



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Hulladékhalmozatok modellezése

Doktori (PhD) értekezés

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

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	10
1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége.....	10
1.2. Célkitűzések.....	10
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	12
2.1. A hulladéklerakás szerepe a hulladékgazdálkodásban.....	12
2.2. Mechanikai modell.....	16
2.2.1. <i>Állékonysági vizsgálatok.....</i>	16
2.2.2. <i>Alakváltozás vizsgálata.....</i>	20
2.3. Hidraulikai modell.....	29
2.4. Biológiai- és komplex modell.....	41
2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése.....	44
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	46
3.1. Kezdeti feltételezések.....	46
3.2. Vizsgálati helyszínek.....	46
3.3. Vizsgált anyagok.....	49
3.4. Vizsgálati módszerek, eszközök.....	54
3.4.1. <i>Módosított kompressziós vizsgálat.....</i>	54
3.4.2. <i>Víztartási görbe mérése.....</i>	60
3.4.3. <i>Egyéb mérések.....</i>	68
4. EREDMÉNYEK.....	70
4.1. A vizsgált hulladék kompressziója.....	70
4.2. A vizsgált hulladék konszolidációja.....	80
4.3. A vizsgált hulladék alakváltozásának reológiai modellezése.....	92
4.4. Hulladékhalom alakváltozásának talajmechanika alapú modellezése.....	94
4.5. Hulladékhalomhoz kapcsolódó hidraulikai modellezés.....	109
4.6. Új tudományos eredmények.....	113
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	116
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	117

7. SUMMARY	118
8. MELLÉKLETEK	119
M1 Irodalomjegyzék.....	119
M2 Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk listája	127
M3 Ábrák jegyzéke	130
M4 Táblázatok jegyzéke.....	137
M5 Mérési jegyzőkönyvek.....	140
M6 Konzolidációs modellek illesztése („T” és „B” modell)	169
M7 Reológiai modellek illesztése („PT” és „BU” modell)	175
M8 Víztartási görbe illesztése	181
M9 PRHK méréseinek rendszerezése	183
M10 A lerakó alatti talaj rétegződése.....	184
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	185

JELÖLÉSJEGYZÉK

a	elsődleges összenyomódás tényezője	[m ² /N]
A	keverési arány	[-]
A _t	minta keresztmetszeti területe	[m ²]
b	másodlagos összenyomódás tényezője	[m ² /N]
c	kohézió	[N/m ²], [kN/m ²], [kPa]
C _c	kompressziós index	[-]
c _c	konzolidációs együttható	[m ² /d]
C ^h _{α,ε}	az érett hulladékra jellemző másodlagos konszolidációs együttható	[-]
c _k	súly együttható	[-]
C _r	duzzadási index	[-]
C ^r _{α,ε}	a friss hulladékra jellemző másodlagos konszolidációs együttható	[-]
c _v	konzolidációs tényező	[m ² /s]
C _α	kúszási (másodlagos konszolidációs) index	[-]
C _{α,ε}	másodlagos konszolidációs együttható	[-]
d	szemcse átmérő	[mm]
E	rugalmassági modulus	[N/m ²]
e ₀	lerakott hulladék kezdeti hézagtenyezője	[-]
E ₅₀	a határoló feszültség-függő rugalmassági modulus	[kPa]
E _s vagy E _{oed}	összenyomódási modulus	[kN/m ²]
E _s (σ)	előterheléstől függő összenyomódási modulus	[kN/m ²]
E _{ur}	tehermentesüléshez tartozó rugalmassági modulus	[kPa]
H	szivárgási hossz	[m]
h	minta magassága	[m]
H ₀	feltöltés magassága	[m]
k	vízáteresztő-képességi együttható	[m/s], [cm/s]

K	abszolút áteresztőképesség	[m ²]
K _{eff}	effektív áteresztőképesség	[m ²]
K _{rel}	relatív áteresztőképesség	[-]
k(s) vagy k(Ψ)	vízáteresztő-képességi függvény	[m/s], [cm/s]
L	minta hosszúsága	[m]
m	felkeményedési kitevő	[-]
m ₂ ^w	tározási jellemző	[kPa ⁻¹]
m _d	száraz talaj tömege	[g]
m _n	nedves talaj tömege	[g]
m _s	szilárd rész tömege	[g]
m _v	víz tömege	[g]
n	nedves talaj tömege	[g]
p ^{ref}	referencia határoló feszültség	[kPa]
Q	időegységre eső folyadékáramlás térfogati mennyiség	[m ³ /s]
S	átesett tömeg	[m%]
s _k	időfüggő süllyedés	[m]
s _{k,h}	hosszú idejű másodlagos konszolidációs süllyedés	[m]
s _{k,r}	rövid idejű másodlagos konszolidációs süllyedés	[m]
s _ö	teljes (összegzett) süllyedés	[m]
s _s	terhelésfüggő süllyedés	[m]
s _Z	száraz talaj tömege	[g]
t	idő	[s]
t ₀	idő paraméter	[s]
t _{1,r}	a rövid idejű süllyedések kezdete	[s]
t _{2,r}	a rövid idejű süllyedések vége	[s]
t _{i,r}	a feltöltés óta eltelt idő	[s]
t _κ	a konszolidációs fokhoz tartozó idő	[s]

T_s	térfogattömeg	[g/cm ³]
u_a	póruslevegőnyomás	[kPa]
$(u_a-u_v)_e$	levegő belépési küszöbérték	[kPa]
$(u_a-u_v)_r$	reziduális víztartalom szívófeszültsége	[kPa]
u_a-u_w vagy s	szívófeszültség, tenzió	[kPa]
u_w	pórusvíznyomás	[kPa]
v	térfogati víztartalom	[%]
V	minta össztérfogata	[cm ³]
$v(t)$	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	[-]
v_r	reziduális térfogati víztartalom	[%]
v_s	telítési térfogati víztartalom	[%]
V_v	mintában lévő víz térfogata	[cm ³]
w	víztartalom	[%]
<i>Görög betűk:</i>		
Θ	normalizált nedvességtartalom	[-]
Θ_w	nedvességtartalom térfogatszázalékban	[%]
Θ_s	telített nedvességtartalom	[%]
Θ_r	reziduális nedvességtartalom	[%]
Θ_t^n	nedvességtartalom nedves tömeg alapon	[%]
Θ_t	nedvességtartalom száraz tömeg alapon	
Ψ_g	gravitációs potenciál	[kPa]
Ψ_m	mátrixpotenciál	[kPa]
Ψ_p	nyomáspotenciál	[kPa]

Ψ_s	ozmózispotenciál	[kPa]
Ψ_t	talajnedvesség összpotenciálja	[kPa]
γ	térfogatsúly	[kN/m ³]
γ_d	száraz térfogatsúly	[kN/m ³]
γ_t	telített térfogatsúly	[kN/m ³]
γ_v	víz térfogatsúlya	[kN/m ³]
Δh	minta összenyomódása	[m]
Δh_0	minta kezdeti összenyomódása	[m]
ΔP	normál feszültség növekmény	[N/m ²], [kN/m ²], [kPa]
ΔP_L	minta hosszában létrejövő nyomásesés	[Pa]
$\Delta \varepsilon$	fajlagos alakváltozás változása	[-]
ε	fajlagos alakváltozás	[-]
ε'	alakváltozási sebesség	[m/s]
η	dinamikai viszkozitás	[Ns/m ²]
λ/b	másodlagos összenyomódási arány	[d ⁻¹]
ρ	térfogatsűrűség	[t/m ³]
ρ_d	száraz térfogatsűrűség	[t/m ³]
ρ_t	telített térfogatsűrűség	[t/m ³]
σ_h vagy σ'	hatékony normál feszültség	[N/m ²], [kN/m ²], [kPa]
σ_x vagy σ_y	vízszintes normál feszültség	[N/m ²], [kN/m ²], [kPa]
σ_z	függőleges normál feszültség	[N/m ²], [kN/m ²], [kPa]
$\sigma - u_a$ vagy σ''	nettó normál feszültség	[kPa]
ν	Poisson tényező	[-]
φ	belső súrlódási szög	[°]

Rövidítések:

B	Bjerrum konszolidációs modell
BAT	legjobb elérhető technológia
BU	Burger reológiai modell
DV	hasznosítható vízkészlet
HS	felkeményedő talajmodell
HV	holtvíztartalom
hy	higroszkóposság
MC	Mohr-Coulmb talajmodell (lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny)
MTA-TAKI	Magyar Tudományos Akadémia, Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet
PRHK	Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ
Pt	összporozitás
PT	Poyting-Thomson reológiai modell
SSC	kúszó puha talajmodell
T	Terzaghi konszolidációs modell
VK _{min}	minimális vízkapacitás
VK _{sz}	szabadföldi vízkapacitás
VK _t	teljes vízkapacitás

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A környezetgazdálkodás témaköréhez tartozó hulladékgazdálkodáshoz, ezen belül a települési szilárd hulladék ártalmatlanításának műszaki fejlesztéséhez kíván hozzájárulni az értekezésem, célom 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 (Barótfi, 2003). Szakkönyvek (Kovács, Telekes, 2004), folyóiratok, konferenciák (pl. 1st Middle European Conference on Landfill Technology 2008), 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 környezetgazdálkodás alapvető része a megfelelő hulladékgazdálkodás, hiszen tágabb értelemben majdnem minden környezetvédelmi, energia- és anyaggazdálkodási kérdés, hulladékgazdálkodási kérdés is.

A hulladékok lerakással történő kezelése, nem a legjobb megoldás. Ennek ellenére fontos a lerakókhoz kapcsolódó műszaki tudás, hiszen még hosszú ideig fognak üzemelni, illetve a rekultivációjukhoz és az ez utáni hasznosításukhoz is szükséges az új ismeret. A biztonságos üzemeltetés mellett, tehát a terület hasznosításához is szükségesek a hulladék domb mechanikai (hulladékfizikai) jellemzői, hiszen a mérnöki szerkezetek alapozását gazdaságosan csak ezek ismeretében lehet megtervezni, és ez esetben az „altalaj” a lerakott hulladék.

Hulladékhalomokhoz (települési, szilárd hulladék-lerakókhoz) kapcsolódó kutatásaimat már a doktori tanulmányaimat (SZIE-MTDI) megelőzően elkezdhettem. Egyetemi hallgatóként (BME), OTKA kutatás keretében részt vettem e témához is kapcsolódó szilárdságtani és áramlástani modellezésben. Szakmérnök hallgatóként (SZIE-YMÉTK) ismereteimet tovább bővíthettem és megismerkedtem a pusztazámori lerakóval. Egyetemi oktatóként (SZIE-YMÉTK) több e témájú konferencián vettem részt, külföldön, ill. hazánkban (szervezőként is), valamint kutatási téma (JÁP) keretében egyetemközi kutatásban dolgozhattam. Mérnöki tevékenységem során beosztott tervezőként több lerakó szakértésében vettem részt (Telekes Kft.). Így az évek során megismerkedtem a kérdéskör, megítélésem szerint, nem kellő mértékben ismert és kutatott részterületeivel. Mind elméleti, mind gyakorlati vonatkozásban sok megválaszolható kérdéssel találkoztam, melyek egy részére találtam szakirodalmi választ (néha megnyugtatót, néha hiányosat, néha ellentmondót), és ezeket a szakirodalmi összefoglalóban gyűjtöttem össze. Az értekezésem nem tárgyalhat minden felmerülő kérdést, hiszen ennek terjedelmi okain túl, előtanulmányi, szakképzetségi, rendelkezésre álló idő és tárgyi eszközök hiánya is akadályát jelenti, de a további kutatói – oktatói - mérnöki pályám során remélem a kérdéskör egyéb vonatkozásaival, illetve a vizsgált résztémával is lesz lehetőségem még foglalkozni.

1.2. Célkitűzések

A fent leírtakból és a következő fejezetből is kitűnik, hogy 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. E kényszerek és lehetőségek miatt, hogy „egy (kis) téglát tessek a fal tetejére” (Tomcsányi, 2000), le kellett szűkítenem a témakört.

A hulladékdombokhoz kapcsolódó modellezést választottam a szűkebb kutatási területemnek, hiszen ez a műszaki feladatok megoldásának egyik általános módszere. A hulladéktest modellezése, fontos feladat, segítségével tudjuk előre becsülni, tervezni az összenyomódását, a kialakítható rézsűket, a keletkező csurgalékvíz és fejlődő gáz mennyiségét, összetételét, útját, a rekultivációhoz és a területhasznosításhoz fontos információkhoz juthatunk stb. Végző soron két részterület modellezésére, kutatására vállalkoztam:

- a hulladéktest mechanikai modellezésére, ezen belül is az alakváltozások tér és idő szerinti becsülésére (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, linearizálással az E_s (E_{oed}) - hulladékra jellemző összenyomódási modulus és a ν - Poisson tényező meghatározása, a k – vízáteresztő-képességi együttható visszaszámítása, a maradó és a rugalmas alakváltozások arányának vizsgálata.
2. A módosított kompressziós vizsgálat eredményeit értékelve, konszolidációs görbe kidolgozása, tehát talajmechanikai alapú konszolidációs vizsgálat.
3. A módosított kompressziós vizsgálat eredményeit értékelve, reológia modell kidolgozása, a degradációs fok függvényében.
4. A kiválasztott hulladéktest alakváltozásának talajmechanika alapú modellezése, az előző pontokban meghatározott hulladékfizikai jellemzők felhasználásával, numerikus (végesesemes) módszert alkalmazó program segítségével, helyszíni süllyedésmérésekkel a modell(ek) validálása, ellenőrzése, a figyelembe nem vett faktorok vizsgálatával, az aljzatsüllyedés-, biodegradáció- és a hulladék összetétel hatásának figyelembevételével.
5. A kiválasztott lerakó hidraulikai modellezéséhez kapcsolódóan, a víztartási görbe (függvény) meghatározása egy elvi vízgyűjtő rendszerre, 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, és ez esetben a mérés technika egy fontos, a tudományt közvetlenül segítő terület.

Célom továbbá az is, hogy a kidolgozott módszerek, méretezési eljárások, mérés technikai megoldások a műszaki gyakorlat más területein is használhatóak legyenek.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a műszaki védelemmel kiépített lerakókban történő hulladék elhelyezés irodalmi összefoglalását ismertetem. A történeti áttekintés után, a különböző célú hulladékmodellek szerinti tárgyalásmódot követem.

2.1. A hulladéklerakás szerepe a hulladékgazdálkodásban

A hulladékgazdálkodási kérdések egyidősek az emberiséggel, sőt az emberiség előtti időkre is tehető, de ezt nem nevezhetjük környezetszennyezésnek, hiszen természetes folyamatok eredményei (pl. a biológia üledékes kőzetek keletkezése). A városiasodás kialakulásával, de még az ipari forradalom előtti időkben a probléma alapvetően lokális közegészségügyi volt, hiszen a keletkezett hulladék mennyisége és minősége nem volt képes a nagyobb károkozásra. Az ipari forradalom és hatásai, a népességrobbanás, az új, természetidegen anyagok tömeges előállítását a hulladékgazdálkodási problémák sorát indukálta. Végző soron a Föld természeti környezetének hulladékkezelési kapacitása kimerült, és súlyos lokális (pl. Xiang et al., 2003), illetve globális (pl. csendes óceáni szemétsziget) környezeti károk keletkeztek, keletkeznek, melyek már nem csak közegészségügyet, de egész ökoszisztémákat érintők. Mint általában a környezetszennyezéseknél, itt is az a probléma, hogy a magasabb rendű, de sokszor még az egészen alacsonyrendű élő szervezetek is képtelenek a gyors környezeti változáshoz alkalmazkodni, hiszen sokszor nagyon gyorsan, nagy területen okoz mérgezést, a nem megfelelő hulladékkezelés. Ha azt is figyelembe vesszük, hogy a legtöbb környezetszennyezés mögött valamilyen hulladékkezelési anomália áll, kijelenthetjük, hogy a környezetvédelem egyik kulcskérdése a hulladékgazdálkodás.

A hulladékgazdálkodás fejlesztését legalább két ok motiválhatja:

- 1) a nyersanyagok szűkössége,
- 2) a környezetszennyezés megelőzése.

A nem megfelelő hulladékkezelés környezeti katasztrófák okozója lehet rövid távon (pl. tiszai ciánszennyezés, ajkai vörösiszap szennyezés stb.), és hosszú távon (pl. metán kibocsátás, talajvízszennyezés stb.) egyaránt. Az éghajlat várható változása az amúgy is számtalan diszfunkcióval terhelt hulladékgazdálkodást újabb feladatok elé állítja (pl. nem várt, a tervezéskor, létesítéskor - az adott területekre nem jellemző - nagy intenzitású csapadék). Melyek megoldásában, mint általában az egyént – társadalmat - természeti környezetet és ezek rendszerét érintő kérdésekben széles társadalmi összefogás szükséges, melynek elengedhetetlen feltétele az információ, az ismeret és tudás, végző soron az ezek hatására kialakuló emberi hozzáállás és az ebből eredő egyéni, intézményi, települési, kistérségi, azaz társadalmi cselekvés.

Értekezésem az előzőekben leírt általános hulladékgazdálkodási kérdések komplex vizsgálatával nyilván nem foglalkozhat, én a települési szilárd (kommunális, nem veszélyes, különleges kezelést nem igénylő) hulladék-elhelyezést (ennek is csak egy kis szeletét) vizsgálom, így e fejezetben, a továbbiakban már csak erről írok.

A hulladékok lerakással történő kezelése, nem a legjobb megoldás, hiszen a hulladékgazdálkodás prioritási sorrendje:

- 1) megelőzés,
- 2) hasznosítás,
- 3) környezetkímélő elhelyezés.

A hulladék keletkezésének megelőzése társadalmi, gazdasági, műszaki feladat, amely hosszú távon nyújthat megoldást, a hasznosítás az elkerülhetetlenül keletkező hulladék legtisztább

kezelési módja. Talán eljön az idő, amikor elhelyezésre nem is lesz szükség, de addig a jövő iránti felelősségünk, hogy ezt környezetkímélő módon valósítsuk meg, így megakadályozva a káros anyagok környezeti transzportját. Ezt valósítják meg a rendezett, műszaki védelemmel kialakított lerakók, melyek ugyan tartósan nyersanyagokat vonnak ki a termelésből, de megakadályozzák a környezeti elemek közvetlen szennyezését. Bár lehet némi rossz érzésünk egy működő lerakót szemlélve, de ez a megoldás mégis összehasonlíthatatlanul jobb, mint a nem oly távoli múlt gyakorlata, a műszaki védelem nélküli vadlerakók végtelen sora. Azt a tényt, hogy a társadalom felismerte a hulladéklerakás hátrányait, az egyéb kezelési módokhoz képest, a "lerakási illeték" bevezetése és a szelektív hulladékgyűjtés egyre nagyobb arányú térhódítása bizonyítja. E két lépésnek és egyéb intézkedéseknek (társadalmi együttműködés, hulladékszegény technológiák alkalmazása stb.) köszönhetően, csökken a lerakásra kerülő hulladék mennyisége és aránya is Magyarországon (2.1. táblázat).

2.1. táblázat Települési hulladék kezelése Magyarországon 2004, 2017 között (www.ksh.hu)

	év				
	2004.	2010.	2013.	2015.	2017
Anyagában hasznosított	540	789	987	1 194	1 319
Energetikailag hasznosított	155	406	336	525	608
Lerakással ártalmatlanított	3 857	2 838	2 415	1 991	1 825
Egyéb módon kezelt	40	–	–		
Összesen [ezer tonna]	4 592	4 033	3 738	3 710	3 752

A bezárt lerakó elsődleges funkcióját ellátja, de az így kialakuló hulladék domb (dombfeltöltéssel készülő lerakók esetén), nem csak a jövő generációjára háruló megoldandó feladat, hanem lehetőség is a terület új hasznosítására, hiszen az eredeti - általában mezőgazdasági - funkció nem visszaállítható. A területhasznosítás egyik motivációja lehet, hogy a település növekedése miatt, a külterületi lerakó belterületté válik. Ekkor akár lakó- vagy szabadidős tevékenységi területté is válhat, de ez a nagy kockázat miatt nem szerencsés, bár a világon sok példát láthatunk erre is. A másik lehetőség, hogy a lerakó területe tartósan külterület marad, ekkor energetikai hasznosítása indokolt (2.1. ábra).



a) Napelemek a Hickory Ridge Lerakón
(Amerikai Egyesült Államok)
(www.foresightusa.com)



b) Szélérőművek a Hamburgi Lerakón
(Németország)
(www.renewableenergyfocus.com)

2.1. ábra Megvalósult megújuló energiatermelés hulladéklerakókon

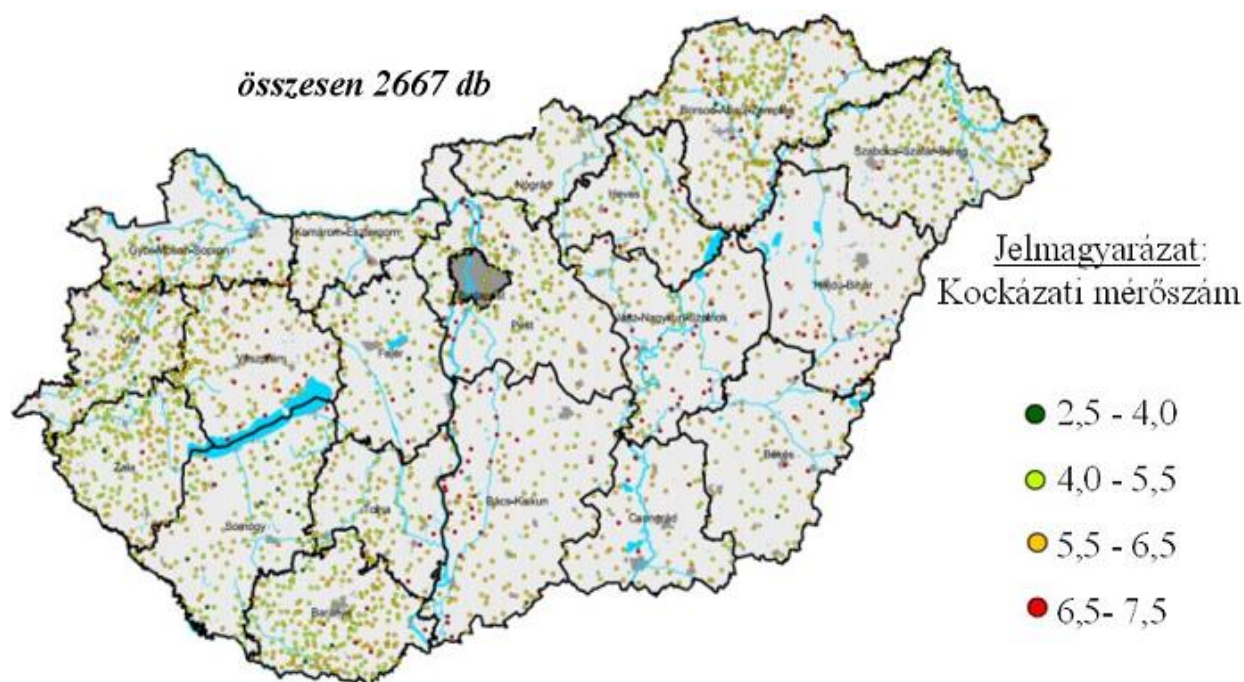
A képződő biogáz (depóniagáz) felhasználása mellett, a hulladék dombon elhelyezhetőek napelemek, szélérőművek, ezek a megújuló energiát hasznosító rendszerek kedvező esetben kiegészülhetnek geotermális energiahasznosítással is, így a bezárt lerakók zöld energiatermelő

szigetekké fejleszthetők, ez az ún. „energy hill concept”. A domb forma előnyös a napelemek elhelyezésére és a szélerőmű esetén is (Sembery, Tóth, 2005). További haszon, hogy nem foglalunk el újabb értékes területeket energiatermelési céllal.

Célszerű röviden megismerni a magyarországi hulladéklerakás helyzetét. Forrásaim Szabó Imre és Szabó Attila (2012) könyve, a szerzők előadásai, valamint JÁP kutatási projekt keretében történő felmérés (témavezetők: Telekes Gábor és Imre Emőke), melyben személyesen is részt vettem.

Magyarországon a hulladékgazdálkodási törvény 2000. évi megjelenése előtt, a települési szilárd hulladéklerakás szabályozatlan volt, bár ilyen esetben a jó erkölcs ad útmutatást, mégis az a kedvezőtlen helyzet alakult ki, hogy ahány település annyi hulladéklerakó (szeméttelep). Amelyek legtöbbször műszaki tervezés nélkül, akár törvénytelen, vadlerakókként alakultak ki. Bár már az 1980-90-es években is építettek korszerű, műszaki védelemmel épített és kedvező helyen (felszíni alaktani és geológiai értelemben) elhelyezett lerakókat.

Mivel rövidtávon a hulladékok lerakása a legkisebb költségű technológia, ezért is lehet az, hogy a 2002-es (Phare programban megvalósult) felmérés szerint 2667 lerakót örököltünk (2.2. ábra), melynek nagy része a szigetelés hiánya és egyéb okok miatt kockázatosnak minősült, így jelenleg már csak mintegy 60 műszaki védelemmel kiépített, regionális lerakó működik.

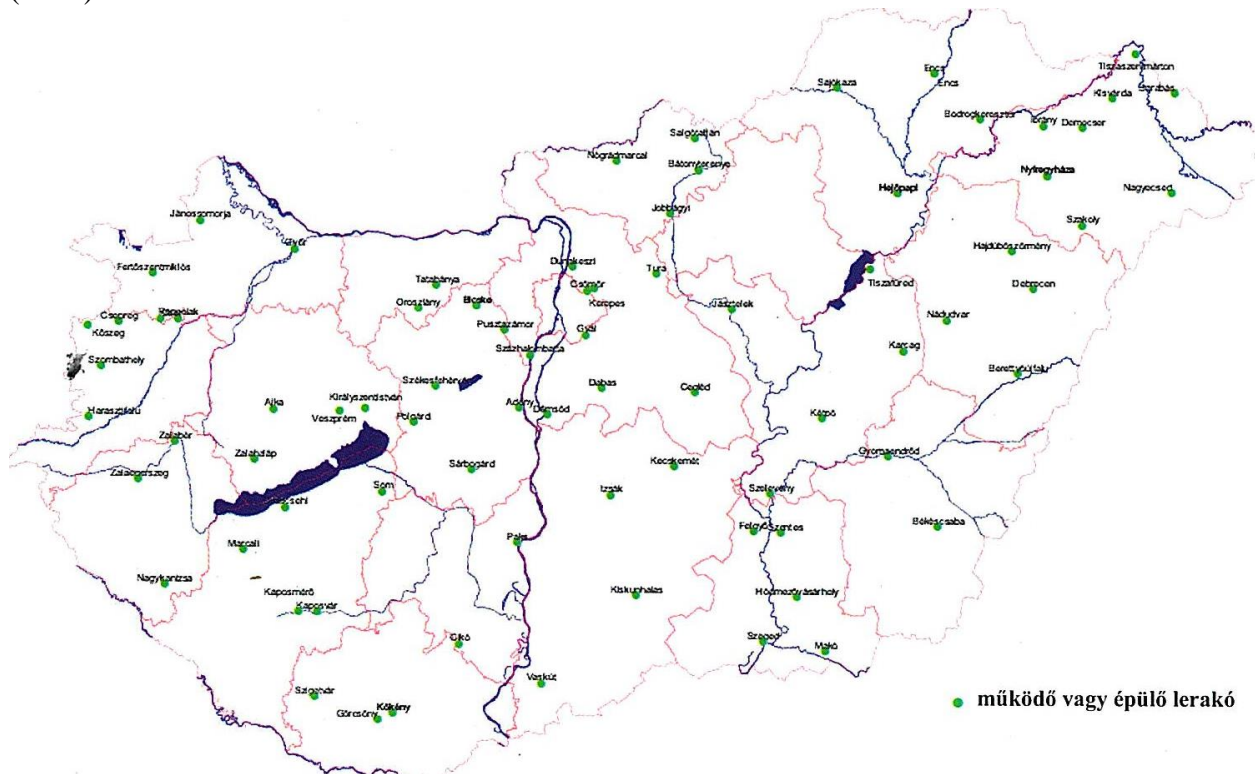


2.2. ábra A HU 9911-01 Phare projektben felmért lerakók hálózata (Royal Haskoning – CANOR, 2003) A kockázati mérőszám értelmezése (Szabó és tsai, 2007)

A felmérés eredményeként a következő javaslat született, a megmaradó 42 db lerakó korszerűsítése mellett, az ISPA Program keretében 22 db új, illetve bővített lerakó létesül és 10 db újat építenek, valamint a rendszer átrakóállomásokkal egészül ki. Az átmeneti időszak után a tervek szerint a végleges lerakó hálózatot 79 db lerakó alkotja majd, amely már egy átgondolt, korszerű hálózat lesz (2.3. ábra).

Tehát fel kell készülni, a megmaradó lerakók sok évtizedes üzemeltetésére, még be kell fejezni a nem rekultivált lerakók környezetbarát bezárását, gondolni kell az utógondozásra,

monitorozásra és a visszamaradó területek hasznosítására, melyek összességében értelmet adnak az értekezés elkészítésének, akkor is, ha nem a lerakás a legjobb elérhető technológia (BAT).



2.3. ábra 2019. július 16. után működő települési szilárdhulladék-lerakók
(www.orszagoszoldhatosag.gov.hu)

A hulladékgazdálkodás, értekezésemhez kapcsolódó rövid, általános áttekintése után, a kutatási kérdések szakirodalmi áttekintése következhet, azaz a hulladéklerakókhoz kapcsolódó modellezési feladatokról, lehetőségekről írok.

A modell definíciója szerint: a modell a valóság olyan egyszerűsített mása, amely a vizsgált jelenség szempontjából a valósághoz hasonlóan viselkedik (M Csizmadia, Nándori 2003). Hulladékhalmozatok esetén többfajta modellről beszélhetünk, aszerint, hogy mi a vizsgált jelenség:

Mechanikai modell	}	Komplex modell.
Hidraulikai modell		
Biológiai modell		

A modell megválasztását befolyásoló tényezők:

- a megválaszolandó kérdés,
- a megkívánt pontosság,
- a kiindulási, perem feltételek.

Mikor egy részkérdésre szeretnénk választ kapni, esetleg megfelelő pontosságú lehet egy egyszerűsített modell vizsgálat (pl.: rézsúállékonyság meghatározásához az egyszerűsített mechanikai modell). Nagyobb pontosság érhető el, illetve egyes kérdések csak úgy vizsgálhatók, hogy a mechanikai, hidrológiai, biológiai hatásokat is figyelembe vesszük, ezek a komplex modellek, melyek a fenti felsorolt modellek szorzataként állíthatók elő, ahogy McDougall (2008) közli, de ebből az is következik, hogy a részmodellek külön-külön történő fejlesztése is hasznos.

Az inhomogén hulladékhalmozatok vizsgálata több faktor meghatározását kívánja, és bonyolultabb matematikai modell megalkotását, mint a homogénnek tekinthető monodeponiák, melyeknél a jól ismert egyszerű talajmechanikai modellek is megfelelő pontosságot biztosítanak.

2.2. Mechanikai modell

A hulladékhalmozatok mechanikai modellezésétől a következő kérdésekre várunk választ (Szabó, 1995; Szabó, Szabó, 2012):

1. Állékonyság:

- a) a lerakott hulladékban,
- b) a hulladéklerakó oldalfalainál, és/vagy alatta,
- c) hulladék és az altalaj között,
- d) hulladék és aljzatszigetelés között,
- e) szigetelőréteg és a fedőréteg között.

A kutatások elsősorban a hulladéktest állékonyságával foglalkoznak (a), ugyanakkor a hulladéklerakók állékonysági vizsgálatához tartozik a környező talajban bekövetkező csúszás is (b), de ez gyakorlatilag egy „szokásos” geotechnikai probléma, míg az állékonysági vizsgálatok sajátos problémakörét képviselik azok az esetek, amikor a mozgás a műszaki védelem elemei és a hulladék vagy a fedőréteg (védőréteg) között következik be (c - e).

2. Alakváltozás

- a) A lerakott hulladék kompressziója, konszolidációja,
- b) A hulladéklerakó aljzatának várható süllyedése.

Míg az első (a) egy speciális kérdés, hiszen a lerakott hulladék nem felel meg az általában vizsgált anyagokra (talajra, építőanyagokra) vonatkozó, azon kezdeti feltételezéseknek, hogy homogén, izotróp, a vizsgálati időt tekintve állandó fizikai tulajdonságú stb., ezért ez egy speciális kérdés. Ezzel szemben a második (b), a geotechnika egy jól ismert kérdése, bár ez esetben, az altalajra jutó, általában szokatlanul nagy terhek teszik különlegessé a kérdést.

A vizsgálatokat a mechanika (elsősorban a talajmechanika) területén kidolgozott módszerekkel próbálják megoldani, a hulladéklerakókra történő értelmezési tartomány kiterjesztésével, amely annál pontatlanabb, minél inkább eltér a két anyagra (talaj és hulladék) vonatkozó anyagtörvény.

2.2.1. Állékonysági vizsgálatok

Bár az állékonyság vizsgálata nem témája az értekezésnek, de az itt felhasznált, meghatározott hulladékfizikai paraméterek ismerete szükséges a teljes hulladékhalmozatok alakváltozási vizsgálatához is, ezért rövid szakirodalmi áttekintése szükséges.

Az állékonysági vizsgálatoknál a geotechnikai gyakorlatban általánosan alkalmazott módszerek használhatók, ezek közül a legismertebbek:

- Jáky-féle vektorpoligonális módszer (Bartos, Králik, 1984; Szepesházi, 2001),
- Bishop (Bishop, 1955),
- Janbu (Janbu, 1969),
- Chen határanalízis módszere (Chen, 1975),
- Kinematikai módszer (Vásárhelyi, Póczy, 1956).

E módszereket ma is használják, hulladéktestekre alkalmazva (Omraci et al., 2003), (Stanciu, 2005), (Petrovic, 2008), (Varga, 2011), legtöbbször számítógéppel segítve.

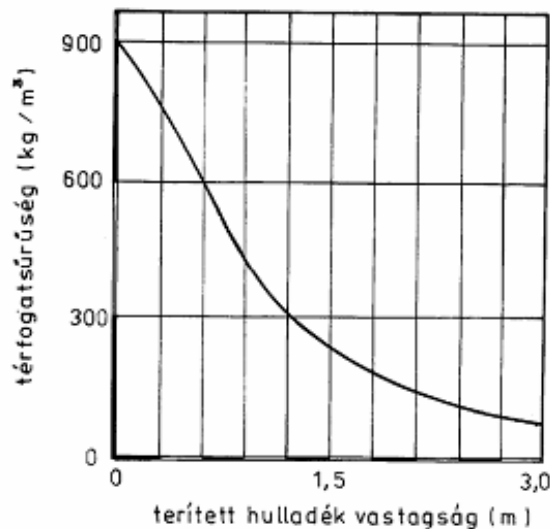
A gépi numerikus megoldási lehetőséget, már szinte valamennyi esettanulmány és kutatás felhasználja. Itt két programot említek, melyeket Magyarországon is széles körűen alkalmaznak:

- GEO5 – programmal a lamellás módszereket alkalmazva lehet rézsúállékonyságot számolni.
- Plaxis – programmal a félteret lehet modellezni numerikusan a végelemek módszerével. E program széles körűen használt a világon, melyet sok szakcikk bizonyít.

Az állékonyságvizsgálatokhoz a geometriai adatok mellett, ismernünk kell a lerakott hulladéknak az alábbi paramétereit:

- térfogatsűrűség,
- kohézió,
- belső súrlódási szög.

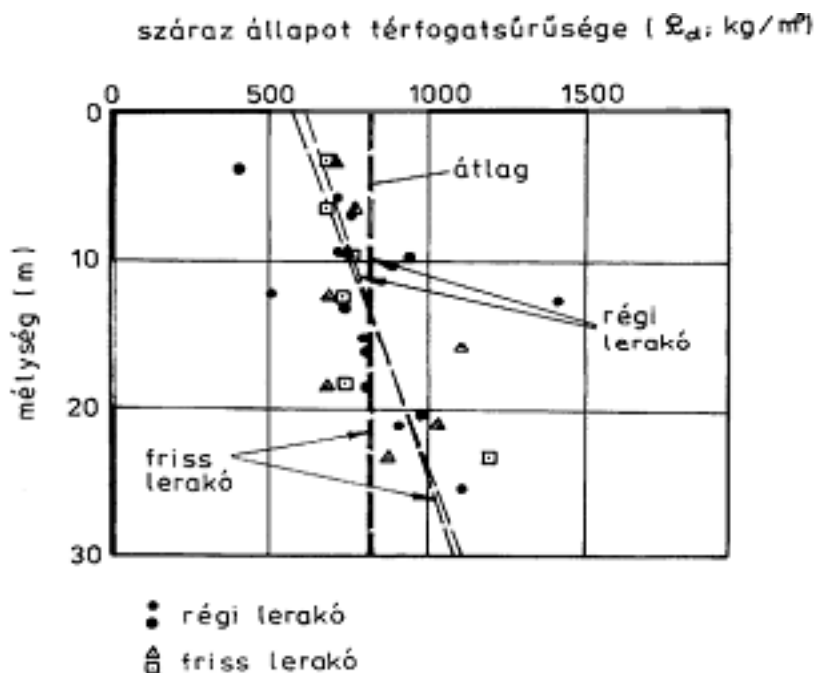
A térfogatsűrűség értéke igen tág határok között változik és függvénye a hulladék összetételének, nedvességtartalmának, a lebomlás fokának, a napi takarás vastagságának, a lerakás módjának, az alkalmazott tömörítő eszköznek, a lerakó magasságának, az egyszerre lerakott hulladék terítési vastagságának, a hulladék korának stb. (Szabó és tsai, 2007). A 2.4. ábra az egyszerre leterített hulladékréteg vastagságának a függvényében szemlélteti az elért térfogatsűrűség értékét (a terítési rétegvastagság kb. 0,5-0,7 m), az ábrán a terítési vastagság természetesen a 0-hoz csak tarthat, fizikailag azt el nem érheti.



2.4. ábra A tömörítéssel elért térfogatsűrűség alakulása az egyszerre leterített rétegvastagság függvényében (Tchobanglous et al., 1977)

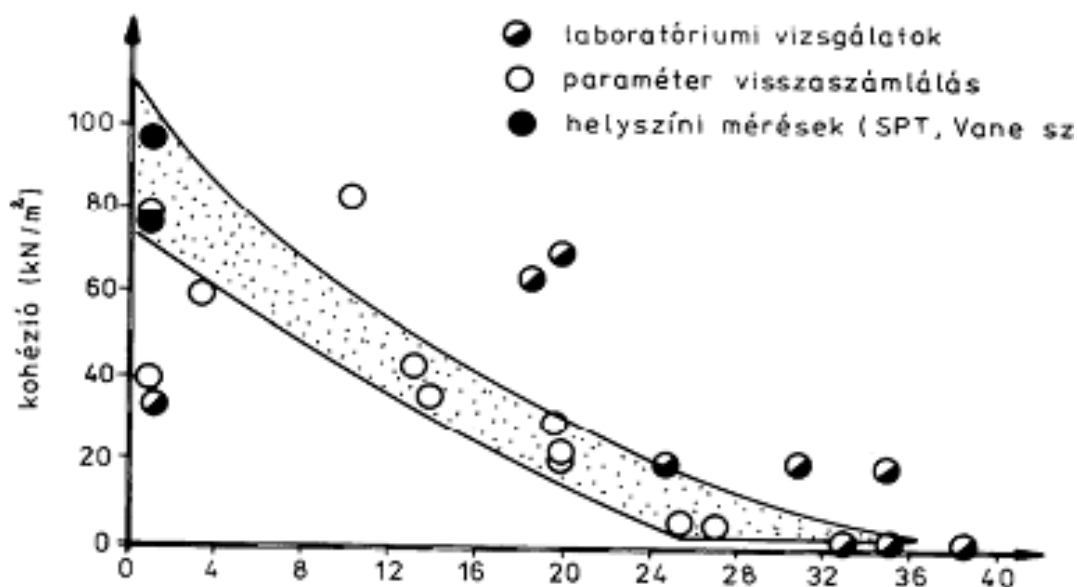
A 2.5. ábra helyszíni vizsgálatokkal meghatározott térfogatsűrűség értékeket mutat, különböző korú hulladékok esetén.

Nyers hulladék térfogatsűrűsége általában $150-350 \text{ kg/m}^3$ között változik, 1 MPa talpnyomásnál kisebb tömörítőgéppel $350-550 \text{ kg/m}^3$ -es értékkel számolhatunk. Kompaktorokkal $800-1000 \text{ kg/m}^3$, egyes speciális eljárásokkal 1000 kg/m^3 -nél nagyobb érték is elérhető (Szabó és tsai, 2007). A lerakott hulladék sűrűsége a lerakóban a mélységnek is függvénye (Tchobanglous et al., 1977, 1993). Minél mélyebben lévő réteget vizsgálunk, annál nagyobb a térfogatsűrűség, mivel a hulladék egyre konszolidáltabb. Az állékonyságvizsgálatoknál $1000-1200 \text{ kg/m}^3$ értékkel vehetjük figyelembe a hulladék súlyából adódó tömeget (Szabó, 1995; Szabó és tsai, 2007), a mélység figyelembe vétele nélkül.



