



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Hulladékhalmok modellezése

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Firgi Tibor

Gödöllő

2019

**A doktori iskola**

**megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

**tudományága:**

Agrárműszaki tudományok

**vezetője:**

Prof. Dr. Farkas István  
egyetemi tanár, DSc  
SZIE, Gépészmérnöki Kar

**Témavezető:**

Prof. Dr. Telekes Gábor  
főiskolai tanár, PhD  
SZIE, Ybl Miklós Építéstudományi Kar  
Építőmérnöki Intézet

**Társ-témavezető:**

Prof. Dr. Szendrő Péter  
rector emeritus, DSc  
SZIE, Gépészmérnöki Kar

.....  
a témavezető jóváhagyása

.....  
az iskolavezető jóváhagyása

## TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK .....	5
<b>1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Célkitűzések .....</b>	<b>5</b>
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	7
<b>2.1. Kezdeti feltételezések.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Vizsgálati helyszínek .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Vizsgált anyagok.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4. Vizsgálati módszerek, eszközök .....</b>	<b>8</b>
2.4.1. Módosított kompressziós vizsgálat .....	8
2.4.2. Víztartási görbe mérése .....	9
2.4.3. Egyéb mérések .....	9
3. EREDMÉNYEK.....	10
<b>3.1. A vizsgált hulladék kompressziója.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2. A vizsgált hulladék konszolidációja .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3. A vizsgált hulladék alakváltozásának reológiai modellezése.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4. Hulladékhalom alakváltozásának talajmechanika alapú         modellezése .....</b>	<b>16</b>
<b>4.5. Hulladékhalomhoz kapcsolódó hidraulikai modellezés.....</b>	<b>18</b>
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	20
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	23
6. ÖSSZEFOGLALÁS .....	24
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK.....	25

## JELÖLÉSJEGYZÉK

A	keverési arány	[-]
$c_k$	súly együttható	[-]
$c_v$	konzolidációs tényező	[m <sup>2</sup> /s]
$C_\alpha$	kúszási (másodlagos konszolidációs) index	[-]
d	szemcse átmérő	[mm]
E	rugalmassági modulus	[N/m <sup>2</sup> ]
$e_0$	lerakott hulladék kezdeti hézagtérfaktor	[-]
$E_s$ ( $E_{oed}$ )	összenyomódási modulus	[kN/m <sup>2</sup> ]
H	szivárgási hossz	[m]
k	vízáteresztő-képességi együttható	[m/s]
S	átesett tömeg	[m%]
t	idő	[s]
$t_0$	idő paraméter	[s]
$u_a-u_v$	szívó feszültség, tenzió	[kPa]
$v(t)$	a minta tetejének függőleges elmozdulása	[m]
$v_0$	kezdeti alakváltozás	[m]
$v_1(t)$	konzolidációs alakváltozása	[m]
$v_2(t)$	másodlagos konszolidációs alakváltozása (kúszás)	[m]
$v_n$	normalizált térfogati víztartalom	[-]

### ***Görög betűk:***

$\eta$	dinamikai viszkozitás	[Pa s]
$\varepsilon$	fajlagos alakváltozás	[-]
$\sigma'$	hatékony normál feszültség	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	Poisson tényező	[-]

## 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A környezetgazdálkodás részét képező hulladékgazdálkodáshoz, ezen belül a települési szilárd hulladék ártalmatlanításának műszaki fejlesztéséhez szeretnék hozzájárulni az értekezésemmel. Céлом a biztonságosabb, kisebb környezeti kockázatot jelentő és gazdaságosabb hulladék-elhelyezés elősegítése.

### 1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége

Az utóbbi évtizedekben a környezetgazdálkodás, környezetvédelem, a környezetszennyezés megelőzése egyre fontosabbá vált Magyarországon is. Szakkönyvek, folyóiratok, konferenciák, törvények, sajtóhírek tucatjai bizonyítják a téma aktualitását.

A hosszú távon működőképes (fenntartható) környezetgazdálkodás megteremtése társadalmi igény, amely új műszaki feladatok megoldását is szükségessé teszi. Nem túlzás kijelenteni, hogy a felelősségteljes környezetgazdálkodás alapvető része a megfelelő hulladékgazdálkodás, hiszen tágabb értelemben majdnem minden környezetvédelmi, energia- és anyaggazdálkodási kérdés, hulladékgazdálkodási kérdés is.

A nem megfelelő hulladékkezelés környezeti katasztrófák okozója lehet rövid-, és hosszú távon egyaránt. Az éghajlat várható változása az amúgy is számtalan diszfunkcióval terhelt hulladékgazdálkodást újabb feladatok elé állítja.

A hulladékok lerakással történő kezelése, nem a legjobb megoldás. Ennek ellenére fontos a lerakókhoz kapcsolódó műszaki tudás, hiszen még hosszú ideig fognak üzemelni. A biztonságos üzemeltetés mellett, a megtelt, rekultivált lerakók területének hasznosításához is szükségesek a hulladék domb mechanikai (hulladékfizikai) jellemzői. A mérnöki szerkezetek alapozását gazdaságosan csak ezek ismeretében lehet megtervezni, mert ez esetben az „altalaj” a lerakott hulladék.

### 1.2. Célkitűzések

A települési szilárdhulladék-lerakókhoz számos műszaki és nem műszaki kutatási téma kapcsolódik. Természetesen az értekezésem a műszaki kérdésekre fókuszál, de még e témák is messze meghaladnák a rendelkezésemre álló kereteket, erőforrásaimat.

A hulladékdombokhoz kapcsolódó modellezést választottam a szűkebb kutatási területemnek. A hulladékhalom modellezése fontos feladat, segítségével tudjuk előre becsülni, tervezni a kialakítható rézsűket, az összenyomódását, a keletkező csurgalékvíz és fejlődő gáz mennyiségét, összetételét, útját. Többfajta modell - mechanikai, hidraulika, biológiai,

komplex -, alkalmazható attól függően, hogy mi a megválaszolendő kérdés. Két részterület modellezésére, kutatására vállalkoztam:

- a hulladéktest mechanikai modellezésére, ezen belül is az alakváltozások tér és idő szerinti becslésére (alkalmazott kutatási szinten),
- a hulladéklerakókhoz is kapcsolódó hidraulikai modellezésre (alkalmazott-alap kutatási szinten).

Az előzőek szerint, valamint a szakirodalom megismerése és saját tapasztalataim alapján levont következtetések eredményeként, előképzettségemet is figyelembe véve és tudva bizonyos kényszereket, korlátokat, lehetőségeket, a következő kérdések megválaszolására vállalkozhattam:

1. Egy kiválasztott hulladéklerakóból vett minták módosított kompressziós vizsgálata, és e vizsgálatokból - a degradációs fok függvényében - a hulladékra jellemző kompressziós görbék leírása, a hulladékra jellemző összenyomódási modulus és Poisson tényező meghatározása, a vízáteresztőképességi együttható visszszámítása, a maradó és a rugalmas alakváltozások arányának vizsgálata.

2. A módosított kompressziós vizsgálat eredményeit értékelve, konszolidációs görbe kidolgozása, tehát talajmechanika alapú hulladék konszolidációs vizsgálat, a degradációs fok függvényében;

3. A módosított kompressziós vizsgálat eredményeit értékelve, reológia modell kidolgozása, a degradációs fok függvényében;

4. A kiválasztott hulladéktest alakváltozásának talajmechanika alapú modellezése, numerikus (végeeselemes) módszert alkalmazó program segítségével, az előző pontokban meghatározott hulladékfizikai jellemzők felhasználásával. Helyszíni süllyedésmérésekkel a modell(ek) validálása, ellenőrzése, a figyelembe nem vett faktorok vizsgálata.

