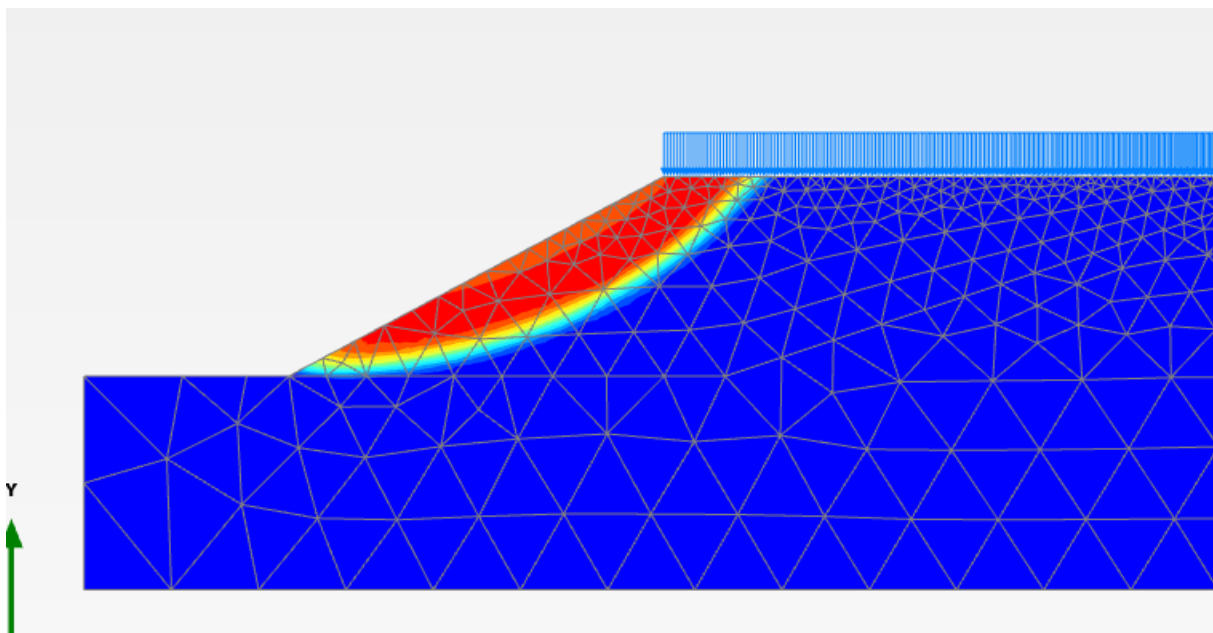


45. ábra: A 14 m magas rézsú tönkremenetele $c=5$ kPa esetén

A rézsű megfelelő 1,35-ös állékonysági biztonságát 28° rézsűszög tudja biztosítani 25° -os belső súrlódási szög, és 5 kPa-os kohézió esetén.