2.5. ábra Helyszíni vizsgálatokkal meghatározott térfogatsűrűség értékek különböző korú hulladékok esetén (Oweis, Khera, 1990)

A nyírószilárdsági paramétereknek talán még a térfogatsűrűség értékeknél is nagyobb a szórása. A 2.2. táblázat valamint a 2.6. ábra, különböző eredetű és összetételű hulladékok, különböző módszerekkel meghatározott kohézió és belső súrlódási szög értékeit tünteti fel. Az értékpárok igen széles tartományban fordulnak elő, az értékek jelentősen függenek a lerakás körülményeitől, a technológiától, a lerakott hulladék korától stb. (Szabó és tsai, 2007). Faur (2012) azonos valószínűséggel előforduló nyírószilárdsági paraméter értékpárok meghatározását javasolja.

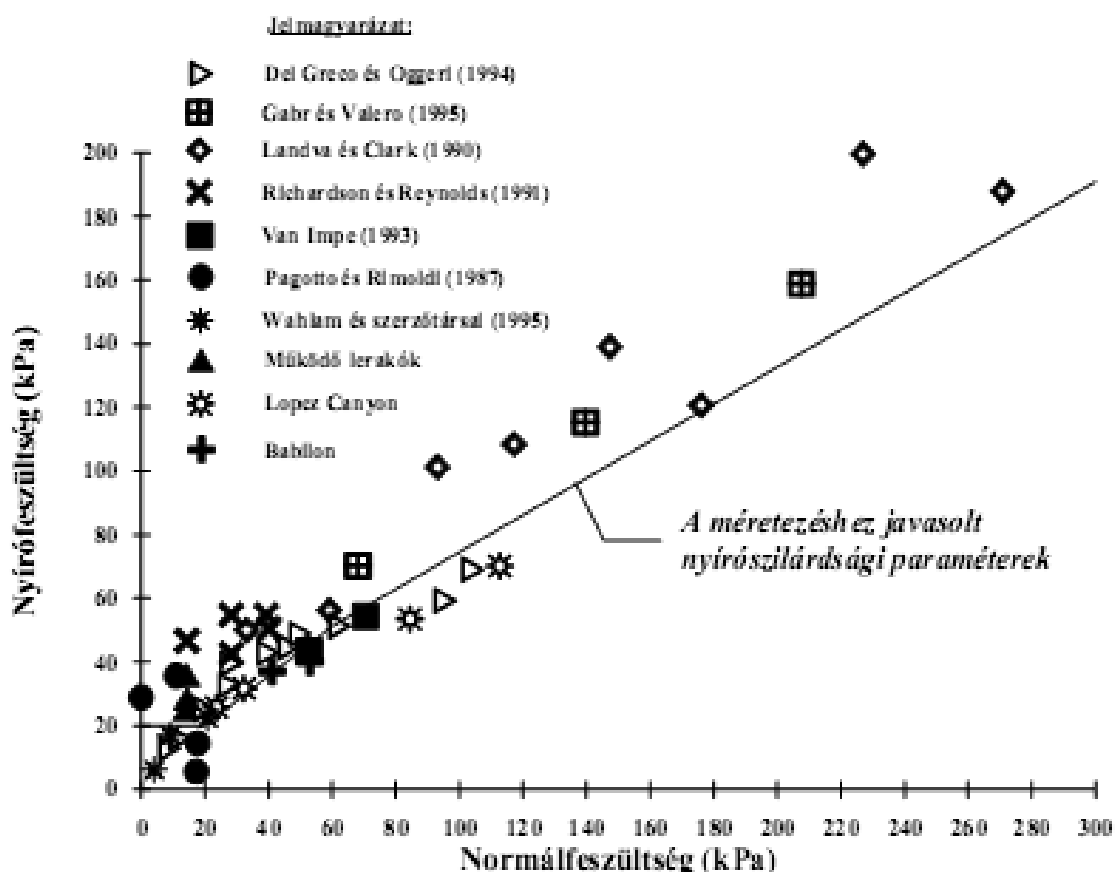


2.6. ábra A hulladék nyírószilárdsági paraméterei irodalmi adatok, laboratóriumi és helyszíni mérések alapján (Singh, Murphy, 1990)

2.2. táblázat Hulladékok nyírószilárdsági paramétereit (Petrovic, 2008)

	c (kPa)	φ (°)	feltétel
Jones & Dixon (2003)	5	25	mindig
Kavazanjian (2001)	24 0	0 33	$\sigma \leq 30$ kPa $\sigma > 30$ kPa
Van Impe (1998)	20 0 20	0 38 30	$\sigma \leq 20$ kPa $\sigma = 20 - 60$ kPa $\sigma > 60$ kPa

Manassero et al. (1996) abból a több kutató által is javasolt megközelítésből indultak ki, hogy a laboratóriumi és helyszíni mérésekből nyert, valamint meglévő lerakók állékonyságvizsgálati adataiból visszszámított nyírószilárdsági paraméterek feldolgozását célszerű az átlagos normálfeszültség és a mobilizált nyírószilárdság figyelembevételével elvégezni. Számos mérés és esettanulmány eredményét foglalták össze a 2.7. ábrán, 300 mm átmérőjű triaxiális vizsgálatok alapján.



2.7. ábra Települési hulladékok nyírószilárdsági vizsgálatának összefoglaló eredményei (Manassero et al., 1996)

König et al. (1996) arra a következtetésre jutottak, hogy a kommunális hulladékok általában nem jellemezhetők egyetlen φ , c értékpárral, a nyírószilárdsági paraméterek értéke nagymértékben függ a deformáció mértékétől, azaz a nyírószilárdság mobilizációjától. Az osztrák gyakorlat általában $c = 5$ kPa, $\varphi = 25^\circ$ értékkel számol (Déri és tsai, 2002).

Az alapvetően talajra kidolgozott fent ismertetett számítási módszerek óhatatlanul is hibát okoznak. A pontosításra elméletileg két lehetőség ismert, pontosabb nyírószilárdsági paraméter-meghatározása, vagy pontosabb anyagtvény alkalmazása, technikailag a numerikus módszerek adaptálása hulladékokra.

A törekvés a pontosabb modellezésre nyilvánvaló igény, ami fellelhető a geotechnikában és a hulladék-elhelyezés területén egyaránt. A pontosítás néhány példája:

- (Pathak et al., 2008) – heterogén talajok vizsgálata stochasztikus modellel,
- (Chang, 2005) – blokk mechanizmus alapú vizsgálat,
- (Omraci et al., 2003) – stabilitás vizsgálat,
- (Fúzy, Vas, 2007) – laza szemcsés talajok kontinuum-mechanikai vizsgálata,
- (Gáspár, Németh, 2000) - viszkoelasztikus modell,
- (Yong, Booth, 2008) – szeizmikus vizsgálat,
- (Fredlund et al., 1995) - a telítetlenség hatása,
- (Varga, 2010) – degradációs fok figyelembevétele,
- (Faur, 2012) – azonos valószínűség módszere.

A hulladék összetétel hatásának vizsgálata kapcsán megállapítható, hogy a műanyagok egyre nagyobb részt képviselnek a hulladékban. A műanyagoknak a hulladékok mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgálták Borgato et al. (2008). Mezőgazdasági aprítékhalmozatok mechanikai modellezését Bense és tsai (2007) végezték el. Monodepónia esetén Petkovsek et al. (2008) a gipsz hatását vizsgálták. Varga (2010) erősítő szálak hatását vizsgálta.

A rézsűállékonyság vizsgálatához általában helyszíni- illetve laboratóriumi mérések szükségesek, a fenti hulladékfizikai paraméterek meghatározásához. Ez nehéz, pontatlan és költséges feladat. A térfogatsűrűség meghatározásának lehetőségei és korlátai jól ismertek. A nyírószilárdsági paraméterek meghatározására a szakirodalomban, a talajmechanikában is jól ismert laboratóriumi nyírószilárdság-vizsgálatokat ajánlják (Szabó és tsai, 2007):

- közvetlen nyíróvizsgálat,
- triaxiális vizsgálat.

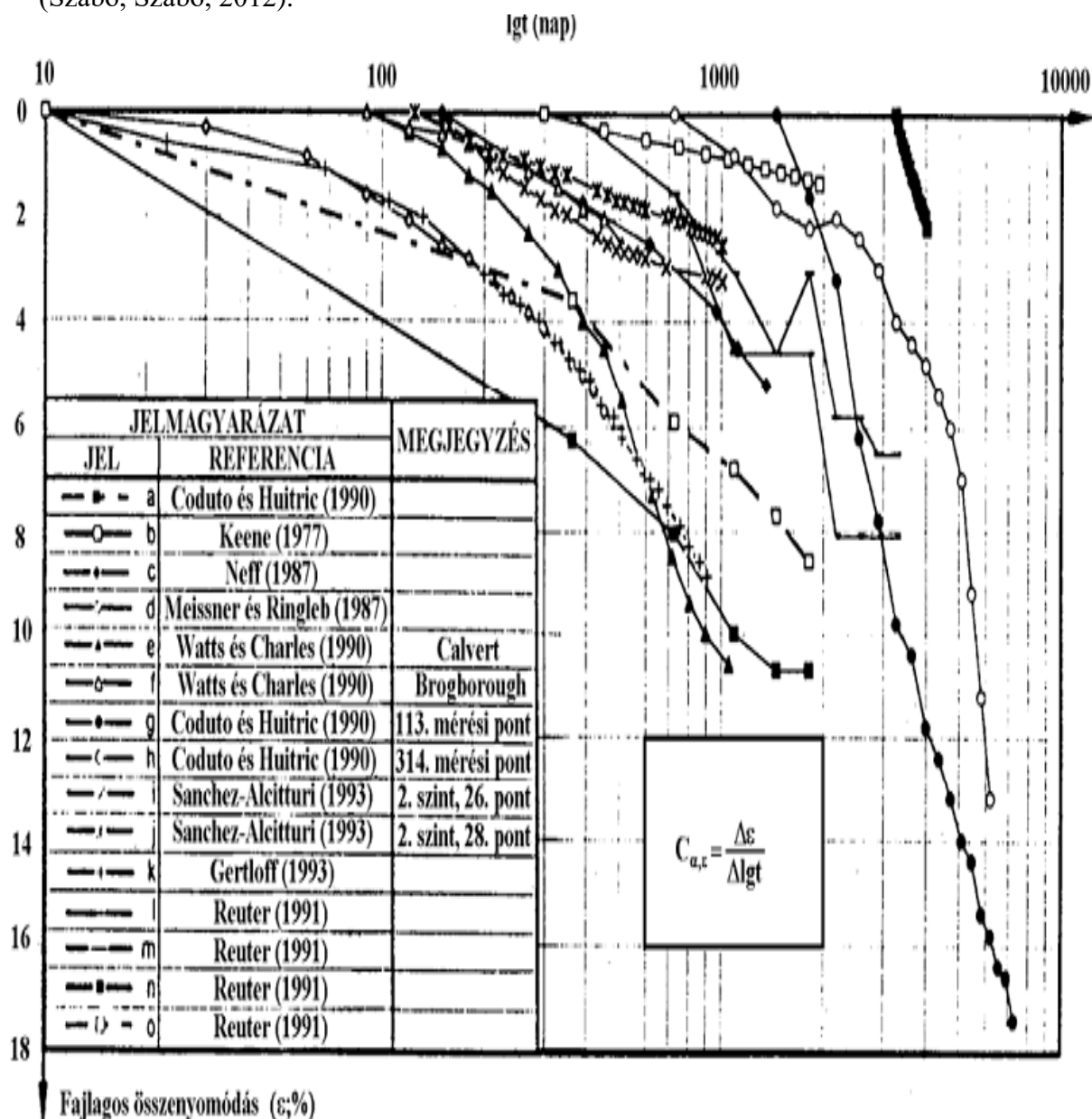
Helyszíni vizsgálatokat Oliver et Gourc (2008), említ, miszerint CPT szondázást adaptáltak hulladéktestek vizsgálatára, és ezt tette Varga (2010) is. A bekövetkezett rézsűcsúszásokból is természetesen visszaszámíthatók a nyírószilárdsági paraméterek.

2.2.2. Alakváltozás vizsgálata

Az alakváltozás vizsgálata a hulladéktestre és a lerakó alatti altalajra vonatkozhat. Ez utóbbi süllyedés meghatározása is alapvetően fontos, mivel a csurgalékvíz gyűjtő rendszer esését a süllyedések lejátszódása után is biztosítani kell. A számítás a talajmechanikában jól ismert módszerrel (Bartos, Králik, 1984; GEO5) elvégezhető, illetve végeeselemes programmal (Plaxis) is modellezhető. Természetesen ehhez ismernünk kell az altalaj talajfizikai jellemzőit a határmélységig. A lerakott hulladék kompressziójának, konszolidációjának ismerete is igen fontos, mert a deformációkat figyelembe kell venni, mind a záró szigetelőrendszer, mind a gázgyűjtő rendszer mechanikai méretezésénél, kialakításánál. A hulladék alakváltozási jellemzői ismeretében becslést tudunk adni a még rendelkezésre álló lerakó térfogatra, és az utólagos területhasznosítás megtervezésének is alapadata. Mivel a hulladéktest alakváltozásának meghatározása a nem rutin feladat, ezért a szakirodalmi összefoglalóban erre koncentrálok.

Hulladéklerakókon végzett süllyedésmérések alapján (2.8. ábra), a süllyedések alakulása öt elkülöníthető fázissal jellemezhető (Manassero et al., 1996, 2000; Bowders et al., 2000) (2.9. ábra):

- 1) a lerakott hulladék önsúlyának hatására bekövetkező fizikai összenyomódás és kúszás,
- 2) szemcsék átrendeződése révén bekövetkező süllyedés,
- 3) hulladék viszkozus tulajdonságaiból adódó összenyomódás,
- 4) szerves összetevők biodegradációja következtében kialakuló összenyomódás,
- 5) szerves összetevők fizikai-kémiai átalakulásából adódó szerkezet összenyomódás (Szabó, Szabó, 2012).

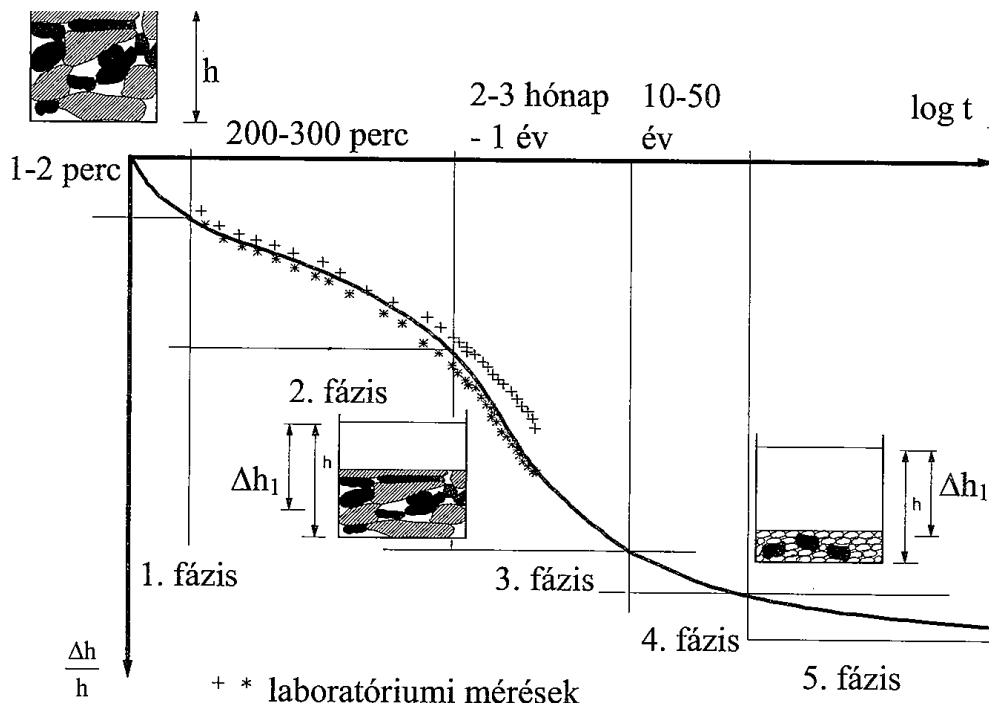


2.8. ábra Különböző lerakóknál mért felszínsüllyedések (König et al., 1996)

A süllyedés várható mértékét számos tényező befolyásolja, amelyek a következők (Szabó és tsai, 2007; Szabó, Szabó, 2012):

- a lerakott hulladék kezdeti tömörsége, hézagtenyezője és térfogatsűrűsége,
- a feltöltés magassága,

- a biológiailag lebomló, illetőleg nem-lebomló hulladékmennyiség aránya,
- a hulladék lerakás előtti és közbeni kezelése,
- a csurgalékvíz szintje, ingadozása,
- környezeti tényezők (nedvességtartalom, hőmérséklet, a biogáz-képződés folyamata, fázisa).



2.9. ábra A hulladékok konszolidációjának jellemző lefutása és fázisai (Manassero et al., 1996; Bowders et al., 2000; Szabó, Szabó, 2012 nyomán)

A várható süllyedés meghatározására sok módszer ismert, melyek általános jellemzője, hogy a végső süllyedést általában két részre bontják, egy terhelés és egy időfüggő szakaszra. A kidolgozott modellek négy csoportba sorolhatók (Szabó, Szabó, 2012):

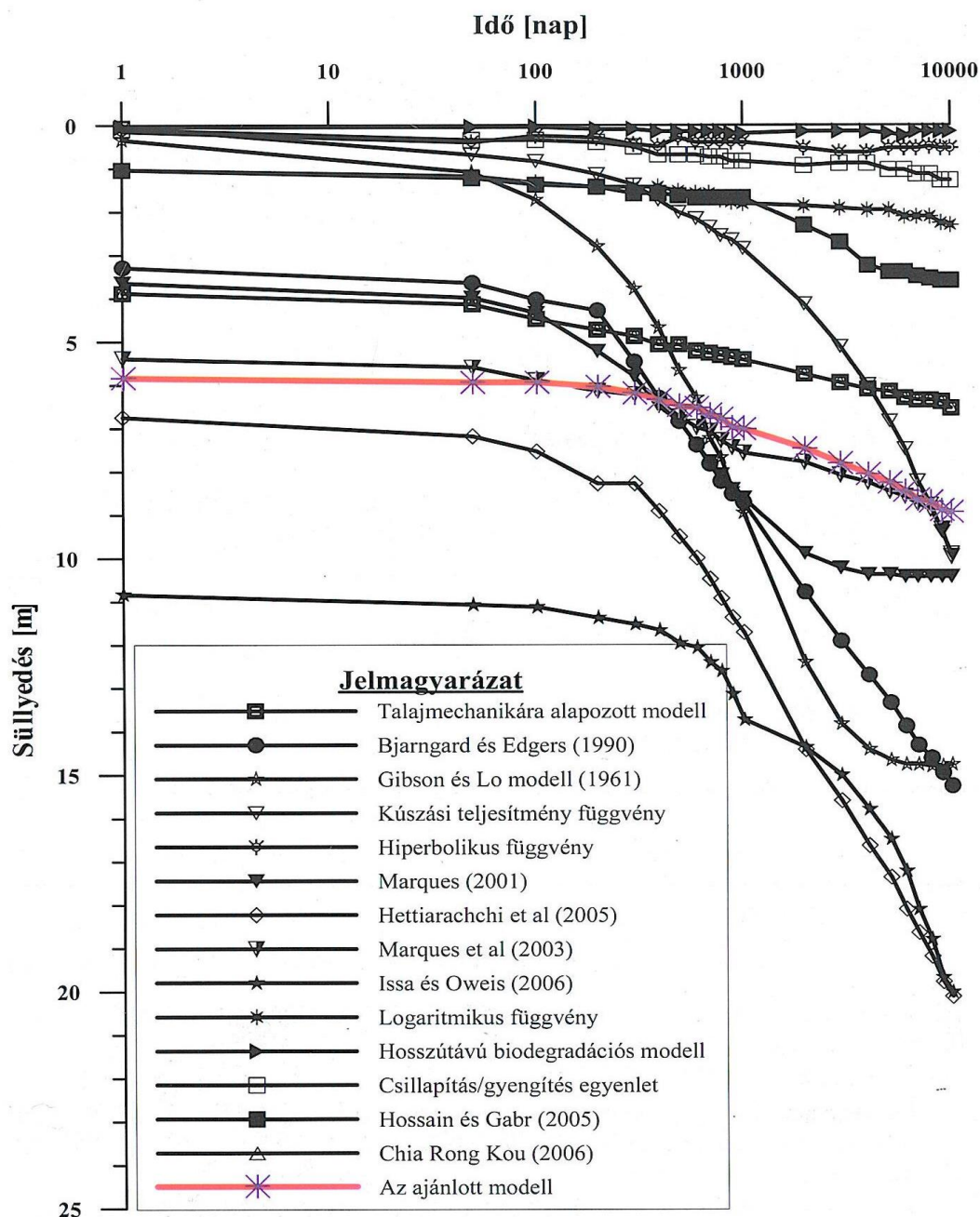
- 1) Talajmechanika alapúak: (Sowers, 1973), (Bjarngard, Edgers, 1990), (Hossain, Gabr, 2005).
- 2) Reológiai modellek: (Gibson, Lo, 1961).
- 3) Biodegradációs: (Park, Lee, 1997), (McDougall, 2008), (Hettiarachchi et al., 2009), (Marques, 2003), (Oweis, 2006) (Liu et al., 2006), (Babu et al., 2010).
- 4) Empirikus modellek: (Yen, Scanlon, 1975), (Edil et al., 1990), (Ling et al., 1998), (Coumoulos, Koryalos, 1997).

Az egyes modellek eredményei nagy szórást mutatnak, ahogy a 2.10. ábra szerinti minta lerakó (30 m magas, 3 m – es terítési vastagságú, 10 év) megoldása mutatja.

A talajmechanika alapú modellezés alkalmazása esetén, a hulladék várható összenyomódását, a talajmechanikából jól ismert konszolidációs elmélettel lehet közelíteni, azonban figyelembe kell venni, hogy a hulladék (Szabó és tsai, 2007):

- a szokásos talajokhoz képest lényegesen változatosabb, inhomogénebb,
- a fizikai paramétereinek pontos meghatározása lényegesen nehezebb,

- a hulladék konszolidációja nemcsak a mechanikai terhelés (önsúly) hatására bekövetkező tömörödés, hanem a különböző alkotórészek kémiai-biológiai lebomlásával rendszerint együtt járó térfogatcsökkenés eredménye is.



2.10. ábra Egy hulladéklerakó várható süllyedése különböző számítási eljárásokkal (Babu et al., 2010)

A süllyedések üteme az idő előrehaladtával lassul. A kezdeti szakaszban az önsúly hatására bekövetkező süllyedések dominálnak (elsődleges konszolidáció), mértéke általában 5-30 %-a a feltöltési vastagságnak, és a süllyedések zöme a feltöltés utáni első évben lejátszódik. Az elsődleges konszolidációt követi a másodlagos konszolidáció szakasza, ami időben hosszán elnyúló, a hulladékban lejátszódó folyamatoktól is jelentősen függő folyamat (Szabó és tsai, 2007).

König et al. (1996) több más szerzőhöz hasonlóan a süllyedéseket két részre bontja (Szabó és tsai, 2007; Szabó, Szabó, 2012):

1. terhelésfüggő süllyedés:

$$s_s = \sigma_h \cdot \int_0^{H_0} \frac{dz}{E_s(\sigma)}, \quad (2.1)$$

ahol: σ_h – a hulladék önsúlyából adódó hatékony normálfeszültség,
 $E_s(\sigma)$ – a hulladékra jellemző, az előterheléstől függő összenyomódási modulus,
 H_0 – a feltöltés magassága.

2. időfüggő süllyedés:

$$s_k = C_{\alpha,\varepsilon} \cdot H_0 \cdot \lg \frac{t_1}{t_2}, \quad (2.2)$$

ahol: $C_{\alpha,\varepsilon}$ – a hulladékra jellemző másodlagos konszolidációs együttható,
 $t_1 ; t_2$ –, a vizsgált időintervallum kezdete és vége.

Az időfüggő süllyedéseket célszerű két részre bontani:

a) rövid idejű másodlagos konszolidációs süllyedés:

$$s_{k,r} = C_{\alpha,\varepsilon}^r \cdot H_0 \cdot \lg \frac{t_{i,r}}{t_{1,r}}, \quad (2.3)$$

ahol: $C_{\alpha,\varepsilon}^r$ – a friss hulladékra jellemző másodlagos konszolidációs együttható,
 $t_{i,r}$ – a feltöltés befejezése után eltelt idő ($10 \text{ nap} < t_{i,r} < t_{2,r}$),
 $t_{1,r}$ –, a rövid idejű süllyedések kezdete ($\approx 10 \text{ nap}$),
 $t_{2,r}$ –, a rövid idejű süllyedések vége,
 $t_1 ; t_2$ –, a vizsgált időintervallum.

b) hosszú idejű másodlagos konszolidációs süllyedés:

$$s_{k,h} = C_{\alpha,\varepsilon}^h \cdot H_0 \cdot \lg \frac{t_{i,h}}{t_{1,h}}, \quad (2.4)$$

ahol: $C_{\alpha,\varepsilon}^h$ – az érett hulladékra jellemző másodlagos konszolidációs együttható.

A $t_{i,h}$ idő múlva bekövetkező teljes (összegzett) süllyedés (2.11. ábra):

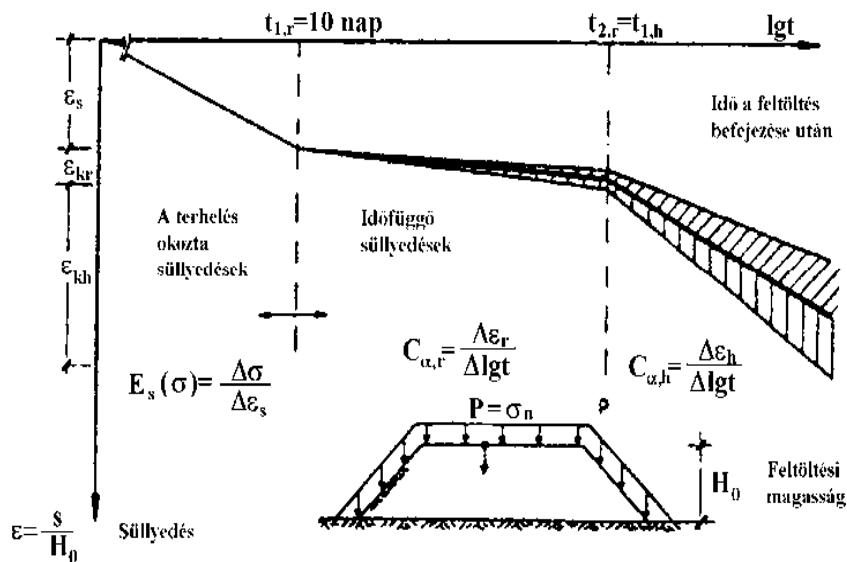
$$s_{\ddot{o}} = s_s + s_{k,r} + s_{k,h}. \quad (2.5)$$

A 2.1-2.5 összefüggések a talajmechanikából ismertek, elméletileg igazak. A becsült süllyedés értékének a megbízhatósága elsősorban a hulladékokra vonatkozó fizikai jellemzők értékének pontosságától függ (Szabó és tsai, 2007; Szabó, Szabó, 2012).

Pontosíthatók a prognózisok, ha a lerakó feltöltése után megkezdik a felszínsüllyedések mérését, és a kezdeti mérések adataira támaszkodva adják meg a várható süllyedéseket (Szabó és tsai, 2007). Minél hosszabb mérési idősor áll rendelkezésre, annál pontosabb lesz a becslés. (Oliver, Gourc, 2008).

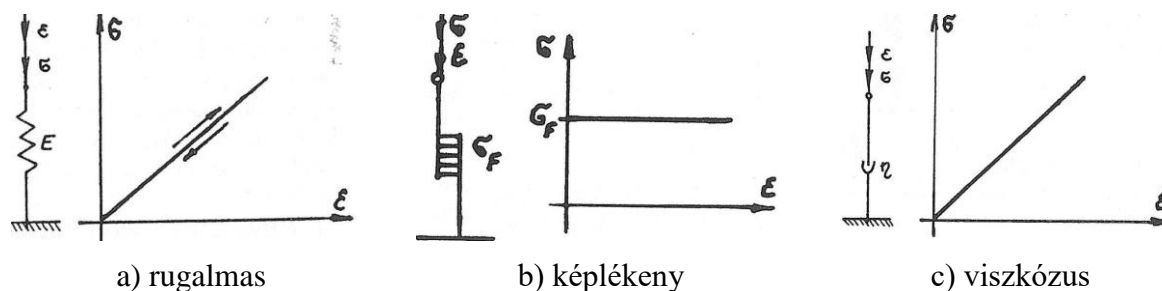
A Terzaghi-féle konszolidáció elmélete a következő feltételezések alapján vezethető le. A szilárd szemcse és a víz összenyomhatatlan, érvényes a Darcy-törvény, süllyedés csakis a víz eltávozásából következik be, az összenyomható réteg oldalirányban határolt, bármely vízszintes metszetben, egy adott időpontban a semleges, a hatékony és a teljes feszültség

konstans, a talaj homogén, izotróp, a talaj összenyomódási modulusa (E_s) konstans. A hulladékokra a felsorolt feltételezések nem mind igazak, (a talajokra sem mindig). Alapjaiban véve a hulladék inhomogén, anizotrop, a süllyedés a pórusvíz távozásán kívül az azonnali összenyomódás, a szemcseátrendeződés és a degradációs folyamatok eredménye. A telítetlenség hatása Fredlund (1998) elméletével figyelembe vehető. A drainezés nem tökéletes volta miatt, illetve amíg a felső lezárás nem készül el, feltételezhető a kvázi telített állapot, ha a mintavétel és helyszíni vizsgálatok ezt igazolják. Az egyéb kezdeti feltételezések miatti különbségek egy része figyelembe vehető, másik részük közelítőleg igaznak tekinthető hulladékokra is. A későbbiekben a Fredlund szerinti konszolidáció fogalmát használom.



2.11. ábra A települési szilárd hulladékok idealizált süllyedés-idő görbéje (König et al., 1996)

Az alakváltozások reológiai alapú modellezése is lehetséges. A reológia a természettudományoknak az a része, amely az anyagok, főleg külső, esetleg belső erők hatására bekövetkező alakváltozásaival, deformációival és az alakváltozások időbeli lefolyásával foglalkozik (Csürös, Bozzay, 1964). Így alkalmas lehet hulladékhalomok alakváltozásának modellezésére is. A szakirodalomból (Müller, 2011) ismert, hogy pl. a növényi anyagok mechanikai tulajdonságait leíró anyagmodellek első csoportjában, a feszültség hatására létrejövő alakváltozásokban az idő nem játszik szerepet (rugalmas, képlékeny alakváltozások), másik csoportjában igen (viszkózus alakváltozások). Más szerzők (Csürös, Bozzay, 1964) a reverzibilis, és az irreverzibilis alakváltozás szerinti csoportosítást alkalmaznak. A reológia három alapvető modell segítségével írja le az anyagok tulajdonságait (2.12. ábra):



2.12. ábra A három alakváltozási forma szemléltetése (Müller, 2011)

A reológia alapmodelljeinek jellemzői:

a) rugalmas anyag (Hook-test, elasztikus test):

a relatív alakváltozás (ε) arányos a testre ható feszültséggel (σ), alapegyenlete:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.6)$$

ahol: E – rugalmassági modulus,

b) képlékeny anyag (plasztikus test, de Saint-Venant-test):

a sebesség fogalma nem értelmezhető, a feszültség az ok, az alakváltozás az okozat,

c) viszkózus anyag (Newton-test):

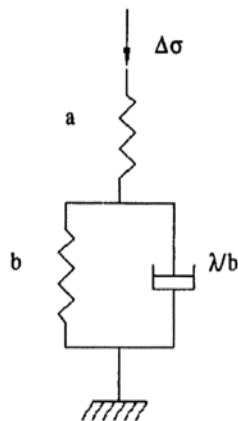
a feszültség nagysága az alakváltozási sebességgel arányos, alapegyenlete:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}, \quad (2.7)$$

ahol: η – viszkozitási tényező.

A valóságos anyagok általában magukon viselik mindhárom alaptulajdonságot és csupán a külső körülményektől függ, hogy melyik tulajdonság jelentkezik dominánsan, ezért a reológiai általános anyagmodellnek az elasztovizkoplasztikus modell tekinthető. Növényi anyagok vizsgálata azt mutatta (Szendrő, Bense, 1997; 1999; Müller, 2011), hogy a mechanikai viselkedésük bizonyos feszültségi és alakváltozási határon belül lineáris viszkoelasztikus modellekkel jól kezelhető. Ezek matematikai leírása, számítása átviteli függvény és Laplace transzformáció segítségével megtalálható Müller 2011-ben megjelent könyvében.

Hulladékhalmozatok esetén a Gibson és Lo – féle reológiai modell ismert (2.13. ábra) (Golush, 2008). E modell megegyezik a Poynting-Thomson modellel.



2.13. ábra Gibson és Lo – féle reológiai modell rajza (Golush, 2008)

A modellt matematikailag a következő egyenlettel írják le a szerzők:

$$\varepsilon(t) = \Delta P \cdot \left[a + b \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{b} t} \right) \right], \quad (2.8)$$

ahol: a – elsődleges összenyomódás tényezője (m^2/N),
 b – másodlagos összenyomódás tényezője (m^2/N),
 λ/b – másodlagos összenyomódási arány ($1/\text{d}$),
 t – idő (s),
 ΔP – normál feszültség (kPa),
 ε – fajlagos alakváltozás (-).

A biodegradációs és empirikus modellek alkalmazása nem része a disszertációnak, így ezekről részletesen nem írok, de a biodegradáció jelenségéről a biológiai modellezés fejezetben igen, mivel e jelenségkör ismerete szükséges a talajmechanika alapú és reológiai modellezés helyes értelmezéséhez.

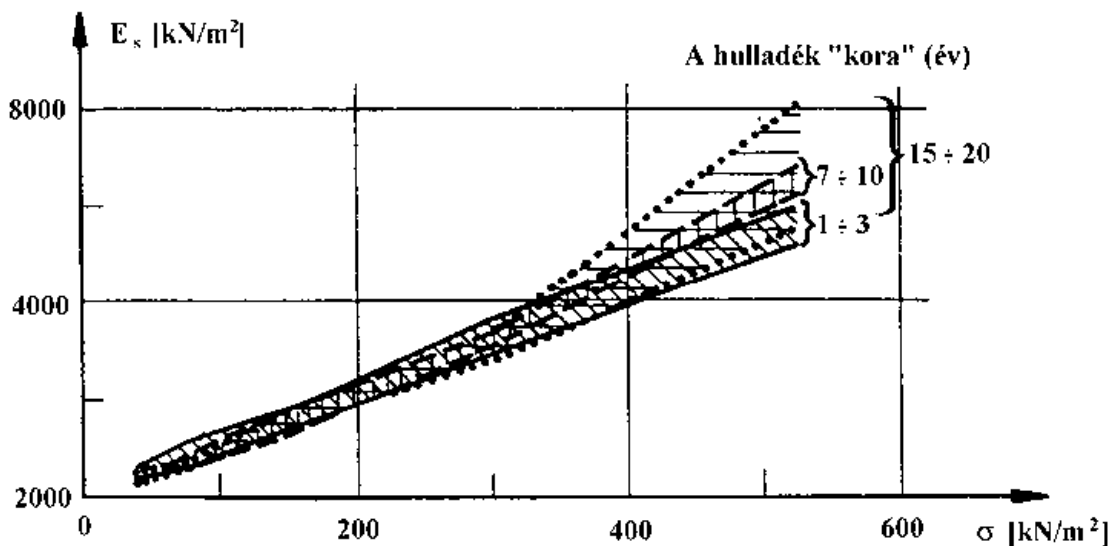
Az alakváltozások modellezéséhez, az állékonysági vizsgálatokhoz szükséges paraméterek mellett, szükségesek az alakváltozási jellemzők is, melyek a talajmechanikai és a reológiai modelleknél gyakorlatilag azonosak. Meg kell határozni a lerakott hulladék kompressziós és konszolidációs jellemzőit. A terhelés okozta süllyedések számításához a hulladékokra jellemző összenyomódási modulus értékére van szükség. A szakirodalomból (Szabó és tsai, 2007) megállapítható, hogy az összenyomódási modulus (E_s) értéke erősen függ az alkalmazott normálfeszültség (σ_n) értékétől (2.14. ábra), és általában a következő formában írható fel:

$$E_s = a + b \cdot \sigma_n, \quad (2.9)$$

ahol: a, b – állandók.

König (1996) mintegy 21 különböző lerakón végzett vizsgálatai alapján:

$$\begin{aligned} E_{s,\min} (\text{MPa}) &= -0,294 + 10,9 \cdot \sigma_n, \\ E_{s,\max} (\text{MPa}) &= -0,106 + 12,5 \cdot \sigma_n. \end{aligned} \quad (2.10)$$



2.14. ábra Különböző korú hulladékokon nagyméretű kompressziós kísérlettel meghatározott összenyomódási modulus értékek (Jessberger, Kockel, 1993)

A másodlagos konszolidáció alatt bekövetkező süllyedések becslésére szolgáló összefüggésekben szereplő másodlagos konszolidációs együttható, illetőleg időintervallumok értékére König (1996) a 2.3. táblázatban szereplő értékeket mérte és javasolta. Felhasználhatjuk a számításainkhoz a 2.4. táblázatban szereplő értékeket is (Oweis, Khera, 1990). Ekkor célszerű a (2.4) összefüggéssel számítani a másodlagos konszolidáció okozta süllyedéseket, de figyelembe kell venni a kúszási (másodlagos konszolidációs) index (C_α) és másodlagos konszolidációs együttható ($C_{\alpha,\epsilon}$) közötti következő összefüggést (Szabó és tsai, 2007; Szabó, Szabó, 2012):

$$C_{\alpha,\varepsilon} = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_0}, \quad (2.11)$$

ahol: e_0 – lerakott hulladék kezdeti hézagtérfegyőze.

2.3. táblázat A másodlagos konszolidáció együttható és szakaszainak jellemző értékei helyszíni mérések alapján (König, 1996)

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

2.4. táblázat Településhulladék lerakók esetén mért kompressziós index (C_c) és kúszási index (C_{α}) értékek (Oweis, Khera, 1990)

<i>Településhulladék lerakók esetén mért kompressziós index (C_c) és kúszási index (C_{α}) értékek (OWEIS-KHERA, 1990.)</i>		
Lerakó	C_c	C_{α}
15 éves lerakó (Boston, Massachusetts)	0,26 e_0	0,24
Laboratóriumi vizsgálat		0,30
Régi lerakó, (NY-Virginia)		0,04
Kis szervesanyag-tartalmú lerakó	0,15 e_0	0,024
Nagy szervesanyag-tartalmú lerakó	0,55 e_0	0,072
Településhulladék lerakó (Melbourne)	0,1 e_0	0,06
15-20 éves lerakó (Michigan)		0,02
10 éves lerakó (Elizabeth New-Jersey)		0,02
Harrison lerakó (New Jersey)	0,25 e_0	
Újratömörített háztartási hulladék-talaj keverék		0,14-0,034

Tapasztalatok alapján (Szabó, Szabó 2012) a következő átlagértékek jellemzőek a kommunális hulladékokra:

Oweis, Khera (1990) szerint:

Konszolidációs együttható: $c_c = 0,015-0,5 \text{ m}^2/\text{d}$.

Kompressziós index: $C_c = (0,15 - 0,25) e_0$.

Kúszási index ($t=0$): $C_{\alpha} = 0,13-0,32$ ($t=10$ év): $C_{\alpha} = 0,01-0,02$.

Bjarngard, Edgers (1990) szerint:

$$C_{\alpha,\varepsilon}^r \approx 0.035, \quad C_{\alpha,\varepsilon}^h \approx 0.215, \quad t_{1,r} = 1-25nap, \quad t_{2,r} = t_{1,h} \approx 200nap.$$

A reológiai modellezéshez szükséges paraméterek Rao et al., (1977), és Park et al., (2007) határozták meg, az utóbbi szerzők 15 lerakó adatait használták fel.

A talajmechanika alapú és a reológiai modellek kapcsán is megállapítható, hogy az alakváltozási jellemzők szórása nagy, mely több más tényező mellett a lerakott hulladék összetételének különbségével is magyarázható.

Az alakváltozási jellemzők mérése kapcsán a szakirodalomból megállapítható, hogy az alakváltozási jellemzőket, általában nagyméretű laboratóriumi kompressziós kísérlettel határozzák meg. Ezek lehetnek zárt kialakításúak is, ekkor a fizikai – biológia – kémiai folyamatok (degradáció) hatása egyszerre modellezhető, mérhető. A laboratóriumi mérések kiegészülnek általában helyszíni mérésekkel is, melyek a lerakó süllyedés mérését jelentik, vagy csak felszíni, vagy dombbelső pontokra is.