5. A kiválasztott hulladéklerakó hidraulikai modellezéséhez kapcsolódóan, egy elvi vízgyűjtő rendszerre, a víztartási függvény meghatározása számítással, a frakciók víztartási görbéjéből. Ellenőrző laboratóriumi mérések, az ismert elméleti meghatározás pontosítása.

A fenti célkitűzések eléréséhez, laboratóriumi kísérletekkel történő igazolásukhoz szükséges új mérési eszközök, módszerek kidolgozása, mivel sokszor nem rutin méréseket kell alkalmazni, így ez esetben a mérés technika egy fontos, a tudományt közvetlenül segítő terület.

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben a kutatási eredményeimet megalapozó kísérleti módszereket, a vizsgált lerakó főbb jellemzőit, továbbá a célok eléréséhez alkalmazott módszertani ismereteket foglalom össze.

### 2.1. Kezdeti feltételezések

A vizsgálatok megkezdése előtt a következő feltételezésekkel éltem:

- A lerakott, szilárd, kommunális (települési), kvázi telített hulladék alakváltozása vizsgálható a talajmechanika/mechanika eszköztárával (fizikai folyamatok, vizsgálati eszközök, elméletek stb.), bár a talaj analógia nem teljes, de a vizsgált jelenség szempontjából a hulladék tekinthető szemcsés közegnek.
- Az azonos korú, lerakott hulladékot a modellezés során, mechanikai tulajdonságait tekintve, homogénnek és izotrópnak tekintem, hidraulikai szempontból homogénnek, de anizotrópnak.
- A szivárgó és takaró szemcsés rétegek tekinthetők frakciók keverékének, így alkalmazható a szemeloszlás vizsgálati és entrópia elmélete.
- A vizsgálatokat a vonatkozó szabványok (ha van) szerint végzem, mert így biztosítható, a mások által végzett vizsgálatokkal, az összehasonlíthatóságuk.
- Az alkalmazott vizsgálatok, elméletek, modellezések közül a még elfogadható pontosságú legegyszerűbbet keresem, hiszen gyakorlati célokból ez a legkedvezőbb.

### 2.2. Vizsgálati helyszínek

A vizsgált kommunális hulladéklerakó a Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ volt, amelynek első üteme 2012. év végére elérte a 99%-os feltöltöttséget (2a ábra).

A hulladékminták laboratóriumi vizsgálatait a Szent István Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Építőmérnöki Intézet, Geotechnikai Laboratóriumában, a víztartási görbe méréseket a Magyar Tudományos Akadémia, Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetének segítségével végeztem.

### 2.3. Vizsgált anyagok

Vizsgálódásom tárgya a hulladéktest agyaga, (kommunális hulladék a napi takarással) és a lerakóhoz kapcsolódó alsó-, felső lezárás ásványi anyaga (vízelvezető (drén) réteg, takarás stb.), valamint meg kellett vizsgálnom a lerakó alatti rétegecszövetet. A geotechnikában szokásos utat járva, a mesterséges rétegekből mintaanyagot (illetve elvi mintát) vizsgáltam, a lerakott hulladékból viszont mintavételre volt szükség, amely 4 db nagytérű fúrás lemélyítésével (12-21 m-es talpmélységgel) valósult meg.

## 2. Anyag és módszer

A 22 hulladékmintából átlagmintákat készítettem:

1. minta (S-1 jelű), (2. degradációs fokú):  
103 F / 0,50, 1,00, 1,50, 2,00 m, 104 F / 0,50, 1,00, 1,50, 2,00 m.
2. minta (S-2 jelű), (3. degradációs fokú):  
103 F / 2,50, 3,50, 4,50, 5,50 m, 104 F / 2,50, 3,00, 4,50, 5,50 m.
3. minta (S-3 jelű) (4. degradációs fokú):  
103 F / 6,50, 7,50, 8,50, 9,50, 10,50, 11,50 m.

A degradációs fok fejezi ki a hulladék fizikai- kémiai- biológiai átalakulási fokát, ahol 1. degradációs fokú a friss hulladék és 5. degradációs fokú a teljesen átalakult, lebomlott.

A hidraulikai modellezés kapcsán, a víztartási görbe méréseknél, szemcsés talajmintákat vizsgáltam, négy szemcsefrakciót ( $d=2,0 - 0,5$  mm), és ezek hat, optimális ( $A=2/3$ ) keverékét.

### 2.4. Vizsgálati módszerek, eszközök

A hulladék és a talaj eltérő anyag, így szükségessé vált a talajmechanikai eszközök, mérési módszerek adaptálása, az épített rétegek vizsgálatához pedig talajtani és telítetlen talajmechanikai vizsgálatok adaptálása, fejlesztése.

#### 2.4.1. Módosított kompressziós vizsgálat

Olyan eszközt kellett építenem, amely képes működtetni különböző nagyságú függőleges terheket és közben mérni a minták összenyomódásának mértékét. A hulladékdomb magasságát, a hulladék térfogat sűrűségét és a minta keresztmetszeti területét (50x50 cm) figyelembe véve, a módosított ödométernek 0-150 kN függőleges erő kifejtésére kellett alkalmasnak lennie.



a) ödométer  
súlyokkal



b) ödométer sajtóval



c) homoklapos  
berendezés

1. ábra Laboratóriumi vizsgálatok



## 2. Anyag és módszer

A berendezés működtetése, statikus teherrel 0-5 kN között lehetséges (1a ábra), e fölött hidraulikus sajtót (harckocsi emelőt) alkalmaztam (1b ábra). Azért hogy a mérésekből a modellezéshez több információt nyerjek, a doboz oldalfalába 2 db acélmembrános nyomásérzékelőt építettünk.

A berendezés üzemi próbáját a gyártó, laboratóriumi próbáját, homokos kavics alkalmazásával, én végeztem el. A laboratóriumi berendezés egyszerű kivitele miatt megbízhatóan működik és olcsó, de ez azzal a hátránnyal jár, hogy a hidraulikus emelővel való teherfelvitel szakaszában, kvázi állandó felügyeletet igényel. A kezelőnek kell a minta összenyomódása miatt kialakuló teheresést korrigálnia. A méréseim közben ezt biztosítottam.

### 2.4.2. Víz tartási görbe mérése

Ismerve a görbe várható lefutását, valamint figyelembe véve a lehetőségeinket, két módszert alkalmaztam: a függő vízoszlop módszerét, homoklapos berendezéssel, és a feszültségkamrás eljárást.

A homoklapos berendezés állandó terhelésen működik, a kutatási programban azonban az 1-100 vízoszlop-cm terhelés közötti tartomány volt domináns, így új mérési protokollt és megújított eszközt építettünk és alkalmaztunk (1c ábra), valamint elvégeztem a feszültségkamrás berendezés hazai bevezetését.