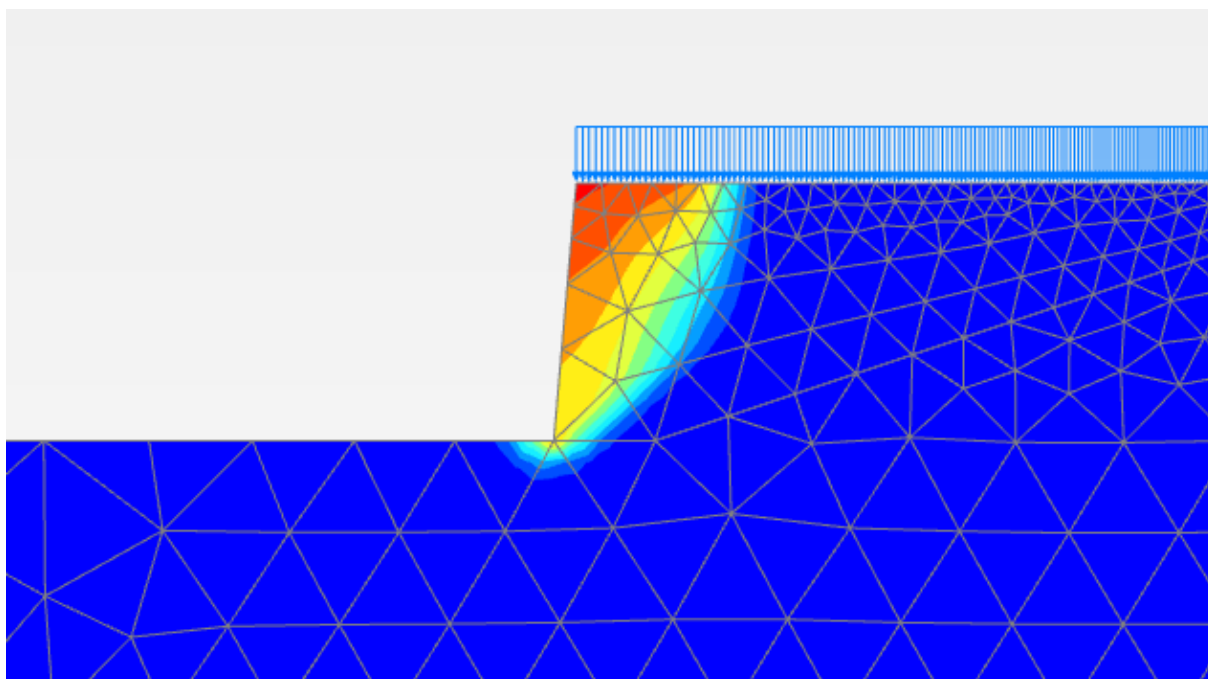


46. ábra: 28° hajlású rézsű



47. ábra: A 28° -ban épített rézsű tönkremeneteli csúszólapja

Az állékonyságvizsgálat utolsó lépéseként meghatároztam az 1,00 illetve az 1,35-ös biztonsághoz szükséges kohéziót, 85° rézsűszög esetén. Előbbi esetben 28 kPa, utóbbiban pedig 47 kPa a biztosítandó kohéziós érték.



48. ábra: Tönkrementeli kép 47 kPa kohézió esetén

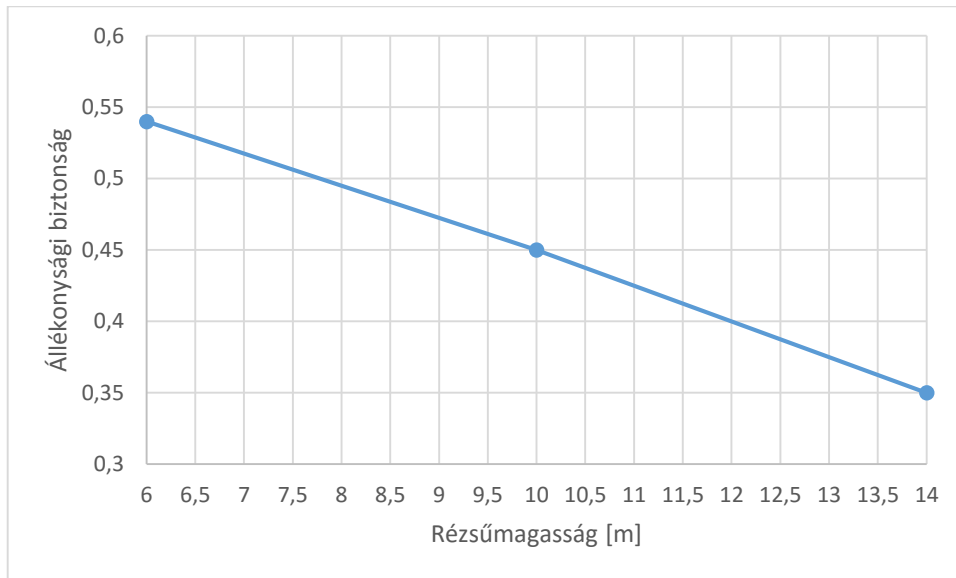
A 14 méter magas rézsű vizsgálata során a következő futtatásokat végeztem el:

11. táblázat: A 14 m magas rézsű vizsgálatai

rézsűszög	ϕ	c	biztonság	teher (10 kN/m)
85	25	5	0,35	igen
30	25	5	1,30	igen
25	25	5	1,52	igen
28	25	5	1,38	igen
85	25	25	0,94	igen
85	25	28	1,01	igen
85	25	40	1,26	igen
85	25	50	1,39	igen
85	25	47	1,36	igen

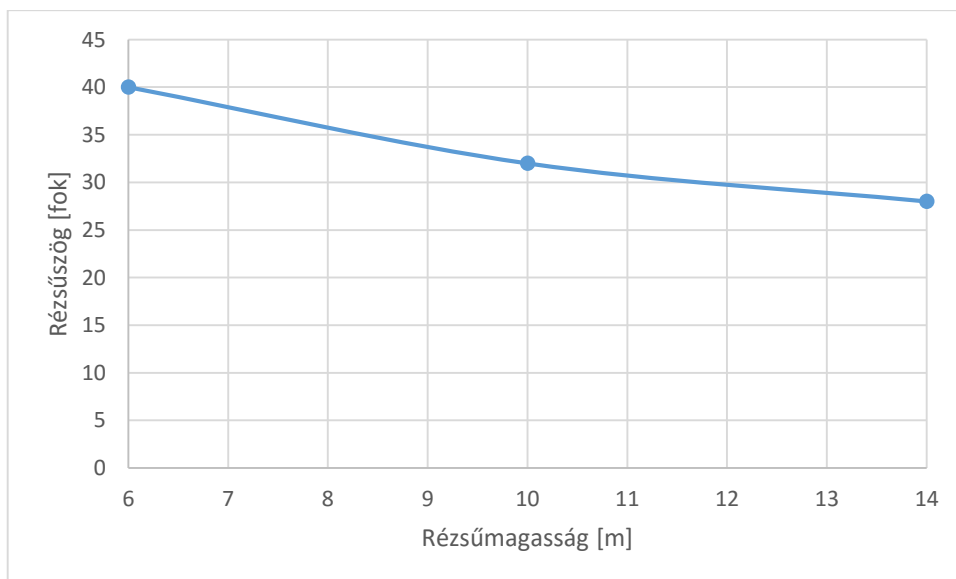
8. Összefoglalás és kitekintés

A szakirodalmi áttekintés és a modellezés eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy az ÖNORM homogén hulladéktestre ajánlott talajfizikai jellemzői a valós értékeket alul becsülik. A nagy modellkísérlet eredményei szerint, amennyiben elfogadjuk a 25°-os belső súrlódási szögre vonatkozó ajánlást, a hulladéktest 6-8 kPa többlet kohézióval rendelkezik az 5 kPa-os ajánláshoz képest. Az ÖNORM talajfizikai paramétereivel modellezett, a kísérletben is szereplő 85° szögű rézsú állékonysága a következők szerint alakul a rézsúmagasság függvényében 6, 10, illetve 14 m magas hulladéktestek esetén:



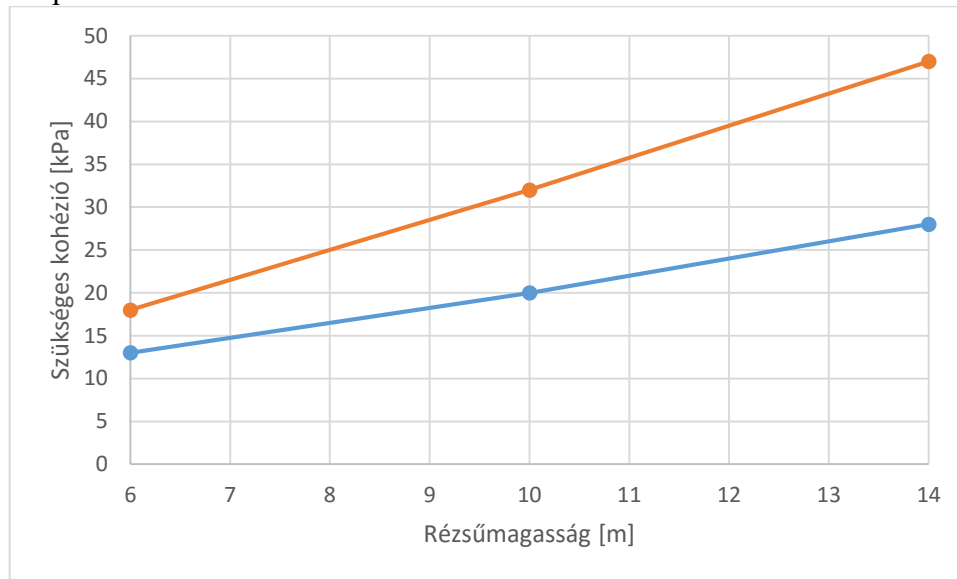
49. ábra: A biztonság alakulása a rézsúmagasság függvényében

A hulladéktest méretének (magasságának) növekedésével az 1,35-ös biztonsághoz szükséges rézsúhajlás egyre kisebb. Azonban valós lerakó méretek esetén is nagyobb 1:3-nál. A pusztazámori lerakó geometriájára korábban elvégzett futtatások szerint 1:1,7.



50. ábra: Az 1,35 biztonsághoz tartozó rézsúszög a rézsúmagasság függvényében

A rézsúmagasság és az állékonysághoz szükséges kohézió értéke között közel lineáris az összefüggés. Az ábrán kézzel az 1,00, narancssárgával az 1,35 biztonsághoz tartozó kohézió értékek szerepelnek.



51. ábra: A szükséges kohézió értéke

A hulladéktestben jelenlévő különböző műanyagok erősítő hatásának modellezése geogrid elemekkel nehézségekbe ütközik. Amennyiben a valóságot jobban közelítő, sűrű, átlapolt kiosztást használunk, a modell megépítése és a hálógenerálás is rendkívül időigényes folyamat. A futási idő is rendkívül hosszúra nyúlik. Ritkábban elhelyezett elemekkel, nagyobb merevséget alkalmazva a számítás könnyebben végrehajtható, azonban az eredmények nem mindig közelítik a hulladék valós viselkedését. Ezért az erősítő hatás geogrid elemekkel történő modellezése további vizsgálatokat igényel.

A modellezés során több futtatás esetén is megengedtem, hogy a talajban húzófeszültségek keletkezzenek. Ilyenkor 5 kN/m^2 értékű húzószilárdságot definiáltam a hulladéktestben. Ez a lépés a globális állékonyságra nem volt hatással, azonban a rézsú élének környezetében a lokális tönkremenetetl meggátolta.

Az eredmények alapján kívánatos lenne, hogy a hulladéktest állékonyságát különböző méretű nagy modelleken, a lerakókban vizsgálják. Szükség lenne a modellek rövid-, és hosszútávú viselkedésének vizsgálatára is.

A kísérleti és számítási eredmények alapján lehetőség lenne nagyobb rézsúszögek alkalmazására. Ezek megvalósíthatóságát külföldön több helyen már próbaszakaszokon vizsgálják.

A napjainkban alkalmazott 1:3 rézsúhajlást nemcsak az állékonyság biztosítása miatt használják. A jelenleg járatos ideiglenes és végleges zárószigetelő rendszerek építése és későbbi karbantartása ilyen meredekség mellett lehetséges. Ezért az állékonysági vizsgálatok mellett szükséges lenne új, meredekebb rézsúre is alkalmazható zárószigetelő rendszer kifejlesztése is, így megvalósítható lenne a hulladéklerakók rézsúszögének növelése.

A hulladékok bomlása folyamán a friss hulladéktestben még meglévő kohézió degradálódik. Ezért arra hosszú távú viselkedés esetén nem lehet teljes egészében számítani. A meredekebb rézsúket valamilyen támszerkezettel meg kell támasztani. Erre jó megoldás lehet az építési törmelékkel feltöltött gabion kosarakból álló támfal.