2.3. Hidraulikai modell

Egy hulladéklerakó tervezéséhez, üzemeltetésében, rekultivációjához fontos a lerakó vízháztartásának ismerete. Ennek segítségével:

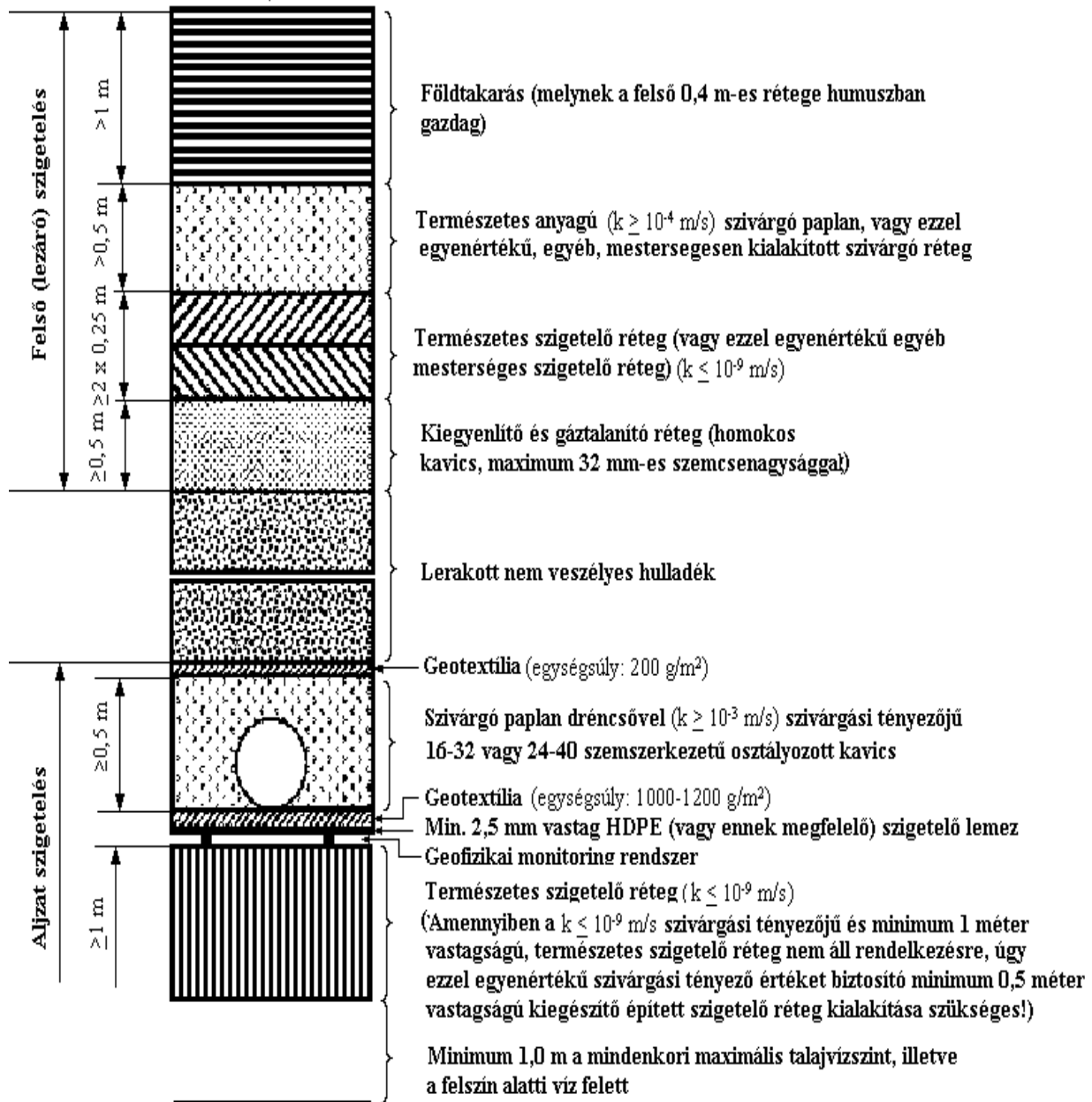
- meg tudjuk határozni a zárószigetelő-rendszeren bejutó csapadékmennyiséget, összehasonlíthatunk alternatív zárószigetelési rendszereket (Szabó, Szabó, 2008),
- becsléseket végezhetünk az esetlegesen szükséges mesterséges vízpótlás mennyiségére, amennyiben a hulladék lebomlási folyamatának szabályozásával az utógondozási időt optimalizálni szeretnénk,
- meg tudjuk határozni a csurgalékvíz gyűjtő rendszert terhelő vízmennyiséget (Ramke, 2008),
- pontosítani tudjuk a hulladéktest modellt (McDougall, 2008),
- hasznos információkat nyerhetünk a rekultiváció során a pótlólagosan megépítendő műszaki védelem mértékének meghatározásához.

Hulladéklerakók építése kapcsán vízgyűjtő, vízvezető, drain-rendszerek építése is szükséges. Az alsó zárásnál e réteggel vezetjük el a csurgalékvizet, így tehermentesítve a szigetelő rétegeket és megakadályozva az oldal irányú elfolyást. A felső zárásnál a takaró rétegen átszivárgó csapadékvíz összegyűjtése és elvezetése miatt szükséges vízelvezető rendszer építése (2.15. ábra, megjegyzés: 22/2001-es rendeletet a 20/2006-os rendelet felváltotta, a szükséges rétegrend gyakorlatilag nem változott).

A vízelvezető rétegek tisztán szemcsés anyagból épülnek. E rétegekben lejátszódó vízáramlás modellezése, illetve e rétegek vízgazdálkodási tulajdonságainak meghatározása közvetlenül kapcsolódik a hulladékhalom modellezéséhez. Ezért a továbbiakban a lerakott hulladék és a szemcsés "segéd" rétegeket is tárgyalom.

A talaj és a hulladék vízgazdálkodási tulajdonságai tulajdonképpen csak potenciális lehetőségek, amelyek víz tényleges jelenléte nélkül is léteznek. A hulladéklerakó vízháztartása azonban már tényleges víz-hulladék kölcsönhatásokat tükröz. A víz sokoldalú szerepét négy tényező szabja meg (Várallyay, 2003):

- 1) a nedvesség mennyisége, tér- és időbeni eloszlása,
- 2) a nedvesség állapota (halmazállapot, energiaállapot),
- 3) a nedvesség mozgása (két- és háromfázisú talajrétegekben),
- 4) a nedvesség kémiai összetétele (koncentráció, ionösszetétel, viszkozitás).



2.15. ábra Nem veszélyes hulladék-lerakó szigetelése (22/2001. (X. 10.) KÖM rendelet)

1. A nedvesség mennyisége, tér- és időbeni eloszlása

A nedvesség aktuális mennyisége illetve egy adott terület nedvességforgalma négy tényezővel jellemezhető szabatosan: 1, a tér nedvességtartalmával; (Θ); 2, a nedvességtartalom szelvénybeli eloszlásával (nedvességprofil: $\Theta f/d$); 3, a nedvességprofilok térbeli megoszlásával; ($\Theta f/d, x, y$); 4, fenti tényezők időbeli dinamizmusával. ($\Theta f/d, x, y, t$).

A talaj nedvességtartalmának meghatározása, a mezőgazdasági vízgazdálkodás, a talajnedvesség szabályozás, a talajmechanika egyik leggyakrabban szükséges mérési módszere. Ennek ellenére ma még nincs olyan eljárás, amellyel a teljes nedvességtartományban, zavaró tényezők nélkül, egyszerűen, gyorsan, megbízhatóan és pontosan meghatározható, folyamatosan regisztrálható a talaj nedvességtartalma, és különösen egy hulladéktest nedvességtartalma. Az egyes módszerek Várallyay (2003) csoportosítása szerint a következők:

Szárítószekrényes eljárás, tenziométeres eljárás, az elektromos ellenállás mérésén alapuló módszerek, neutronszóródásos módszer, γ -sugár-gyengítési módszer, dielektromos állandó mérésén alapuló módszerek, távérzékelési módszerek és egyéb módszerek

2. A nedvesség állapota

A nedvesség állapotának egyik értelmezése a halmazállapot, a másik értelmezése a nedvesség energiaállapota. Ez utóbbi azt fejezi ki, hogy a nedvességtartalom mely hányada milyen erők hatása alatt áll, mekkora erővel kötődik a szilárd fázis elemeihez, szemcséihez vagy szemcsehalmazaihoz. A talajban és a hulladéktestben levő vízre alapvetően három erő hat: a gravitációs erő, a kapillaris erő és a különböző szorpciós erők. Ezen erők érvényesülését azok kötési energiája, hatástávolsága és hatásmechanizmusa szabja meg, az tehát döntő mértékben a (talaj)szemcsék és a pórusok méretétől és méret szerinti megoszlásától függ (Várallyay, 2003; Stefanovits és tsai, 1999).

A talajnedvesség energiaállapotának, termodinamikai összefüggéseit kifejező nedvességpotenciál-elmélet alapjait Buckingham (1907) rakta le a hőmozgás és az elektromos áram analógiája alapján. Gardner (1958) definíciója szerint a talajnedvesség potenciálja az a hasznos munkamennyiség, amely egységnyi tömegű tiszta víz, egységnyi tömegű talajból való eltávolításához, illetve egy vonatkoztatási ponttól egységnyi távolságra való elmozdításához szükséges, (a talajnedvesség kinetikus energiája, a víz lassú mozgása miatt nem számottevő). Ez a munka, egységnyi tömegű víz izoterm körülmények közti mozgása esetén, hidrosztatikai nyomáskülönbségként is kifejezhető. A talajnedvesség összpotenciálja: (Ψ_t -térfogategységre megadva) a nehézségi erők hatását kifejező gravitációs potenciál (Ψ_g), a rendszer levegő–víz határfelületei között adódó hidrosztatikus nyomáskülönbséget kifejező nyomáspotenciál (Ψ_p), a szilárd fázis integrált hatását kifejező mátrixpotenciál (Ψ_m), valamint az oldható sók és a disszociáló adszorbeált ionok hatását kifejező ozmózispotenciál (Ψ_s) algebrai összege (Várallyay, 2003):

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_s . \quad (2.12)$$

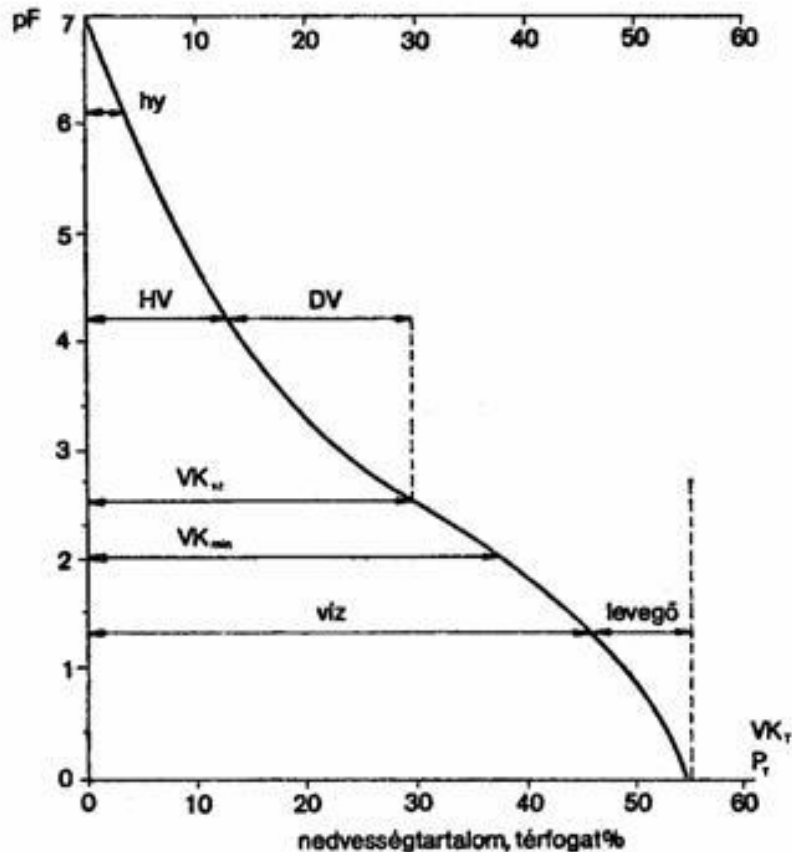
A Ψ_g értéke a Föld minden pontján megközelítően azonos, a gravitációs potenciál gradiensének értéke pedig megközelítően 1. A Ψ_p figyelembe vétele elsősorban a vízzel telített (kétfázisú) talaj feletti "vízoszlop" (álló- és folyóvizek mélysége, árasztás mértéke stb.) esetében szükséges. Az ozmózis két feltétele (koncentráció-különbség, szemipermeabilis hártya) a talajban és a hulladékban - utóbbi hiányában - nincs meg, ezért a Ψ_s a talaj nedvességállapotának jellemzésénél elhanyagolható. A talajnedvesség részpotenciáljait kifejező alapegyenletben – előbbieik szerint – megengedhető leegyszerűsítések miatt a talajnedvesség energiaállapota az esetek túlnyomó részében jól jellemezhető a mátrixpotenciál Ψ_m mértékével (Várallyay, 2003).

A nedvesség energia állapotát közvetett, de mérhető módon a víztartási görbe (függvény) írja le, így a talaj és a hulladék hidraulikai modellezésének egyik kulcs kérdése (és a disszertáció egyik témája), így erről részletesen írok.

A víztartási függvény (görbe) – a talajtanban korábban pF-görbe, újabban víztartó képesség függvény - értelmezése, leírása különböző a talajmechanikában és a talajtanban. Az eltérés oka felhasználásának különbségében és történeti okokban keresendő.

A pF görbe (víztartó képesség függvény) talajtani értelmezés szerint, a talaj nedvességtartalmát ábrázolja a Ψ_m (mátrixpotenciál) függvényében. A mátrixpotenciál értelmezhető hidrosztatikus nyomáskülönbségként is, és kifejezésének megkönnyítésére Schofield (1935) bevezette a pF fogalmát, ami a Ψ_m vízoszlop-cm-ben kifejezett értékének logaritmus. Ha a talaj nedvességtartalmát a pF ($\log \Psi_m$ – vízoszlop cm) függvényében

ábrázoljuk, olyan pF-görbe szerkeszthető (2.16. ábra), amelyről a talaj, különböző erővel kötött nedvességfrakcióinak mennyisége közvetlenül térfogatszázalékban olvasható le.



2.16. ábra A pF-görbéről leolvasható talaj-vízgazdálkodási jellemzők (Várallyay, 2003)

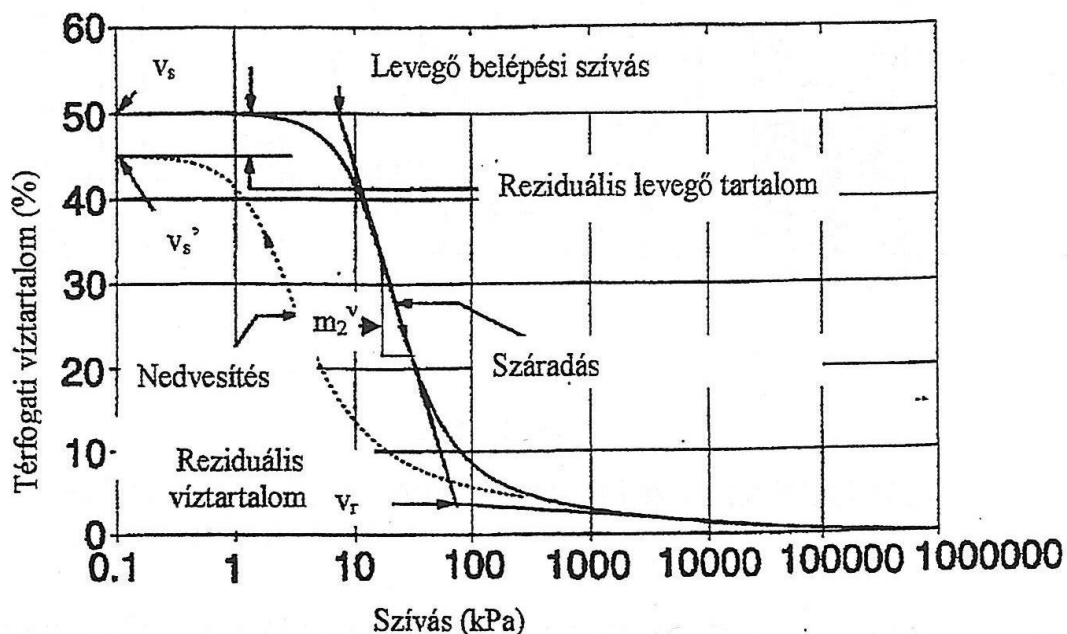
hy = higroszkóposág; HV = holtvíztartalom; DV = hasznosítható vízkészlet;
 VK_{sz} = szabadföldi vízkapacitás; VK_{min} = minimális vízkapacitás (levegőkapacitás);
 VK_t = teljes vízkapacitás; P_t = összporozitás

A víztartási függvény a talajmechanikában a (víztartalom - szívófeszttség függvény) a talaj nedvességtartalmát (v) a szívófeszttség ($s = u_a - u_w$) függvényében ábrázolja féllogaritmikus koordinátarendszerben, általában a nettó normálfeszttség nulla értéke mellett, azaz a $\sigma' = (\sigma - u_a) = 0$ síkon, de értelmezhető bármely más állandó $(\sigma - u_a) > 0$ síkon is. A víztartási függvény a telítetlen talajok egyik legfontosabb jellemzője. Közvetlen, méréssel történő meghatározása csak telítetlen talajon lehetséges. A víztartási függvény talajmechanikai jelölésrendszere a 2.17. ábrán látható, egy iszap talaj esetén. A vízszintes tengelyen a szívófeszttség logaritmusa, a függőleges tengelyen a térfogati víztartalom aritmetikusan szerepel.

A víztartási görbe három jól elkülöníthető tartományra bontható:

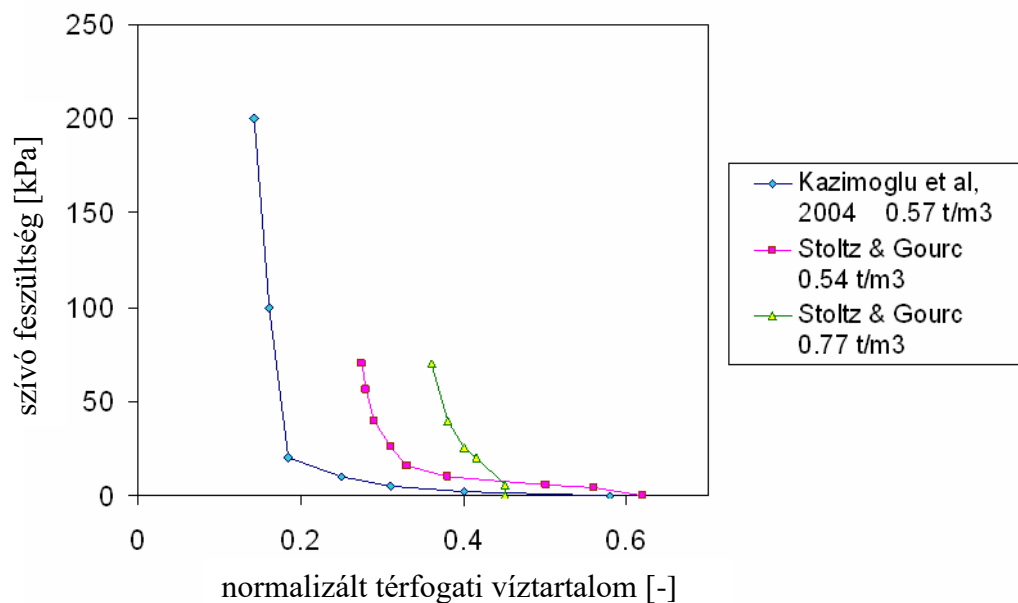
- 1. tartomány: szívófeszttség: $0 - (u_a - u_v)_e$, (0 - levegő belépési küszöbérték),
 víztartalom : v_s (telítési víztartalom).
- 2. tartomány: szívófeszttség: $(u_a - u_v)_e - (u_a - u_v)_r$,
 (levegő belépési küszöbérték – reziduális víztartalom szívófeszttsége),
 víztartalom : $v_s - v_r$, (telítési víztartalom – reziduális víztartalom).
- 3. tartomány: szívófeszttség : $(u_a - u_v)_r - 1000000$ kPa,
 (reziduális víztartalomhoz tartozó szívófeszttség – 1000000 kPa),
 víztartalom : $v_r - 0$, (reziduális víztartalom – 0).

Az 1,000,000 kPa felső határ a nedvesség porózus anyagból való kivonásának problémájához kapcsolódó termodinamikai megfontolásokon alapul. Ez a vízfázisnak az az energiaszintje, ahol bármely porózus anyag relatív nedvességtartalma zérusra csökken. A száradási és a nedvesítési ág eltérő. A hiszterézis fizikai magyarázata a szűkülő-táguló kapillárisrendszerrel (Jamin-cső) magyarázható (Taylor, 1948). Kezdeti telített talajállapotból általában csak a száradási ágat mérik.



2.17. ábra Jellegzetes víztartási görbe ábrázolása a talajmechanikában (Fredlund, Rahardjo, 1993)

A 2.18. ábra hulladéokra meghatározott víztartási görbét mutat, több kutatótól, McDougall (2008) szerint.



2.18. ábra Hulladékra jellemző víztartási görbék (McDougall, 2008)

A víztartási görbe meghatározásának két lehetősége: a mérés, vagy a számítás. A hazai geotechnikai gyakorlatban mindkét módszer ritkán használt, szemben a talajtannal. A

laboratóriumi mérések idő- és költség igényesek. A gyakorlat számára ezért fontosak a közvetett meghatározási módszerek. Ilyenek a szemeloszlási görbéből kapillárisokra vonatkozó összefüggéseken alapuló számítási módszerek (Arya, Paris, 1981). A szemeloszlási görbéből adatbázis felhasználásával egyszerűen mérhető talajparaméterekkel (Rajkai, 1993; 2004). A szemeloszlási görbéből a szemeloszlási entrópia alapján (Imre et al., 2005).

A víztartási görbe meghatározásának másik lehetősége a mérés, mely lehet helyszíni és laboratóriumi. Telítetlen talajok esetén három mérhető/szabályozható feszültség van: a teljes feszültség (σ), a póruslevegőnyomás (u_a) és a pórusvíznyomás (u_w). A mérések csak akkor értékelhetők a feszültségi állapotváltozók függvényében, ha a pórusvíznyomást és a póruslevegő-nyomást külön-külön mérik, vagy szabályozzák. Mérésük féligáteresztő lemezek, membránok segítségével lehetséges, melyekre kapcsolt nyomásmérő, illetve szabályozó egységgel állítható be a terhelés értéke. A féligáteresztő lapok/membránok anyaga lehet szemcsés anyagú, kerámia vagy celofán. A féligáteresztő elemek működése egyrészt az adhéziós jelenségeken alapszik, másrészt az elem megfelelő víztartási tulajdonságán. A megfelelő azt jelenti, hogy csak a vizet engedik át és a levegőt mindaddig nem, míg a fellépő szívófeszültség nagysága a levegő belépési küszöbérték alatt marad. Tehát a víztartási görbéjük 1. tartományában használhatóak mérésre ezek az elemek. A pórusvíznyomás és a póruslevegőnyomás mérési lehetőségeit felhasználva, a víztartási görbét lépcsős terhelésű kísérlettel határozzák meg. A szívófeszültség alkalmazására a következő módszerek ismertek (Rajkai, Várallyay, 1993; Rajkai, 2004, Várallyay, 2003):

1. A szívófeszültség szabályozása gravitációs vagy vákuum módszerrel és „félig-áteresztő” lap alkalmazásával.
2. Tengelyeltolási technika, kerámia vagy celofán ”félig-áteresztő” lappal vagy membránnal.
- 3.a) A szívófeszültség szabályozása ozmózison alapuló kémiai módszerrel, és ”félig-áteresztő” membránnal.
- 3.b) A relatív levegőnedvesség tartalom szabályozása kémiai módszerrel.

A módszerek alkalmazhatósági tartományai:

- mechanikai módszerek:

víznyomást szabályozva (1):

megcsapolt vízoszlop módszer	$u_a - u_w < 20 \text{ kPa}$,
függő vízoszlop módszer	$u_a - u_w < 100 \text{ kPa}$,

levegő- és víznyomást szabályozva (2):

nyomásmembrános eljárás	$100 \text{ kPa} < u_a - u_w < 1600 \text{ kPa}$,
feszültségkamrás eljárás	$u_a - u_w < 600 \text{ kPa}$,

- kémiai módszerek:

ozmózison alapuló (3a)	$u_a - u_w > 2500 \text{ kPa}$,
relatív levegőnedvesség tartalom szabályozása (3b)	$u_a - u_w < 1500 \text{ kPa}$.

Általában nem elegendő egyetlen módszert alkalmazni a teljes víztartási görbe meghatározására. A hazai talajtani gyakorlatban alkalmazott eljárási rend a növekvő tenzió szerint: teljes telítés vízzel - minta alsó éle merül vízbe - homoklapos berendezés - kaolinlapos berendezés – nyomásmembrános készülék. Szakcikk és konferenciák tanúsága szerint napjainkban a víztartási görbe mérés-technikai fejlesztése az automatizálás és a sokpontos mérés irányában folytatódik (Ray, 2016).

A laboratóriumi méréssel a talaj térfogati víztartalmát (v) néhány, beállított szívófeszültség ($u_a - u_w$) értékre határozzuk meg, a víztartási görbének csak pontjai ismertek. A felhasználás érdekében célszerű e pontokra folytonos függvényt illeszteni (Várallyay és tsai, 1979).

Különböző paraméteres függvények a talajtanban is jól ismertek, pl. a van Genuchten - függvény (van Genuchten, 1980):

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m, \quad (2.13)$$

ahol: Ψ - a szívó feszültség értéke,
 α , n , m - állandók,
 Θ - normalizált térfogati víztartalom,

$$\Theta = \frac{\Theta_w - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r},$$

ahol: Θ_w - térfogati víztartalom (v),
 Θ_s - telített térfogati víztartalom (v_s),
 Θ_r - reziduális térfogati víztartalom (v_r).

A talajmechanikában alkalmazott víztartási függvények közül példaként Fredlund, Xing (1994) egyenletét ismertetem:

$$v_n = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^m}, \quad (2.14)$$

ahol: s - a szívó feszültség értéke ($u_a - u_w$) (Ψ),
 v_n - normalizált térfogati víztartalom (Θ),
 a , n , m - állandók, e – Euler-féle szám.

Az egyenlet mérési adatokra illesztésekor az ismeretlen paraméterek száma kevesebb vagy egyenlő lehet, mint a víztartási görbe mért pontjainak száma. Még számos egyenlet ajánlanak különböző szerzők a talajok víztartási görbéjének leírására és szinte mind levezethető a következő általános formulából (Havrán, 2004):

$$a_1 v_n^{b_1} + a_2 \exp(a_3 v_n^{b_1}) = a_4 s^{b_2} + a_5 \exp(a_6 s^{b_2}) + a_7, \quad (2.15)$$

ahol: a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , a_7 , b_1 , b_2 – konstansok.

3. A nedvesség mozgása

A vízmozgásnak tulajdonképpen két alapvető esete különböztethető meg:

- a) folyadékmozgás - telített – kétfázisú- közegben,
 - telítetlen – három (négy*) fázisú – közegben,
 (* - negyedik fázisnak a víz levegő határfelületén kialakuló hártya tekinthető),
- b) levegő nedvességtartalom mozgása.

Vízmozgás akkor jön létre, ha a közeg, különböző pontjaiban eltérő a víz potenciális energiája. A közeg nedvességpotenciáljából vezethetők le a végbemenő vízmozgás törvényszerűségei, feltételei, iránya, sebessége stb. (Várallyay, 2003).

A folyadékmozgás pontos, kvantitatív leírását alapvetően három tény nehezíti:

- a közeg (hulladék, talaj) tulajdonságok nagy tér- és időbeli variabilitása,
- a folyadékfázis (extrém kivételektől eltekintve) nem H_2O , hanem különböző töménységű és kémiai összetételű oldat,
- a szilárd- és folyadékfázis közti kölcsönhatás.

A póruslevegő nedvességtartalmát vagy az áramló levegő sodorja magával (passzív mozgás), vagy diffúzió révén mozog (aktív mozgás) a magasabb hőmérsékletű helyekről a kisebb parciális nyomású pórusok felé.

Telített közegben a talaj, hulladék teljes pórussterét folyadék tölti ki, s így a gravitációs folyadékmozgás (szivárgás) – első közelítésben – jól jellemezhető a hidraulikus gradiens és a hidraulikus vezetőképesség hatását megfogalmazó Darcy-törvénnyel. Mely alapja a vízzel telített porózus anyagrendszerekben történő vízmozgást leíró hidraulikai számításoknak, fizikai és matematikai modelleknek, bár azt többen módosították, finomították, meghatározták érvényességi körét, alkalmazhatóságának feltételeit (Szepesházi, 2001).

A Darcy-törvény szerint az abszolút áttersztőképesség (m^2) a következő egyenlet szerint számítható:

$$K = \frac{Q \cdot \eta}{A_t \cdot \frac{\Delta P_L}{L}}, \quad (2.16)$$

ahol: Q – időegységre eső folyadékáramlás térfogati mennyiség,

η – dinamikai viszkozitás,

A_t – keresztmetszeti terület,

ΔP_L – minta hosszában létrejövő nyomáscsökkenés,

L – minta hosszúsága.

Ha az áramló folyadék térfogatsúlyát és viszkozitását állandónak tekintjük, a vízáttersztőképességi együttható (m/s) is állandónak tekinthető (Kabai, 1994):

$$k = \frac{K \cdot \gamma_v}{\eta}. \quad (2.17)$$

Víz mérőfolyadék esetén ($20\text{ }^\circ\text{C}$ –on) az abszolút áttersztőképesség és a vízáttersztőképességi együttható átszámítható (Major, 1995):

$$k = 9,75 \cdot 10^6 \cdot K. \quad (2.18)$$

A vízáttersztőképességi együttható meghatározása többféle módon lehetséges (Bartos, Králik, 1984; Várallyay, 2003):

- meghatározás számítással és táblázatokból,
- meghatározás laboratóriumi vizsgálatokkal,
- meghatározás helyszíni, terepi mérésekkel.

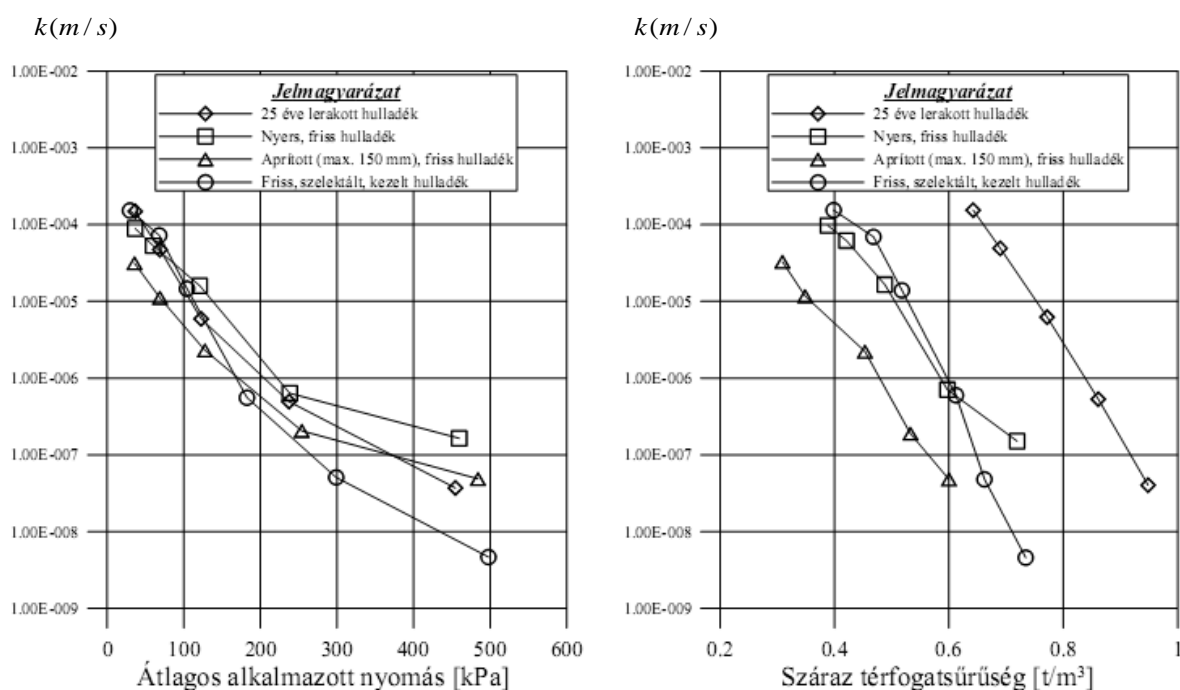
A hulladék áttersztőképessége több tényező függvénye, amelyek a következők (Szabó és tsai, 2007):

- a hulladék fajtája,
- a hulladék feldolgozás, kezelés módja,
- a lebomlás fázisa,
- beépítési és települési tömörség,
- a hulladék vastagsága,
- a hulladék telítettsége,
- a lerakógáz képződés.

Különböző korú és kezelésű hulladékok (friss háztartási hulladék, 20 éve lerakott hulladék, aprított hulladék) laboratóriumi körülmények között meghatározott szivárgási tényező értékeiket tünteti fel a 2.5. táblázat (Heyer, 2003) és a 2.19. ábra (Povrie et al., 2005).

2.5. táblázat Hulladékok jellemző szivárgási tényező értékei (Heyer, 2003)

<i>Hulladékok jellemző szivárgási tényező értékei (HEYER, 2003.)</i>				
Függőleges terhelés (kPa)	Modellezett települési vastagság (m)	Nedves	Száraz	Szivárgási tényező (m/s)
		térfogatsűrűség (t/m ³)		
0-100	0-10	0,7-1,15	0,25-0,7	$5 \times 10^{-3} - 10^{-5}$
100-200	10-20	0,8-1,25	0,35-0,8	$10^{-4} - 10^{-6}$
~ 320	~ 34	0,9-1,3	0,5-0,9	$10^{-6} - 10^{-7}$
~ 600	~ 63	1,2-1,4	0,6-0,95	$10^{-7} - 10^{-9}$



2.19. ábra Különböző hulladékok laboratóriumban mért szivárgási tényező értékei (Povrie et al., 2005)

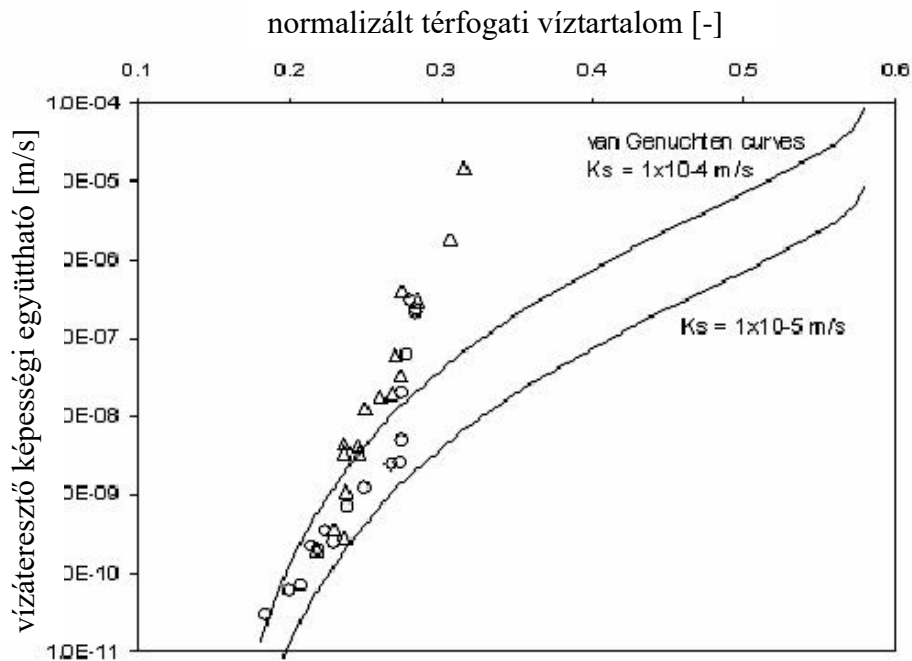
Ha a talaj, hulladék pórusait nem csak egyféle folyadék, vagy gáz telíti, akkor a vizsgált, áramló közegre vonatkozó effektív átteresztőképességről (K_{eff}) beszélhetünk. Az effektív átteresztőképesség mindig kisebb, mint az abszolút, mert a jelenlévő második, vagy harmadik fázis a pórussteret és ezáltal az átteresztőképességet is csökkenti (Bódi, 2014) Az effektív és az abszolút átteresztőképesség arányát relatív átteresztőképességnek (K_{rel}) nevezzük.

$$K_{rel} = \frac{K_{eff}}{K} \quad (2.19)$$

A telítetlen közeg vízvezető-képessége (kapilláris vezetőképessége) függ egyrészt a szilárd fázis pórusainak méret szerinti megoszlásától, továbbá attól, hogy azok milyen hányadát tölti ki víz, tehát azok milyen hányada vehet részt a víz vezetésében, ami viszont alapvetően a szivóerő (és természetesen a pórusméret-megoszlás) függvénye. A vízzel telítetlen közeg kapilláris vezetőképessége tehát mindig kisebb, mint a vízzel telített közeg vízvezető-

képessége (hidraulikus vezetőképessége). Ebből viszont az következik, hogy a k még konstans pórusviszonyok esetén sem jellemezhető egyetlen értékkel, hanem csupán egy $k = f(\Psi)$, vagy $k = f(\Theta)$ függvénnyel (Várallyay, 2003). A Darcy-törvény érvényes telítetlen talajokra is (a vízfázis és a levegőfázis áramlására egyaránt), de a k átteresztőképességi együttható nem állandó. Kis nyomásnál a gáz fázis áramlására a Klingenberg (1941) által módosított Darcy-törvényt kell alkalmazni. Hasonlóan a tranziens áramlásra felírt differenciálegyenletben sem állandó a k együttható.

Az átteresztőképességi együttható a szívófeszültség függvényében, a víztartási görbe felhasználásával is megadható (Lloret, Alonso, 1980; Fredlund et al., 1994). Betonok esetén a telítetlen áramlás kérdéseit vizsgálta Major et Wittmann (2011). Hulladékokra McDougall (2008) közöl adatokat (2.20. ábra).



2.20. ábra A vízáteresztő-képességi függvény hulladékokra (McDougall, 2008)

Egyes modellek segítségével a víztartási görbe matematikailag leírt függvényéből az átteresztőképességi együttható – szívófeszültség függvény felírható.

Például: van Genuchten (1980):

$$k_r(\Psi) = \frac{\left\{1 - (a\Psi)^{n-1} [1 + (a\Psi)^n]^{-m}\right\}^2}{[1 + (a\Psi)^n]^{m/2}}, \quad (2.20)$$

ahol: a , n , $m(=1-1/n)$, v_r , v_s - paraméterek,
 v – térfogati víztartalom,
 v_s – telítési térfogati víztartalom,
 v_r – reziduális térfogati víztartalom,
 $\Psi = (u_a - u_w)$ - kapilláris szívófeszültség.

A csurgalékvíz áramlásának modellezésével hulladékban White, Beaven (2008) foglalkozott.

Az előzőekben (2.3. fejezetben) ismertett kérdések tárgyalásánál, a geotechnikát és a talajtant is érintettem, célszerűnek tartom, a két tudományterületnek, a témakörhöz tartozó fogalmait összehasonlítani, párhuzamba állítva ismertetni (2.6. táblázat).