### 2.4.3. Egyéb mérések

Amelyek vagy saját rutin mérések, vagy a lerakó dokumentált adatszolgáltatása, vagy más kutató dokumentált mérései. Ezek közül két méréscsoportot emelnék ki. Egyrészt a PRHK-tól megkaptam, többek között, a felszíni süllyedés adatokat (2b ábra), másrészt felhasználtam a paralel minták BME-n készített nyírószilárdsági és egyéb vizsgálatainak eredményeit.



a) az első ütem hulladék dombja



b) az 1-es számú szintezési pont (órkö)

2. ábra A vizsgált hulladéklerakó (PRHK)

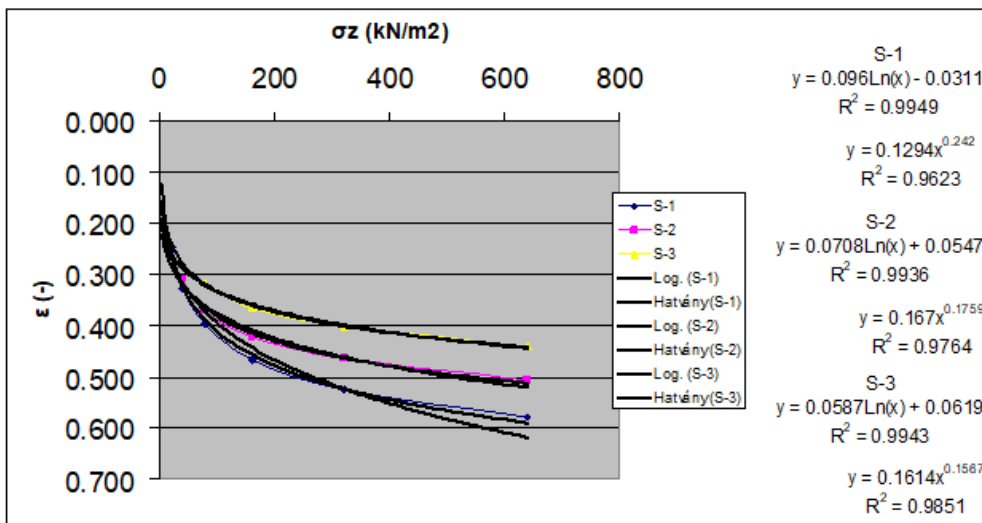
### 3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetében bemutatom a kutatómunkám során elért új tudományos eredményeket, amelyek a hulladékhalomok modellezését segítik.

#### 3.1. A vizsgált hulladék kompressziója

A hulladék (hasonlóan a talajokhoz) alakváltozása időben lejátszódó folyamat, azaz reológiai vizsgálatot igényel. De a talajmechanika alapú modellezéshez célszerű az alakváltozások terhelés függő értékét (kompresszió) és időbeli lefolyását (konszolidáció), először külön-külön megvizsgálni. E kettő ismeretében alkotható az alakváltozást többé-kevésbé jól leíró modell. A hulladék sajátja, hogy benne nem elhanyagolható mennyiségben szerves és így bomló anyagok is vannak, amelyek többletsüllyedést okoznak. Valamint a bomlás és mechanikai aprózódás miatt, az anyag megváltozik, így az alkalmazható anyag egyenlet állandói, paraméterei is változnak, ennek figyelembe vétele is szükséges, amelynek egyik lehetséges módja a degradációs fokok alkalmazása.

Az összenyomódás degradációs fok szerinti függését jól szemléltetik a közös ábrába rajzolt kompressziós görbék (3. ábra).



3. ábra A mért kompressziós görbék és matematikai leírásuk

A terhelés növekedésével a minták merevebbé válnak, azaz a talajokhoz hasonló tulajdonságot mutatnak. A degradációs fok növekedésével is merevebbé válnak a minták, és szerintem itt nem az előterhelésnek van szerepe, mivel a görbék nem "találnak egymásra", hanem a degradációnak (biológiai bomlás, kémiai átalakulás, mechanikai aprózódás), amely megváltoztatja magát az anyagot. Ezért javaslom, bár praktikus az egyszerűsége folytán (és a szakirodalomban szinte kizárólagosan

### 3. Eredmények

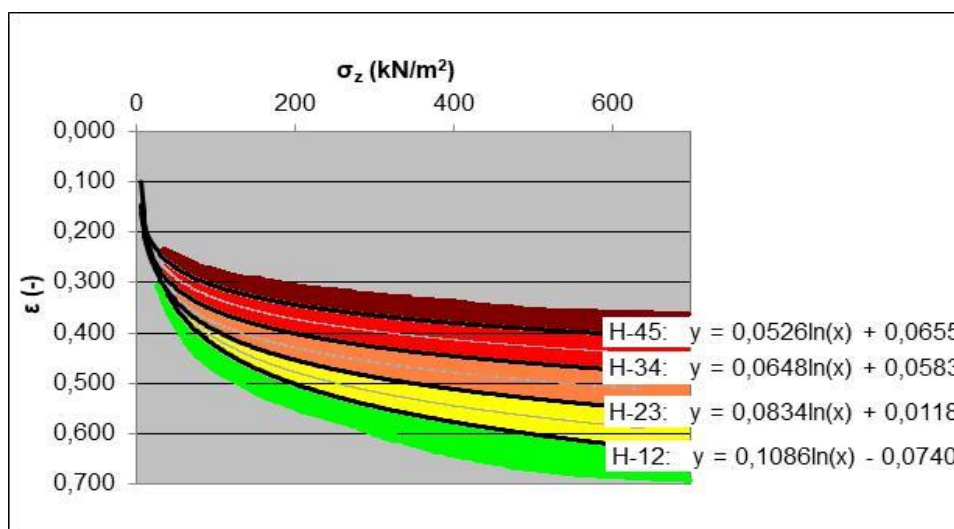
alkalmazott), az egy, vagy kétféle (friss és degradálódott) hulladék modell helyett, az öt degradációs fokú hulladékot külön-külön, más állandókkal jellemezhető anyagegyenlettel leírni. A görbék jellegéből adódóan a logaritmusos, vagy a talajmechanikában szokásos hatvány függvényekkel való közelítés praktikus, de célszerű az adott minták előterhelési feszültsége alatti terheléseket figyelmen kívül hagyni, így az eredményeket a 3. ábra mutatja.

Meg kell vizsgálni a mintavétel-minta előkészítés-mérés okozta hibákat, ez a statisztikai elemzés helyett, a fizikai folyamatok elemzésével lehetséges. A mintavétel fellazulást okoz, ezért amíg az előterheltség szintjét nem érjük el a mérésünk hamis, másrészt az előterheltségnek szerintem más a hatása, mint a talajoknál, hiszen amíg talajoknál döntően tömörödés következik be, addig a hulladékoknál e mellett, figyelembe véve, hogy a "szilárd rész" összenyomható, törhető, tehát itt az előterhelés, a mintavételi körülmények miatti fellazulással nem megszűnő változást okoz.

A későbbi számításokhoz jól felhasználható a terhelési szakaszonkénti linearizálás, az összenyomódási modulus megadása, a terhelés és a degradációs fok függvényében (4. fejezet).

#### *A degradációs fok meghatározása alakváltozási jellemzőkkel*

A hulladékminták alakváltozási jellemzőit a degradációs fokuk függvényében határoztam meg. A vizsgálat eredményeit felhasználva, megadhatók olyan alakváltozási jellemző – normál feszültség tartományok, amelyek az ismeretlen degradációs fokú hulladékminták, degradációs fok szerinti kategorizálását teszik lehetővé. A 4. ábrán kompressziós görbékkel adtam meg a degradációs fok tartományait, a határgörbék egyenleteit is közöltem.



4. ábra Degradációs fok tartományok a kompressziós görbékkel értelmezve

### 3. Eredmények

#### *A Poisson-tényező változása*

A kompressziós vizsgálat közben az oldalnyomást is mértem, így a Poisson-tényező számítható (1. táblázat). Ez degradációs fokként lehetséges és a nemlineáris viselkedés miatt, terhelési intervallumokban szükséges.