9. Jövőbeli célok

A számítógépes vizsgálatok után fontos lenne a 10 és 14 m magas rézsűre is helyszíni, nagymodell kísérletet elvégezni. Ennek során legalább 1 éven keresztül vizsgálni szükséges a hulladéktest viselkedését. Így információkat nyerhetünk a hulladék hosszútávú viselkedéséről.

A meredekebb rézsűk alkalmazásához szükséges új zárószigetelő rendszer kidolgozása is. Ennek elemeit szintén helyszíni modellkísérletek segítségével lehetne vizsgálni. A zárószigetelésbe építendő geoműanyagok már rendelkezésre állnak, jelenleg a kísérletek előkészítése zajlik.

Irodalomjegyzék

- [1.] Aipli Sándor – Szarka Gábor: Hulladékok alakváltozási kérdéseinek vizsgálata, TDK dolgozat 2013
- [2.] Blight, G. E. 2006: A survey of lethal failures in municipal solid waste dumps and landfills, 5th International Congress on Environmental Geotechnics, Thomas Telford, London, 13-42.
- [3.] Dimitrios Pavlos Zeccos (2005), Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid-Waste – PHD
- [4.] Dixon, N., Langer, U. 2006: Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. Waste Management 26[8.] pp.:220-232.
- [5.] Faur K. B. (2012), Hulladéklerakók magasztási lehetőségeinek ellenőrzése állékonyságvizsgálattal, Szakdolgozat
- [6.] Független Ökológiai Központ Alapítvány, Grafikonok a magyarországi hulladékgazdálkodás állapotáról, www.foek.hu
- [7.] Kovács M. (2009), Földművek, BME egyetemi jegyzet
- [8.] Kölsch, F. 1995: Material values for some mechanical properties of domestic waste. Fifth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy pp.:711-729.
- [9.] Kwak, H. G., Filippou, F. C. 1990: Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads. Report No. UCB/SEMM-90/14, Department of Civil Engineering, University of California,
- [10.] Lamborn J. 2009: Characterisation of municipal solid waste composition into model inputs. Hydro-Phisico-Mechanics of Wastes, 3rd International Workshop, Germany.
- [11.] Nejan Huvaj-Sarihan - Timothy D. Stark; BACK-ANALYSES OF LANDFILL SLOPE FAILURES. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008

- [12.] Palaypayon M., Ohta, H. 2007: Estimation of Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste in Landfills.
- [13.] Singh, S., Murphy, B. J. 1990: Geotechnics of waste fills. ASTM-STP 1070, pp. 240-258.
- [14.] Stark, T. D., Eid, H. T., Evans, W. D., Sherry, P. E. 2000: Municipal solid waste slope failure – II: Stability analysis. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126 (5), 408–441.
- [15.] Szabó I. – Szabó A. – Madarász T. : Hulladékgazdálkodás, digitális tananyag 6.5 Fejezet (<http://hulladekonline.hu/files/172/>)
- [16.] Szabó I. – Varga G. : Hulladéklerakók állékonyságvizsgálatának kérdései, Oktatási segédlet
- [17.] Szabó I. : Hulladéklerakók lezárása és rekultivációja II., Oktatási segédlet
- [18.] Szabó A. (2008), Hulladéklerakók lezárásának aktuális kérdései, PhD értekezés
- [19.] Szabó I. – Szabó A. – Németh Cs. : Hulladéklerakók lezárása és rekultivációja, Tervezési segédlet
- [20.] Szilva A. 2012 : Hulladéklerakók állékonysági kérdései
- [21.] Varga G. (2010), Hulladéklerakók állékonysági kérdései, PhD értekezés
- [22.] Varga G., Czap Z. 2010: Hulladéklerakók végeselemes vizsgálatai. GTM (Gazdasági Tükörcép Magazin) 2010 III. X. évf. 52-53.o.