2.6. táblázat A geotechnikában használt szakkifejezések talajtani megfelelői

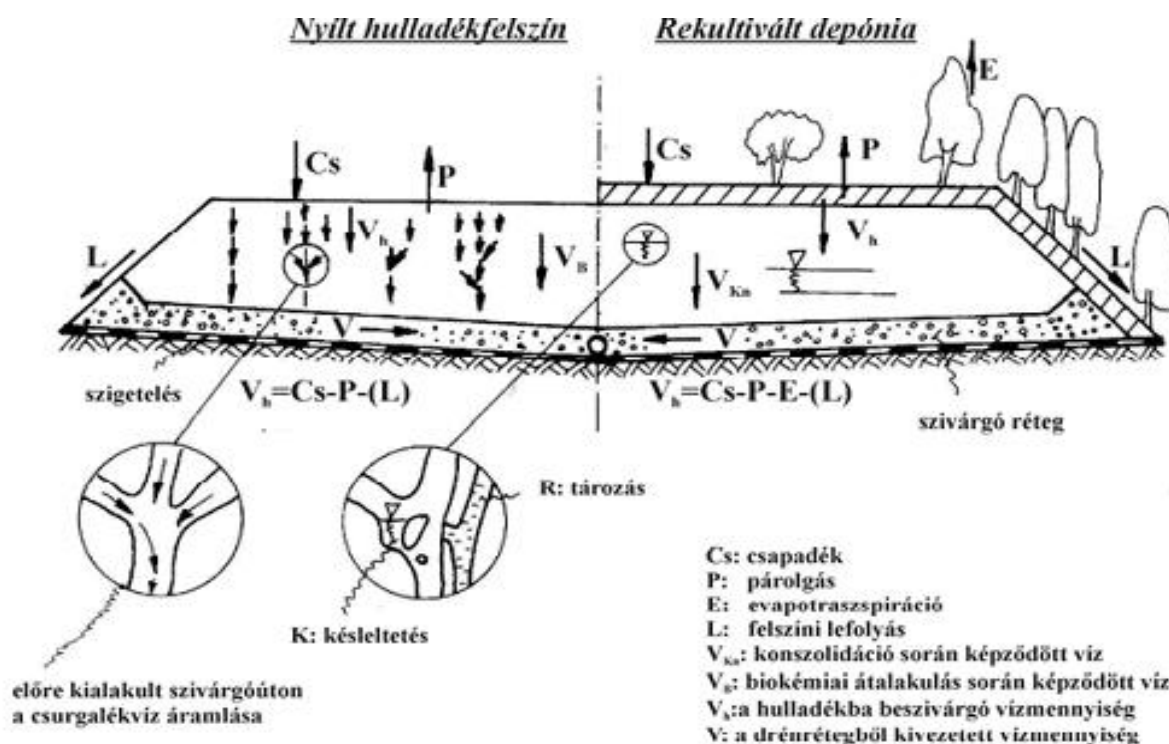
talajtan	geotechnika
Talaj: A hazai talajtan a talajok kialakulásának (képződésének) körülményeit (Dokucsajevi talajképző tényezők) figyelembe vevő, ún. fejlődéstörténeti talajbesorolást használ. Alapvető tulajdonsága a termékenysége (termőtalaj).	Talaj: Ásványi szemcsék és/vagy szerves anyag leülepedett, olykor szerves eredetű halmaza, amelynek alkotói mechanikai hatásokkal könnyen szétválaszthatóak. Két nagy csoportja a szemcsés és kötött (plasztikus, kohéziós) talaj. A termékenység nem feltétel.
Szemcseösszetétel.	Szemeloszlás.
Fizikai talajféleség.	Talajfrakció illetve talaj neme.
Bolygatatlan minta.	Zavartalan minta.
Bolygatott minta.	Zavart minta.
Zacskós minta.	Víztartalmi, félig zavart, zacskós minta.
Talaj nedvességtartalma:	Talaj víztartalma:
Nedves tömeg alapon:	
$\Theta_t^n = \frac{n - sz}{n} \cdot 100$, nedvességtartalom tömegszázalékban (nedves tömeg alapon),	nem használt.
Száras tömeg alapon:	
$\Theta_t = \frac{n - sz}{sz} \cdot 100$, nedvességtartalom tömegszázalékban (száras tömeg alapon),	$w = \frac{m_v}{m_s} \cdot 100 = \frac{m_n - m_d}{m_d} \cdot 100$, víztartalom.
Térfogatszázalékban:	
$\Theta_w = \Theta_t \cdot T_s$, nedvességtartalom térfogatszázalékban,	$v = \frac{V_v}{V} \cdot 100$, térfogati víztartalom.
Kifejezhető mm-ben:	
1 térfogatszázalék = =1 mm víz/10 cm-es talajréteg,	nem használt.
ahol:	ahol:
n - a nedves talaj tömege,	m_n ,

sz - a száraz talaj tömege, T _s - a térfogattömeg, γ - térfogatsúly,	m _d ≈ m _s (szilárd rész tömege), ρ - térfogatsűrűség, γ - térfogatsúly, m _v - víz tömege, V - a minta össztérfogata, V _v - a mintában lévő víz térfogata.
Hidraulikus vezetőképesség. Kapilláris vezetőképesség.	Vízáteresztőképességi együttható (telített talaj). Vízáteresztőképességi függvény. (telítetlen talaj).
Nedvességtenzió.	Szívófeszültség, szívás.
pF-görbe, víztartó képesség függvény.	Víztartási görbe, víztartási függvény.

4. A nedvesség kémiai összetétele

Fontos ismerni a hulladéklerakóban áramló folyadék fázis vegyi összetétele és annak változása, ez nem része az értekezésnek, de utalok a szakirodalomra. (White, Beaven, 2008).

A vízgazdálkodási tulajdonságok számbavétele után, vizsgálható a hulladéktest vízháztartása, amelyet, a módosított vízháztartási egyenlettel írhatunk le (2.21. ábra).



2.21. ábra A hulladéklerakó vízháztartása (Szabó, 1995)

Figyelembe kell venni a még üzemelő nyitott, és a rekultivált, lezárt hulladéklerakó eltérő csurgalékvíz képződési körülményeit is. A rekultiváció után szerepet kap a növényzet párolgása, a talaj tározó hatása, esetenként a fedőréteg drénezéséből származó elfolyás (Martner, Zeuner, 2002). Egy számítógéppel segített hidraulikai modellezést White et Beaven, (2008) ismertetnek.

2.4. Biológiai- és komplex modell

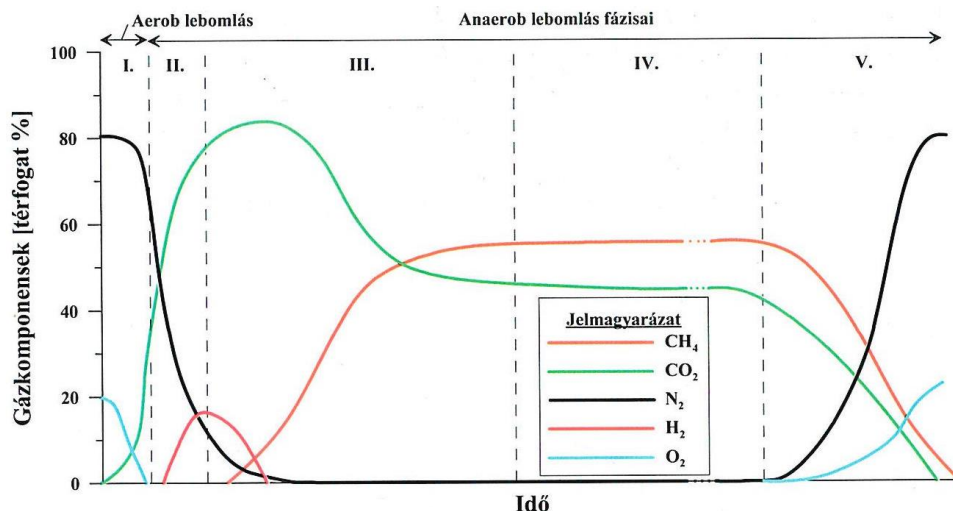
A hulladéktestet alapvetően megkülönbözteti a talajoktól az a tulajdonsága, hogy a lerakás után lebomlási folyamatok és kémiai átalakulások mennek végbe benne (Bente et al., 2008), ami által jelentősen megváltoznak a fizikai tulajdonságai. A biológiai, kémiai átalakulási folyamatok vizsgálata nem a disszertáció feladata, így e kérdéskörrel, csak egy összefüggés szempontjából foglalkozom, miszerint melyek azok a legfontosabb biológiai, kémiai átalakulások, amelyek hatással vannak/lehetnek a fizikai tulajdonságokra, és ezek időbeli lezajlása milyen.

A hulladéklebomlási folyamat eredményeként hulladéklerakó-gáz és csurgalékvíz keletkezik. Laboratóriumi mérések (Stegman, Spendlin, 1985) és tapasztalatok alapján a lebomlási folyamatot öt jellegzetes fázisra osztják (2.22. ábra), (Christensen, Kjeldsen, 1989) nyomán Szabó és tsai., (2007):

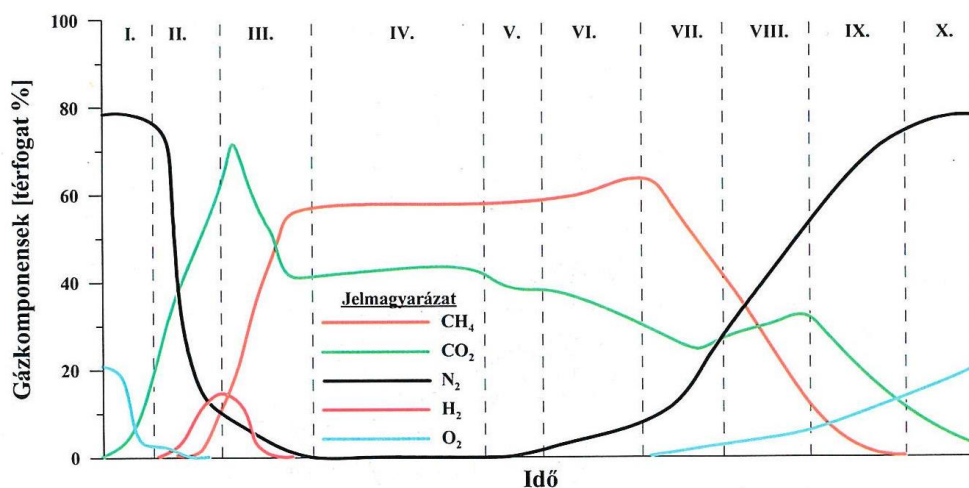
Az aerob lebomlás (I. fázis): Az I. fázis egy rövid abiotikus szakasz, rögtön a hulladék elhelyezése után, amikor a rendelkezésre álló oxigén (levegő) mellett a hulladékban jelenlevő vagy kívülről származó mikroorganizmusok a szerves anyag aerob lebontását végzik. A folyamatot részben a lerakóban csapódott levegő, a felszínközeli rétegeknél pedig az atmoszférából bejutó oxigén táplálja. Az aerob fermentáció eredménye a szén-dioxid, az ammónia és a víz, illetve az egyéb alkotórészek oxidációs termékei. A folyamat fontos tényezője a nedvesség, ami a mikroorganizmusok számára 60 %-nál optimális. A nedvesség egyaránt származhat magából a hulladékból vagy a lerakóba bejutó csapadékból történő utánpótlásból. A folyamat exoterm, és a lezárást követő néhány nap, illetve hét alatt a hőmérséklet elérheti a 60-70°C-ot is. A nagy hőmérséklet gyakran öngyulladásához is vezethet. A lerakó átlagos belső hőmérséklete ebben a fázisban 40-60°C.

Az anaerob lebomlás fázisai (II-V): A lerakó/biogázképződés körülményeit az anaerob (oxigénmentes) lebomlás jellemzi, a számára kedvező, elsősorban közepes (30-75°C) hőmérsékleti tartományban. A biogázképződés (termelés) szempontjából a legfontosabb három fő vegyületcsoport a szénhidrátok, fehérjék, és a zsírok. Az anaerob lebomlás kezdeti szakaszában (II. fázis) illékony zsírsavak, szén-dioxid és hidrogén keletkezik az erjesztő és acetogén baktériumok hatására. A savas kémhatású csurgalékvíz nagy koncentrációban tartalmazhat zsírsavakat, kalciumot, vasat, nehézfémeket és ammóniát. A gáz nitrogéntartalma csökken a szén-dioxid- és hidrogénképződés következtében. A redoxipotenciál csökkenésével a kezdeti magas szulfáttartalom lassan lecsökken. A keletkező szulfid kicsapja a vasat, mangánt és a nehézfém elemeket, amelyek eddig oldott állapotban voltak. A III., ún. második közbülső anaerob fázis a metanogén baktériumok lassú növekedésével kezdődik. A metánkoncentráció nő, mialatt a hidrogén, a szén-dioxid és a zsírsavak koncentrációja csökken. Tovább csökken a szulfátkoncentráció a folytatódó szulfátredukció révén. A zsírsavak átalakulása a pH és alkalitás (lúgosság) növekedésével jár, ami a kalcium, a vas, a mangán és a nehézfémek oldhatóságának a csökkenését vonja maga után, amelyek később valószínűleg szulfidokként csapódnak ki. Továbbra is szabadul fel ammónia, ami az anaerob környezetben nem alakul át. A IV., ún. metán fázisban 50-60 % metántartalomnál stabilizálódik a gázképződés, ami a zsírsavak és a hidrogén alacsony szinten történő tartását eredményezi. Az V. fázisban csak az ellenálló szerves szén marad az elhelyezett hulladékban. A metántermelődés jelentősen visszaesik, koncentrációja olyan kicsi lesz, hogy nitrogén jelenik meg a gázokban a légköri diffúzió miatt. Aerob zónák és a metán képződéshez túl magas redoxipotenciálú zónák jelennek meg a felső rétegekben.

A folyamat modellezése többek között a McDougall-Pyrah modell segítségével lehetséges. A szerzők az egyes fázisok időintervallumát nem adják meg, ezért ezt a lerakó egyedi jellemzőit is mérlegelve kell meghatározni.



a) Christensen- Kjeldsen, 1989



b) Rettenberger, 1992

2.22. ábra A depóniagáz és a csurgalékvíz összetevőinek alakulása a lebomlási fázisban (Christensen, Kjeldsen, 1989; Rettenberger, 1992, 2008)

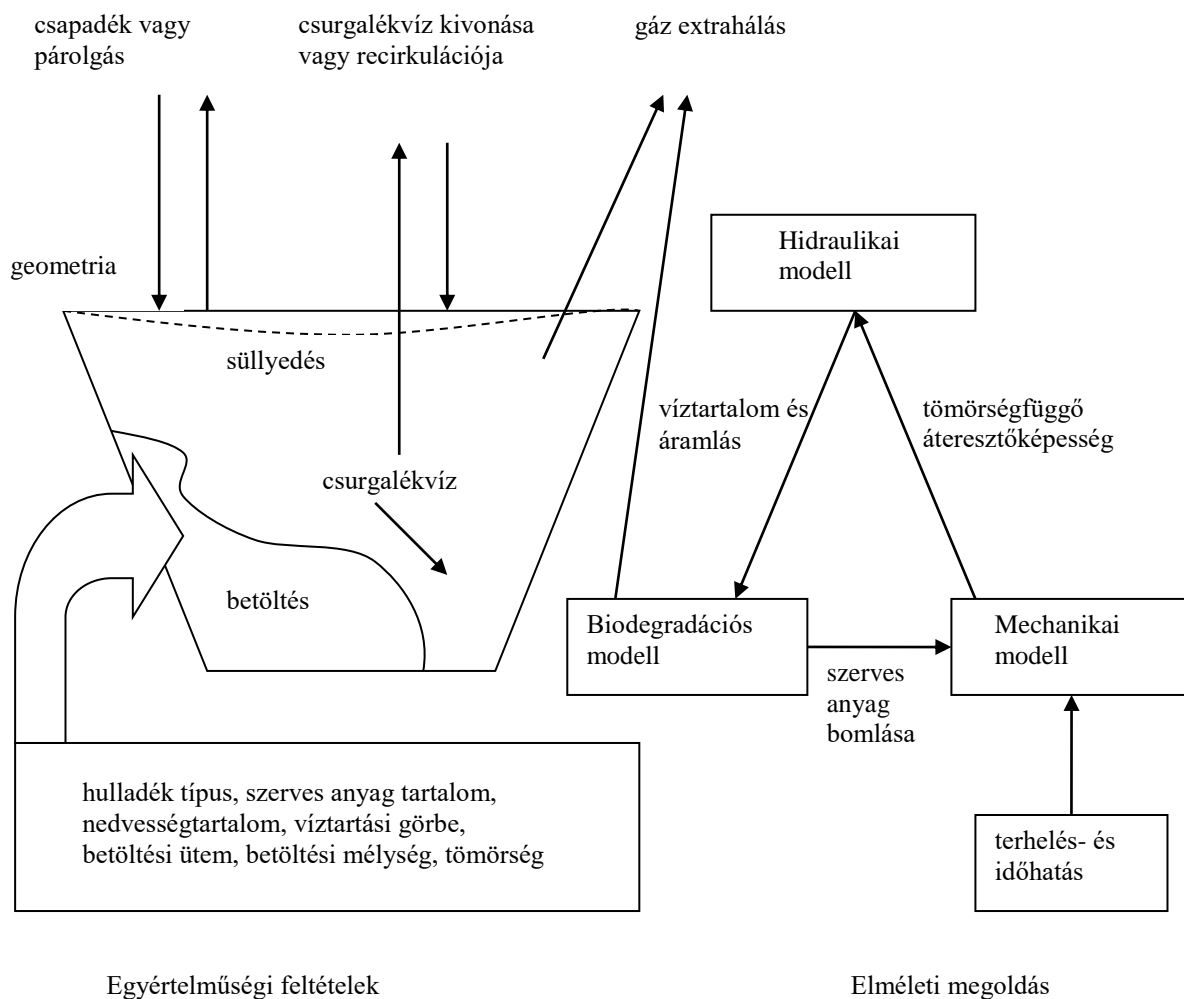
Egy szilárdhulladék lerakóban a fenti lebomlási, degradációs folyamatok játszódnak le, melyben dominálnak az anaerob körülmények, a szerves anyagok lebomlása viszonylag lassú (Hughes et al., 2005). A hulladék, lerakása után, az idő előrehaladtával a fent ismertetett öt degradációs fázis szerint bomlik le, azaz a vizsgált minta 1-5 degradációs fokúnak sorolható be.

2.7. táblázat A hulladékot alkotó összevont frakciók arányának alakulása a bomlási folyamat során (Varga, 2010)

	Degradációs állapot				
	1.	2.	3.	4.	5.
Durva szemcsék (%)	66-86	58-75	40-58	30-45	25-40
Homok (%)	10-25	11-27	20-35	20-35	20-35
Finom szemcsék (%)	5-15	8-18	15-30	25-40	35-50

A vizsgált minta degradációs fokának meghatározásánál figyelembe kell venni az összetételét, a szervesanyag tartalmát, a korát, a víztartalmát és csurgalékvízének vízkémiai tulajdonságait (Reddy et al., 2011). A biológiai-kémiai-mechanikai degradációs folyamatok jelentősen és határozott irányban megváltoztatják a hulladék szemeloszlását is (2.7. táblázat), és így a szemeloszlás meghatározására egyszerűsödhet a hulladékminták degradációs fokba sorolása (Varga, 2010).

A komplex modellek a mechanikai, hidraulikai és biológiai hatások együttes modellezését teszik lehetővé, ilyen a McDougall-Pyrah modell (McDougall, 2008) (2.23. ábra).



2.23. ábra A McDougall-Pyrah kapcsolt modell vázlata (Imre et al., 2007)

Ez egy hidraulikus, egy mechanikus és egy biodegradációs rész-modellből áll. A hidraulikus rész-modell egy „nem kapcsolt” telítetlen vízáramlási modell, amely a beszivárgási hatások, és a víztartási görbe ismeretében leírja az áramlást, lehetővé teszi a keletkező csurgalékvíz mennyiségének becslését, megadja a nedvességtartalmat. A biodegradációs rész-modell megadja a nedvességtartalom függvényében lejátszódó tömegcsökkenést, amely a mechanikai modell bemenő adata. Ezt a rész-modellt a közegészségügy által használt szennyvízlebomlási modell továbbfejlesztésével alakították ki, figyelembe véve, hogy a kisebb víztartalom és nagyobb szilárdanyag tartalom miatt az enzimikus hatások fontosabbak. Két független részből áll, az egyik az illékony zsírsavak (VFA) koncentrációját, a másik a metánképző biomassza mennyiségét (MB) írja le. A mechanikai rész-modell egy dupla pórusszerkezetű, telítetlen, bio-viszko-elasztikus anyagmodell alapján, kis elmozdulások és

alakváltozások figyelembe vételével készült. A következő másodlagos hatások szerepelnek benne: a hagyományos értelemben vett kúszás, a tömörödés miatti előterhelési feszültség növekedés és a biodegradációs tömegcsökkenés. A városi hulladék víztartási és kompresszibilitási jellemzői önsúly hatására ugyanis olyanok, mint a dupla pórusszerkezetű telítetlen talajoké. A szilárd szervesanyag-tartalom egy relatív állandó aggregátumon belüli víztartalmat jelent, az alakváltozás az aggregátumok közötti pórusrendszer rovására történik. A mechanikai rész-modell eredménye információt ad a fázisos összetétel megváltozásáról, és ezen keresztül az áteresztőképesség és a víztartási jellemzők változásáról (Imre et al., 2007).

2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A vizsgált hulladék kompressziójának talajmechanika alapú modellezés kapcsán a következő megállapítások tehetők. A szakirodalom egységes szemléletűnek mondható, elvi szinten ellentmondások nem tapasztalhatók. A téma kutatott, melyet a sok megjelent szakcikk bizonyít, ugyanakkor sok részletkérdés nem, vagy nem kellően ismert, melyet egyrészt az újabb és újabb szakcikk megjelenése bizonyít, másrészt az üzemeltetői tapasztalat, miszerint konkrét kérdésekre nincs mindig megnyugtató (akár szabványosított) válasz. A talajmechanika alapú modellezés egy ismert út, jóllehet a talaj analógia nem teljes, hiszen a hulladék nem talaj, de a geotechnikai vizsgálati- és számítási módszerek módosításával eredményt érhetünk el. A szakirodalom elsősorban az összenyomódási modulus meghatározására összpontosít, szükséges lenne a teljes kompressziós görbe ismerete. Valamint az alakváltozási jellemzők terhelés függése kutatott, de a degradációs fok szerinti változásuk nem. A vizsgált hulladék egyéb, a kompressziós viselkedésükhöz köthető hulladékfizikai jellemzőik kapcsán megállapítható, hogy a vizsgálati faktorok száma sok, és nagy szórást mutatnak. A szakirodalmi adatok sokszor nem ismert háttérű méréseken, vagy visszszámításokon, esetleg becsléseken, tapasztalati alapú felvételen nyugszanak. Ebben az esetben is a terhelésfüggésük vizsgált, de az időfüggésük nem, illetve nem következetesen alkalmazott rendszerben. Ezért célszerűnek tartom a fentiekén kívül a Poisson-tényező, a vízáteresztő-képességi együttható és tehermentesítés hatását vizsgálni a degradációs fok függvényében.

A vizsgált hulladék konszolidációja kapcsán, a szakirodalomból is megállapítható, hogy a hulladékhalom alakváltozása időben lejátszódó folyamat. Arra, hogy a fizikai – kémiai – biológiai hatásokat, milyen matematikailag kezelhető formában lehet felírni sok elmélet született már. A különböző módszerek szerinti számítás végeredményei nagy szórást mutatnak. De még azonos módszert alkalmazva is jelentős lehet a számítások végeredményének eltérése, amely a bemenő adatok rendkívül nagy szórása miatt lehetséges. Az időben lejátszódó folyamatok hatásának vizsgálata a bemenő adatok változására, nagy kihívás. A szakirodalom nem egységes a friss és az érett hulladék értelmezését illetően, szükséges ezt tisztázni, illetve célszerűnek tűnik több érettségi, azaz degradációs fázist megkülönböztetni, és ezt következetesen alkalmazni a teljes modellezés (mintavétel – laboratóriumi vizsgálatok – kiértékelés- numerikus számítások) során. Az időben lejátszódó alakváltozás talajmechanika alapú modellezése egy járható út a szakirodalom szerint, de a fent leírtak miatt pontosítható, pontosítandó.

A reológiai modellezés is adaptálható a hulladékok vizsgálatára, bár ez az út a talajmechanika alapú modellezéshez képest ritkábban alkalmazott. Ebben az esetben is megállapítható, hogy a számításokhoz felhasználandó bemenő adatoknak nagy a szórása, így egyrészt minden új információ értékes, másrészt ez esetben is célszerű lenne a degradációs fokhoz kötni a modell paramétereit. Célszerűnek tartom a rövid és hosszú idejű viselkedést más modellel leírni, az eltérő domináns hatások miatt.

A vizsgált hulladék alakváltozásának talajmechanika alapú modellezése kapcsán a szakirodalomból ismertek a hulladékhalom alakváltozását leíró analitikus és numerikus megoldások is. Vannak komplex megoldások, melyek nem csak a mechanikai viselkedést írják le, de becslést adnak a csurgalékvíz mennyiségére, a fejlődő lerakóhelyigáz képződésére is. Közös jellemzőjük e megoldásoknak, hogy a bemenő adatok száma sok, nehezen és bizonytalanul előállíthatóak, ugyanakkor a megoldások paraméter-érzékenyek. Leszűkítve a vizsgálódást az alakváltozás kérdésére, szükséges lenne egy olyan elméletileg megalapozott módszer, mely a gyakorlati célokra is jól használható, azaz egyszerű. Ezért érdemes numerikus (véges elemes) ismert módszert adaptálni hulladékhalmokra. A vizsgálati célt szem előtt tartva ez célszerű, ugyanakkor azért is érdemes a részmodellek fejlesztése, mert ezek szorzata a komplex modell.

A talajmechanika alapú modell kapcsán abban a szerencsés helyzetben voltam, hogy Varga, (2010) doktori értekezése, az általam vizsgált hulladékminták nyírószilárdsági paramétereinek értékét (többek között) megadta, így ezeket én, mint alapadatokat tudtam felhasználni. E fejezetben ezeket nem tüntettem fel, mint irodalmi adatokat, de a későbbiekben felhasználok, mint speciális irodalmi adatokat.

A hidraulikai modell kapcsán megállapítható, hogy a modellek bizonytalansága szintén nagy. A bemenő paraméterek szórása szintén. E modellezési terület alapvetően két részből áll, a hulladéktest és a "segéd" szerkezetek vizsgálatából. Lehetőségeim miatt szűkíteni kellett a kutatás témáját. A korábbi kutatásaimat is figyelembe véve, ez utóbbi vizsgálata mellett döntöttem. Ez esetben pedig leghasznosabb a víztartási függvényre összpontosítani, hiszen a "segéd" szerkezetek nedvességgel kapcsolatos viselkedésének ez a kulcskérdés. E kérdéskörrel a talajtan és a talajmechanika egyaránt régóta foglalkozik. A két tudományterület a szakkifejezésekben, a vizsgálatok célját illetően eltér, de elvében nem. Hasznos lehet egyrészt a víztartási függvény meghatározásával kapcsolatban a közvetlen, mérési eljárások mérés-technikai fejlesztése, hiszen a vizsgálandó talajok, a talajtanban kidolgozott módszerek mérési tartományának szélén találhatóak, a talajmechanikai célú mérések pedig a haza gyakorlatban kevésbé ismertek. Másrészt a közvetett (szemeloszlás alapú) víztartási függvény meghatározások előremutatóak, a nemzetközi kutatások napjainkban gyakori témája, így e módszer pontosítása is hasznos.

A mérés-technika kapcsán megállapítható, hogy a mechanikai - és a hidraulikai modellhez szükséges bemenő adatok meghatározása nem rutin feladat. Ez a legtöbb esetben speciális eszközöket, eljárásokat igényel, így a mérés-technika, az adatfeldolgozás, kiértékelés új útjait kell kidolgozni.

Megállapítható továbbá, hogy a hulladéklerakók mechanikai viselkedésének vizsgálata kapcsán az új ismeret a bemenő adatok pontosítása, a modellek egyszerűsítése, de a vizsgált jelenség szempontjából pontosságának megtartása, esetleg javítása melletti, alkalmazott kutatás-fejlesztés, míg a hidraulikai modell kapcsán a téma szűkítése indokolt (lehetőségeim figyelembe vétele miatt), és alkalmazott alap kutatás.

Ezeket a megállapításokat figyelembe véve határoztam meg kutatómunkám célkitűzéseit.

3. 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.

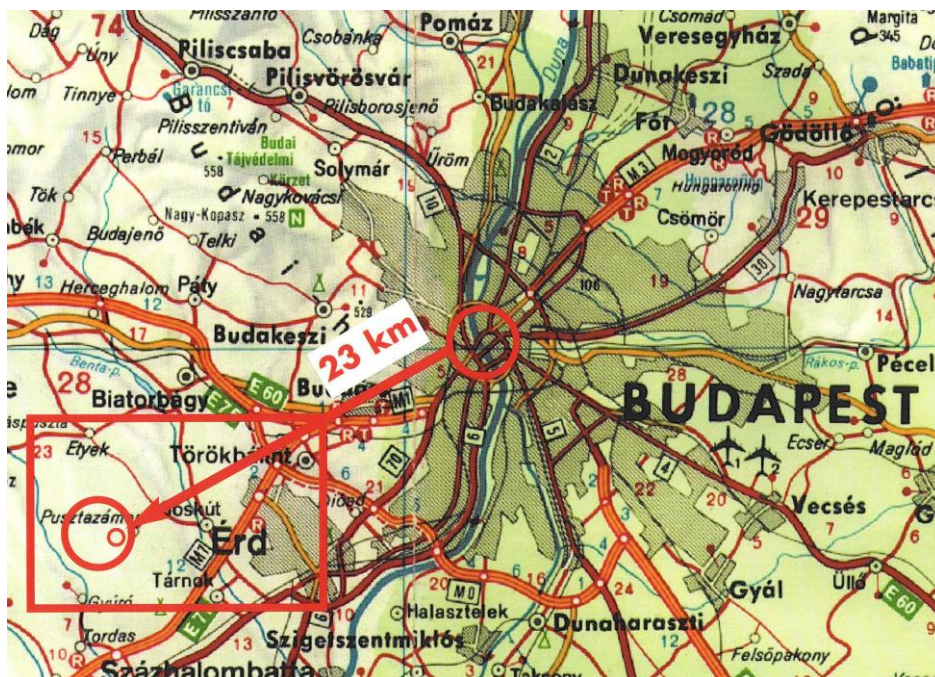
3.1. Kezdeti feltételezések

A vizsgálatok megkezdése előtt a következő feltételezésekkel éltem:

- A lerakott szilárd, kommunális (települési) 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 más kutatók által végzett vizsgálatokkal való összehasonlíthatóságuk.
- Az alkalmazott vizsgálatok, elméletek, modellezések közül a még elfogadható pontosságú legegyszerűbbet keresem, hiszen gyakorlati célokból ez a legkedvezőbb.

3.2. Vizsgálati helyszínek

A vizsgált kommunális hulladéklerakó a Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ volt. A választást több ok is indokolta: ez a "budapesti" lerakó, régi munka és tudományos kapcsolat, értékelhető alapadatrendszer, Magyarország egyik legnagyobb lerakója, már 18 éve üzemel stb. A lerakó Budapesttől 23 km súlyponti távolsággal, DNY-ra található (3.1. ábra), koordinátái: 47°22'39"N, 18°47'53"E.



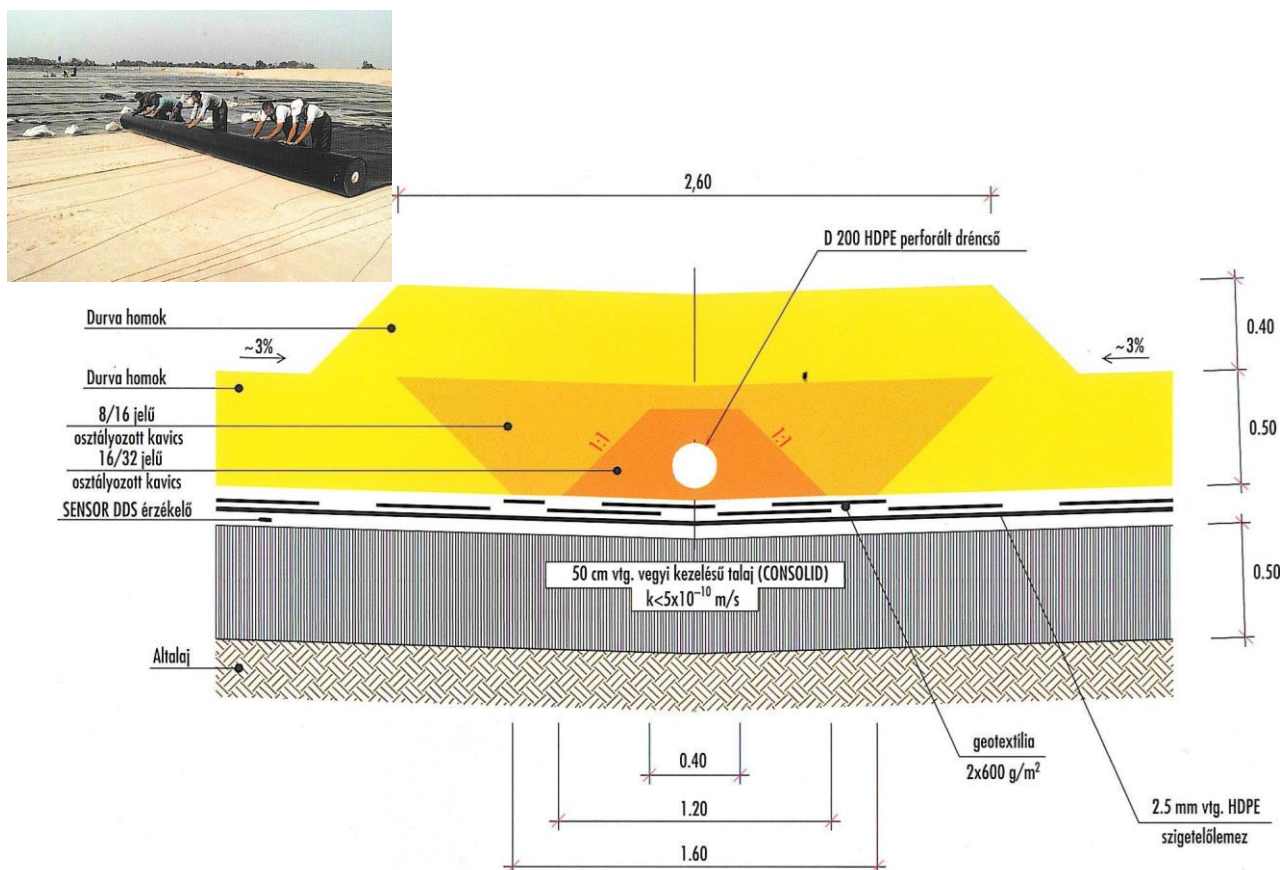
3.1. ábra Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ elhelyezkedése (FKF Zrt., 2013)

A pusztazámori hulladéklerakó építése 1999 áprilisában kezdődött és 2000 augusztusában fejeződött be. A 91 hektáros korábbi mezőgazdasági területen helyezkedik el a lerakótér (és bővítési területei), a komposztáló tér, a fogadóterminál, az irányítási és üzemviteli épületek. A lerakó 5 ütemben (eredeti tervek szerint 3 ütemben) a 3.1. táblázat szerinti kapacitással és üzembe helyezési idővel, területtel üzemel. Az első ütem 2012. év végére elérte a 99%-os feltöltöttséget.

3.1. táblázat A lerakó kapacitása és várható működési időtartama (FKF Zrt., 2013)

		I. ÜTEM	II. ÜTEM	III. ÜTEM	IV. ÜTEM	V. ÜTEM	ÖSSZESEN
LERAKÓTÉR TERÜLETE	ha	18,3	15,8	12,4	8,9	6,9	62,3
DEPÓNIA HULLADÉK TÉRFOGATA	Mm ³	3,8	3,5	3,6	2,5	6,1	19,5
ÜZEMELÉSI IDŐ	év	12	10	10	7	17	56
ÜZEMBE HELYEZÉS (TERVEZETT)	év	2000	2012	2022	2032	2039	

A lerakót az EU vonatkozó irányelvei szerinti és a hazai szabályozásnak megfelelő műszaki védelemmel építették, melynek a legfontosabb ismérve, hogy rendelkezik aljzatszigeteléssel (3.2. ábra), a szivárgó vizek és a keletkező depóniagázok kezeléséhez szükséges szerkezetekkel, berendezésekkel.



3.2. ábra Aljzatszigetelés és mélyponti szivárgó kialakítása (FKF Zrt., 2013)

A lerakót a Fővárosi Közterület Fenntartó Zrt. üzemelteti. Naponta átlagosan 1000-2000 t hulladékot raknak le, a mennyiséget hídmérleggel (3.3a ábra) mérik és regisztrálják. Az átvett

hulladék összetételét szűrőpróbaszerűen vizsgálják. Kompaktor segítségével tömörítik (3.3b ábra), 2-3 m vastag prizmába rendezve, napi takarást alkalmazva építik be (3.4. ábra).



a) hídmérleg



b) tömörítés kompaktorról

3.3. ábra A lerakó üzemeltetése

A hulladékfeltöltés geometriájának kitűzése és a feltöltöttség ellenőrzése GPS geodéziai méréssel történik.

a) a lerakó műholdas képe
(Google)b) az 1. ütem hulladék dombja
(FKF Zrt., 2013)

3.4. ábra A Pusztazámori Hulladékkezelő Központ

A szükséges laboratóriumi vizsgálatok a Szent István Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Építőmérnöki Intézet, Geotechnikai Laboratóriumában készültek. A rutinszerű geotechnikai vizsgálatok (víztartalom, sűrűség, kompressziós vizsgálat stb.) elvégzése mellett, speciális eszközt fejlesztettünk (3.5. ábra), a nagyméretű ödométert, a hulladék eltérő maximális „szemnagysága” miatt.

A hidraulikai modellezés legfontosabb (kulcs) mérése a víztartási görbe meghatározása. Az építőmérnöki gyakorlatban e vizsgálat nem rutinszerű, de a talajtanban igen. Így került sor a Magyar Tudományos Akadémia, Talajtani Kutatóintézetének bevonására (az együttműködés jóval korábbra datálódik). Itt helyet és szakmai segítséget kaptam laboerszköz fejlesztésre (pF mérő bokszt (3.6. ábra), feszültségkamrás berendezés), és az intézet biztosította a kontrollméréseket is.

A társmerések (Varga, 2010) a Budapesti Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnikai Laboratóriumában készültek, e mérések eredményeit, a mérések részletes ismertetése nélkül, mint speciális irodalmi adatokat használtam fel.



3.5. ábra SZIE-YMÉTK-ÉI-GTL a nagyméretű ödométer

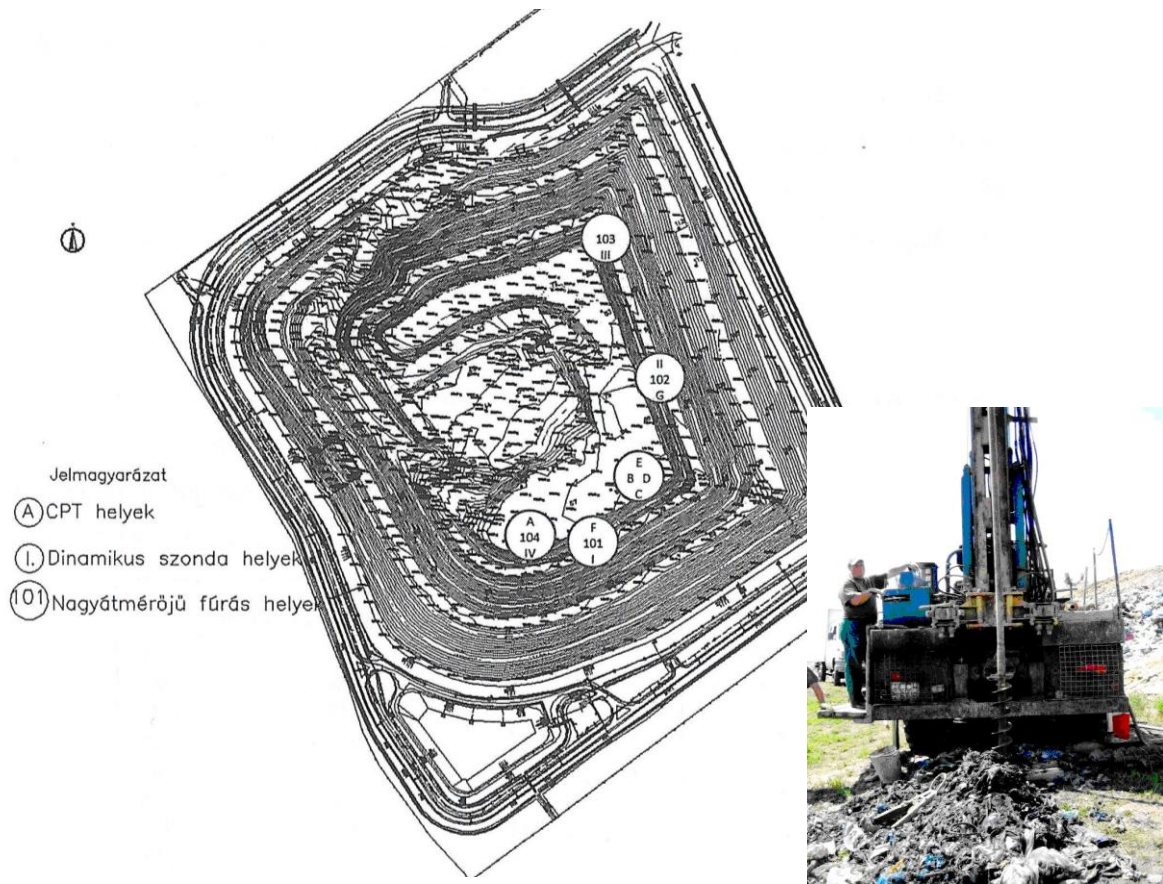


3.6. ábra MTA-TAKI víztartási görbe mérése

3.3. Vizsgált anyagok

Vizsgálódásom tárgya a hulladéktest agyaga, a kommunális hulladék a napi takarással és a lerakóhoz kapcsolódó alsó-, felső lezárás (vízelvezető (drain) réteg, takarás stb.) ásványi anyaga, valamint meg kellett vizsgálnom a lerakó alatti rétegösszetétet. A geotechnikában szokásos utat járva, a mesterséges rétegekből mintaanyagot (illetve elvi mintát) vizsgáltam, a lerakott hulladékból viszont mintavételre volt szükség.

A pusztazámori hulladéktest feltárása 2010-ben, kutatási együttműködés keretében (SZIE-BME) valósult meg. 4 db nagytérű fúrást mélyítették (12-21 m-es talpmélységgel (3.7a ábra)), valamint készült 7 db CPT és 4 db DIN szondázás. A feltárási pontokat a (3.7b ábra) mutatja. A minták degradációs fok szerinti besorolása és az ehhez szükséges összetétel-, biológiai- és kémiai vizsgálatokat a BME-en végezték (Varga, 2010). Én paralel mintákkal dolgoztam, így ezeket újra meghatározni nem volt szükséges.



a) feltárási helyszínrajz

b) nagyátmérőjű geotechnikai fúrás a PRHK-ban

3.7. ábra A hulladéktest feltárása

Vizsgálataimhoz 22 db víztartalmi mintát kaptam, melyek a mintavétel és a vizsgálat elvégzése közötti időben, fagyasztással voltak tartósítva. A 22 minta vizsgálata egyenként nem volt megvalósítható, mivel mennyiségük túlságosan csekély volt, így átlagminták készítésére kényszerültem, de ez azzal az előnnyel járt, hogy az adott hulladékra jellemző átlagot mérhettem.