1. táblázat A Poisson-tényező [-] változása

terhelés (kN/m <sup>2</sup> ) \ minta jele	S-1	S-2	S-3
40	0,48	0,47	0,45
80	0,41	0,39	0,38
160	0,36	0,35	0,34

A degradációs fok, illetve a terhelés növekedésével csökken a Poisson-tényező értéke. Ennek oka, hogy a degradáció, és természetesen a tömörítés is merevebbé teszi a vizsgált anyagot. A feszültségfüggés a nemlineáris viselkedéssel magyarázható.

#### *A tehermentesítés értékelése*

A tehermentesítést (és újrateherelést) értékelve az állapítható meg, hogy, az alakváltozások döntő része (több mint 90 %) maradó, reológiai értelemben irreverzibilis (2. táblázat). Hiszterézis hatás nem volt mérhető.

2. táblázat Az alakváltozások aránya

	S-1	S-2	S-3
rugalmas- / maradó alakváltozás (a teljes alakváltozás százalékában)	9 / 91	6 / 94	6 / 94

A maradó alakváltozások nagy arányának oka, a hulladék anyagi összetételében és a terhelés hatására történő átalakulásában keresendő. Ha még azt a ténytet is figyelembe vesszük, hogy a degradáció okozta alakváltozás szintén maradó, akkor a rugalmas alakváltozás aránya még kisebb.

### **3.2. A vizsgált hulladék konszolidációja**

Vizsgálataimban a konszolidáció fogalmát Fredlund, D.G. szerinti értelemben használom. Az alakváltozások időbeli lefutása még az összenyomódásnál is bizonytalanabb, hiszen sok nehezen számításba vehető faktortól függ. A (talaj)mechanika alapú konszolidációs vizsgálat kapcsán megjegyzem, hogy az általam mért konszolidációs görbékből a terhelésfüggő összenyomódás és a rövid idejű másodlagos összenyomódás (kúszás a viszkózus tulajdonság miatt) számítható. A hosszú idejű másodlagos összenyomódás (kúszás a degradáció miatt), a helyszíni mérésekből és irodalmi adatokból, illetve az S-3 jelű minta hosszú idejű méréséből becsülhető.

### 3. Eredmények

A laboratóriumi vizsgálatok során tapasztaltak szerint, a vizsgált hulladékminták kvázi telített állapotúak voltak, ez egyrészt a felső lezárás hiányának, a drénezési viszonyok bizonytalan voltának, a lerakott hulladék magas nedvesség tartalmának és a bomlási folyamatoknak tulajdonítható.

A konszolidációs görbék laboratóriumi meghatározása után, három módon végeztem el a kiértékelésüket:

- Klasszikus talajmechanikai kiértékeléssel (Casagrande-Taylor-módszer),
- Terzaghi modell módosításával:

$$v(t) = v_0 + v_1(t), \quad (1)$$

ahol:  $v(t)$  – a minta tetejének függőleges elmozdulása,  
 $v_0$  – a kezdeti alakváltozás,  
 $v_1(t)$  – a konszolidációs alakváltozása.

A konszolidációs alakváltozás, a következő formulával számítható:

$$v_1(c_v, t) = v_{1,\infty} \left[ 1 - \int_0^{2H} \frac{u(c_v, t, x) dx}{2H\sigma} \right], \quad (2)$$

ahol:  $v_{1,\infty} = 2H\sigma / E_s$  – a konszolidációs alakváltozás végértéke.

- Bjerrum modell módosításával:

$$v(t) = v_0 + v_1(t) + v_2(t), \quad (3)$$

ahol:  $v_2(t)$  – a másodlagos konszolidációs alakváltozás.

A másodlagos konszolidációs alakváltozás (kúszás), a következő formulával számítható:

$$v_2(t) = C_\alpha \frac{2H}{1 + e_0} \log \frac{t + t_0}{t_0}. \quad (4)$$

Szükséges az ismert konszolidációs modellek módosítása, a kezdeti alakváltozás alkalmazásával, enélkül a modellezésre kevésbé alkalmasak.

Megállapítható, hogy a módosított Bjerrum modell írja le legjobban a valóságot, a hulladék alakváltozási viselkedését ismerve, illetve a regressziós mutatók szerint is. A további számításokhoz a 3. táblázat értékei vehetők figyelembe.

A talajokkal összehasonlítva, megállapítható, hogy a hulladéknak jelentős az azonnali alakváltozása, amely természetesen a telítetlenség következménye is lehet, de sokkal inkább az összenyomható "szilárd szemcsék" jelenlétével magyarázható. Természetesen a kúszás is jelentős a vizkózus tulajdonság

### 3. Eredmények

miatt, a hosszú idejű kúszás magyarázata a degradáció. A süllyedés összetevőinek arányát a 4. táblázat tartalmazza.

3. táblázat A konszolidációs jellemzők átlagértékei

Minta	degradációs fok	konszolidációs tényező ( $c_v$ ) ( $m^2/s$ )	kúszási index ( $C_\alpha$ ) (-)
S-1	2	3,20E-08	0,00283
S-2	3	4,58E-08	0,00273
S-3	4	7,89E-08	0,00156

4. táblázat A süllyedés összetevőinek aránya (átlag)

kezdeti (azonnali) összenyomódás	konszolidációs összenyomódás	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúszás)
$v_0 / v$	$v_2 / v$	$v_2 / v$
0,47	0,42	0,11

#### *A vízáteresztő-képességi együttható visszaszámítása*

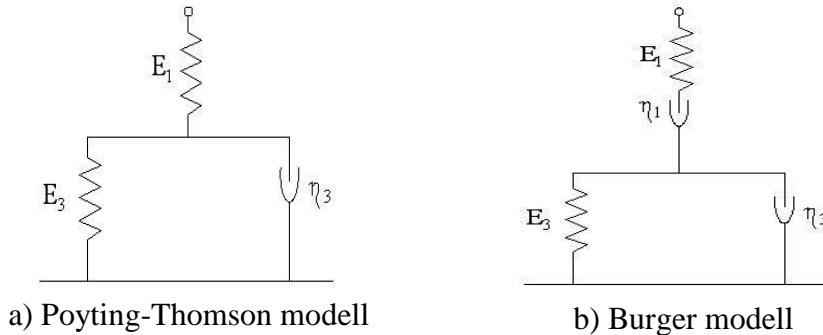
A konszolidáció elméletéből ismert, hogy a konszolidációs együttható ismeretében a vízáteresztőképességi együttható visszaszámítható (5. táblázat). Az eredményekből megállapítható, hogy a függőleges normál feszültség növelésével (a minta összenyomásával) csökken a  $k$ -tényező értéke, a degradációs fok növekedésével kisebb mértékben szintén csökken, bár itt az összefüggés nem teljesen egyértelmű, de tendenciájában igaz (best trend). A terhelés függés a minta összenyomásának következménye, a degradációs fok függés a mechanikai aprózódás következménye.