Az átlagmintákat a degradációs fok figyelembevételével a következő módon készítettem:

1. minta: 103 F / 0,50, 1,00, 1,50, 2,00 m,
104 F / 0,50, 1,00, 1,50, 2,00 m,
2. minta: 103 F / 2,50, 3,50, 4,50, 5,50 m,
104 F / 2,50, 3,00, 4,50, 5,50 m,
3. minta: 103 F / 6,50, 7,50, 8,50, 9,50, 10,50, 11,50 m.

A párhuzamos vizsgálatok eredményeit felhasználva (Varga, 2010), a minták a következő degradációs fokúak:

1. minta, jele: S-1 – 2. degradációs fok,
2. minta, jele: S-2 – 3. degradációs fok,
3. minta, jele: S-3 – 4. degradációs fok.

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 degradációs fok meghatározását és részleteit (Varga, 2010) tartalmazza (2.4. fejezet).

A pusztazámori lerakó jogszabályi kötelezettségének eleget téve, saját méréseket is végez. Többek között mérik a beszállított hulladék tömegét, szemrevételezéssel és szűrőpróbaszerű mintavétel utáni laboratóriumi vizsgálattal az összetételét, az épülő hulladékdomb évenkénti felmérésével a térfogatát. Az egyéb környezetvédelmi célú mérések (vízkémiai-biológiai vizsgálatok, csurgalékvíz mennyiségi mérése stb.) nem tárgyai az értekezésemnek így ezekre nem térek ki, csak a fentebb felsoroltakra. A beszállított hulladék (és napi takarás) tömegét a kezdetektől mérik hidmérleg segítségével (3.2. táblázat).

3.2. táblázat A lerakó saját tömeg és térfogat mérései

Év	Depónia tömege (t)	Depónia térfogata (m ³)
2000	114.283	134.000
2001	358.859	422.000
2002	769.734	832.000
2003	1.333.943	1.302.000
2004	1.988.300	1.913.000
2005	2.540.654	2.341.000
2006	3.026.669	2.629.600
2007	3.428.754	2.878.400
2008	3.847.867	3.099.000
2009	4.245.516	3.317.000
2010	4.561.218	3.472.000
2011	4.819.869	3.589.000
2012*	5.037.565	3.653.000

* - 2012. végére az I. ütem elérte a 99 % - os feltöltöttséget

A hulladékdomb évenkénti felméréséből kiszámítható a lerakott hulladék térfogata (az adott időpontig bekövetkezett degradáció lejátszódása után) (3.2. táblázat).

A kezelésre átvett hulladék összetételét a lerakó üzemeltetője (FKF Zrt.), a mindenkor érvényes jogszabályok előírásainak megfelelően vizsgálja. A vizsgált időszak utolsó 8 évi átlagát kiszámolva a 3.3. táblázatban megadottak szerint alakul az összetétel (az évenkénti bontás a mellékletben található).

A lerakó altalaját a tervezés megkezdése előtt feltárták, a részletes geotechnikai szakvéleményből (Mélyépterv Kultúrmérnöki Kft. készítette) megállapítható, hogy az I. ütem altalaját feltáró fúrás a G12-FR jelű, amely 60 m-es talpmélységgel készült. Természetesen kisebb talpmélységűek még készültek. Az adott fúrás rétegsorát a melléklet, a fontosabb talajfizikai jellemzőket a 3.4. táblázat mutatja.

3.3. táblázat A kezelésre átvett hulladék összetétele (2006-2013 átlaga)

frakciók (MSZ 21420-29:2005)	(m/m %)
biológiailag bomló	25,98
papír	11,17
karton	4,65
kompozit	3,25
textil	3,75
higiéniai	4,37
műanyag	19,30
nem osztályozott éghető	2,30
üveg	4,07
fém	3,30
nem osztályozott éghetetlen	4,47
veszélyes	0,87
kis szemcseméretű	12,53

3.4. táblázat A G12-FR jelű geotechnikai fúrásban észlelt talajok fontosabb talajfizikai jellemzői

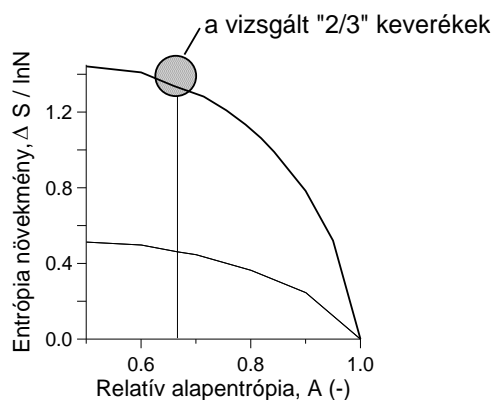
		ρ_n (t/m ³)	φ (°)	c (kN/m ²)	E_s (kN/m ²)
0,00-5,00 m	iszapos homokliszt	1,63	33	34	6000
5,00 – 20,00 m	agyagos homokliszt	1,96	33	42	20000
20,00 – 30,00 m	iszapos agyag	2,17	18	206	25000
30,00 – 40,00 m	agyagos homokliszt	2,22	5	430	40000
40 m-től	kőzetlisztes agyagmárga	na.	na.	na.	na.

Megjegyzés: a talajmegnevezés a mintavételkor érvényes szabványnak megfelelő (MSZ), de ez a talajfizikai tulajdonságokat nem befolyásolja.

A szűrőrétegek és a felső lezárás vizsgálata kapcsán, a vizsgált anyag a szűrőbe beépített, 3.2. ábra szerinti, anyag lehetne, de az épített rétegekre való tekintettel és az eredmények általánosíthatósága érdekében, általánosan szemcsés talajok vizsgálatára került sor. E fejezetben ismertetett vizsgálati eredmények egy sokéves kutatás része, melyben részt vettem (Imre et al., 1999, 2000, 2002, 2006). A kutatási rész, annak igazolása, hogy a modell, az Imre-Genovese modell (Imre et al., 2003), érvényes-e új keverékekre, a mérési tapasztalatok felhasználásával a modell pontossága javul-e. A mérések mérés-technikai fejlesztését és a mérési eredmények kiértékelésével, a megalkotott elmélet pontosítását végeztem.

A kutatás távlati célja a szemeloszlási entrópia (Lőrinc, 1986, 1990; Imre et al., 2005) felhasználásával a víztartási görbe meghatározása. Ezért nem véletlenszerű a frakciók és keverékek kiválasztása, hanem igazodik a kutatási programhoz. Normalizált koordináta rendszerben mutatja a (3.8. ábra) a vizsgált homok keverékeket.

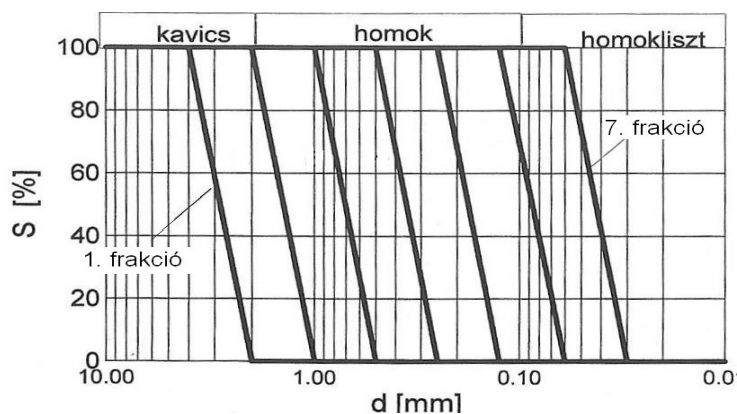
A kutatás első részében 7 homokfrakciót és 21 telítetlen $A = 2/3$ optimális homokkeveréket vizsgáltak (Imre et al., 2003). Az új méréseknél (Imre, Havrán, Firgi) az első négy frakció (3.5. táblázat és 3.9a ábra) és 6 optimális keverék (3.9b ábra) vizsgálatára került sor (Havrán, 2004). A keverékek 1/3 rész finom és 2/3 rész durva szemcsés halmazból álltak.



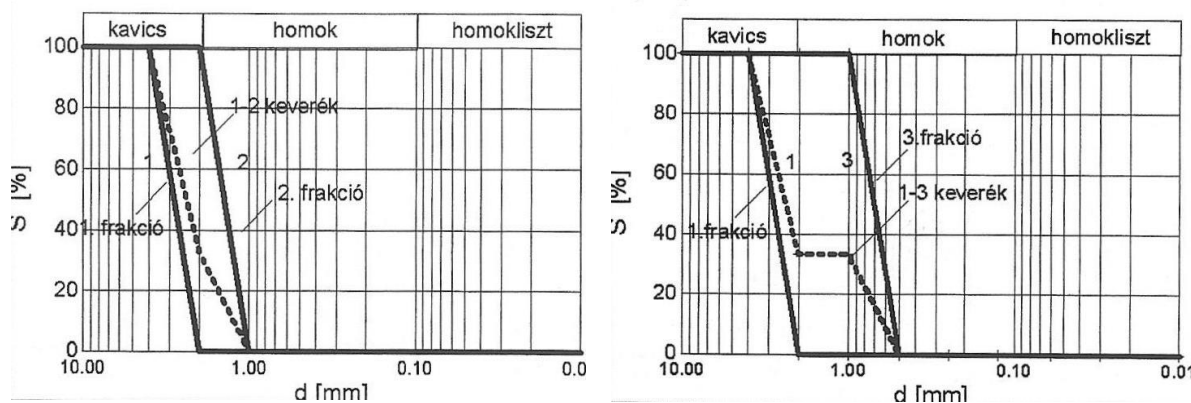
3.8. ábra A vizsgált keverékek, normalizált koordináta rendszerben a maximális és minimális normált entrópia növekmény vonallal

3.5. táblázat A vizsgált frakciók

Frakció	Szemcse méret d (mm)
1	2,000 – 4,000
2	1,000 – 2,000
3	0,500 – 1,000
4	0,250 – 0,500
5	0,125 – 0,250
6	0,060 – 0,125
7	0,030 – 0,060



a) vizsgált frakciók



b) a keverékek közül egy folytonos és egy frakcióhiányos idealizált szemeloszlási görbéi

3.9. ábra Szemeloszlási görbék

A mintavétel, a minták előkészítésének értékelése

A mintavétel mennyiségi és minőségi végrehajtására befolyásom nem volt. A további vizsgálatok eredményeinek értékelhetősége miatt szükséges néhány tényt rögzíteni.

- Mint általában a geotechnikai gyakorlatban mindig kevés a minta, és így kevés az adat, ez a hulladék esetében még inkább igaz, hiszen nagy a hulladék inhomogenitás. Ezt átlagminták készítésével igyekeztem figyelembe venni.
- A mintavétel technikájából adódóan a minták, úgynevezett féligzavart minták voltak, ezért várható volt, hogy a kezdeti terhelési szakaszon az előterhelési hatás érvényesülése mellett, a fellazítás hatásai is érvényesülnek.
- A minták előkészítésének az a része, hogy a nagyobb darabokat ki kell venni, szükségszerűen és elkerülhetetlenül hibát okoz.
- A vizsgált minták egy adott lerakóból származnak (PRHK), az eredmények úgy általánosíthatók, hogy figyelembe vesszük az esetlegesen más lerakási technológiát (azért ez általában nagyon hasonló), illetve a lerakott hulladék összetételét (3.3. táblázat), ami kommunális lerakók esetén inkább időbeli tendenciát mutat, mint térbelit, valamint a klimatikus viszonyokat, és akkor akár más lerakó is modellezhető a kidolgozott módszerrel.

A hidraulikai modell kapcsán vizsgált szemcsés talaj frakciók és keverékek előállítására a felező sziták alkalmazásával kielégítő pontosságúnak mondható, de akár még ezt is lehetne tovább pontosítani, megítélésem szerint az egyéb bizonytalanságokhoz viszonyítva ez így elfogadható. A minták előkészítésére kidolgozott eljárás (telítés, minta kiszúrás) sem mutat hibát, így az eredmények általánosíthatók.

3.4. Vizsgálati módszerek, eszközök

A hulladék és a talaj eltérő anyag, így szükségessé vált a talajmechanikai eszközök, mérési módszerek adaptálása. Az épített rétegek vizsgálata kapcsán, pedig talajtani és egyéb telítetlen talajmechanikai vizsgálatok adaptálása, fejlesztése, hazai bevezetése vált szükségessé. Természetesen rutin geotechnikai, geodéziai stb. méréseket is alkalmaztam.

3.4.1. Módosított kompressziós vizsgálat

A 3.3. fejezetben ismertetett mintavétel után szükségessé vált a rutin laboratóriumi eszköz az ödométer fejlesztése, ill. új berendezés építése, mivel látható volt, hogy jóval nagyobb "szemcséket" tartalmaz a hulladék, mint a talajok általában, a mérés tisztázására pedig a rutin ödométert alkalmaztam.

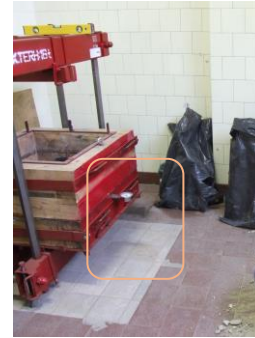
A vizsgálati berendezés

Egy olyan eszközre volt szükség, amely képes működtetni különböző nagyságú függőleges terheket és mérni e teher hatására létrejövő összenyomódását a mintának. A minták közvetlen nyíró vizsgálata egy 50x50 cm-es keresztmetszeti területű nyíródobozzal történt, ezért én is ezt a belső méretet választottam, megtartva a nyíródobozt, de azt ödométerre átalakítva (3.10a ábra). A tervezés után a berendezés gyártását szakipari cég végezte.

A hulladékdomb magasságát és a hulladék térfogat sűrűségét figyelembe véve, a berendezésnek 0-600 kN/m² közötti függőleges feszültség létrehozására kellett alkalmasnak lennie. Ez, figyelembe véve a minta keresztmetszeti területét, 0-150 kN függőleges erőt jelent. Statikus teherrel 0-5 kN között lehetséges a terhelés (3.11a ábra), e fölött hidraulikus sajtót (harckocsi emelőt) alkalmaztunk (3.11b ábra), mivel a 150 kN –os statikus terhelés még áttétel alkalmazásával sem lehetséges, a rendelkezésre álló hely és egyéb lehetőségek miatt.



a) próbamérés közben

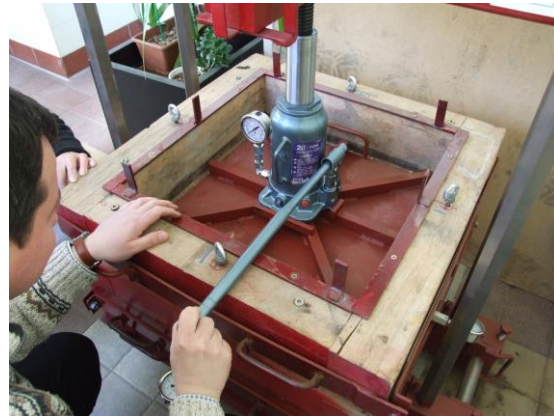


b) az oldalnyomásmérő

3.10. ábra Az új ödométer



a) súlyokkal



b) hidraulikus sajttóval

3.11. ábra A teher felvitele a mérés során;

Azért hogy a mérésekből a modellezéshez több információt nyerjek, a doboz oldalfalába 2 db nyomásérzékelőt építettünk (Nicron acélmembrános nyomásmérő (3.10b ábra).

A berendezés üzemi próbáját a gyártó elvégezte, mely során acél próbatest alkalmazásával tesztelték a berendezés szilárdságát (az alakváltozások mérése mellett), melynek eredménye a 16 t-ás maximális terhelhetőség lett. A hidraulikus sajtó kalibrálását terhelőkeretben végezték, eredményeit táblázatos formában megkaptam.

Próbamérés, mérési tapasztalatok

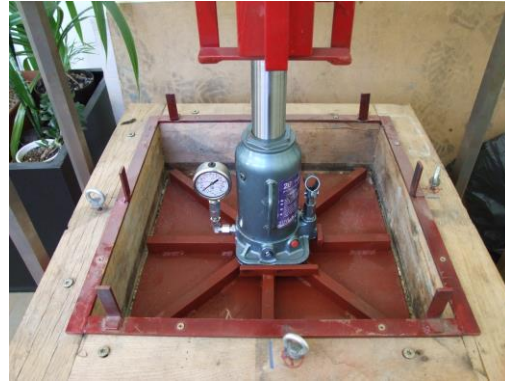
A berendezés laboratóriumi próbáját homokos kavics alkalmazásával (3.12. ábra) végeztem el. A méréshez használt homokos kavics (saGr) szemeloszlási vizsgálatának jegyzőkönyveit a melléklet tartalmazza. A vizsgálatot 5 terhelési lépcsőben hajtottam végre 4 kN/m^2 – től 800 kN/m^2 –ig (így a berendezést a maximális teherbírás felett is próbaterheltem).



a) bekészített homokos kavics



b) a terhelő lap



c) terhelés hidraulikus sajtóval
3.12. ábra Próbamérés

A berendezés alkalmasnak mutatkozott nagyátmérőjű ödométeres vizsgálatok végrehajtására, abban túlzott alakváltozások, deformációk, törés nem volt tapasztalható (az emelő tömítettségének hibája javításra került). A tapasztalat szerint a függőleges elmozdulás mérésének nem elég pontos módja a lézeres távmérés, így századmilliméter beosztású mérőórákkal szereltem fel a berendezést (MTDI műszerpályázatának segítségével) (3.13. ábra).



3.13. ábra A függőleges elmozdulás mérésének változtatása

A hulladékminták (kvázi) telített állapotúak, így a víz elvezetéséről (drénezésről) gondoskodni kell, ezért az alsó lemezt átfúrva 2db csövet építettem a műszerbe, és előírtam (magamnak) geotextília alkalmazását. A fertőzésveszély miatt a műszer alá műanyag kádat építettem, hogy az esetlegesen a csövekből kifolyó csurgalékvizet (mely az emberi egészségre és az élővilágra nézve is veszélyes), össze tudjam gyűjteni (3.14. ábra).



3.14. ábra A csurgalékvíz elvezetése, összegyűjtése

Tapasztalatom szerint a berendezés oldalnyomást mérő egysége, nem elég érzékeny, mivel viszonylag kicsi a nyomásmérő felület, illetve az óra osztása sem elég finom, de ennek

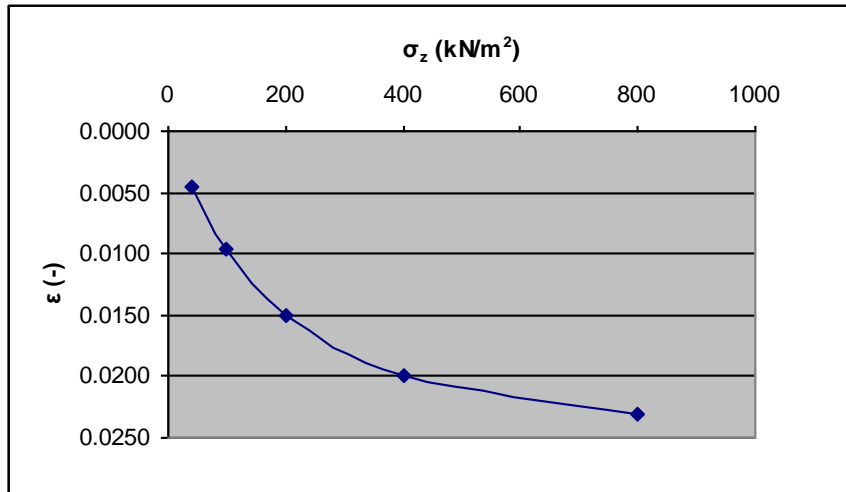
javítására lehetőség nem volt, így elfogadtam, hogy e méréseket nagyobb bizonytalanság mellett hajtom végre. Egy másik megoldás az oldalirányú alakváltozások mérése lett volna, de erre lehetőség nem volt (nagyátmérőjű magminta triaxiális vizsgálata).

A nagyméretű ödométer próbamérését, ahogy azt az előzőekben írtam homokos kavicsra végeztem. Az eredmények a várt értéket mutatták (3.15. ábra és 3.6. táblázat).

3.6. táblázat M-1 jelű minta kompressziós vizsgálatának eredményei

függőleges normál feszültség	vízszintes normál feszültség	fajlagos függőleges alakváltozás
σ_z	$\sigma_x = \sigma_y$	(ε)
(kN/m ²)	(kN/m ²)	(-)
4	nm.	né.
40	15,0	0,0045
100	36,0	0,0096
200	61,0	0,0150
400	98,0	0,0200
800	147,0	0,0231

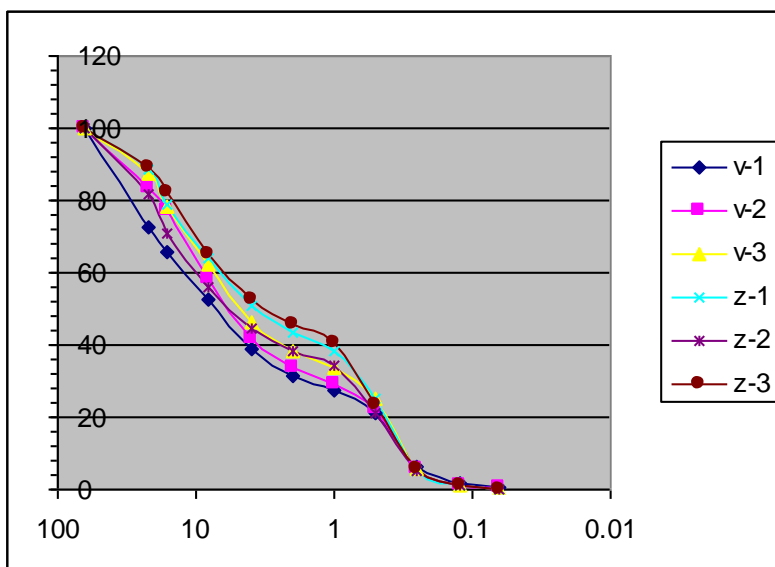
A végeredmény a szakirodalmi adatokkal is jó egyezést mutatnak. Ezekből a tényekből arra következtettem, hogy a berendezés hulladékok esetében sem hamisítja meg az eredményeket, a megkívánt pontosságnál jobban.



3.15. ábra Az M-1 jelű minta kompressziós görbéje

A további mérés megbízhatóságára vonatkozó megjegyzésen kívül, még két megállapítást teszek:

- Az első, a hulladéklerakó alsó vízvezető rétege hasonló anyagból épített, a teljes lerakó magassághoz viszonyítva vékony rétegének összenyomódása e vizsgálat szerint is elhanyagolható, az egyéb mozgásokhoz képest.
- A második megállapítás nem érinti a témát, de érdekes megfigyelés, hogy ilyen körülmények között (gátolt oldalkitérés és dinamikus hatás nélkül), a vizsgált anyagban a szilárd szemcsék törése volt tapasztalható (hallható), melyet a szemeloszlási vizsgálat visszaigazolt (3.16. ábra és 3.7. táblázat).



3.16. ábra Az M-1 jelű minta szemeloszlási görbéje (vizsgálat előtt (v) és vizsgálat után (z))

3.7. táblázat Az M-1 jelű minta fontosabb talajfizikai jellemzői

Minta jelle: M-1	bekészítés után	simító terhelés után	vizsgálat után
ρ_d (t/m ³)	1.769	2.064	2.113
e (-)	0.498	0.284	0.254
n (%)	33,24	22.12	20.26

A vizsgálat menete

A (3.3. fejezet) szerinti minták vizsgálatát végeztem el. Az első lépés a minták beszállítása után az átlagminták képzése volt (3.17. ábra). Így előállítottam 2. 3. és 4. degradációs fokú mintákat.



3.17. ábra A beszállított minta egy része és az átlagminták képzése

Ezután el kellett távolítanom a vizsgált mintatest méreteihez képest túl nagy darabokat (szabvány szerint), hogy ne egy-egy nagyobb hulladék alakváltozását mérjem, majd lemértem a bekészített minta súlyát. Ezután víztartalmi mintát vettem a hulladékból, a degradációs fok és a telítettség ellenőrzése céljából (3.18. ábra).

A mintát bekészítettem a berendezésbe, majd a függőleges terhet előbb súlyokkal (3.19a ábra), majd sajtóval (3.19b ábra) biztosítottam. Egy beállított függőleges terhelés értéknél (rendre: 5-10-20-40-80-160-320-640 kN/m²) az idő függvényében (rendre: 1-2-5-10-15-30-60-120-180-240-300-1440-2880 perc stb.) leolvastam a függőleges összenyomódást (3.20a ábra).

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.



a) beszállított minta válogatása



b) súlymérés



c) víztartalmi minták

3.18. ábra Az ödométeres vizsgálat előkészítő munkarészei

Az egyes terhelési lépcsőket a szabvány szerinti ideig, ill. ésszerű ideig működtettem, és csak akkor növeltem a terhelést, amikor vélhetően lejátszódott a fizikai összenyomódás. A vizsgálatról jegyzőkönyvet vezettem (melléklet), egy-egy minta mérésénél tervszerű, illetve szükségszerű terhelési lépcsők után tehermentesítést hajtottam végre.

Az oldalnyomás értékét is folyamatosan rögzítettem (3.20b ábra). A vizsgálat végrehajtása után a betömörödött hulladékból magmintát vettem további vizsgálatok céljából (3.20c ábra).



a) terhelés súlyokkal (250 kg)



b) terhelés sajtóval (16t)

3.19. ábra Az ödométeres vizsgálat



a) a függőleges összenyomódás mérése



b) az oldalnyomás mérése



c) "magmintavétel"

3.20. ábra Az ödométeres vizsgálat mérőórái és mintavétel

3.4.2. Víz tartási görbe mérése

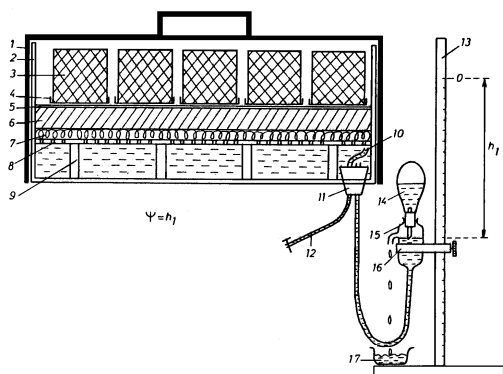
A hidraulikai modell kapcsán, a szakirodalmi összefoglaló (2. fejezet) szerint is, illetve a telítetlen talajmechanika elméletét ismerve egyértelmű, hogy a víz tartási görbe (víz visszatartási) görbe (függvény) meghatározása a kulcs feladat. Ezért a mérések tulajdonképpen szemcsés talajfrakciók és keverékek víz tartási görbéinek meghatározása volt.

A vizsgálati berendezések

Ismerve a görbe várható lefutását, valamint figyelembe véve a lehetőségeinket, két módszer jöhetett számításba: a függő vízoszlop módszere és a feszültségkamrás eljárás.

a) Függő vízoszlop módszere

A módszer a függő, vagy negatív vízoszlop elvére épül. A szívásófeszültséget a szabad vízfelszín magasságának beállításával hozzuk létre. Amíg a membránon keresztül nem jut levegő a szívótérbe, addig a függő, "negatív" vízoszlopot vákuum, azaz szívóerő tartja egyensúlyban, aminek értéke megegyezik a vízoszlop súlyával. A membrán a vizet átengedi, ezért ugyanez a szívófeszültség alakul ki a talajmintákban is. Így a szívóerő egyenlő a vízfelszín és a minta középvonala közötti vízoszlop súlyával. A mérés elméleti korlátja a rendszerben fellépő kavitáció. Adott töltőanyag esetén további korlát a töltőanyag (membrán) levegő belépési küszöbértéke. A (3.21a ábra) a homoklapos berendezés elvi elrendezését mutatja. A berendezéseket az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetben (TAKI) fejlesztették ki, és Várallyai-féle pF-mérő „box”-ként, vagy TAKI-módszerként vált ismertté (Várallyay, 1973), melyek előre beállított terhelési értékeken napjainkban is működnek (321b ábra).



a) elvi elrendezés (Várallyay, 2003)



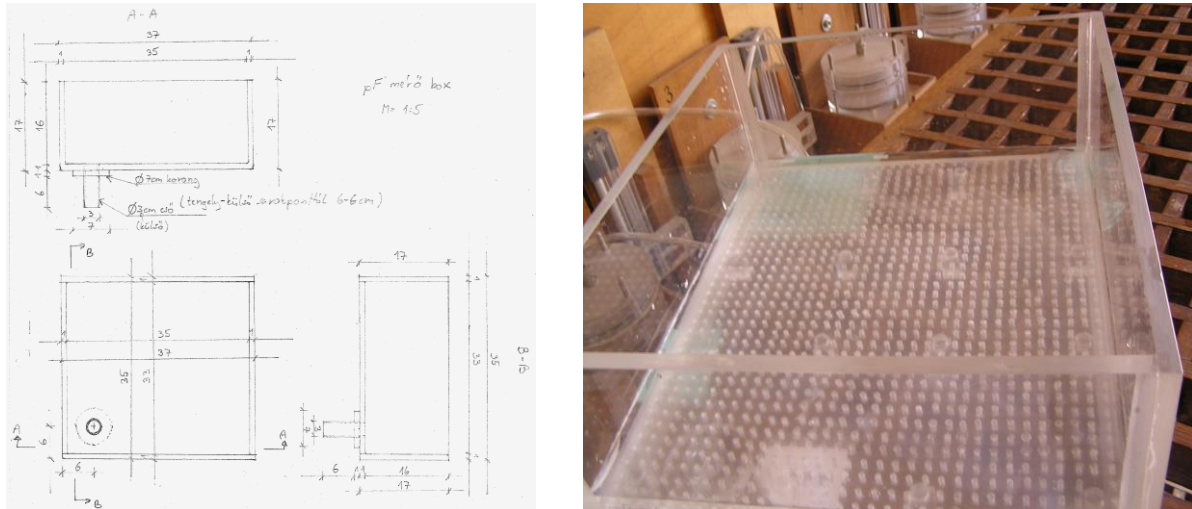
b) működés közben (MTA)

3.21. ábra Homoklapos berendezés,
a talaj nedvességpotenciáljának meghatározására pF 0–2,0 tenziótartományban

A TAKI berendezései fix terhelésen működnek, a kutatási programban azonban az 1-100 vízoszlop-cm terhelés közötti tartományban sok pont meghatározására volt szükség, így új homoklapos berendezés építése mellett döntöttünk (Laufer, 2005).

A berendezéshez szükséges egy 350x330 mm belső alapterületű, 170 mm belső magasságú kád (felülről nyitott doboz). A doboz átlátszósága fontos, hogy a szívótérben esetlegesen megjelenő buborékok, vagy homokfolyás észlelhető legyen. Fontos továbbá a megfelelő szilárdság, légzárás, vegyi ellenállóság, biológiai inaktivitás. E követelményeknek megfelel a 10 mm vastagságú plexi lemez. Újításként a régi dobozzal ellentétben nem 5 darabból, hanem 3 –ból készítettem – 1 meghajlított U alak és két oldallap, így csökkent a ragasztás hossza, amely a sérülékeny rész.

A gyártást szakcég végezte, a ragasztáshoz speciális kétkomponensű ragasztót alkalmazva. A (3.22. ábrán) látható a tervrajzom, amely alapján a gyártó dolgozott.



3.22. ábra A plexi doboz tervrajza (kicsinyített rajz), és kész állapotban a perforált lappal

A szívótér és a többletéggű töltet elválasztására szolgál a perforált lap. Anyaga a doboznál leírtak miatt hasonlóan 10 mm vastag plexi (a vízáteresztés miatt perforálva), amely 25 mm magas 13x13 mm-es csapolva és ragasztva rögzített, lábakon áll. A perforálást 10x10 mm-es raszterben 3 mm-es átmérővel készítettem. A kiegészítő tartozékokat az eredetivel egyezőre készítettem (fedél, nívópalack és tartozékai) (3.23. ábra).



3.23. ábra A bokszt kiegészítő elemei

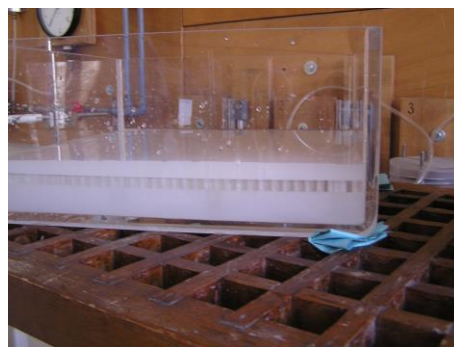
Ezután lehetővé vált a berendezés száraz összerakása, majd a többletéggű töltet nedves bekészítése következett.

A membránnak a mért szívástartományban nem szabad átengednie a levegőt, de jó vízáteresztő-képességűnek kell lennie. Ilyen anyag nagyobb szívó feszültség-tartományban nincs: a durva szemcsés anyagoknak kicsi a levegő belépési küszöbértékük, a finomabb szemcséjű anyagoknak kis szívó feszültség értékeknél kicsi a vízáteresztő-képességük, így lassan állna be az egyensúly. Ezért a különböző szívó feszültség-tartományokhoz különböző anyagokat használunk membránnak. Kis szívó feszültségnél (pF 1,0-ig; 10 cm vízoszlop) durva homok töltőanyagot, nagyobb szívó feszültségnél (pF 1,0-2,0; 10-100 cm vízoszlop) finom homokot, és 100-316 cm-ig (pF 2-2,5) kaolin és kvarcliszt keverékét alkalmazhatunk. Az új boxok készítésénél az előzőekben leírtak alapján DIN 90-es homoklisztet alkalmaztunk membránként.

A szűrőréteg feladata a homokréteg szívótérbe jutásának megakadályozása. Fontos, hogy mikrobiológiailag inaktív legyen, és így az algák ne tudjanak megtelepedni benne. Az eredeti berendezésnél azbesztgyapotot írtak elő szűrőréteggnek. Az azbesztgyapot porszerű anyag, igen rövid szálakból áll. Vizes szuszpenzióként kerül a kádba, és vákuum alatt jól tömöríthető. Látszólag a homoklapnak (homokpaplan membránréteg) alárendelt szerepű, de a megfelelő bekészítése a legkényesebb feladat az eszköz összerakása során. Az azbeszt azonban már nem forgalmazható, azaz nem lehet beszerezni és felhasználni sem szabad, ezért új szűrőréteg anyagot kellett keresnünk.

Az új anyagokkal szemben támasztott legfontosabb követelmény a gyapot (vatta) szerkezet volt, ami tömöríthető, és nincs meghatározott lyukmérete, mint a szőtt anyagoknak. Kipróbáltunk geotextíliát (500 g/m^2), bazaltgyapotot és kerámiagyapotot (128 g/m^3).

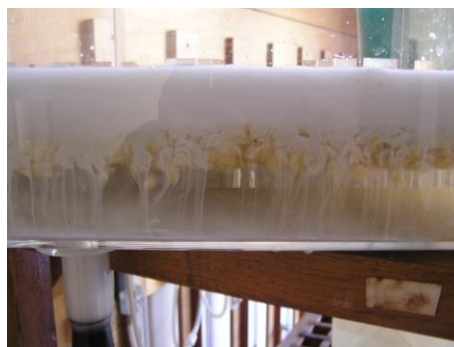
A geotextília előnye, hogy könnyen formára lehet vágni, jól tömörített (3.24. ábra).



3.24. ábra Geotextília előkészítése és a sikertelenség

A feladatra alkalmatlannak bizonyult, mert több réteg esetén sem tudott elég sűrű szálszerkezetet biztosítani a finom homok megszűréséhez, és a víznél kisebb sűrűsége miatt felúszott.

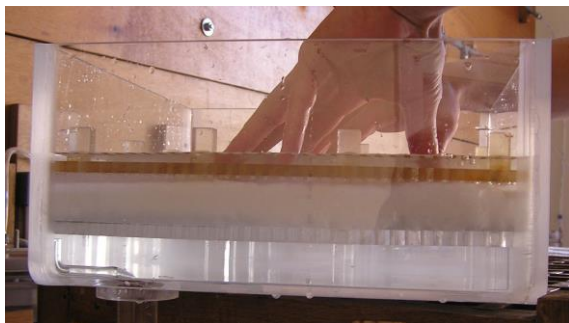
A bazaltgyapot, hőszigetelő paplanból származott. Nagy hézagterfogata miatt úgy döntöttünk, hogy átgyúrjuk a könnyebb tömöríthetőség érdekében. A kőzetgyapot jól tömörödött vákuum hatására, de az átgyúrás miatt szétszakított szálszerkezet nem tudott elég szorosan összeállni, és átengedte a homokliszt szuszpenzióját (3.25. ábra).



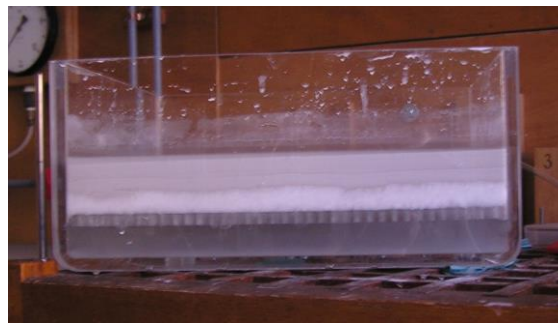
3.25. ábra Bazaltgyapot előkészítése és a sikertelenség

A felhasznált kerámiagyapot Alsitra Mat 1260-as típusú, 128 kg/m^3 testsűrűségű, $1''$ (25 mm) vastag, normál szálhosszúságú ($l_{\text{átl}} < 70 \text{ mm}$) alumíniumszilikát-gyapot paplan volt. Kémiai összetétele $48\% \text{ Al}_2\text{O}_3$, $52\% \text{ SiO}_2$, tehát mikrobiológiailag inaktív. Jól formára szabható, könnyen beilleszthető a kádba. A szűrés tulajdonsága megfelelőnek bizonyult, homokszivárgás, a kezdeti minimális mennyiség után, nem volt tapasztalható (3.26a ábra).

Végül a membránréteg a homoklisztből megfelelően kialakult (kb. 1 nap alatt) (3.26b ábra).



a) vízlégszivattyúzás közben



b) az elkészült box

3.26. ábra Kerámiagyapot alkalmazása;

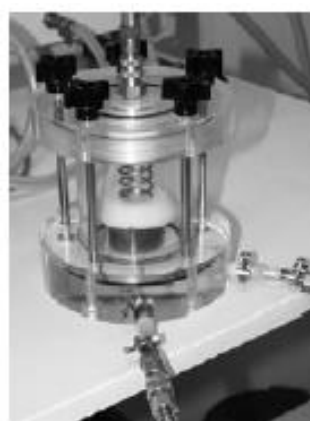
b) Feszültségkamrás készülék

Az eljárás során a mintát körülvevő levegő nyomását növeljük Δp értékkel, így a teljes feszültség (σ), a pórusvíznyomás (u_w), és a póruslevegőnyomás (u_a) is nő Δp értékkel. Ha a mintára ható víznyomást szabályozzuk, az értékét a minta alján 0-ra állítjuk be, ($u_w = 0$ – szabad kifolyás biztosításával), akkor tetszőlegesen nagy szívófeszültség értékeket ($u_a - u_w$) hozhatunk létre a póruslevegőnyomás növelésével. Az eljárás a tengelyeltolási technika (Hilf, 1948; Rétháti, Imre, 1991) egy változata. A tengelyeltolási technikára azért van szükség, mert a pórusvíznyomás a fellépő kavitáció miatt nem csökkenthető az adott hőmérsékletnek megfelelő telítettségnyomás alá, ami a függő vízoszloppal történő mérésnek felső határt szab.

A víznyomás szabályozását ($u_w=0$), úgy valósíthatjuk meg, hogy a talajmintát egy féligáteresztő hártára/membránra tesszük, és szabad vízkifolyást biztosítunk. A membrán a létrehozott légnyomásonál a vizet átveszt, a levegőt nem. A membrán anyaga szerint, megkülönböztetünk nyomásmembrános készüléket (3.27a ábra), ahol a membrán anyag celofán, illetve feszültségkamrás készüléket (3.27b ábra), ahol a membrán anyaga magas levegő belépési küszöbértékű szűrőkő, amely kaolin- vagy kerámialap. A mérési tartomány felső határa a szűrőkő levegő belépési küszöbértékével, ami gyártmánytól függően 100-600 kPa között mozog, megegyezik.



a) Nyomásmembrános készülék (MTA-TAKI)



b) Feszültségkamrás készülék

3.27. ábra A tengelyeltolási technikát alkalmazó berendezések

Az általunk használt feszültségkamrás berendezést Kanadában (University of Saskatchewan) fejlesztették ki. A számunkra leszállított alapberendezés a következő részekből áll: alj a szűrőkővel, henger, tető, összekötő csavarok, leszorító elem (3.28. ábra).



3.28. ábra Feszültségkamrás alapkészülék szétszerelt állapotban

A berendezések beüzemelése, próbamérések

Gyártásuk után, szükséges az új laboratóriumi eszközök beüzemelése, próbamérések végzése.

a) Homoklapos berendezés

A próbamérést a talajtani szakirodalomban (Rajkai, 1993) leírt mérési eljárásrend szerint végeztük el. Egyetlen berendezéssel dolgoztunk, a nívópalack mozgatásával növeltük a terhelést. A kontrollt az MTA-TAKI párhuzamos mérései és mérési tapasztalatai jelentették. A vizsgált anyag homok volt.

A próbamérés tapasztalatai szerint a megépített új berendezés alkalmas a víztartási görbe diszkrét pontjainak meghatározására 0-100 cm vízoszlopban kifejezett tenzió tartományban. A terhelés növelésével a szűrőréteg kismértékben alakváltozik (összenyomódik) ennek figyelembevétele a nívópalack mozgatási kalibrációjával lehetséges. A mintavevő hengerek letakarására szolgáló lyukacsos tetővel kapcsolatban a tapasztalatunk, hogy célszerű a kishengerhez való műanyag tető használata, mert az alumínium és a réz galvánelemként működve gyorsan korrodál, a kivételnél pedig a minta elszóródása elkerülhető a jól illeszkedő tetővel. A mérések eredményeiből azt a feltételezést, hogy a szemcsés talajban viszonylag hamar beáll az egyensúly, annyiban kell kiegészítenünk, hogy a szemcsés talaj vízáteresztő képessége a szívó feszültség viszonylag kis értékeinél is már rohamosan csökken, az egyensúly beállításához a vártnál több idő szükséges (akár több mint egy hónap). Tapasztalatunk szerint az elhúzó méréseket gombák megjelenése hamisíthatja meg, ez a fényzáró tető alkalmazásával minimalizálható, gombaölő szer alkalmazására nem tettünk kísérletet, mert a víz viszkozitására gyakorolt és egyéb, a mérést befolyásoló hatásuk nem ismert. A minta és szűrőkő közötti kapcsolat döntő jelentőségű a mérés megbízhatósága szempontjából. A "lágy" membránanyagú homoklapos berendezés éppen a lap plaszticitása miatt segíti ezt elő, mely ennek ellenére bizonytalanra válhat, tehát célszerű a minták mozgatását minimalizálni.

A függő vízoszlopos módszer előnye, hogy kicsi szívófeszültség értékek beállításánál, a folyadékfázis nyomásának (szívásának) pontos szabályozása a levegőnyomásénál egyszerűbb. Az azbeszt szűrőréteg kiváltása lehetővé teszi, az előregező és felújítandó Várallyay-féle berendezések további üzemben tartását.

b) Feszültségkamrás berendezés

A leszállított berendezést kiegészítő alkatrészekkel (az alsó víztér zárására szolgáló csapok: két oldalról záró gyorscsatlakozó, felső levegő gyorscsatlakozó) kellett felszerelni, hogy a mérésre alkalmas legyen. A kísérletek végzése során más berendezések használata is szükséges volt (kompresszor, nyomásszabályzó, mérleg). A berendezés üzembe helyezését,

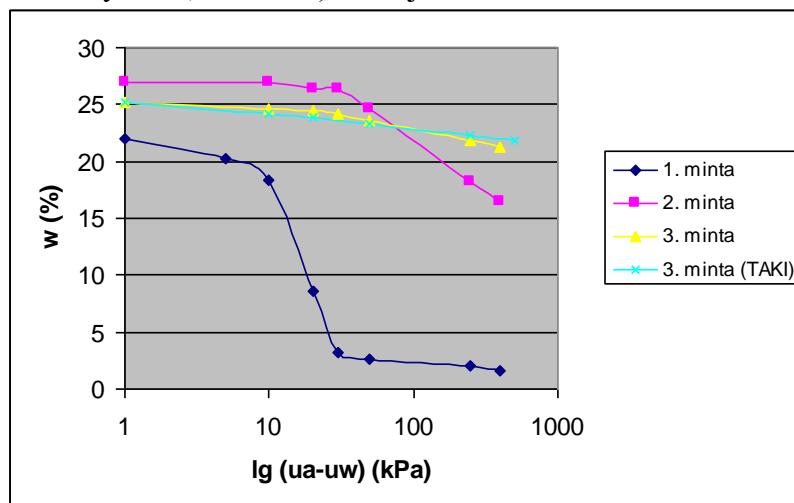
hazai előírások hiányában, a szakirodalomra (Fredlund, Rahardjo, 1993), (De Gennaro, 2002) és az Amerikai Egyesült Államok műszaki szabványára (ASTM D 2325-68) támaszkodva hajtottuk végre, így a szűrőkő telítését is, mely a mérést megelőző legfontosabb feladat (Firgi, 1999; 2006).

Olyan eljárási leírást, amely az általunk használt, egyszerre csak egy mintát vizsgáló berendezésre vonatkozik, nem találtunk. Ezért a következő eljárás protokollt állítottam össze.

1. A mintatartó hengerben lévő minta szívófeszültségét esetlegesen a mérés megkezdése előtt - vízbe állítva - a lehető legkisebb értékre kell csökkenteni ("telítés").
2. A mintát, a leszorító rugóval a feszültségkamrában rögzíteni kell, a berendezést össze kell szerelni, és lemérni a tömegét. Össze kell kapcsolni a levegőnyomás vezetékkel. A víz kivezetéseket ki kell nyitni.
3. Alkalmazni kell a szükséges szívó feszültség értékének megfelelő nagyságú légnyomást, melyet kompresszor vagy levegőpalack segítségével lehet létre hozni. Az alsó csapok nyitva vannak, amelyeken keresztül a fölös víz a mintából távozik, valamint a szűrőkővön átdiffundált levegőt a csapokon keresztül időről-időre az alsó víztérből fecskendő segítségével ki kell fújni. A berendezés tömegét a levegő- és vízcsapok zárása után újra le kell mérni.

Az alsó és felső csap zárása és szétválaszthatósága lehetővé teszi, hogy a berendezés szétszedése és a minták kivétele nélkül határozzuk meg a minta tömegváltozását (mely a mintából kifolyó vízből származik), a berendezés+minta tömegének mérésével. Akkor tekintetem úgy, hogy az egyensúlyi állapot beállt az alkalmazott szívó feszültség és a minta víztartalma között, ha a fél óra időkülönbséggel mért tömegek között az eltérés egy küszöbérték (0,05 g) alatt volt. A tömeg mérését legalább század gramm pontossággal kell végezni. Ha az egyensúlyi állapot beállt, a berendezés szétszedése nélkül (a minta zavarása nélkül) alkalmazható a következő levegőnyomás (ill. szívófeszültség) érték. Így egy mintán mérhető az adott talaj víztartási görbéjének nulla – a szűrőkő levegő belépési küszöbértéke közötti tartománya. A méréssorozat végén a mintát a feszültségkamrából kiszedve, 105 °C-on tömegállandóságig kell szárítani és megmérni a száraz tömegét. A mért adatokból a víztartási görbe szerkeszthető. A mérésekhez a mellékletben közölt jegyzőkönyvet készítettem és használtam. Az eszköz próbamérése során öt talajmintát vizsgáltam (melléklet). A kontroll méréseket a TAKI végezte.

A próbamérés eredményeit a (3.29. ábra) mutatja.



3.29. ábra Feszültségkamrás berendezéssel mért víztartási görbék

A próbamérés tapasztalatai a következők. A javasolt kísérleti eljárás szerint a bekészítendő mintákat telíteni kell. Az 1. számú talajmintát (zavart homokminta) telítetlen állapotban építettem be és utólag felülről, víz csepegtetésével telítettem. A 3. számú talajmintát szűrőkőre téve egy tálban, melyet a szűrőkő szintjéig vízzel feltöltöttem, csökkentve a minta szívófeszültségét (telítés alulról). A 2. és 5. minta, mivel víz alóli mintavételből származtak, feltételeztem, hogy kvázi-telített állapotúak. A bekészítés előtt ezért nem telítettem e két mintát. Ez az eljárás a 2. minta esetén – amelyet azonnal felhasználtam – nem okozott problémát. Az 5. minta esetén - amelyet a minta kiszúrása után több hétig exszikkátorban tároltam - problémák jelentkeztek a szűrőkő és a minta kapcsolatában, amelynek feltehető oka, hogy a minta kiszáradt és a mintatartó hengerbe visszahúzódott (szabad szemmel ez nem volt látható). A talajminta és a szűrőkő közötti kapcsolat jóságának (folytonos vízszál kialakulása) a víztartási görbe feszültségkamra eljárással történő meghatározásának megbízhatóságára döntő befolyása van. Kötött talajmintáknál ezért is nagyon fontos a talajminta alsó felületének gondos kialakítása, hogy a bekészítés előtt ép, friss felületű legyen. Tapasztalatom szerint a terhelés nem monoton jellege (levegőnyomás lecsökkentése) is rontja a minta és a szűrőkő közötti kapcsolatot. Egyes méréseknél ugyanis lecsökkentettem a légnyomást tömegmérés előtt, de így egy tehermentesítési és terhelési ciklus után szinte mindig elromlott a mint-szűrőkő kapcsolata. Nem hanyagolható el az a tény sem, hogy nagyobb nyomáson a kamrába zárt levegő mennyisége, így tömege is nő.

Ezt a hatást többféle módon is figyelembe vehetjük:

- mérés előtt a kamrában lévő levegőnyomást atmoszférikusra csökkentjük,
- megmérjük a levegőnyomás alkalmazása után a levegőtöbbletből adódó tömegváltozást és ezzel javítjuk a mért eredményt,
- számítással ($pV = mRT$ – állapotegyenlet felhasználásával) és a számított tömeggel megjavítjuk a mért eredményt.

E munka során mérésekkel, a 3.8. táblázat szerinti, korrekciós táblázatot állítottam össze a kamrába zárt levegő tömegnövelő hatásának figyelembe vételére.

A terhelési lépcsők időigényéről a következők mondhatók. Tapasztalatom szerint az adott nagyságú szívó feszültség alkalmazása után a víztartalom egyensúlya a minta közel telített állapotában relatív gyorsan létrejön (szemes talaj esetén: 3-8 óra, kötött talaj esetén: 8-14 óra). A minta telítettségének csökkenésével az egyensúlyi állapot eléréséhez több idő szükséges (szemes talaj esetén: 14-48 óra, kötött talaj esetén: 48-72 óra). A kísérletek végzése során azt tapasztaltam, hogy a minta bekészítése és a terhelés alkalmazása után kb. fél óra szükséges ahhoz, hogy a szűrőkő feletti fölös vízcseppek távozzanak. A mérést csak a fölös víz távozása után lehet elkezdni.

3.8. táblázat A feszültségkamrába bezárt levegő tömegváltozásának korrekciós táblázata

alkalmazott légnyomás (kPa)	korrekció (g) minta térfogata: 18,8 cm ³	korrekció (g) minta térfogata: 37,6 cm ³
5	0,00	0,00
10	0,00	0,00
20	0,05	0,05
30	0,05	0,05
50	0,10	0,10
250	0,75	0,70
400	1,30	1,20

A próbamérések alapján megállapítható, hogy a készülékkel meghatározható víztartási görbék felhasználhatók a telítetlen talajok geotechnikai feladatainak megoldása során alapadatként. E berendezés hazai bevezetése megtörtént, az MTA-TAKI hasonló készülékeket azóta kutatási célra már használ is.

A vizsgálat menete

A mérés megkezdése előtt, három feladatot kellett megoldani:

1. Frakciók készítése

A vizsgálandó szemcsés talajt szétszítálva (szabványos szitasoron), és kiválasztva a vizsgálandó négy frakciót, ezeket még 2-3 részre kellett szétszítani. Az így szétszított mintából az egyes frakciókat tömegarányos keveréssel állítottuk elő. Erre azért volt szükség, hogy a frakció szemeloszlási görbéje közelítse az ideálist.

2. Keverékek készítése

Az elkészített frakciókból 1/3-2/3 (finom/durva) - tömegarány kimérés utáni keveréssel állítottuk elő a 6 fajta keveréket.

3. A minták telítése, bekészítése

A telítéshez egy üres boxot használtunk, melyben a szokásos módon elhelyeztük a perforált tartólapot és a szitaszövetet. Az adott frakcióból vagy keverékből előállított száraz mintát, a leglazább állapot előállításával, tölcser segítségével, a boxba töltöttük (e_{max}). Ezután a talajfelszínre helyezett fémlapra csurgatott desztillált vízzel telítettük. 1-2 napig így elárasztva hagytuk, majd mintavevő hengerrel kiszúrtuk a mintákat.

A víztartási görbék mérését, a fent leírtak szerint, feszültségkamrás és homoklapos berendezéssel végeztem, melyek közül értékelhető mérési eredményeket az utóbbi mérések adtak.

a) Mérés a feszültségkamrás berendezéssel

A próbamérési tapasztalatok (és külföldi tapasztalatok) alapján az 5 bar-os szűrőkő 0,5 ill. 1,0 bar-osra történő cseréje mellett döntöttem. A szűrőkövek megbízható beragasztását azonban nem sikerült megoldani (mérés közben vagy a telítéskor) megsérült, így értékelhető eredményem e mérésekből nincs.

b) Mérés az új homoklapos berendezéssel

Az új homoklapos berendezés terhelési lépcsői (a szívófeszültséget vízoszlop centiméterben kifejezve): 1cm, 4cm, 7cm, 15 cm, 20 cm.



3.30. ábra Homoklapos berendezés működés közben

A berendezés nívópalackja segítségével beállítható a kívánt terhelést. A boxban 30-35 kis minta helyezhető el (3.30a ábra), melyek tömegét átlagosan 2-3 naponta mértük. A beállított szívó feszültség érték és a minta víztartalma között egy idő után (2-3 hét) beállt az egyensúly, azaz a tömegállandóság. Amely után lehet a következő terhelési lépcsőt alkalmazni. (3.30b ábra). A méréssorozat végén a minták víztartalmát meghatároztuk. A mért adatokból a víztartási görbe mért pontjai kiszámíthatóak. Egy mintasorozat mérési ideje így 3-4 hónap volt.

3.4.3. Egyéb mérések

A disszertáció készítéséhez a fentiekén túl, egyéb laboratóriumi és helyszíni mérések is szükség volt. Ezek részletes ismertetése nem szükséges, mert vagy rutin mérésekről van szó, vagy a lerakó dokumentált adatszolgáltatásáról, vagy más kutató dokumentált méréseinek felhasználásáról, így csak felsorolás szerűen ismertettem ezeket.

Rutin mérések

A nagyméretű ödométer próbamérése kapcsán szemeloszlási vizsgálat készült (SZIE-YMÉTK). Elvégeztem a hulladék minták víztartalmi vizsgálatát és tömegmérését (3.16. ábra). A mérhető tisztázására, az S-3 jelű hulladék minta rutin kompressziós vizsgálatát is végrehajtottam (3.31. ábra), a nagy ödométeres vizsgálat terhelési lépcsőit alkalmazva (S-3k jelzésű minta).



a) a minta bekészítés és simító terhelése

b) az ödométer működés közben;

c) a növekvő terhelés

3.31. ábra Az S-3k jelű hulladékminta rutin kompressziós vizsgálat

Kapcsolódó mérések

a) PRHK adatszolgáltatása

Abban a szerencsés helyzetben voltam, hogy közvetlenül az üzemeltetőtől (FKF Zrt.) kaptam az alapadatokat, a mérések megbízhatóságának, körülményeinek ismertetésével együtt, ezek az adatok a következők voltak:

A lerakó helyszínrajza, tervezett geometriai kialakítása, - szintadatai, altalajjellemzők. Ezek az adatok a tervezés, illetve a tervezést megelőző fázisban készültek, geodéziai felmérés és rutin geotechnikai vizsgálatok segítségével. Megkaptam a lerakóba szállított hulladék tömegét évenkénti bontásban (hídmérleg adatok) és a lerakó fél évenkénti felszínfelmérését, melyet LEICA 1200 GPS-el mérnek. Megkaptam továbbá a hulladék összetételének adatait éves bontásban. Megkaptam a modell validálásához elengedhetetlenül szükséges süllyedés adatokat, melyeket örkövek (3.32. ábra), évente kétszeri felmérésével állítanak elő, a fenti GPS-műszerrel.



3.32. ábra Az 1-es számú szintezési pont (örkö)

b) MTA-TAKI mérései

A víztartási görbe méréseket szoros együttműködésben végeztem a Talajtani Kutató Intézettel, mivel ők rendelkeznek kellő tapasztalattal e téren. Ők végezték a kontrollméréseket párhuzamos mintákon, a saját fix terhelésű homoklapos-kaolinlapos berendezéseiken, illetve magasabb tenzió-tartományokban nyomásmembrános készülékkel. Ők biztosítottak helyet a mi eszközeinknek is és mérték a mintáink bontás utáni víztartalmait. Eszközeikkel és tapasztalatukkal segítették az új homoklapos berendezés megépítését.

c) BME-ÉÖ-GT mérései

Az értekezés részben a SZIE-BME közös kutatási program (JÁP) keretében készült, a BME (Varga, 2010) párhuzamos mintákon mérte a hulladékminták térfogatsűrűségét, nyírószilárdsági paramétereit (közvetlen nyíró géppel), a hulladékminták összetételét, víztartalmát, szerves anyag tartalmát, végső soron a degradációs fok szerinti kategorizálást meghatározta. Ezeket az adatokat, mint speciális irodalmi adatokat használtam fel.

4. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem az elért tudományos eredményeimet. Az első öt alfejezetben részletesen kifejtve ezeket, a célkitűzések szerinti sorrendben, a fejezet végén pedig tömör megfogalmazásban.

4.1. A vizsgált hulladék kompressziója

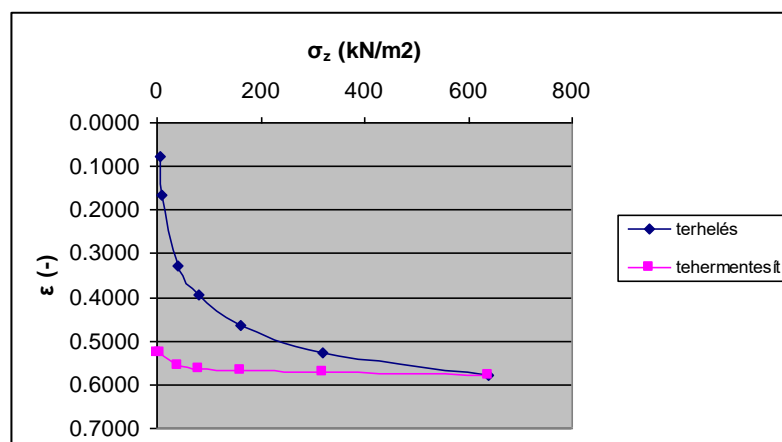
A vizsgált hulladék alakváltozásának talajmechanika alapú elemzése egy lehetséges út, mely az elvégzett ödométeres vizsgálatok után lehetségessé vált. A kompresszió ez esetben, a talajmechanikában szokásos terminológia szerint, a terhelés (normál feszültség (σ))-alakváltozás (fajlagos-összenyomódás, gátolt oldalkitérés mellett (ε)) összefüggését értem.

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, melyek 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.

A hulladékminták kompressziós vizsgálatának mérési eredményeit a 4.1. - 4.3. táblázatok és a 4.1. - 4.3. ábrák mutatják.

4.1. táblázat S-1 jelű minta (2. degradációs fok) kompressziós vizsgálatának eredményei

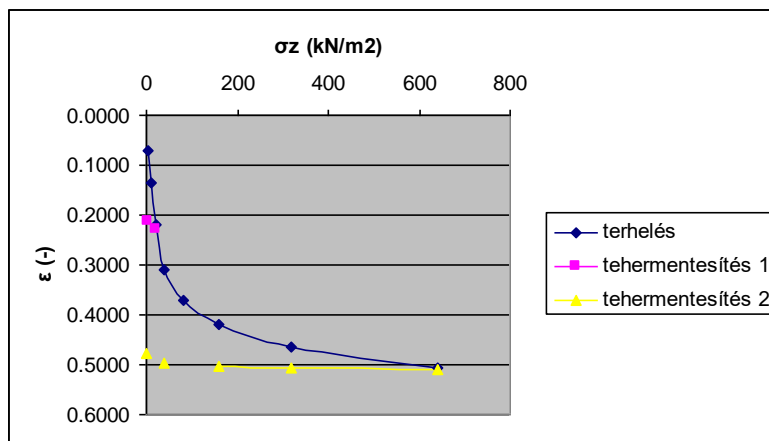
függőleges normál feszültség	vízszintes normál feszültség	fajlagos függőleges alakváltozás
σ_z (kN/m ²)	$\sigma_x = \sigma_y$ (kN/m ²)	(ε) (-)
5	nm.	0.0776
10	nm.	0.1659
40	37	0.3280
80	55	0.3959
160	90	0.4656
320	115	0.5251
640	140	0.5788



4.1. ábra S-1 jelű minta (2. degradációs fok) kompressziós görbéje

4.2. táblázat S-2 jelű minta (3. degradációs fok) kompressziós vizsgálatának eredménye

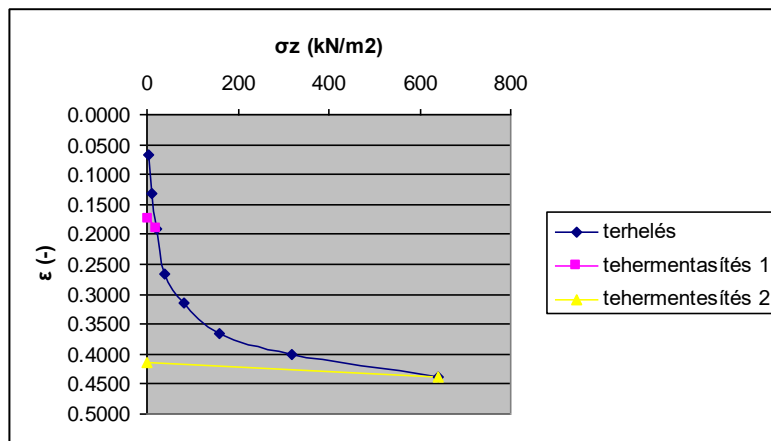
függőleges normál feszültség	vízszintes normál feszültség	fajlagos függőleges alakváltozás
σ_z	$\sigma_x = \sigma_y$	(ϵ)
(kN/m ²)	(kN/m ²)	(-)
5	nm.	0.0695
10	nm.	0.1364
20	nm.	0.2188
40	35	0.3084
80	52	0.3698
160	87	0.4209
320	105	0.4636
640	120	0.5068



4.2. ábra S-2 jelű minta (3. degradációs fok) kompressziós görbéje

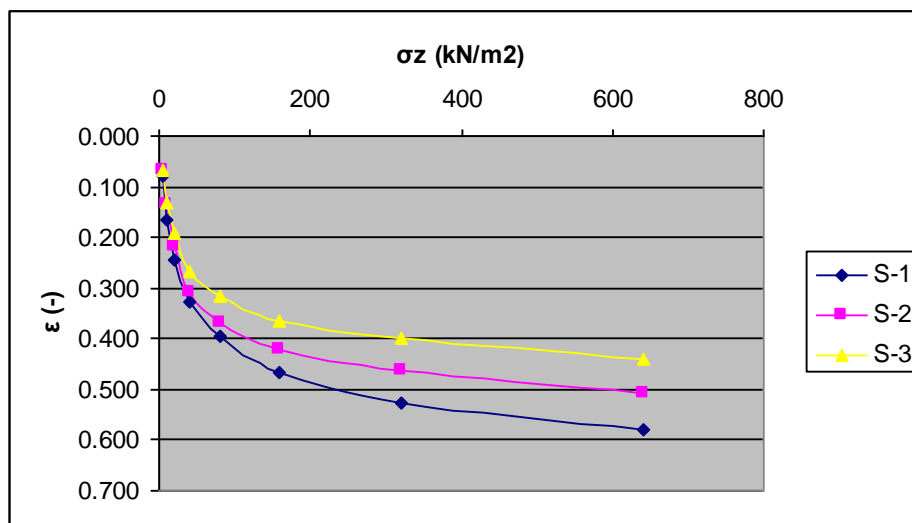
4.3. táblázat S-3 jelű minta (4. degradációs) kompressziós vizsgálatának eredményei

függőleges normál feszültség	vízszintes normál feszültség	fajlagos függőleges alakváltozás
σ_z	$\sigma_x = \sigma_y$	(ϵ)
(kN/m ²)	(kN/m ²)	(-)
5	nm.	0.0672
10	nm.	0.1312
20	nm.	0.1912
40	33	0.2657
80	50	0.3154
160	85	0.3653
320	95	0.4004
640	115	0.4393



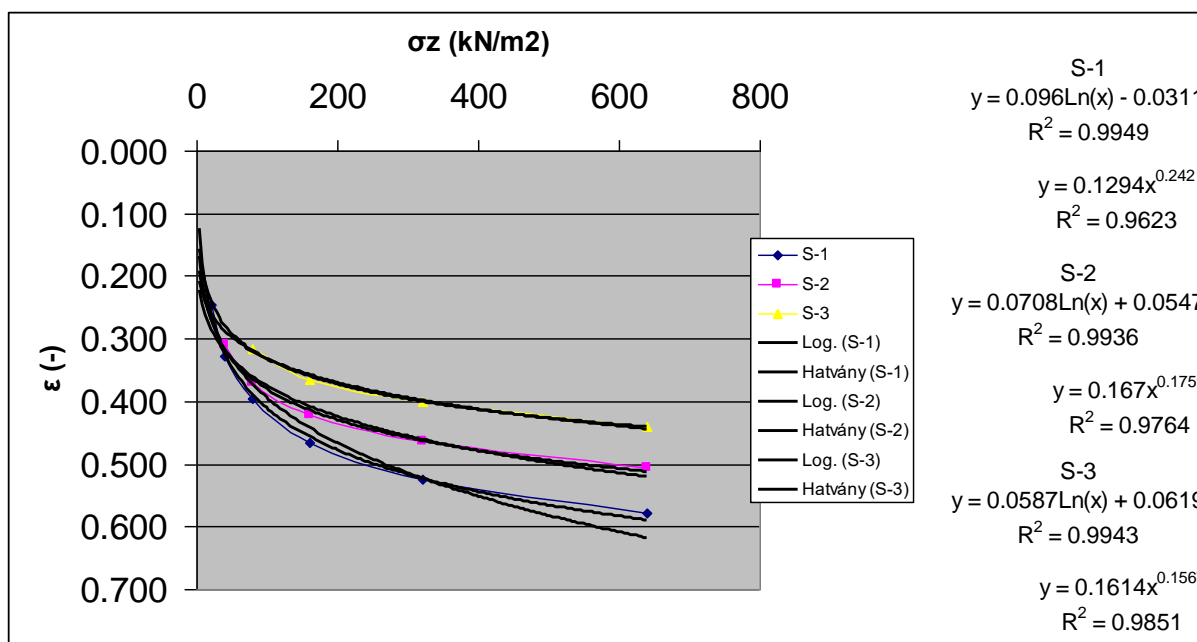
4.3. ábra S-3 jelű minta (4. degradációs) kompressziós görbéje

Az összenyomódás degradációs fok szerinti függését jól szemléltetik a közös ábrába rajzolt kompressziós görbék (4.4. ábra).



4.4. ábra A 2-3-4 (S-1, S-2, S-3) degradációs fokú hulladékminták kompressziós görbéje

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 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 4.5. ábra mutatja.



4.5. ábra A mért kompressziós görbék matematikai leírása

A kompressziós görbék matematikai leírása, a szokásos jelölésekkel, a következők:

2. degradációs fokú (S-1) jelű minta esetén:

$$\varepsilon = 0,096 \ln(\sigma) - 0,0311, \quad (R^2 = 0,9949), \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = 0,1294 \sigma^{0,242}, \quad (R^2 = 0,9623). \quad (4.2)$$

3. degradációs fokú (S-2) jelű minta esetén:

$$\varepsilon = 0,0708 \ln(\sigma) + 0,0547, \quad (R^2 = 0,9936), \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = 0,167 \sigma^{0,1759}, \quad (R^2 = 0,9764). \quad (4.4)$$

4. degradációs fokú (S-3) jelű minta esetén:

$$\varepsilon = 0,0587 \ln(\sigma) + 0,0619, \quad (R^2 = 0,9943), \quad (4.5)$$

$$\varepsilon = 0,1614 \sigma^{0,1567}, \quad (R^2 = 0,9851). \quad (4.6)$$

Az illesztési hibából megállapítható, hogy ez esetben a logaritmikus közelítés a jobb.

Illik megvizsgálni a mintavétel-minta előkészítés-mérés okozta hibákat, ezt a statisztikai elemzés helyett, a fizikai folyamatok elemzésével próbálom végrehajtani. 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 minták előkészítése (a nagyobb darabok kivétele) meg nem határozható hibát okoz, vélhetően lágyítja az anyagot (később részletesen elemzem), ezt a helyszíni mérések figyelembevételével lehet korrigálni, de az biztos, hogy még nagyobb hibát követnénk el, ha nem vennénk ki ezeket. Természetesen, mint minden mérésnek, így ennek is vannak hibái, ezt próbamérésekkel (3. fejezet) igyekeztem minimalizálni, hiszen újbóli mérésre nincs lehetőség, mert roncsolásos a vizsgálat.

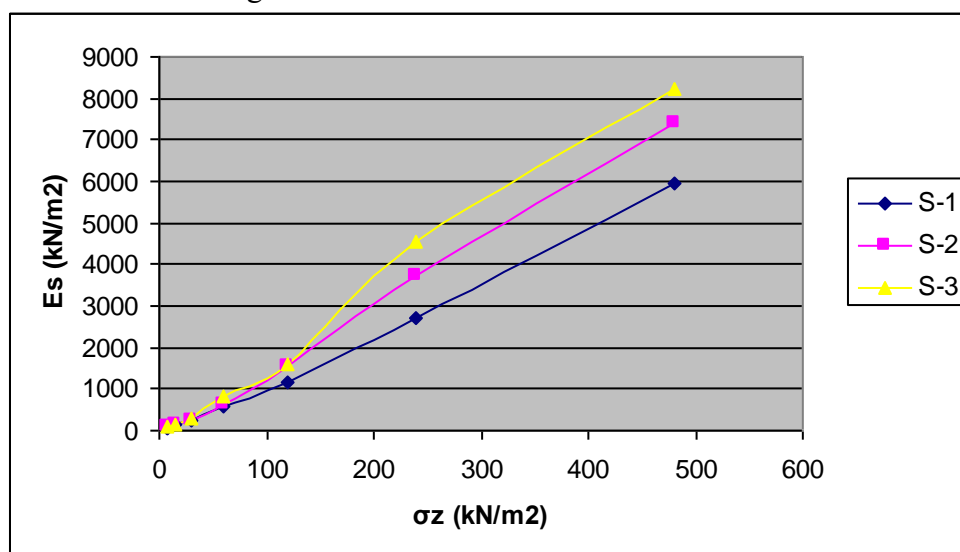
A későbbi számításokhoz jól felhasználható a terhelési szakaszonkénti linearizálás, amelynek eredményei a 4.4. táblázatban találhatók. Az értékekből megállapítható, hogy az alkalmazott terhelés növelése és a degradáció is felkeményedést okoz, helyi anomáliáktól eltekintve (S-2 jelű minta 10-40 kN/m² közötti feszültségtartomány esetén).

4.4. táblázat Összenyomódási modulus a degradációs fok függvényében ($E_s = E_{oed}$)

minta jele (deg. fok)	S-1 (2)	S-2 (3)	S-3 (4)
$\Delta\sigma$ feszültségtartomány (kN/m ²)	E_s (kN/m ²)	E_s (kN/m ²)	E_s (kN/m ²)
1 - 5	52	58	60
5 - 10	57	75	78
10 - 20	126	121	167
20 - 40	241	223	268
40 - 80	590	651	806
80 - 160	1147	1566	1602
160 - 320	2689	3744	4562
320 - 640	5964	7416	8220

Grafikusan ábrázolva az eredményeket (4.6. ábra), látható, hogy az egyes minták feltételezhető előterheltségi szintjénél „törrik” a görbe, és előtte lágyabban viselkedik az

anyag, ez a fenti megállapítást látszik igazolni, miszerint az alkotók összenyomása a fellazulással nem szűnik meg.



4.6. ábra Az összenyomódási modulus feszültség és degradációs fok szerinti változása

Így célszerű csak az előterhelés utáni szakasszal számolni és azt extrapolálni (4.7 ábra), matematikai formában, a szokásos jelöléseket alkalmazva, ez a következőképpen írható:

2. degradációs fokú (S-1) jelű minta esetén:

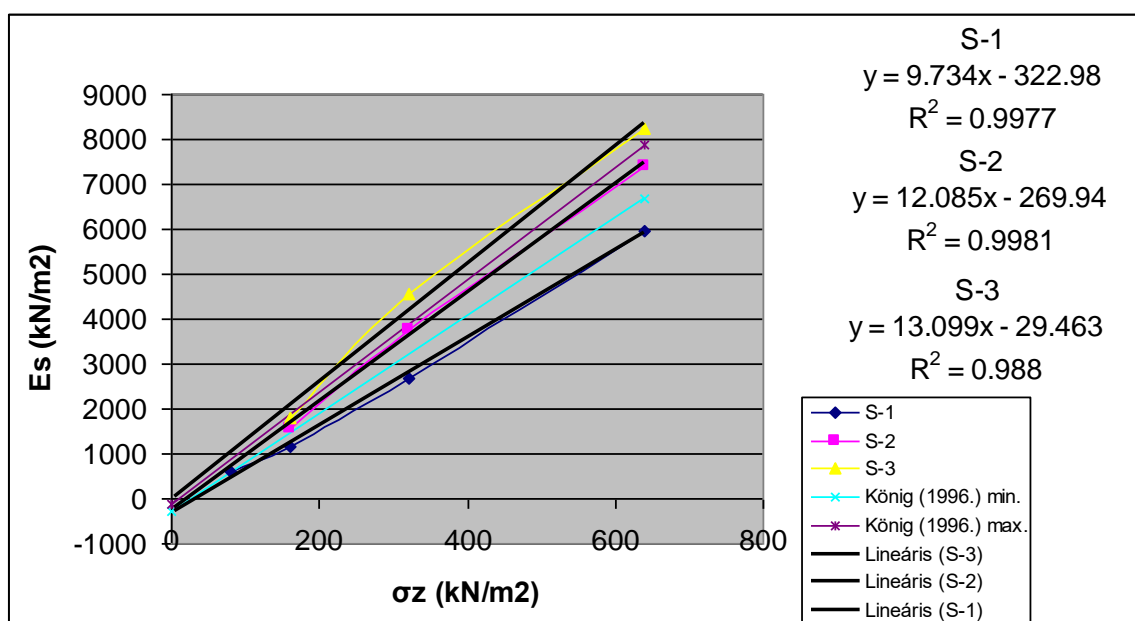
$$E_s = 9,734 \sigma - 322,98, \quad (R^2 = 0,9977). \quad (4.7)$$

3. degradációs fokú (S-2) jelű minta esetén:

$$E_s = 12,085 \sigma - 269,94, \quad (R^2 = 0,9981). \quad (4.8)$$

4. degradációs fokú (S-3) jelű minta esetén:

$$E_s = 13,099 \sigma - 29,463, \quad (R^2 = 0,9880). \quad (4.9)$$



4.7. ábra Az összenyomódási modulus feszültség és degradációs fok szerinti változásának matematikai leírása: $y=ax+b$ formában

A jelenség matematikai leírása a végtelig leegyszerűsítve $E_{si}=a(f(\text{degradációs fok})) \cdot \sigma_{zi}$ – formulával is közelíthető (4.8 ábra):

2. degradációs fokú (S-1) jelű minta esetén:

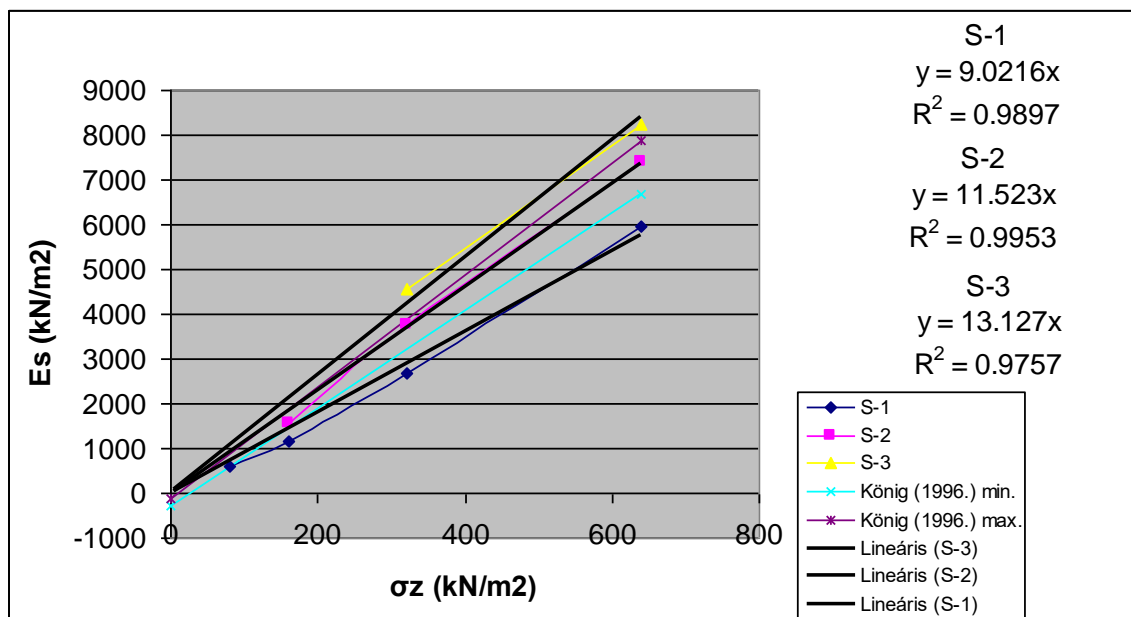
$$E_s = 9,0216 \sigma, \quad (R^2 = 0,9897). \quad (4.10)$$

3. degradációs fokú (S-2) jelű minta esetén:

$$E_s = 11,523 \sigma, \quad (R^2 = 0,9953). \quad (4.11)$$

4. degradációs fokú (S-3) jelű minta esetén:

$$E_s = 13,127 \sigma, \quad (R^2 = 0,9757). \quad (4.12)$$



4.8. ábra Az összenyomódási modulus feszültség és degradációs fok szerinti változásának matematikai leírása: $y=ax$ formában

Az ábrákon feltüntettem König (1996) eredményeit is, melyek jól közelítik a számított értékeket. A (4.7-4.12) egyenletekben a normál feszültség (σ) és, így az összenyomódási modulus ($E_s = E_{oed}$) mértékegysége [kN/m^2].

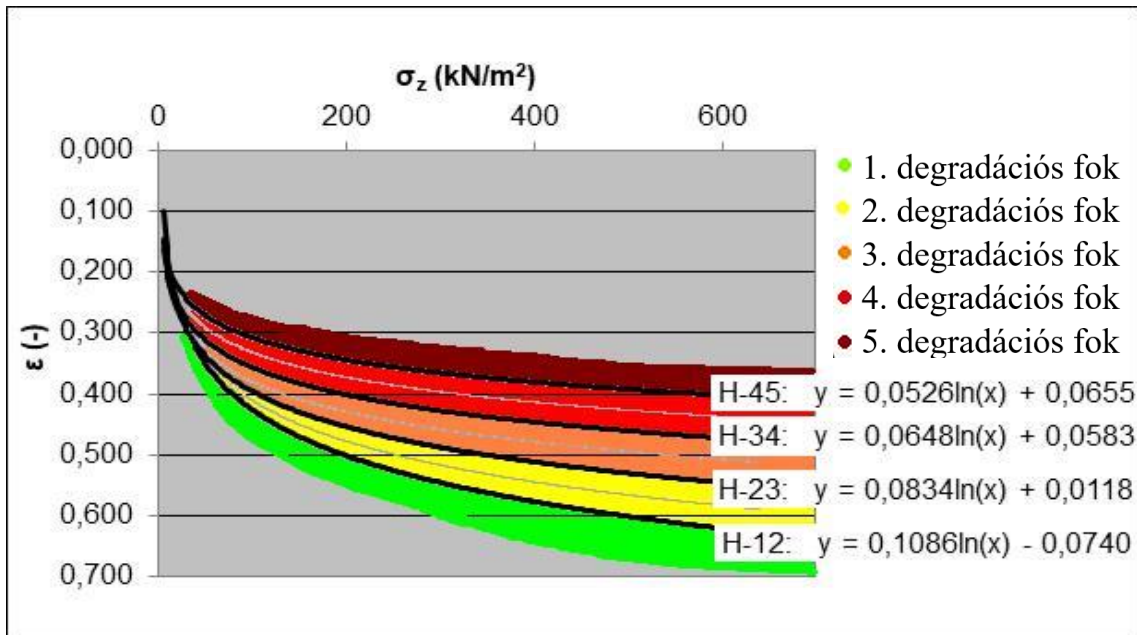
A hulladékminták kompressziója kapcsán, összességében megállapítható, hogy a terhelés növekedésével a hulladékminták merevebbé válnak, azaz a talajokhoz közelítő tulajdonságot mutatnak, oka, hogy az új terhelés, már egy teherviselés szempontjából jobb, tömörebb szerkezetre hat. Az, hogy a degradációs fok növekedése is merevebbé teszi a hulladékot, a degradáció (biológiai bomlás, kémiai átalakulás, mechanikai aprózódás) következménye.

A hulladékok kompressziós vizsgálata kapcsán egyéb, az anyag viselkedését leíró fizikai jellemzők meghatározására és elemzésre is szükség van, ez az eddig figyelembe nem vett, de figyelembe vehető faktorok vizsgálatát jelentik.