5. táblázat A vízáteresztő-képességi együttható [ $m/s$ ] változása

terhelés ( $kN/m^2$ ) \ minta jele	S-1	S-2	S-3
5	2,21E-08	4,29E-08	3,16E-08
10	2,67E-08	3,56E-09	1,06E-08
20	na.	5,14E-09	4,66E-09
40	7,44E-09	8,64E-10	2,08E-09
80	2,55E-09	9,29E-10	2,31E-09
160	4,22E-10	5,74E-10	4,74E-10
320	2,58E-10	7,67E-11	2,02E-10
640	4,50E-11	6,00E-12	8,36E-11

### 3.3. A vizsgált hulladék alakváltozásának reológiai modellezése

Az elemi idealizált anyagmodellekből (rugalmas, képlékeny, viszkózus) összeállított modellrendszerrel várható a valóságos viselkedés közelítése. Ezek közül a viszkoelasztikus modell alkalmazása indokolt. A végtelen sok modellből, a jelenséget a legegyszerűbben, a feladatnak megfelelő pontossággal leíró modellt kell választani. E választásban segít a Müller-féle osztályozás. A mérési eredmények és a lejátszódó folyamatok ismeretében, az I. osztályba sorolt Poyting-Thomson („PT”) és a IV. osztályba sorolt Burger-modell („BU”) (5. ábra) tűnik jó választásnak.



5. ábra Reológiai modellek

A kúszást leíró válaszfüggvények feszültségugrásra, a következők:

A „PT” modell esetén: 
$$\varepsilon(t) = \sigma_1 \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_3} \cdot e^{-\frac{E_3 t}{\eta}} \right). \quad (5)$$

A „BU” modell esetén: 
$$\varepsilon(t) = \sigma_1 \left( \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_3} \cdot e^{-\frac{E_3 t}{\eta_2}} \right). \quad (6)$$

6. táblázat A hulladékminták „PT” és „BU” modell állandói

	modell „PT”			modell „BU”			
	E <sub>1</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>3</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	η (Ns/m <sup>2</sup> )	E <sub>1</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>3</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	η <sub>1</sub> (Ns/m <sup>2</sup> )	η <sub>2</sub> (Ns/m <sup>2</sup> )
S 1	(101) – 569	(1267)- 20928	(12214)- 4.25E+6	(101)- 570	(1337)- 29965	(4.40E+6)- 2.06E+8	(7720)- 222367
S 2	(73) – 661	(694)- 15636	(165607) 3.04E+6	(74)- 614	(988)- 33462	(6.68E+6)- 4.92E+8	(32622)- 326783
S 3	(183)- 759	(3256)- 20745	(71326)- 679807	(184)- 761	(1763)- 23030	(6.18E+6)- 2.36E+8	(16595)- 389163

A modell állandóit, az anyagállandókat meghatároztam (6. táblázat). Megállapítható, hogy a vizsgált jelenség megfelelő pontossággal leírható az alkalmazott két viszkoelasztikus modellel. A két modell közül a Burger-modell a mért adatsort jobban közelíti, a regressziós együttható 0,98 feletti mindkét esetben. Ha a fizikai (biológiai-kémiai) folyamatokat is figyelembe vesszük az elemzésnél, az mondható, hogy a rövid idejű alakváltozást a Burger-modell pontosabban modellezi. Viszont a hosszú idejű viselkedésre a Poyting-Thomson – modell ajánlható, hiszen a mozgások véges értékűek.

#### **3.4. Hulladékhalom alakváltozásának talajmechanika alapú modellezése**

A modellezés eszközéül a Plaxis 2D FEM programot választottam, így ezt az alapvetően talajok és szerkezetek vizsgálatára kifejlesztett programot próbáltam adaptálni. A modellezés kétdimenziós, mivel az alakváltozások becsléséhez, figyelembe véve a bemenő adatok megbízhatóságát és pontosságát, a 2D modell is elegendő pontosságúnak bizonyult. A feladat nem szokványos, így egy prekonceptión alapuló modellezési munkafolyamat útját jártam.

##### *1. A feladat előkészítése*

A hulladékfizikai jellemzők és geometriai ismeretek gyűjtése és rendszerezése. Szükséges az adatok megbízhatóságuk szerinti elemzése, és a modell validálásánál célszerű a kevésbé megbízható adatokat a változó paraméternek tekinteni.

##### *2. A modellezési koncepció (munkahipotézis) felállítása*

Az adott feladat vizsgálható (közelítőleg) a fenti, talajmechanikai alapú programmal. De egy ilyen véges elemes módszert alkalmazó programot eszköznek kell tekinteni, és a hulladék sajátosságaihoz kell igazítani.

Legfontosabb eldöntendő kérdés az anyagmodell megválasztása. A döntést befolyásolja, hogy az adott anyagmodell jól közelíti-e a vizsgált anyag viselkedését, mennyire ismert, illetve milyen mért adatokkal rendelkezünk. A MC modell mellett szól a könnyen előállítható (jól ismert vizsgálatokkal mérhető), egyszerű bemenő adatok és a talajokon nyert sok összehasonlító tapasztalat. A HS modell fejlettebb, a talajok alakváltozását a tapasztalatok szerint pontosabban leírja. A SSC modell mellett szól, hogy a kúszást is figyelembe vesz, így a gyengébb talaj-hulladék analógia esetén is alkalmazható. Természetesen ez az alkalmazhatóság a lerakott hulladék összetételétől is függ. Mivel települési szilárd hulladékot vizsgáltam, megállapításaim erre vonatkoznak.

##### *3. Modell adatrendszer felépítése*

Az előző két bekezdés alapján a következő bemenő adatokkal dolgoztam:

- A geometria a terv szerinti, egyszerűsítésekkel, középmetset vizsgálata.



### 3. Eredmények

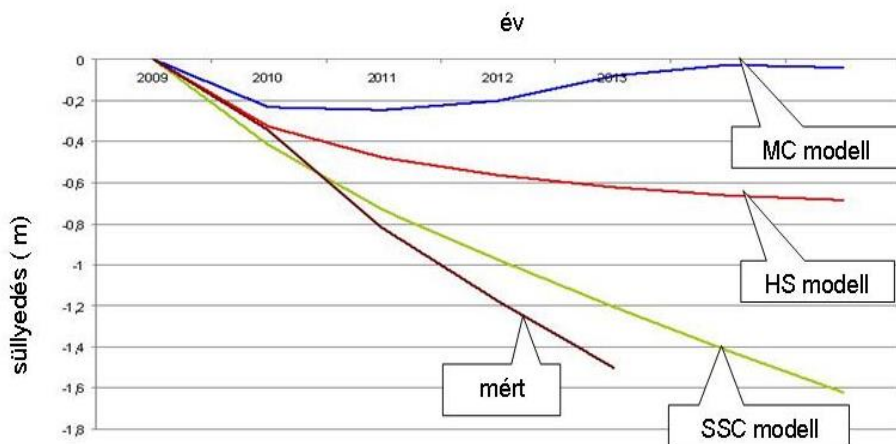
- Választott anyagmodellek:
  - Mohr –Coulomb (MC), (lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny),
  - Felkeményedő (HS),
  - Puha talajmodell kúszással (SSC).
- A degradációs fokokhoz meghatározott hulladékfizikai jellemzők.

#### 4. Numerikus számítások elvégzése

A numerikus számítást a gép elvégzi, a valóságot jobban közelíti a modellezés, ha a degradációnak megfelelően rétegekre osztjuk a hulladékdombot, és a rétegeket az idő előrehaladtával léptetjük a következő fázisba, mindig az adott degradációs fokhoz és mélységhez tartozó fizikai jellemzőket adunk meg. Ezután el kellett végezni a paraméter érzékenység vizsgálatát.

#### 5. A modell validálása, az eredmények értékelése

A számítással meghatározott süllyedéseket, összehasonlíthattam a lerakón mért értékekkel, és ezen ismeretek birtokában validálni tudtam mind a három modellt. Az eredmények értékelésekor, a magasabban lévő süllyedésmérő pontok mért adataihoz (átlagához) viszonyítottam a további számítás értékeit, kontroll vizsgálatot végeztem. A HS és a SSC modellek jellegükben visszaadták a valóságot. A MC modell jellegében sem írja le a valóságot a hulladékdomb felszíni, szélső pontjaiban (6. ábra).