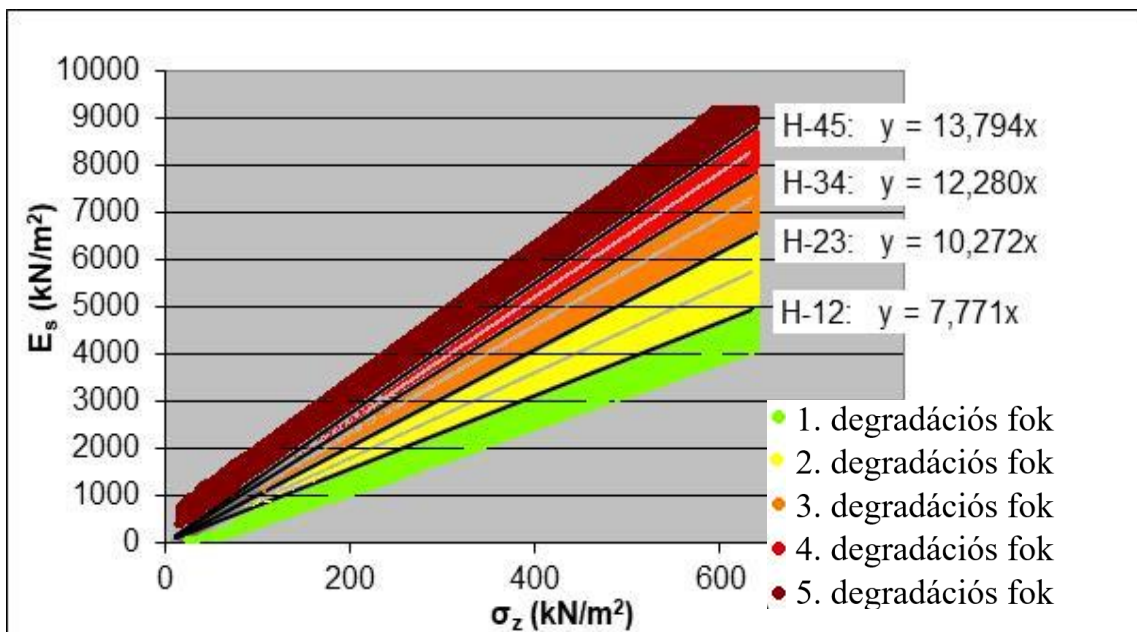
A degradációs fok meghatározása alakváltozási jellemzőkkel

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 4.9. ábrán kompressziós görbékkel, a 4.10. ábrán az összenyomódási modulus segítségével adtam meg a degradációs fok tartományait. Az ábrákon a határgörbék egyenleteit megadtam.



4.9. ábra Degradációs fok tartományok a kompressziós görbékkel értelmezve



4.10. ábra Degradációs fok tartományok az összenyomódási modulusal értelmezve

A megadott határok a vizsgált hulladéklerakó esetén, az átlagminták vizsgálata miatt, közelítőleg igazak, de még további statisztikai vizsgálatok szükségesek a vizsgált- és más lerakók adatainak felhasználásával, e módszer megbízhatóságának növeléséhez.

A Poisson-tényező változása

A kompressziós vizsgálat közben az oldalnyomást is mértem, ezért lehetőség van a Poisson-tényező számítására, ez degradációs fokonként lehetséges és a nemlineáris viselkedés miatt függőleges terhelési intervallumokban szükséges.

Az általános Hook-törvényből levezethető, hogy lineáris alakváltozási és tengelyszimmetrikus feszültségi állapotban (ödométeres vizsgálat):

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_z, \quad (4.13)$$

mivel: $\sigma_x \neq 0; \sigma_y \neq 0$ és $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$.

Így a mért értékekből a fenti formula segítségével számítható a Poisson-tényező, mely értékeit a 4.5. táblázat tartalmazza. Megállapítható, hogy a degradációs fok, illetve a terhelés növekedésével csökken a Poisson-tényező értéke. A Poisson-tényező ismertett változásának feltehetően az oka, hogy a degradáció is, és természetesen a tömörítés is merevebbé teszi a vizsgált anyagot. A feszültségfüggés a nemlineáris viselkedéssel magyarázható.

4.5. táblázat A Poisson-tényező [-] változása

terhelés (kN/m ²)\ minta jele	S-1	S-2	S-3
5	nm.	nm.	nm.
10	nm.	nm.	nm.
20	nm.	nm.	nm.
40	0.48	0.47	0.45
80	0.41	0.39	0.38
160	0.36	0.35	0.34
320	né.	né.	né.
640	né.	né.	né.

nm. – nem mérhető, né – nem értelmezhető geometriai feltétel miatt

A tehermentesítés értékelése

A tehermentesítést (és újrateherelést) értékelve az állapítható meg, hogy, az alakváltozások döntő része (több mint 90 %) maradó, reológiai értelemben irreverzibilis. Hiszterézis hatás nem volt mérhető. A rugalmas és maradó alakváltozások arányát a 4.6. táblázat mutatja.

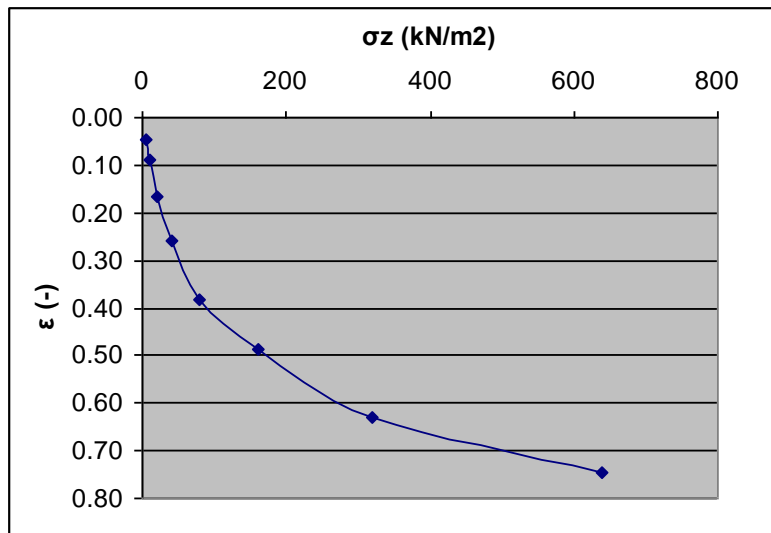
4.6. táblázat Az alakváltozások aránya

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

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

A mérethatás vizsgálata

Azoknál a vizsgálatoknál, ahol egy nagyobb objektumot annak egy kisebb részével helyettesítünk, felmerül a geometriai (méret) hatás kérdése. Ezért készítettem az S-3 jelű mintából hagyományos ödométeres vizsgálatot is (S-3k jelű minta). A vizsgálat eredményeit 4.11.-4.12. ábrák és a 4.7. táblázat tartalmazza.

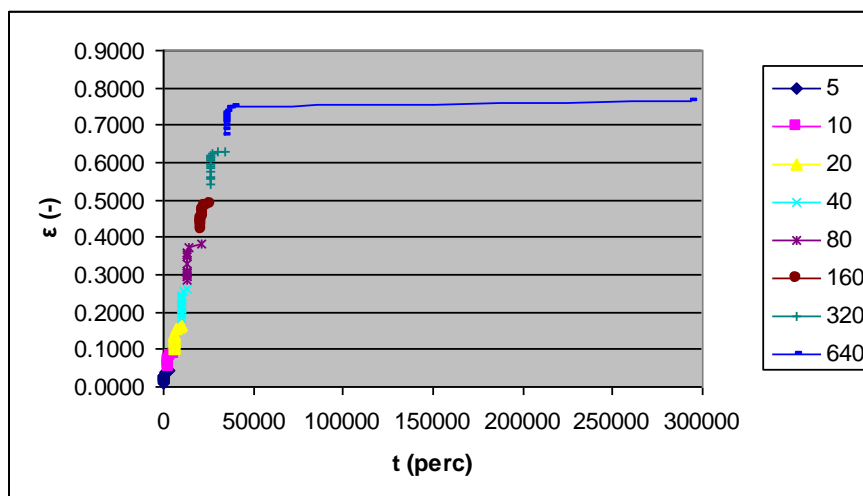


4.11. ábra S-3k jelű minta kompressziós görbéje

4.7. táblázat S-3k jelű minta kompressziós vizsgálatának eredményei

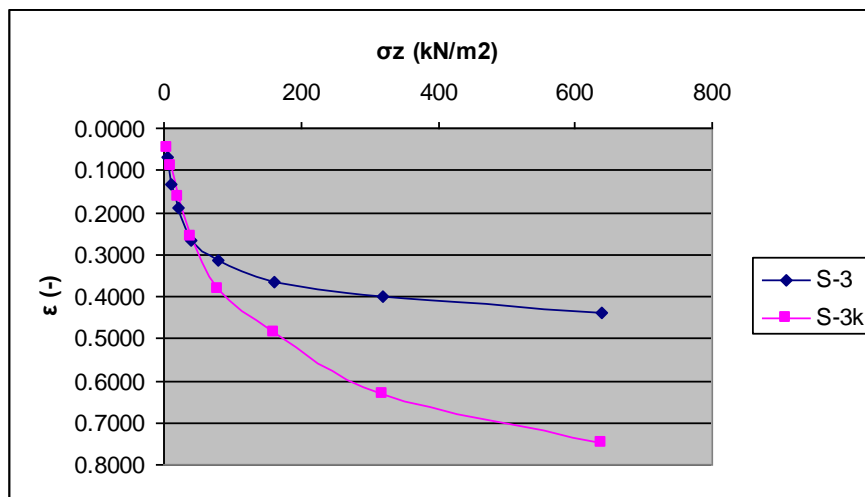
függőleges normál feszültség σ_z (kN/m ²)	vízszintes normál feszültség $\sigma_x = \sigma_y$ (kN/m ²)	fajlagos függőleges alakváltozás (ϵ) (-)
5	nm.	0,045900
10	nm.	0,089450
20	nm.	0,164750
40	nm.	0,259700
80	nm.	0,383445
160	nm.	0,486845
320	nm.	0,631345
640	nm.	0,746345

Az ábrából megállapítható, hogy a két mérés jelentős eltérést mutat, de modelltörvény alkotására felhasználni ezt az eredményt még sem lehet.



4.12. ábra Az S-3k jelű minta összegzett konszolidációs görbéje

Azért nem, mert nem csak a méret, hanem a vizsgált anyag összetétele is megváltozott, hiszen az S-3k jelű mintánál még több "nagy darabot" ki kellett venni. Ezek után arra a kérdésre, hogy akkor vajon az S-3 jelű minta és a valós geometria (lerakó) jelentős méretbeli különbsége, illetve a minta válogatása okoz-e hibát, azt mondhatjuk, hogy természetesen igen. De ez a hiba, az egyéb bizonytalanságokhoz képest nem jelentős, legalábbis a szakirodalom helyszíni mérései (visszaszámítások) szerint (4.7. és 4.8. ábrák). Az eredmények értékelését segíti a 4.13. ábra, melyen a nagyméretű- és a hagyományos ödométeres vizsgálat mérési eredményeit egy diagramban ábrázoltam.



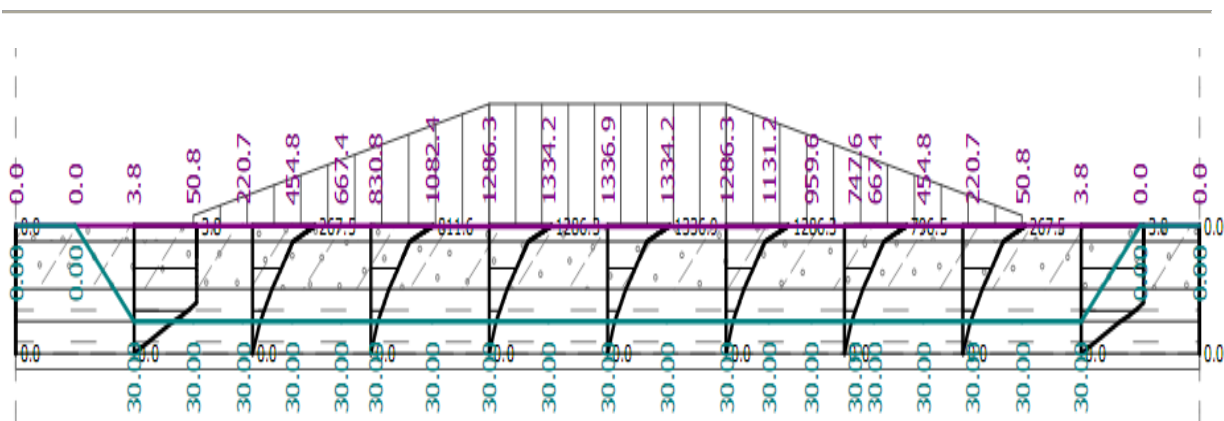
4.13. ábra Az S-3 és S-3k jelű minta alakváltozásának összehasonlítása

Az altalaj összenyomódása

A hulladék súlyából származó teher hatására a lerakó altalaja is összenyomódik, ez az alakváltozás az anyagi folytonosság miatt a lerakó felszínének függőleges elmozdulását is okozza, így vizsgálata ez esetben is szükséges. Az altalaj számításba vehető tulajdonságait a (3. fejezet) tartalmazza. A rétegsor elemzéséből megállapítható, hogy a határmélységet célszerű a lerakó alatt -40 méterre felvenni, hiszen ettől a mélységtől nagyságrendileg merevebb anyag található (márga), melynek összenyomódása, figyelembe véve a feszültségintenzitás mélység szerinti csökkenését is, már elhanyagolható. A számítást GEO5 programmal végeztem, 600 kN /m² –es maximális teherintenzitást feltételezve, melynek eloszlása követi a lerakó geometriáját. Az eredményeket a 4.14. ábra mutatja, melyből megállapítható, hogy a maximális süllyedés 1,34 m. A végeredmény megegyezik, a Kany szerinti, karakterisztikus pont alatti, számítással kapott értékkel. A tapasztalat szerint ez az érték a süllyedés felső határértékének tekinthető. Az altalaj összenyomódását összehasonlítva a lerakott hulladék várható összenyomódásával, megállapítható, hogy ez egy-másfél nagyságrenddel kisebb, de nem elhanyagolható.

Az időbeli lefolyásáról (konszolidáció) ez a számítás nem ad tájékoztatást, de a nagy vastagságú, kis áteresztőképességű kötött (plasztikus) réteg miatt, a konszolidációs idő évtized(ek)re becsülhető. Az adathiány miatt (k-tényező, tisztázatlan drénezési viszonyok, ödométeres vizsgálathoz nem tudunk konszolidációs időt stb.), a konszolidáció számítása csak közelítő lehet.

A konszolidáció számítását, a modell felépítésénél (Plaxis modell) végeztem el, az altalaj átlagos talajfizikai jellemzőit alkalmazva.



4.14. ábra A lerakó aljzatsüllyedés számítása GEO5 programmal

A kevés összehasonlító tapasztalatom miatt (nagy felület, nagy teher stb.), nagyon szerettem volna helyszíni mérésekkel szerzett adatokkal ellenőrizni a számítást. Erre több kísérletet tettem, de ezek sorra elbuktak, a következő okok miatt:

1. a lerakó alsó talpfelületére állított gázkutakban való mérés, a kutak tönkremenetele miatt meghiúsultak (az új fűrt kutak, pedig természetesen nem érnek le a talpmélységig),
2. a lerakó alsó csurgalékvíz gyűjtő rendszerének dréncsöveit (bár azok átjárhatóak voltak), a nagy távolság miatt felmérni nem sikerült,
3. geofizikai (geoelektromos) módszerrel a szigetelő lemez helyzetének meghatározása, bár a kontraszt az elektromosan szigetelő műanyaglemez és a hulladék között ideális, pontossága nem érte el a deciméter nagyságrendet sem, így ezek a mérések használhatatlanok voltak.

Így meg kellett elégednem a modellezés eredményeivel. Megjegyzem, hogy ezek a tapasztalatok is hozzájárultak ahhoz, hogy a lerakó II. üteménél, már inklinométer csöveket építettek be az alsó lezárásba.

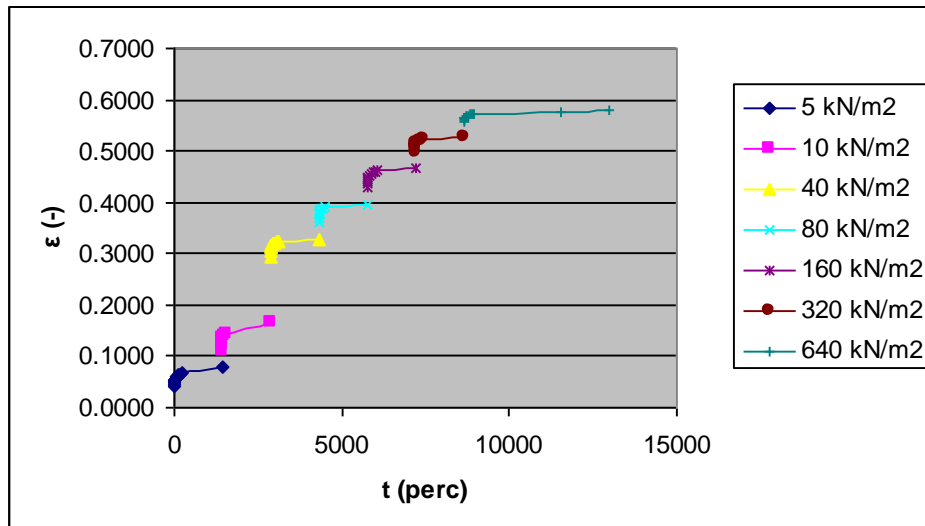
4.2. A vizsgált hulladék konszolidációja

A konszolidáción ez esetben a talajmechanikában szokásos terminológia szerint az alakváltozás (összenyomódás, gátolt oldalkitérés mellett (ϵ)) – eltelt idő (t) összefüggését értem, és Fredlund, D. G. szerinti értelemben használom.

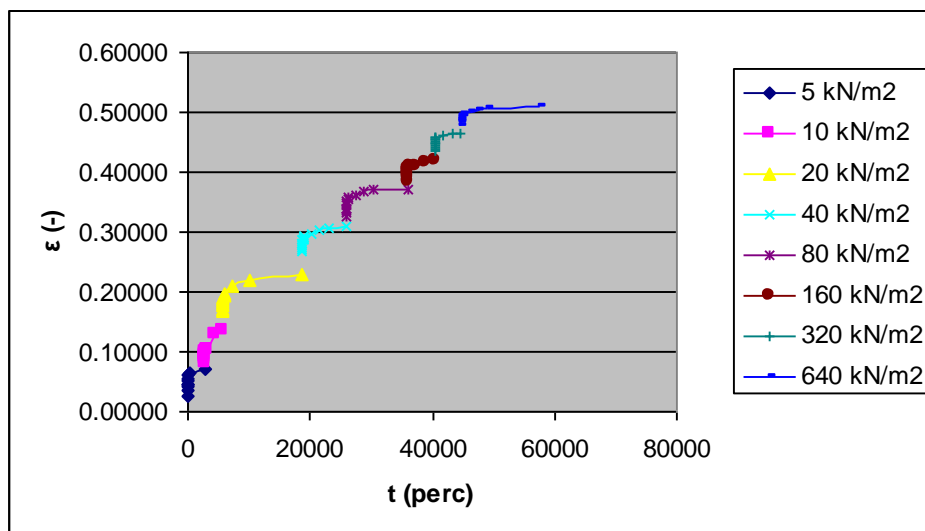
Az alakváltozások időbeli lefutása még az összenyomódásnál is bizonytalanabb, hiszen sok nehezen számításba vehető faktortól függ. A szakirodalom áttanulmányozása után, a (talaj)mechanika alapú konszolidációs vizsgálat kapcsán, arra a következtetésre jutottam, hogy az általam mért konszolidációs görbékből a terhelésfüggő összenyomódás és a rövid idejű másodlagos összenyomódás (kúszás a viszkózus tulajdonság miatt) becsülhető a degradációs fok függvényében. A hosszú idejű másodlagos összenyomódás (kúszás a degradáció miatt), a helyszíni mérésekből és irodalmi adatokból, ill. az S-3 jelű minta hosszú idejű méréséből becsülhető.

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. Természetesen nem telített, csak kvázi telített, már csak a lerakóhelyi gáz képződése miatt is. Későbbi vizsgálatok esetén, mikor a felső lezárás elkészül, esetleg érdemes megfontolni, hogy telítetlen konszolidációs vizsgálat szükséges-e.

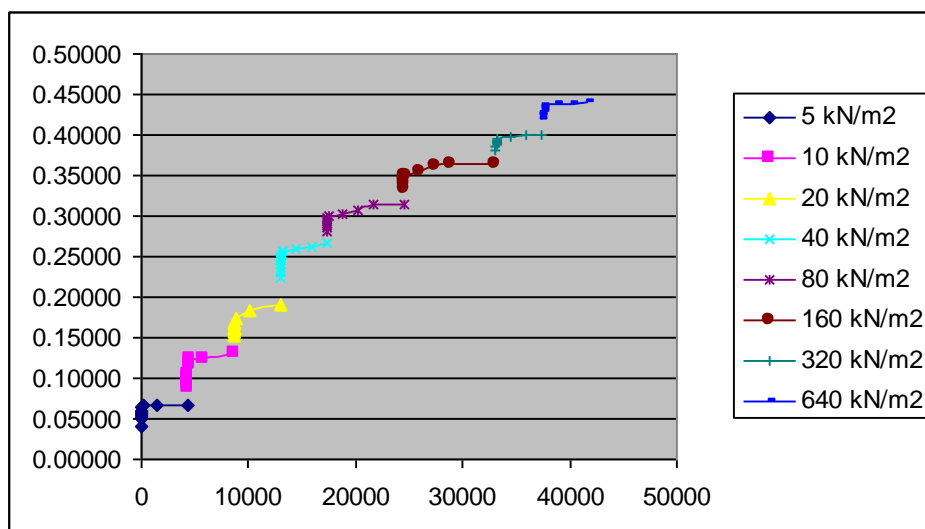
A hulladékminták konszolidációs vizsgálatának mérési eredményeit a 4.15-4.17. ábrák mutatják.



4.15. ábra Az S-1 jelű minta összegzett konszolidációs görbéje



4.16. ábra Az S-2 jelű minta összegzett konszolidációs görbéje



4.17. ábra Az S-3 jelű minta összegzett konszolidációs görbéje

A klasszikus talajmechanikai kiértékelést végrehajtva (Casagrande-Taylor-módszer (Szepesházi, 2000) (4.18. ábra)), ahol a következőket feltételezzük:

A konszolidáció kezdeti szakaszán az összenyomódás az idő négyzetgyökével lineárisan nő:

$$\Delta h - \Delta h_0 = a \cdot \sqrt{t}, \quad (4.14)$$

ahol: t - a vizsgálat kezdete óta eltelt idő,
 Δh - összenyomódás t időpontban,
 Δh_0 - kezdeti összenyomódás (konszolidációs fok = 0),
 a - konstans.

Ha két időpontot kiválasztunk (t_1 és t_2), és mindegyikre alkalmazzuk a (4.14) egyenletet, a felírható kétismeretlenes egyenletrendszerből kifejezhető a kezdeti összenyomódás:

$$\Delta h_0 = \frac{\Delta h_1 \cdot \sqrt{\frac{t_2}{t_1} - \Delta h_2}}{\sqrt{\frac{t_2}{t_1} - 1}}. \quad (4.15)$$

A konszolidációs összenyomódás végét (a másodlagos összenyomódás kezdetét), a konszolidációs görbe (szemilogaritmikus ábrázolásban) inflexiós pontjába húzott érintő és a végérintő metszéspontja adja.

A konszolidációs tényező, pl. konszolidációs diagram (Bobe, Hubacek, 1983) felhasználásával számítható, mivel e diagramok tulajdonképpen a konszolidációra felírható differenciálegyenlet kezdeti és peremfeltételeket figyelembe vevő megoldásai. Feltételezve az egydimenziós konszolidációt (kompressziós kísérlet esetén igaz), a konszolidációs tényezőre a következő összefüggés írható:

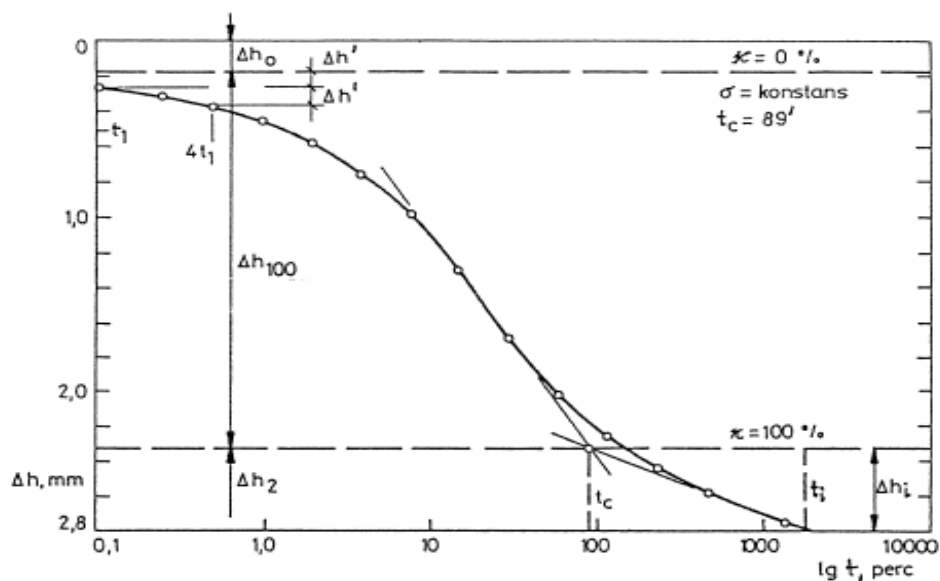
$$c_v = \frac{T_\kappa \cdot H^2}{t_\kappa}, \quad (4.16)$$

ahol: t_κ - a konszolidációs fokhoz tartozó idő,
 H - a szivárgási hossz (minta fél magassága),
 T_κ - a konszolidációs fokhoz tartozó időtényező.

A másodlagos összenyomódás szemilogaritmikus ábrázolásban egyenes vonalú, így az egyenes hajlásával, a kúszási együtthatóval jellemezhető (a hulladékokra alkalmazott talajmechanikai modell szokásos formája szerint 10-es alapú logaritmust használunk, bár a konszolidációs elmélet természetesen alapút alkalmaz). A kúszási együttható a következőképpen számítható:

$$C_{\alpha, \varepsilon} = \frac{\varepsilon_z(t_2) - \varepsilon_z(t_1)}{\lg \frac{t_2}{t_1}}, \quad (4.17)$$

ahol: t - a vizsgálat kezdete óta eltelt idő ($t_2 > t_1 > t_{korsz}$),
 ε_z - a minta fajlagos függőleges összenyomódása.



4.18. ábra Magyarozó ábra a konszolidáció értékeléséhez (HEFOP/2004/3.3.1/0001.01)

A konszolidáció kiértékelését a 4.8.-4.10. táblázatok tartalmazzák.

4.8. táblázat Az S-1 jelű minta fontosabb konszolidációs jellemzői

terhelés (kN/m ²)	összenyomódás növekmény (mm)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (mm)	konszolidációs összenyomódás (mm)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúszás) (mm)
5	4.78	2.60	1.45	0.73
10	5.43	2.35	1.67	1.41
40	9.97	8.40	1.18	0.39
80	4.17	2.38	1.44	0.35
160	4.29	2.35	1.62	0.32
320	3.66	2.25	1.15	0.26
640	3.16	2.17	0.73	0.26

terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúszás) (%)	konszolidációs tényező c _v (m ² /s)	kúszási együttható C _{α,ε} (-)
5	55	30	15	1.14E-07	0.0133
10	43	31	26	1.51E-07	0.0199
40	84	12	4	9.41E-08	0.00627
80	57	35	8	6.15E-08	0.00468
160	55	38	7	2.49E-08	0.00549
320	62	31	7	2.96E-08	0.00345
640	69	23	8	1.21E-08	0.00273
Átlag*	61	32	7	3.20E-08	0.00409

*Hasonlóan a kompresszió értékelésénél az előterhelési feszültségnél kisebb terhek figyelmen kívül hagyásával.

4.9. táblázat Az S-2 jelű minta fontosabb konszolidációs jellemzői

terhelés (kN/m ²)	összenyomódás növekmény (mm)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (mm)	konszolidációs összenyomódás (mm)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúszás) (mm)
5	6.75	3.13	3.12	0.50
10	6.50	1.50	4.10	0.90
20	8.86	3.08	3.97	1.81
40	7.78	3.87	3.29	0.61
80	6.04	1.93	3.10	1.00
160	4.52	1.56	2.09	0.87
320	4.15	1.54	3,26	0.25
640	4.40	1.62	2.29	0.48

terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomó dás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúszás) (%)	konszolidáci- ós tényező c_v (m ² /s)	kúszási együttható $C_{\alpha,\varepsilon}$ (-)
5	46	46	8	2.47E-07	0.00430
10	23	63	14	2.66E-08	0.02754
20	35	45	20	6.23E-08	0.01856
40	50	42	8	1.93E-08	0.03041
80	32	51	17	6.05E-08	0.01108
160	35	46	19	8.99E-08	0.00817
320	37	57	6	2.87E-08	0.00263
640	37	52	11	4.45E-09	0.00741
Átlag*	35	52	13	4.58E-08	0.00732

*Hasonlóan a kompresszió értékelésénél az előterhelési feszültségnél kisebb terhek figyelmen kívül hagyásával.

4.10. táblázat Az S-3 jelű minta fontosabb konszolidációs jellemzői

terhelés (kN/m ²)	összenyomódás növekmény (mm)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (mm)	konszolidációs összenyomódás (mm)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúszás) (mm)
5	4.89	3.30	1.48	0.11
10	4.65	1.57	2.46	0.62
20	4.36	1.68	1.45	1.23
40	5.42	2.52	2.26	0.64
80	3.61	1.14	1.37	1.11
160	3.63	1.49	1.08	1.06
320	2.55	1.20	1.02	0.33
640	2.83	1.39	1.16	0.28

terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konzolidációs összenyomódás (%)	másodlagos konzolidációs összenyomódás (kúszás) (%)	konzolidációs tényező c_v (m ² /s)	kúszási együttható $C_{a,\varepsilon}$ (-)
5	68	30	2	1.88E-07	0.00088
10	34	53	13	8.26E-08	0.00679
20	39	33	28	7.77E-08	0.01342
40	46	42	12	5.57E-08	0.00647
80	32	37	31	1.86E-07	0.00948
160	41	30	29	7.60E-08	0.00867
320	47	40	13	9.21E-08	0.00329
640	49	41	10	6.87E-08	0.00274
Átlag*	46	37	17	7.89E-08	0.00490

*Hasonlóan a kompresszió értékelésénél az előterhelési feszültségnél kisebb terhek figyelmen kívül hagyásával.

A feldolgozás egy más formája lehet, ismert konszolidációs modell illesztése a mért adatokra, ez a következő formákban történt.

A "T" konszolidációs modell

A jól ismert Terzaghi modell módosítása, mely figyelembe veszi a kezdeti alakváltozást (4.19. ábra), így a függvény a következő:

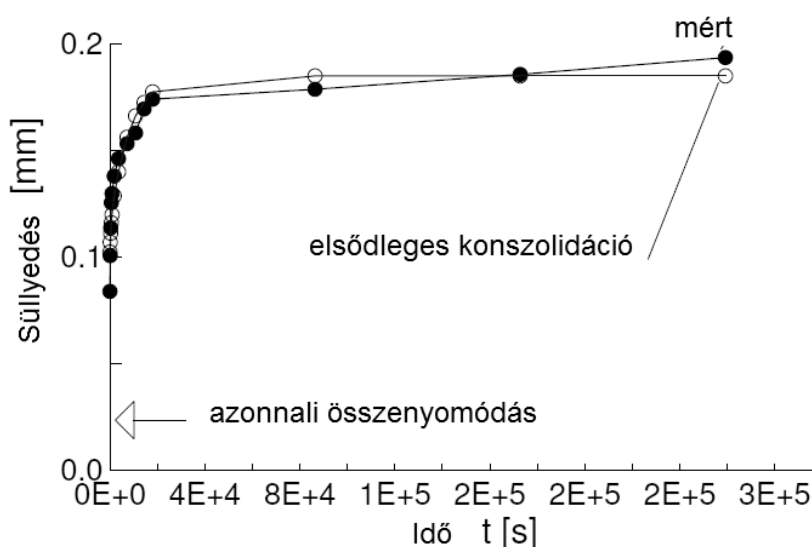
$$v(t) = v_0 + v_1(t), \quad (4.18)$$

ahol: $v(t)$ – a minta tetejének függőleges elmozdulása,

v_0 – a kezdeti alakváltozás,

$v_1(t)$ – a konszolidációs alakváltozása,

t – a terheléstől eltelt idő.



4.19. ábra Konszolidációs modell illesztése a mért értékekre (mintaábra) "T" modell szerint (módosított Terzaghi modell)

A konszolidációs alakváltozás, a következő formulával számítható:

$$v_1(c_v, t) = v_{1,\infty} \left[1 - \int_0^{2H} \frac{u(c_v, t, x) dx}{2H\sigma} \right], \quad (4.19)$$

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

ahol: H - a minta fél magassága,

σ - a teljes normálfeszültség növekmény,

E_s – összenyomódási modulus,

u – pórusvíznyomás,

c_v – konszolidációs tényező,

t – a terheléstől eltelt idő,

x – hely szerinti változó.

4.11. táblázat Az S-1 jelű minta "T" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői

S-1	modell "T"		
terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	konszolidációs tényező c_v (m ² /s)
	v_0 / v	v_1 / v	
5	31.4	68.6	2.52E-08
10	37.1	62.9	3.70E-08
40	47.1	52.9	3.01E-08
80	47.4	52.6	2.05E-08
160	47.4	52.6	2.78E-08
320	48.3	51.7	2.04E-08
640	48.7	51.3	4.17E-09
átlag*	47.8	52.2	2.1E-08

4.12. táblázat Az S-2 jelű minta "T" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői

S-2	modell "T"		
terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	konszolidációs tényező c_v (m ² /s)
	v_0 / v	v_1 / v	
5	32.9	67.1	3.82E-08
10	34.3	65.7	9.75E-08
20	42.6	57.4	1.25E-08
40	48.1	51.9	1.30E-08
80	48.9	51.1	2.04E-08
160	50.1	49.9	3.46E-08
320	51.2	48.8	3.25E-08
640	51.1	48.9	1.30E-08
átlag*	49.9	50.1	2.3E-08

4.13. táblázat Az S-3 jelű minta "T" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői

S-3 terhelés (kN/m ²)	modell "T"		
	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	konszolidációs tényező c_v (m ² /s)
	v_0 / v	v_1 / v	
5	40.6	59.4	3.50E-09
10	37.7	62.3	2.32E-08
20	41.8	58.2	2.09E-08
40	45.0	55.0	1.16E-08
80	46.0	54.0	1.18E-08
160	46.8	53.2	9.81E-09
320	48.5	51.5	1.05E-08
640	48.6	51.4	9.27E-09
átlag*	47.5	52.5	1.02E-08

*Hasonlóan a kompresszió értékelésénél az előterhelési feszültségnél kisebb terhek figyelmen kívül hagyásával.

A "B" konszolidációs modell

A jól ismert Bjerrum modell módosítása, mely figyelembe veszi a kezdeti alakváltozást (4.20. ábra), így a függvény a következő:

$$v(t) = v_0 + v_1(t) + v_2(t), \quad (4.19)$$

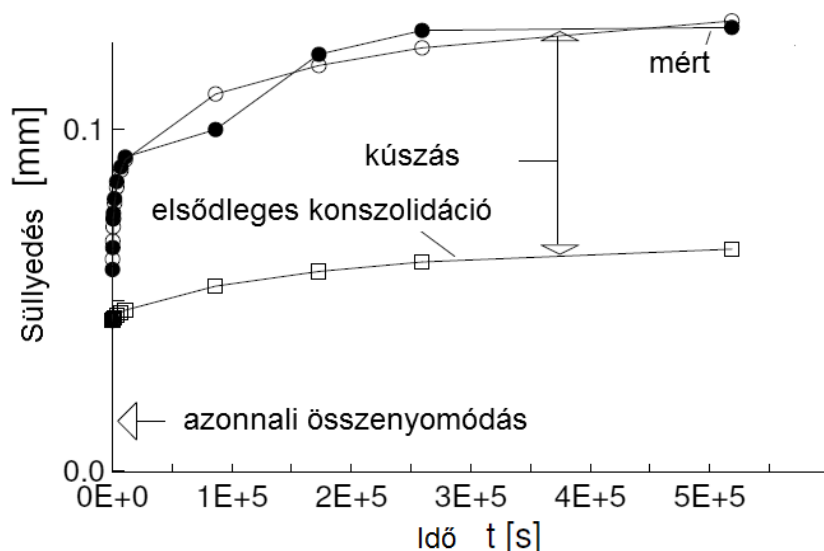
ahol: $v(t)$ – a minta tetejének függőleges elmozdulása,

v_0 – a kezdeti alakváltozás,

$v_1(t)$ – a konszolidációs alakváltozása (4.18),

$v_2(t)$ – a másodlagos konszolidációs alakváltozása (kúszás),

t – a terheléstől eltelt idő.



4.20. ábra Konszolidációs modell illesztése a mért értékekre (mintaábra) "B" modell szerint (módosított Bjerrum modell)

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

$$v_2(t) = C_\alpha \frac{2H}{1+e_0} \log \frac{t+t_0}{t_0}, \quad (4.20)$$

ahol: C_α – kúszási index,
 t_0 – idő paraméter,
 e_0 – kezdeti hézagtenyező.

A modellillesztés számítógépes program segítségével történt (Wolfram Mathematica), a számítás részletei a mellékletben találhatóak, a 4.17. és 4.18. ábrák mintaábrák, az eredményeket a 4.11.-4.16. táblázatok tartalmazzák.

4.14. táblázat Az S-1 jelű minta "B" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői

S-1	modell "B"				
terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (%)	konszolidáci- ós tényező c_v (m ² /s)	kúszási index C_α (-)
	v_0 / v	v_1 / v	v_2 / v		
5	25.6	65.7	8.7	E-3	0.00297
10	32.7	56.6	10.7	3E-3	0.00368
40	45.4	50.2	4.3	5E-13	0.00287
80	45.8	42.6	11.6	5E-13	0.00332
160	46.1	36.4	17.5	5E-13	0.00340
320	47.4	41.6	11.0	5E-13	0.00278
640	48.3	43.8	7.9	5E-13	0.00181
átlag*	46.6	42.9	10.5	5E-13	0.00283

4.15. táblázat Az S-2 jelű minta "B" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői

S-2	modell "B"				
terhelés (kN/m ²)	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (%)	konszolidáci- ós tényező c_v (m ² /s)	kúszási index C_α (-)
	v_0 / v	v_1 / v	v_2 / v		
5	19.8	68.4	11.8	7E-12	0.00375
10	32.7	64.3	3.0	6E-2	0.00098
20	39.1	57.5	3.4	3E-4	0.00400
40	46.1	46.4	7.5	5E-4	0.00277
80	46.7	48.0	5.2	6E-13	0.00380
160	48.7	40.3	11.0	3E-4	0.00264
320	50.0	37.8	12.2	6E-13	0.00244
640	50.0	39.1	10.9	2E-4	0.00198
átlag*	48.3	42.3	9.4	n.r.	0.00273

4.16. táblázat Az S-3 jelű minta "B" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői

S-3 terhelés (kN/m ²)	modell "B"				
	kezdeti (azonnali) összenyomódás (%)	konszolidációs összenyomódás (%)	másodlagos konszolidációs összenyomódás (%)	konszolidáci- ós tényező c _v (m ² /s)	kúszási index C _α (-)
	v ₀ / v	v ₁ / v	v ₂ / v		
5	30.7	60.1	9.2	6E-13	0.00165
10	33.2	51.2	15.6	6E-13	0.00439
20	39.8	49.3	10.9	E-3	0.00266
40	42.0	45.4	12.6	6E-13	0.00339
80	44.4	45.6	10.0	8E-4	0.00182
160	45.5	43.4	11.1	9E-4	0.00169
320	47.5	39.7	12.9	6E-13	0.00140
640	47.6	40.2	12.2	6E-13	0.00156
átlag*	46.2	42.2	11.6	4E-4	0.00161

*Hasonlóan a kompresszió értékelésénél az előterhelési feszültségnél kisebb terhek figyelmen kívül hagyásával.

Mind a három kiértékeléssel kapott eredmény tendenciájában hasonlóan és feltételezhetően jól leírja a hulladékminták rövid idejű konszolidációs viselkedését. Természetesen a szórás relatív nagy, de ez az inhomogén hulladék sajátja. A további számításokhoz a (4.11.-4.16. táblázat) átlagértékei vehetők figyelembe, mivel ezek bizonyos tendenciát mutatnak, az így meghatározott fizikai jellemzők jó összhangot mutatnak a szakirodalmi adatokkal. A konszolidáció a degradációs fok függvényében a (4.17.) táblázat szerinti átlagértékekkel számítható.