6. ábra A különböző modellek kontroll vizsgálatának eredményei

A SSC modell a legpontosabb, mert figyelembe veszi a kúszást is. Így a lerakott hulladék alakváltozása az idő függvényében jól modellezhető, annak ellenére, hogy a süllyedés összetevőinek fizikai tartalma más a talaj és a hulladék esetén. A 7. táblázatban gyűjtöttem össze a validálás utáni hulladékfizikai jellemzőket.

### 3. Eredmények

7. táblázat A puha modell kúszással (SSC) validált paraméterei

réteg	$\lambda^*$ [-]	$\kappa^*$ [-]	$\mu^*$ [-]	k [m/s]
1. degradációs fok	0,01660	0,018500	0,00002658	1,5E-7
2. degradációs fok	0,01547	0,016280	0,00002975	1,0E-7
3. degradációs fok	0,01449	0,012230	0,00003341	9,0E-8
4. degradációs fok	0,01195	0,008174	0,00003725	7,0E-8
5. degradációs fok	0,10000	0,006700	0,00003951	5,0E-8
alap réteg	0,15000	0,016000	0,00400000	1,0E-10

#### 6. A modell alkalmazhatósága, felhasználása

A validált modellel a lerakó hosszú idejű mechanikai viselkedése vizsgálható, ennek gyakorlati jelentősége van, egyrészt az önsúly hatására bekövetkező további mozgások kapcsán, másrészt egy adott időpillanatban bekövetkező teherfelvitel (területhasznosítás következtében) hatására létrejövő alakváltozás becsülhető, illetve az állékonyság vizsgálható.

#### 4.5. Hulladékhalomhoz kapcsolódó hidraulikai modellezés

A vízgyűjtő rétegek vízáramlási kérdéseinek modellezéséhez is szükséges a víztartási görbéjük meghatározása. Ez a szemcsés talajt alkotó frakciók víztartási görbéinek ismeretében számítással is lehetséges, az Imre-Genovese modell segítségével. A keverékek szemeloszlása a frakciók szemeloszlásának súlyozott összege:

$$S_{NJ}(d) = \sum_{k=1}^i x_k S_k(d), \quad (7)$$

ahol:  $x_k$  a k-adik frakció gyakorisága.

Hasonló megállapítás igaz a keverékek víztartási görbéjére is :

$$w_{NJ}(u_a - u_w) = \sum_{k=1}^i c_k w_k(u_a - u_w), \quad (8)$$

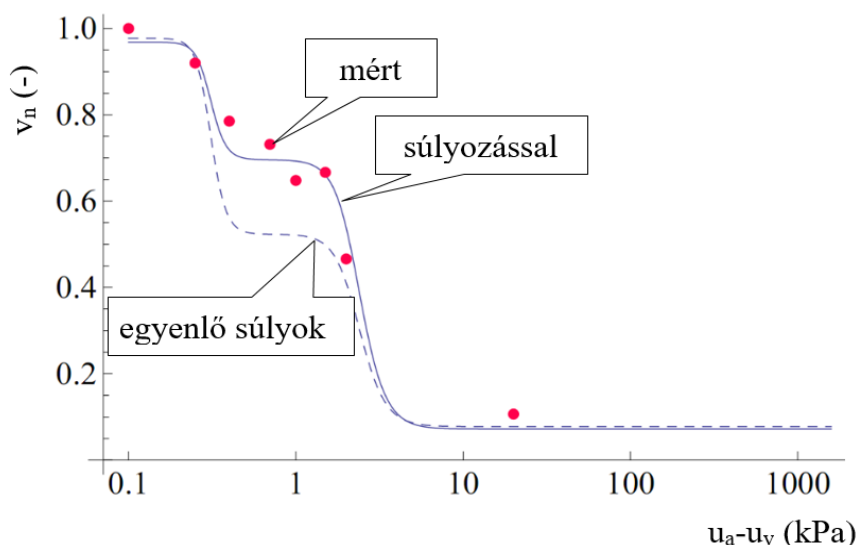
ahol  $c_k$  a súly együttható:  $\sum_{k=1}^N c_k = 1, \quad c_k \geq 0.$

Feltételezések továbbá, hogy:

- 1) optimális A=2/3 keverékek esetén a súlyok  $c_k$  ( $k=1 \dots N$ ) egyenlőek,
- 2) a frakciók víztartási görbe modellje egy trilineáris függvény szemilogaritmikus léptékben,
- 3) a frakciók víztartási görbéinek nem konstans részei nem fedik egymást.

### 3. Eredmények

Megvizsgáltam a  $c_k$  – súlyok változtatásának a modell pontosságára gyakorolt hatását, és kerestem az optimális súlyozást. Ezt úgy végeztem, hogy a talaj keverékek különböző súlyozással számított víztartási görbe pontjaira, a jól ismert van Genuchten függvényt illesztettem, amelyet a keverékek mért víztartási görbéire illesztett, van Genuchten függvényvel hasonlítottam össze. A súlyok változtatásával a modell pontossága javult (7. ábra). A legjobb regresszió keresésével, a súlyok a 8. táblázat szerint alakultak.



7. ábra Az 1-4 talajkeverék víztartási görbéje az azonostól eltérő súlyozással

8. táblázat A talaj keverékek víztartási görbéinek frakciókra vonatkozó súlyozása

talaj keverékek jele	$c_k$ (keverék első tagjára)	$c_k$ (keverék második tagjára)
1-2:	0,29	0,71
1-3:	0,10	0,90
1-4:	0,30	0,70
2-3:	0,40	0,60
2-4:	0,34	0,66
3-4:	0,43	0,57

Megállapítható, hogy a vizsgált keverékekre alkalmazható az Imre-Genovese modell, amelynek pontossága javul az azonostól eltérő súlyozással. Átlagosan a durvább frakciót a féltől kisebb súllyal (átlagosan 0,31), míg a finomabb frakciót féltől nagyobb (átlagosan 0,69) súllyal számításba véve.

## 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### 1. A vizsgált hulladék kompressziója

Laboratóriumi vizsgálati eredmények alapján kimutattam, hogy a degradációs fokával is jellemzett hulladék, önsúlya és a külső mechanikai teher hatására, olyan függőleges összenyomódást szenved, amely az alkalmazott normál feszültségtől nem lineárisan függ. Felkeményedik a hulladék, a degradáció következményeként pedig változnak a teher - alakváltozás kapcsolatát leíró anyagtörvény állandói. E változás megadása a degradációs fokhoz is köthető, mivel annak növekedésével merevebbé válik a hulladék.

A kompressziós görbék degradációs fokuk szerint különböző paraméterű logaritmikus függvénnyel jól közelíthető:

A 2. degradációs fok esetén:  $\varepsilon = 0,0960 \ln(\sigma) - 0,0311$ .

A 3. degradációs fok esetén:  $\varepsilon = 0,0708 \ln(\sigma) + 0,0547$ .

A 4. degradációs fok esetén:  $\varepsilon = 0,0587 \ln(\sigma) + 0,0619$ .

A terhelési szakaszonként linearizálva, az előterhelés utáni szakasszal számolva és azt extrapolálva, a hulladék degradációs foka szerint az összenyomódási modulus ( $\sigma$  [kN/m<sup>2</sup>]):

A 2. degradációs foknál:  $E_s = 9,734 \sigma - 322,980$  vagy,  $E_s = 9,022 \sigma$ .

A 3. degradációs foknál:  $E_s = 12,085 \sigma - 269,940$  vagy,  $E_s = 11,523 \sigma$ .

A 4. degradációs foknál:  $E_s = 13,099 \sigma - 29,463$  vagy,  $E_s = 13,127 \sigma$ .

Megállapítottam, hogy célszerű (és a szakirodalomban szinte kizárólagosan alkalmazott), egy, vagy kétféle (friss és degradálódott) hulladék modell helyett, az eltérő degradációs fokú hulladékot más-más állandókkal jellemezhető anyagegyenlettel leírni, így a kompresszió leírása pontosabbá válik.

A módosított kompresszió vizsgálat eredményeit felhasználva kimutattam, hogy a degradációs fok, illetve a terhelés növekedésével csökken a Poisson-tényező. Az alakváltozások döntő része (több mint 90 %) maradó, reológiai értelemben irreverzibilis. Histerézis hatás pedig nem volt mérhető.

### 2. A vizsgált hulladék konszolidációja

Különböző degradációs fokú, kvázi telített hulladék minták, módosított ödométeres vizsgálatának eredményei alapján kimutattam, hogy a vizsgált hulladék önsúlya és a külső mechanikai teher hatására, az idő függvényében olyan függőleges összenyomódást szenved, amely a talajmechanikában alkalmazott konszolidációs modellek módosításával, jelentősen eltérő paraméterekkel ugyan, de jól leírható.

#### 4. Új tudományos eredmények

A Terzaghi és a Bjerrum konszolidációs modell módosításával, a kezdeti összenyomódás hozzáadása mellett, a regressziós vizsgálat, és a kúszás miatt, az alábbi módosítással javaslom az összefüggés használatát:

$$v(t) = v_0 + v_1(t) + v_2(t) = v_0 + v_{1,\infty} \left[ 1 - \int_0^{2H} \frac{u(c_v, t, x) dx}{2H\sigma} \right] + C_\alpha \frac{2H}{1+e_0} \log \frac{t+t_0}{t_0}.$$

A konszolidációs modellek állandóit, a degradációs fok és a terhelés, függvényében, továbbá a süllyedés összetevőinek arányát meghatároztam és közöltem.

##### 3. A vizsgált hulladék alakváltozásának reológiai modellezése

Laboratóriumi vizsgálattal kimutattam, hogy a hulladékminták alakváltozása viszkoelasztikus reológiai modellekkel megfelelően leírható. A modellezés pontosabbá válik, ha a hulladék degradációs foka szerint történik, a rövid idejű viselkedést a hulladékokra eddig nem alkalmazott Burger- modell pontosabban leírja, mint a hosszú idejű viselkedés leírására eddig ajánlott Poyting-Thomson modell. A Burger-modell, kúszást leíró válaszfüggvénye feszültségugrásra, a következő:

$$\varepsilon(t) = \sigma_1 \left( \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_3} \cdot e^{-\frac{E_3 t}{\eta_2}} \right).$$

A modell állandóit, a terhelés és a degradációs fok függvényében, meghatároztam és közöltem. Az adatok elemzéséből megállapítottam, hogy a degradációs fok és a terhelés függvényében egyértelmű tendencia érvényesül a modell anyagállandói között. A hulladék a degradációja során és a terhelés hatására alakváltozás szempontjából merevebbé válik.

##### 4. Hulladékhalom alakváltozásának talajmechanika alapú modellje

Olyan új talajmechanika alapú modellezési folyamatot dolgoztam ki, amelynél a véges elemes módszer alkalmazó rutin geotechnikai programot (Plaxis), általános eszköznek tekintettem, és a hulladékhalom sajátosságaihoz igazítva, adaptáltam. A feladat nem szokványos, így egy prekonceptiós alapuló modellezési munkafolyamat szükséges lépéseit is meghatároztam. A számításokhoz felhasználtam az ödométeres- és egyéb kiegészítő vizsgálataim eredményeit. Helyszíni süllyedésmérésekkel validáltam, ellenőriztem a számítást. Így a kidolgozott modellezési munkafolyamat, a lerakó egyedi sajátosságainak figyelembe vételével, bármely más hulladékdombra alkalmazható.

Az anyagmodell céljára a puha modell kúszással (SSC) bizonyult a legjobbnak, így ezt ajánlom. A modell paramétereit meghatároztam és

#### 4. Új tudományos eredmények

---

közöltem. A korábbi modellezésekhez képest javult a számítás pontossága azáltal, hogy a hulladékfizikai paramétereket a degradációs fok és a mélység (nyomás) függvényében vettem fel és az idő előrehaladtával léptettem a következő degradációs fázisba. A hulladékdomb mélység szerinti felosztása hűen követi a lerakás réteges terítését, a degradációs fokok szerinti hulladékfizikai jellemzők változtatása pedig a degradációs folyamatot.

#### 5. A hulladékhalom hidraulikai modelljének pontosítása

Az alsó és felső lezáró és vízgyűjtő rétegek hidraulikai vizsgálatához, a víztartási függvényük számítását pontosítottam. Az általános felhasználhatóság érdekében, minta szemcsés talajokat és ezek keverékeit vizsgáltam. Laboratóriumi kísérletekkel és a módosított modell illesztésével igazoltam, hogy az optimális ( $A=2/3$ ) szemcsés talaj keverékek ( $d=2,0 - 0,5$  mm) víztartási függvényei – az egyes frakciók víztartási függvényeinek ismeretében - számítással történő előállítása, súlyozással pontosítható.

A vizsgált frakciók mért víztartási függvényeiből, a szemeloszlás ismeretében, az Imre - Genovese modellel, a keverékek víztartási függvénye, számítással is meghatározható. Az alkalmazott modell szerint, a keverékek víztartási függvénye a frakciók víztartási függvényének összege:

$$w_{NJ}(u_a - u_w) = \sum_{k=1}^i c_k w_k(u_a - u_w),$$

ahol:  $c_k$  a súly együttható és  $\sum_{k=1}^N c_k = 1$ ,  $c_k \geq 0$ .

A korábbi feltételezések közül egyet, miszerint a  $c_k$  súlyok ( $k=1 \dots N$ ) egyenlők, pontosítottam. Megvizsgáltam a  $c_k$  – súlyok változtatásának a modell pontosságára gyakorolt hatását, és kerestem az optimális súlyozást. Megállapítottam, hogy a durvább frakciót a féltől kisebb súllyal (átlagosan 0,31), míg a finomabb frakciót féltől nagyobb (átlagosan 0,69) súllyal számításba véve, a modell pontossága mintegy 20% - kal javítható.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatásom fő célja, a települési szilárd hulladékból épülő dombok alakváltozásának modellezése és a hidraulikai modell pontosítása volt. Azonban a hulladéklerakók kapcsán egyéb kérdések is modellezendők lehetnek, e tekintetben is hasznos lehet a kutatási munkám, hiszen a fenti kérdésekre is választ adó modellek a mechanikai-, hidraulikai- és biodegradációs modellek szorzataként állíthatók elő

A hulladékból épülő domb alakváltozásának modellezésére a következő utat jártam. A hulladékból vett minták, mivel különböző mélységből származtak a lerakási technológia következtében, különböző korúak voltak. A hulladék kora, a végbemenő fizikai-kémiai-biológiai átalakulása miatt, lebomlási fokot is jelent, amit a degradációs fokkal lehet kifejezni. A mintákat degradációs fok szerinti átlagmintákká rendeztem és így hajtottam végre a módosított ödométeres vizsgálatot, saját fejlesztésű berendezéssel. A mérés eredményeit kiértékeltem, talajmechanikai - és reológiai alapú modellek segítségével is. A kapott hulladékfizikai jellemzőket közöltem, amelyek egy későbbi tervezés, akár a vizsgált, akár más hasonló települési szilárd hulladéklerakó domb esetén, kiindulási adatként szolgálhatnak. A PRHK első ütemének hulladékdombját végeeselemes módszert alkalmazó geotechnikai programmal modelleztem, kidolgoztam a számítógéppel segített tervezés egy lehetséges útját. A korábbi modellezésekhez képest javult a számítás pontossága azáltal, hogy a domb mélység szerinti felosztása hűen követi a lerakás réteges terítését, a degradációs fokok szerinti hulladékfizikai jellemzők változtatása, pedig a degradációs folyamatot. A számítás kontrollját a lerakó saját, dombfelszíni, geodéziai mérései jelentették. A modellezési módszer általánosítható, de figyelembe kell venni a lerakók egyedi sajátosságait is. A modell kitér a lerakó alatti altalaj süllyedésére is. A jövőben, a PRHK második üteme kapcsán célszerű az aljzatsüllyedést is mérni, amire lehetőség lesz, hiszen a mérőcső rendszer kiépítésre került, célszerű lenne a hulladék domb belsejét is ilyen módon mérni, hogy ne csak a felszíni deformációját ismerjük.

A hidraulikai modell fejlesztése kapcsán, a modellezés alapját képező víztartási görbe, függvény meghatározására koncentráltam. Egyelőre a segéd szerkezetek (vízgyűjtő) kapcsán, de távlati célként, a lerakott hulladék víztartási görbéje is meghatározandó, így az alakváltozások modellezése is pontosítható. Pontosítottam a szemcsés talajkeverékek víztartási görbéjének számításával történő előállítását, az őket alkotó frakciók víztartási függvények ismeretében. Az értekezésemnek ez a része egy kis lépésnek tekinthető, a cél egy olyan eljárás kidolgozása, amelynek segítségével a talajok szemeloszlási entrópiájának ismeretében, víztartási görbéjük meghatározható közvetlen mérés nélkül is. Így a kutatás következő lépése az ideálistól eltérő keverékek vizsgálata lehet.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Céлом a biztonságosabb, kisebb környezeti kockázatot jelentő és gazdaságosabb hulladék-elhelyezés elősegítése volt. Ez természetes módon kapcsolódik az agráriumhoz is, hiszen az elhelyezett hulladékok jelentős része az agrárium közvetlen termékeiből származnak, vagy azokhoz kapcsolódó csomagoló anyagok.

Egy települési szilárdhulladék lerakóból (PRHK) vett hulladékminták laboratóriumi méréseivel, meghatároztam a hulladékfizikai jellemzők változását, a degradáció és a terhelés függvényében. Ezen ismeretek birtokában numerikus számítással modelleztem a teljes lerakó alakváltozását az időben, szimulálva a lerakás és a degradáció ütemét, a helyszíni mérések adataival a modellt validáltam. A hidraulikai modell kapcsán, a vízelvezető- és a lezáró rétegek vizsgálatával foglalkoztam. Ezen belül is a sok szempontból kulcsfontosságú víztartási görbe meghatározására fókuszáltam.

Az értekezésem döntő részben saját mérési eredményeimre támaszkodik. A hulladékminták ödométeres vizsgálatához saját fejlesztésű, új laboratóriumi eszközt és mérési módszert alkalmaztam. A víztartási függvény mérésének laboratóriumi módszerét tovább gondoltam, adaptáltam, megújítottam.

Együttműködtem társkutatókkal, és így az elért eredmények a mechanikai modellezés tekintetében teljesnek mondhatók, a hidraulikai modell kapcsán egy újszerű lépésnek a komplex megoldás felé. Az alakváltozások térben és időben történő leírása természetesen csak bizonyos egyszerűsítések, idealizálások mellett lehetséges, hiszen a befolyásoló faktorok száma rendkívül nagy, így egy olyan utat kerestem amely elfogadható pontosság mellett, egyszerű számítást eredményez, hiszen gyakorlati szempontból általában ez a legkedvezőbb.

Természetesen a kutatási téma nincs lezárva, ezt folytatni érdemes. Célszerű más lerakók adataival is elvégezni a modellezés folyamatát, így a lerakók egyedi sajátosságainak hatását megismerni. A víztartási kísérleteket célszerű az optimálistól eltérő keverékekre is kiterjeszteni és a szemeloszlást a szemeloszlási entrópia felhasználásával értelmezni.

Az értekezés felhasználható a beszállítható hulladékmennyiség becsléséhez, a lerakó lezárásának pontosabb megtervezéséhez, illetve egy esetleges utólagos területhasznosítás során az alapozás tervezéséhez alapadatokat szolgáltat.

Személyes céлом volt a különböző tudományterületek eredményeink áttekintése, felhasználása, adaptálása, az azonos, vagy hasonló fogalmak egységes értelmezése, így alapképzettségemet szélesítő tudás megszerzése. Ezt a választott téma jól szolgálta, hiszen az alapvetően interdiszciplináris.



## 7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

### *Lektorált cikk világnyelven*

1. **Firgi, T.**, Telekes, G. (2016): Modelling the deformation of a MSW landfill based on tests, *Procedia Engineering*, Volume 161, Elsevier, pp. 318-323.
2. Tang, A.M., Askarinejad, A., Brencic, M., Cui, Y-J., Diez, J., Dijkstra, T., **Firgi, T.**, Gajewska, B., Gentile, F., Grossi, G., Jommi, C., Hughes, P., Kehagia, F., Koda, E., Maat, H., Lenart, S., Lourenco, S., Oliveira, M., Osinski, P., Springman, S., Stirling, R., Toll, D., Van Beek, V. (2018): Atmosphere - vegetation - soil interactions in a climate change context; changing conditions impacting on engineered transport infrastructure slopes in Europe, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 51, pp. 156-168. (IF: 1.102)

### *Lektorált cikk magyar nyelven*

1. Imre, E., Rajkai, K., **Firgi, T.**, Havrán T., Trang P., Telekes G., Lőrincz J. (2008): A homokfrakciók és homokkeverékek víztartási görbéje közti kapcsolat, *Hidrológiai Közlöny* 88:(5), 52-56. o.
2. Imre, E., Kovács, M., Trang, P., **Firgi, T.**, Telekes, G., Kovács, K. (2012): A hazai hulladéklerakó dombok felmérése energetikai felhasználás céljából, *Műszaki Ellenőr* 1., 39-42. o.
3. **Firgi, T.** (2015): Települési hulladék domb alakváltozás vizsgálata, *Economica* 8:(3), 95-104. o.
4. **Firgi, T.**, Telekes, G. (2017): Települési szilárd hulladékból épülő dombok, *Magyar építéstechnika*, 2017/8-9., 34-37. o.
5. Imre, E., **Firgi, T.** (2018): A víztartási görbe talajmechanikai alaklamazása, *Hidrológiai Közlöny* 98(4), 24-33. o.
6. **Firgi, T.**, Keszezné Say, E., Telekes, G. (2018): A geotechnika területén a talajok víztartási függvényének alkalmazási köre és laboratóriumi mérésének tapasztalatai, *Műszaki Szemle* 72, EMT, 8-17. o.