4.17. táblázat A konszolidációs jellemzők átlagértékei a degradációs fok függvényében

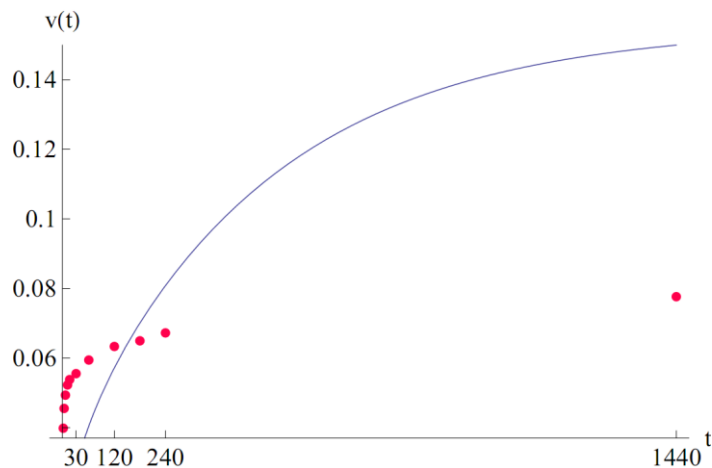
Minta	degradációs fok	konszolidációs tényező c _v (m ² /s)	kúszási index C _α (-)
S-1	2	3.20E-08	0.00283
S-2	3	4.58E-08	0.00273
S-3	4	7.89E-08	0.00156

A talajokkal összehasonlítva, megállapítható, hogy a hulladéknak jelentős az azonnali alakváltozása, mely természetesen a telítetlenség következménye is lehet, de sokkal inkább az összenyomható "szilárd szemcsék" jelenlétével magyarázható. Természetesen a kúzás is jelentős a viszkózus tulajdonság miatt, a hosszú idejű kúzás magyarázata a degradáció. A süllyedés összetevőinek arányát a laboratóriumi vizsgálat és a modellillesztés eredményeként, a következő (4.18.) táblázat szerinti átlagértékekkel javaslom figyelembe venni:

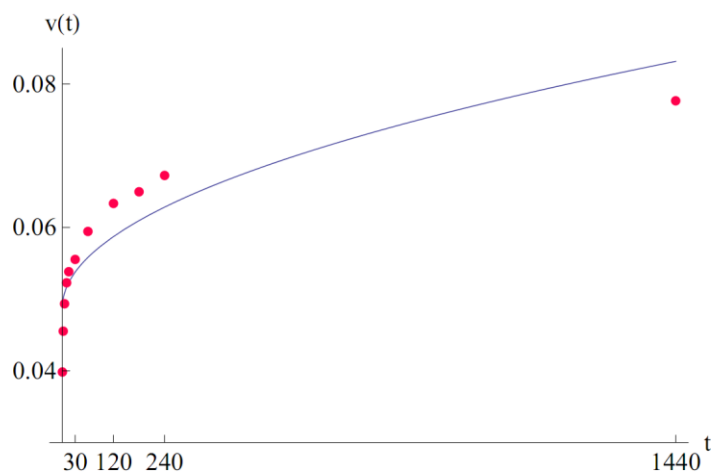
4.18. táblázat A süllyedés összetevőinek aránya (átlag)

	kezdeti (azonnali) összenyomódás	konszolidációs összenyomódás	másodlagos konszolidációs összenyomódás (kúzás)
	v ₀ / v	v ₂ / v	v ₂ / v
vizsgált kommunális hulladék	0.47	0,42	0,11

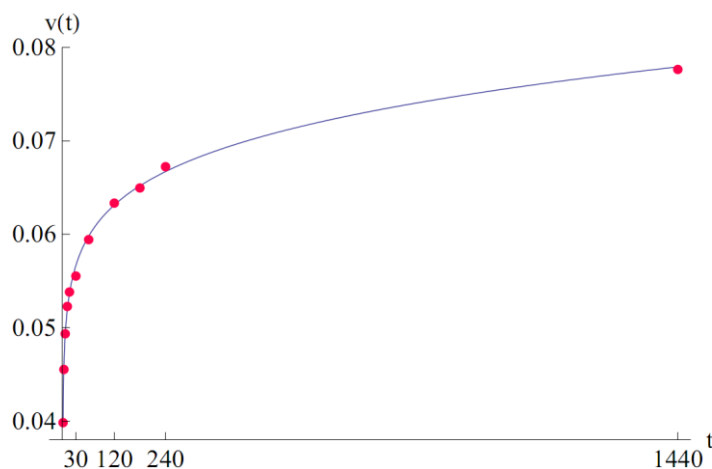
A hulladék minták konszolidációs vizsgálata kapcsán összességében megállapítható, hogy szükség volt az ismert konszolidációs modellek módosítására, hiszen kezdeti alakváltozás nélkül, a modellezésre kevésbé alkalmasak (4.21. ábra). Továbbá megállapítható, hogy a "B" modell írja le legjobban a valóságot, a hulladék alakváltozási viselkedését ismerve (korábban), illetve a regressziós mutatók szerint, valamint az ábrák is erről tanúskodnak (melléklet).



a) Terzaghi modell szerint



b) "T" modell szerint (módosított Terzaghi modell);



c) "B" modell szerint (módosított Bjerrum modell)

4.21. ábra Talajmechanika alapú modellek alkalmazása az S-1 jelű minta első terhelésénél

A vízáteresztő-képességi együttható visszaszámítása

A konszolidáció elméletéből ismert, hogy a konszolidációs együttható kiszámítható a következő módon:

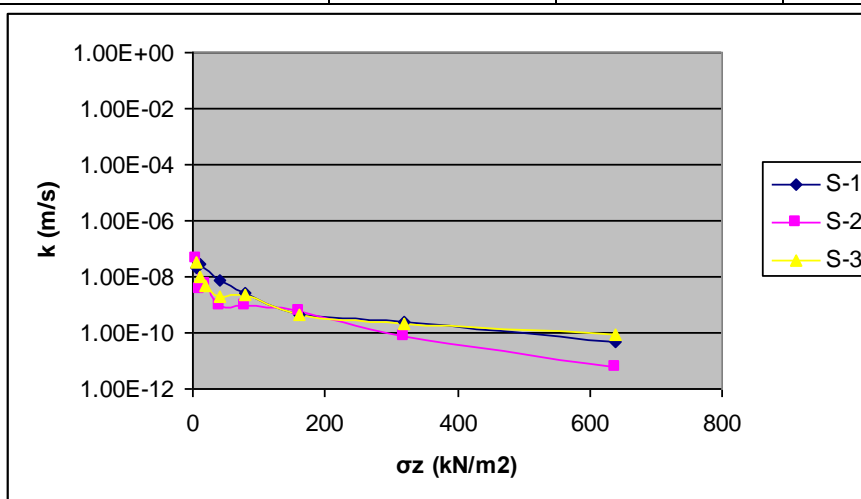
$$c_v = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_v}, \quad (4.21)$$

ahol: k – vízáteresztő-képességi együttható,
 $E_s = E_{oed}$ – összenyomódási modulus,
 γ_v – a víz térfogatsúlya.

A (4.21) összefüggésből, felhasználva a kompressziós vizsgálat eredményeit, a k -tényező kiszámítható (4.19. táblázat, 4.22. ábra).

4.19. 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



4.22. ábra A vízáteresztő-képességi együttható változása

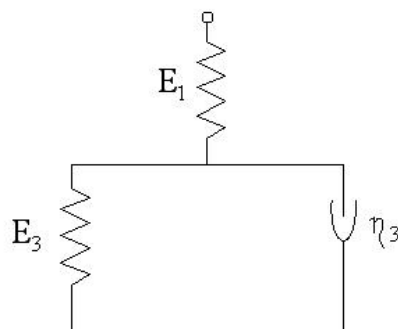
Az eredményekből megállapítható, hogy a függőleges normál feszültség növelésével (a minta összenyomásával) csökken a k -tényező értéke, a degradációs fok növekedésével kisebb mértékben szintén csökken, bár itt az összefüggés nem teljesen egyértelmű, de tendenciájában igaz (best trend). A terhelés függés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

A kiszámított értékek inkább tendenciákat tükröznek, mint pontos értékeket, hiszen csak pontszerűen mintáztam a hulladékot és kis mértékben megváltoztattam az összetételét is, valamint a konszolidációs együttható számítása is hibával terhelt, ezért összefüggés (függvénykapcsolat) vizsgálatát nem tartom lehetségesnek, de az eredmények egy modellalkotás kiinduló értékei lehetnek, illetve trend alkotására felhasználhatók.

4.3. A vizsgált hulladék alakváltozásának reológiai modellezése

Ha figyelembe vesszük a hulladékmintákban a terhelés hatására lejátszódó folyamatokat, az elemi idealizált anyagmodellekből (rugalmas, képlékeny, viszkózus) összeállított modellrendszerből várható megfelelő közelítése a valóságnak. Ezek közül a viszkoelasztikus modell alkalmazása indokolt. A végtelen sok modelltől, a jelenséget a legegyszerűbben, a feladatnak megfelelő pontossággal leíró modellt kell választani. E választásban segít a Müller-féle osztályozás (Müller, 2011, Csizmadia, Nándori, 2003). A feszültségugrás hatására bekövetkező kúszási jelenség leírására, figyelembe véve a válaszfüggvényt, az I. osztályba sorolt Poyting-Thomson ("PT") (4.23 ábra) és a IV. osztályba sorolt Burger-modell ("BU") (4.24. ábra) tűnik jó választásnak, a mérési eredmények ismeretében. E két modellt alkalmaztam, a degradációs fok függvényében.

Poyting-Thomson modell



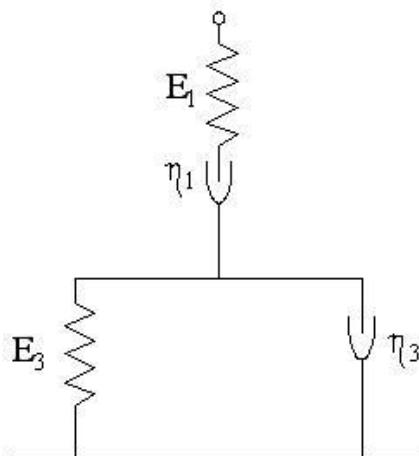
4.23. ábra Poyting-Thomson - modell

A "PT" modell, kúszást leíró válaszfüggvénye feszültségugrásra, a következő:

$$\varepsilon(t) = \sigma_1 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_3} \cdot e^{-\frac{E_3 t}{\eta}} \right), \quad (4.22)$$

ahol: ε – fajlagos alakváltozás (-),
 t – idő (s),
 σ – normál feszültség (kN/m²),
 E – rugalmassági modulus (kN/m²),
 η – viszkozitási tényező (Ns/m²).

Burger modell



4.24. ábra Burger - modell

A "BU" modell, kúszást leíró válaszfüggvénye feszültségugrásra, a következő:

$$\varepsilon(t) = \sigma_1 \left(\frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_3} \cdot e^{-\frac{E_3 t}{\eta_2}} \right), \quad (4.23)$$

ahol: ε – fajlagos alakváltozás (-),
 t – idő (s),
 σ – normál feszültség (kN/m²),
 E – rugalmassági modulus (kN/m²),
 η – viszkozitási tényező (Ns/m²).

Müller (2011) könyvében ismertett matematikai megoldást követve, a modell állandóit, az anyagállandókat, számítógépes program (Wolfram Mathematica) segítségével határoztam meg. Az eredményeket a 4.20.-4.22. táblázatok tartalmazzák.

4.20. táblázat Az S-1 jelű minta "PT" és "BU" modellillesztéssel meghatározott modell állandói

terhelés (kN/m ²)	modell "PT"			modell "BU"			
	E ₁ (kN/m ²)	E ₃ (kN/m ²)	η (Ns/m ²)	E ₁ (kN/m ²)	E ₃ (kN/m ²)	η ₁ (Ns/m ²)	η ₂ (Ns/m ²)
5	105	177	26310	117	259	454992	5249
10	42	114	12200	45	189	263181	1913
40	101	1267	12214	101	1337	4.40E+6	7720
80	109	1624	29158	110	1763	6.18E+6	18571
160	183	3256	126669	184	3546	1.15E+7	69816
320	319	7997	187314	320	8589	3.22E+7	120984
640	569	20928	4.25E+6	570	29965	2.06E+8	222367

4.21. táblázat Az S-2 jelű minta "PT" és "BU" modellillesztéssel meghatározott modell állandói

terhelés (kN/m ²)	modell "PT"			modell "BU"			
	E ₁ (kN/m ²)	E ₃ (kN/m ²)	η (Ns/m ²)	E ₁ (kN/m ²)	E ₃ (kN/m ²)	η ₁ (Ns/m ²)	η ₂ (Ns/m ²)
5	151	156	5508	159	171	1.57E+6	3723
10	56	109	73698	59	329	356282	7139
20	57	237	46648	57	309	6.14E+6	33811
40	73	694	165607	74	988	6.68E+6	32622
80	120	1176	172261	121	1394	3.03E+7	104524
160	204	3390	550968	206	4405	2.21E+7	104502
320	362	7759	1.10E+6	365	9172	6.93E+7	238815
640	661	15636	3.04E+6	614	33462	4.92E+8	326783

4.22. táblázat Az S-3 jelű minta "PT" és "BU" modellillesztéssel meghatározott modell állandói

terhelés (kN/m ²)	modell "PT"			modell "BU"			
	E ₁ (kN/m ²)	E ₃ (kN/m ²)	η (Ns/m ²)	E ₁ (kN/m ²)	E ₃ (kN/m ²)	η ₁ (Ns/m ²)	η ₂ (Ns/m ²)
5	105	177	3166	117	259	454992	2757
10	42	114	15559	45	189	263181	12282
20	101	1267	71823	101	1337	4.40E+6	20342
40	109	1624	71326	110	1763	6.18E+6	16595
80	183	3256	108260	184	3546	1.15E+7	31320
160	319	7997	635645	320	8589	3.22E+7	87256
320	569	20928	303176	570	29965	2.06E+8	134865
640	759	20745	679807	761	23030	2.36E+8	389163

A reológia modellezés kapcsán megállapítható, hogy a vizsgált jelenség az alkalmazott két viszkoelasztikus modellel leírható, a megfelelő pontossággal. A két modell közül a Burger-modell a mért adatsort jobban közelíti, a regressziós együttható 0,98 feletti mindkét esetben, de a Burger-modellnél minden esetben néhány ezreddel több. 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 (kvázi végtelen mozgást, csak a vizsgálatától független jelenség az erózió okozza, de ez meggátolt a rekultivációval és az utógondozással).

A degradációs fázisok és a terhelés függvényében egyértelmű tendencia állapítható meg a modell állandói, az anyagállandók között. A hulladék a degradáció során és a terhelés hatására is alakváltozás szempontjából merevebbé válik. Ez az összefüggés a terheléssel szorosabb, mint a degradációs fokkal. A rugalmassági modulus kis terheléseknél tapasztalható visszaesése a viszkozitási tényező növekedése mellett, a mintavétel okozta zavaró hatással magyarázható, így a modellalkotásakor javasolt az előterhelési feszültségnél kisebb értékek figyelmen kívül hagyása, ha szükséges a modellállandók extrapolációval történő meghatározása.

4.4. Hulladékhalom alakváltozásának talajmechanika alapú modellezése

A modellezés kapcsán célul tűztem ki, hogy egy olyan talajmechanika alapú, gépi megoldást (modellt) alkotok, amely lehetővé teszi a kommunális hulladékhalom alakváltozásának követését időben és térben. A feladat nehézsége sokrétű, hiszen a vizsgálandó anyag (kommunális hulladék), inhomogén és anizotróp, mechanikai viselkedése kevésbé ismert, a mechanikai hatásokra szuperponálódnak a biológiai-kémiai hatások, a geometria a szokásos feladatokhoz képest (pl. földműtervezés) nagyságrenddel nagyobb, stb. Céлом volt továbbá, hogy a feladatot a lehető legegyszerűbb módszer kidolgozásával oldjam meg, hiszen gyakorlati szempontból ez a legkedvezőbb.

A modellezés eszközéül a Plaxis 2D FEM programot választottam, mivel jelenleg ez az egyik leggyakrabban alkalmazott program és a SZIE-YMÉTK-ÉI-e rendelkezik vele. 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 preconcepción alapuló modellezési munkafolyamat útját jártam (a hidrodinamikai modellezésekhez hasonlóan).

1. A feladat előkészítése

A hulladékfizikai jellemzők és geometriai ismeretek gyűjtése és rendszerezése a (3. fejezetben) megtalálható. Egy hasonló, általános feladat esetén, lehetnek ezek az adatok részletesebbek, vagy hiányosabbak, első esetben a végeredmény várhatóan jobban leírja a lerakó egyedi sajátosságainak hatását, az utóbbi esetben a hiányokat irodalmi adatokra támaszkodva kell felvenni, vagy pótméréseket kell végezni. A modellezés egyik alaptörvénye, hogy a bemenő adatok jósága, alapvetően meghatározza a végeredmény megbízhatóságát. Ezért is célszerűnek tartottam a legfontosabb alapadatokat elemezni megbízhatóság szempontjából (4.23. táblázat)

A feladat jellegéből adódik, hogy kiváló minőségű alapadat csak ritkán alkalmazható, ilyen lehetne esetleg a geometria még pontosabb geodéziai felvétele, de ez vélhetően a modell globális jóságát nem befolyásolná számottevően. A megbízhatóságok értékelésének következményeként, a modell validálásánál célszerű a kevésbé megbízható adatokat a változó paraméternek tekinteni.

4.23. táblázat A bemenő adatok és megbízhatóságuk értékelése

alapadat	megbízhatóság	indoklás
geometria	kiváló - jó	terv szerinti építés évenkénti felmérés szükséges idealizálás
hulladék összetétele	jó	negyedévenkénti akkreditált mérés, minősítés szűrőpróbaszerű mintavétel
térfogatsűrűség	jó-közepes	laboratóriumi mérés és helyszíni mérés visszaszámítása eloszlás bizonytalan
nyírószilárdsági paraméterek	jó	laboratóriumi mérés pontoszerű mintavétel
összenyomódási modulus	jó	laboratóriumi mérés pontoszerű mintavétel
Poisson-tényező	közepes	laboratóriumi mérés (kisebb megbízhatóságú) pontoszerű mintavétel
vízáteresztő-képességi együttható	közepes-gyenge	kompressziós vizsgálatból visszaszámított (hibával terhelt) pontoszerű mintavétel ismeretlen valós drainézési viszonyok
kúszási együttható (viszkózus)	jó	laboratóriumi mérés pontoszerű mintavétel
kúszási együttható (degradációs)	gyenge	hulladék összetételből becsült
helyszíni süllyedésmérés	jó-közepes	pontoszerű mérés, nem teljes adatsor, hatások egyben mérve

Értékelés: kiváló – jó – közepes – gyenge

A következőkben felsorolom azokat, a már meglévő mérési eredményeket, melyeket felhasználtam a modellalkotás során, de részben sem én mértem.

A BME-EÖ-GT méréseit, ahogy már írtam, közvetlenül fel tudtam használni, mivel a közös kutatás keretében, mérték a paralel minták szilárdsági és egyéb hulladékfizikai jellemzőit, ezeket a (4.24. táblázatban) foglalom össze, Varga (2010) nyomán.

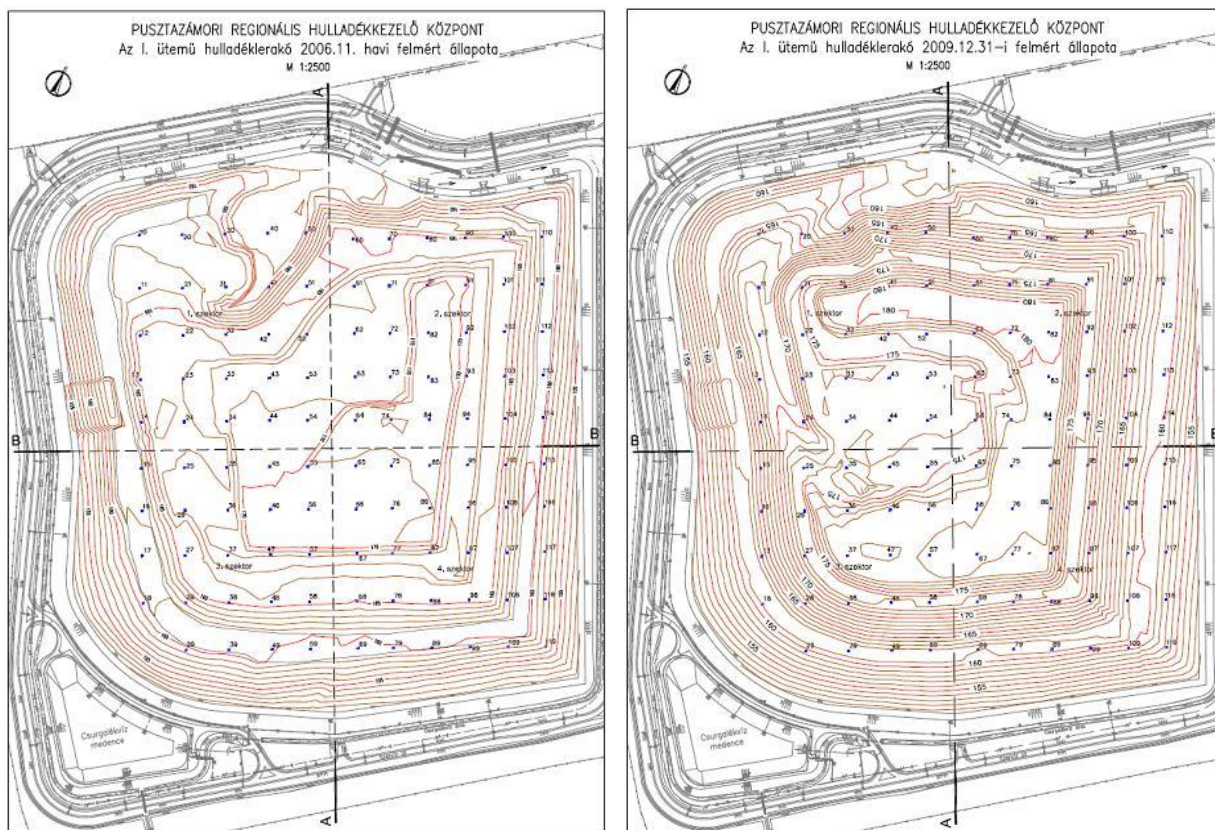
4.24. táblázat Hulladékfizikai jellemzők a degradációs fok függvényében (Varga, 2010)

degradációs fok	minta jele	víz-tartalom (%)	Szervesanyag tartalom (%)	térfogatsúly (kN/m ³)	belső súrlódási szög (°)	kohézió (kN/m ²)
1.	A	32.3	63.8	7.98	34.86	4.31
	B	35.7	56.4	8.42	35.99	25.74
	C	29.5	50.1	8.13	35.42	26.15
	átlag	32.5	56.8	8.18	35*	25*
2.	D	45.6	42.5	8.76	26.78	15.17
	E	54.6	40.9	8.50	28.40	4.40
	F	57.8	37.5	9.11	22.92	22.13
	átlag	52.7	40.3	8.79	26*	15*
3.	G	88.5	32.6	9.44	23.08	12.68
	H	84.2	35.9	9.23	22.35	10.59
	I	79.6	35.7	9.85	23.46	15.67
	átlag	84.1	34.7	9.51	23*	13*
4.	J	106.7	29.4	10.31	21.49	12.28
	K	95.7	25.6	10.11	21.74	9.87
	L	103.8	27.2	10.28	21.92	11.29
	átlag	102.1	27.4	10.23	21*	11*
5.	M	121.4	18.9	11.20	21.09	5.47
	N	115.6	23.6	11.02	20.32	3.69
	O	118.9	15.3	10.70	19.77	3.44
	átlag	118.6	19.3	10.97	20*	4*

* - mivel a nyírósilárdsági paraméterek összetartozó értékpárok, így az átlagérték a karakterisztikus érték meghatározásánál szokásos, az óvatosan becsült átlagérték

A lerakó által végzett és általam felhasznált mérésekről az előzőekben szintén írtam. A (3. fejezetben) közöltek is (beszállított hulladék és napi takarás tömege, beszállított hulladék összetétele, altalaj jellemzői) természetesen mérések eredményei ezeket itt már nem közlöm újra. A mért értékekből egyrészt következtetni lehet a lerakott hulladék sűrűségének változására, de mivel a lerakott anyag nem állandó tömegű, hiszen a degradáció során anyagvesztés is történik, a $\rho = m/V$ számítás hibával terhelt, amihez még a víz-tartalom változásának hatása is hozzáadódik, a sűrűség számítása tehát további elemzést igényel, a jelen számításokban elfogadtam a 4.28. táblázat adatait.

Ezekon kívül, megkaptam a lerakó geometriai kialakítását, a tervezett állapot szerint, és a hulladéktest évenkénti felszínfelmérésének eredményeit is (4.25. ábra).



4.25. ábra A PRHK felszínfelmérése 2006. 11. és 2009. 12. (FKF Zrt. 2000-2013)

A hulladéktest felszínmérése részletes, a modellezéshez azonban szükséges a geometria idealizálása, amelyről a következő alfejezetben írok.

2. A modellezési koncepció (munkahipotézis) felállítása

Az előző fejezetekben történt megállapítások szerint, 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.

Az anyagmodell megválasztása

A kompresszió szempontjából legfontosabb eldöntendő kérdés az anyagmodell megválasztása (Martin, Puskás, 2014). A döntést befolyásolja, hogy az adott anyagmodell jól közelíti-e a vizsgált anyag fizikai tulajdonságait, mennyire ismert, illetve milyen mért adatokkal rendelkezünk.

a) Mohr-Coulomb talajmodell (MC)

Egyszerűsége és történelmi hagyományai (sok az összehasonlító tapasztalat, a kapcsolódó labormérések rutinszerűek) folytán az első lehetőség a Mohr-Coulomb anyagmodellnek nevezett, lineárisan rugalmas - tökéletesen képlékeny anyagmodell alkalmazása, ahol a képlékenységi feltétel a Coulomb-féle törvény. Talajok vizsgálata kapcsán szerzett tapasztalatok szerint az alakváltozások számítása ezzel az anyagmodellel pontatlan, de sok esetben elfogadható eredményt ad. Ennek oka az, hogy a számítás, folyási feltételként is a Coulomb-féle feltételt használja, azaz úgy tekinti, hogy míg a feszültségek nem elégitik ki a Coulomb-féle feltételt, addig a talaj rugalmasan viselkedik, illetve a feltétel teljesülése utáni képlékeny alakváltozásokat a Coulomb-féle folyási feltétel deriválásával számítja (Koch, 2012), azonban a talajok és így a hulladék viselkedésére ezek a feltevések nem igazak.

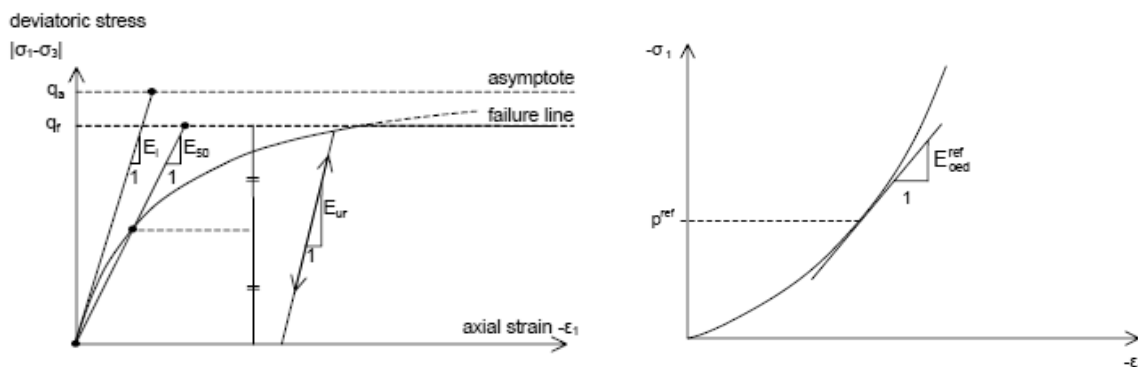
Pontosítható a számítás, ha a mélységgel változó összenyomódási modult alkalmazunk, feltéve, hogy a vizsgálati tartományban ezt sikerült jól meghatározni. A modell felépítéséhez szükséges paraméterek:

E , rugalmassági modulus [kN/m²]; ν , Poisson-tényező [-]; φ , belső súrlódási szög [°]; c , kohézió [kN/m²]; ψ , dilatációs szög [°]; k , vízáteresztő-képességi együttható [m/s].

b) Felkeményedő talajmodell (HS)

Jellemzője, hogy hatványfüggvényekkel veszi figyelembe a feszültségeknek a talajmerevségre gyakorolt hatását, a kompressziós görbe σ'_1 tengely felé való görbülését, az összenyomódási modulus feszültséggel való növekedését. Ezt a kapcsolatot jól közelíthetjük egy hiperbolával, ezt az összefüggést elsőként Kondner (1963) fogalmazta meg.

A Plaxis programban lévő felkeményedő talajmodell túlszárnyalta ezt a megközelítést is. Első sorban azzal, hogy a képlékenység elméletét használja a rugalmasság elmélete helyett. Továbbá tartalmazza a talaj dilatációt. A Mohr-Coloumb (lineárisan rugalmas –tökéletesen képlékeny) modellel szemben a felkeményedő talajmodell hozam-felülete nincs fixálva a főfeszültségi térben, hanem kiterjedhet a plasztikus deformációk hatására. Különbséget tehetünk a két fő típusú, nyírási és összenyomódási felkeményedés között. A nyírási felkeményedés az elsődleges deviátor terhelés által okozott visszafordíthatatlan deformációk modellezésére szolgál. Az összenyomódási felkeményedés a visszafordíthatatlan plasztikus deformációk modellezésére alkalmas.



4.26. ábra Hiperbolikus feszültség összenyomódás összefüggés (Plaxis)

Megjegyzés: $\sigma_1 - \sigma_3$ – deviátor feszültség, ε_1 – fajlagos alakváltozás

A Plaxis a következőképpen számítja a különböző állapotokhoz tartozó rugalmassági modulusokat:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m, \quad (4.24)$$

ahol: E_{50} : a határoló feszültség-függő rugalmassági modulus,
 p^{ref} : referencia határoló feszültség ($-\sigma_3$), ami a E_{50}^{ref} rugalmassági modulusához tartozik,
 (az aktuális merevség a legkisebb főfeszültségtől függ),
 m : a feszültség függés mennyiségét vezérlő felkeményedési kitevő.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_1 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m, \quad (4.25)$$

ahol: E_{oed} : a tangenciális rugalmassági modulus,
 E_{oed}^{ref} : tangenciális rugalmassági modulus a legnagyobb főfeszültségnél ($-\sigma_1' = p^{ref}$),
 (elsődleges terhelésről van szó, ezért a modell $-\sigma_1'$ használ $-\sigma_3'$ helyett).

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m, \quad (4.26)$$

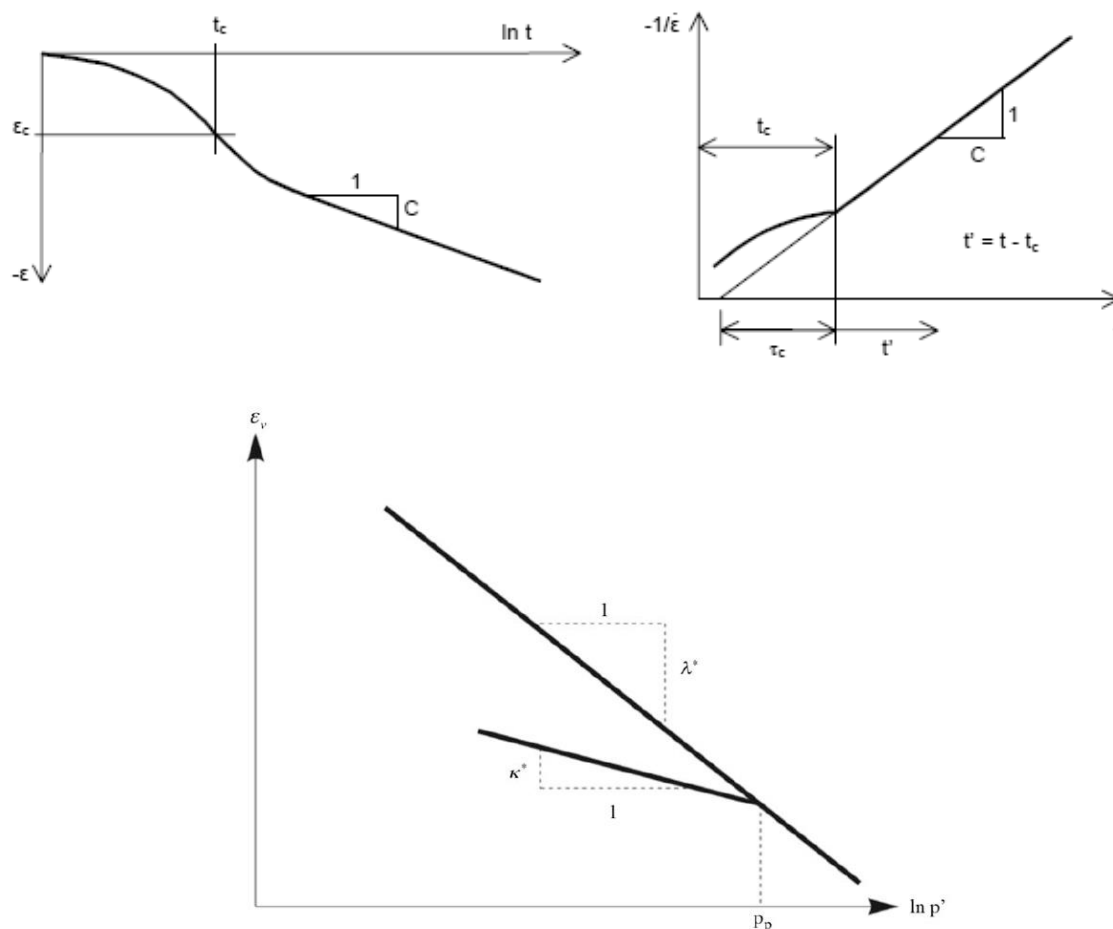
ahol: E_{ur} : a tehermentesüléshez tartozó rugalmassági modulus,
 E_{ur}^{ref} : referencia rugalmassági modulus, ami a megfelelő p^{ref} referencia nyomáshoz tartozik.

A felkeményedő talajmodell paraméterei (4.26. ábra):

- erőtvény szerinti feszültségfüggő merevség: m ,
- az elsődleges deviátor feszültség hatására létrejövő képlékeny alakváltozás: E_{50}^{ref} ,
- az elsődleges kompresszió hatására kialakuló képlékeny alakváltozás: E_{oed}^{ref} ,
- rugalmas tehermentesülési/terhelési merevség: E_{ur}^{ref} ; v_{ur} ,
- tönkremeneteli paraméterek, mint a Mohr-Coloumb modellben: c ; φ ; ψ ,
- vízáteresztő-képességi együttható: k ,
- a Plaxis ajánlásai szerint: $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$, valamint $E_{ur}^{ref} = (3-5) \cdot E_{50}^{ref}$.

c) Puha talajmodell kúszással (SSC)

A puha talajmodell kúszással hasonlít a felkeményedő talajmodellre, a különbség a két modell között, hogy a felkeményedő talajmodell nem alkalmas másodlagos kompresszió (kúzás) figyelembevételére.



4.27. ábra A módosított kúzási tényező ($C = \mu^*$), a módosított duzzadási tényező (κ^*) és a módosított kompressziós tényező (λ^*) értelmezése, meghatározása (Plaxis)

Néhány alapvető jellemzője (4.27. ábra):

- feszültségfüggő szilárdság (logaritmikus összenyomódás),
- különbséget tesz elsődleges terhelés és tehermentesülés-másodlagos terhelés között,
- másodlagos kompresszió (időfüggő),
- tönkremeneteli feltételek, mint a MC modellben.

Összefüggés a nemzetközileg normalizált paraméterek között (Plaxis):

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3 \cdot (1 + e)}, \quad (4.27)$$

ahol: C_c - a kompressziós index,
 e - hézagtényező.

$$\kappa^* = \frac{2}{2,3} \cdot \frac{C_r}{1 + e}, \quad (4.28)$$

ahol: C_r - a duzzadási index.

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2,3(1 + e)}, \quad (4.29)$$

ahol: C_α - a kúszási index.

Ödométeres vizsgálati eredmények átszámítása a szükséges paraméterekhez (Plaxis):

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1 + e_0)} = \frac{\frac{\Delta \varepsilon_a (1 + e_0)}{\Delta \log \sigma'_v}}{2,3(1 + e_0)} = \frac{\Delta \varepsilon_a}{2,3 \Delta \log \sigma'_v} = \frac{\Delta \varepsilon_a}{\Delta \ln \sigma'_v}, \quad (4.30)$$

$$\kappa^* \approx \frac{2C_s}{2,3(1 + e_0)} \approx \frac{2 \frac{\Delta \varepsilon_a (1 + e_0)}{\Delta \log \sigma'_v}}{2,3(1 + e_0)} \approx \frac{2 \Delta \varepsilon_a}{2,3 \Delta \log \sigma'_v} \approx \frac{2 \Delta \varepsilon_a}{\Delta \ln \sigma'_v}. \quad (4.31)$$

A fentiekből következik, hogy a talajmodell (hulladékmodell) megválasztása döntő kérdés. 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 én települési szilárd hulladékot vizsgáltam, megállapításaim erre vonatkoznak.

A konszolidáció számítása

A konszolidáció számítását a következő differenciál-egyenlet megoldásával végzi a Plaxis:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (4.32)$$

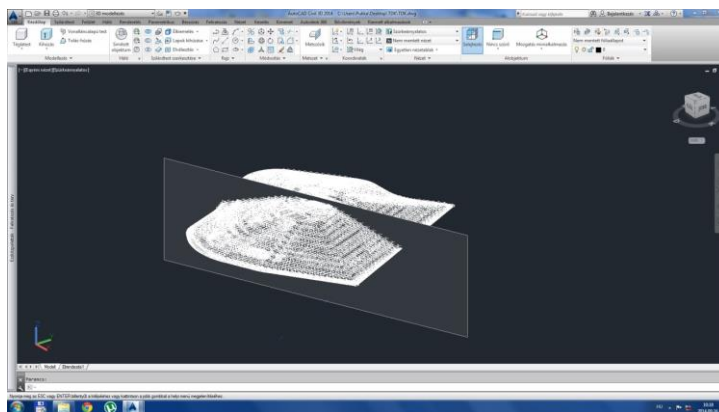
ahol: p a pórusvíznyomás,
 az ismert jelölések:

$$c_v = \frac{kE_{oed}}{\gamma_w}; \quad E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}; \quad z = H - y. \quad (4.33)$$

A konszolidáció (4.33) szerinti számítása a modellezés céljára elfogadható, bár a kezdeti alakváltozás jelentős hulladékok esetén, ezt csak hosszabb idő alatt bekövetkező átlag süllyedéssel tudjuk figyelembe venni, azaz nem várható a modelltől pl. napra az eredmény, de évre már igen.

A geometria felvétele

A lerakó terv szerinti geometriája és az évenkénti felmérésből az egyes feltöltési szintekhez tartozóan is jól ismert. Természetesen a modellezés kapcsán célszerű bizonyos egyszerűsítéseket tenni, mivel egyrészt a végeselemes számítás instabillá válik helyi geometriai anomáliák miatt, másrészt kevés gyakorlati haszonnal jár és nem is ismert például a feltöltés napi szintje. Így a geometria felvételénél a hulladéktömegből számítható éves, egyenletes feltöltési szintből indultam ki, szimmetrikus dombot feltételezve. Mivel a program kétdimenziós, így középmetszet vizsgálható (4.28 ábra), a térbeli hatások becslésére a tengelyszimmetrikus modell is választható, de ez sem teljesen igaz, mivel a lerakó nem forgástest, valahol a kettő között lehet a valóság.



4.28. ábra Geometriai felvétel

3. Modell adatrendszer felépítése

Az előző két bekezdés alapján a következő bemenő adatokkal dolgoztam:

- A geometria a terv szerinti, egyszerűsítésekkel, középmetszet vizsgálata.
- Választott anyagmodellek:
 - Mohr –Coulomb (MC),
 - (lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny),
 - Felkeményedő (HS),
 - Puha talajmodell kúszással (SSC).
- Az alkalmazott hulladékfizikai jellemzők:

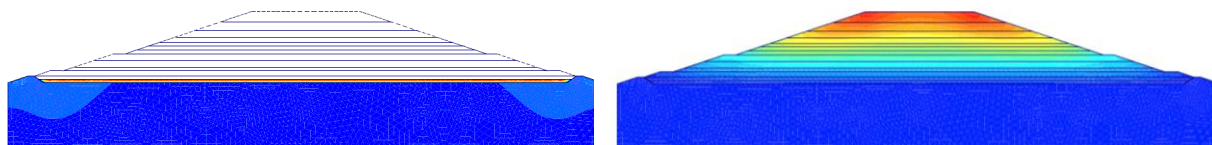
Az előzőekben leírt fizikai jellemzőket alkalmaztam, az 1. és 5. degradációs fokhoz tartozó értékeket extrapolálással állítottam elő. De tulajdonképpen az 1. degradációs fokú rétegnek nincs általában gyakorlati jelentősége, mivel a lerakás technológiájából következik, hogy az újabb réteg felhordása, már a 2. degradációs fokú mintát terheli, természetesen önsúlya hatására már ez a réteg is összenyomódott, de ennek mértékéről semmilyen mérési információ nem áll rendelkezésre, csak a szerves anyag csökkenéséből és a térfogatsűrűség növekedéséből lehet következtetéseket levonni, illetve irodalmi adatokat felhasználni.

4. Numerikus számítások elvégzése

A numerikus számítást a gép elvégzi, a fent leírt elvek, elméletek alapján. A program alkalmas az alakváltozások meghatározására a teher (önsúly és külső terhek) hatására, és ez

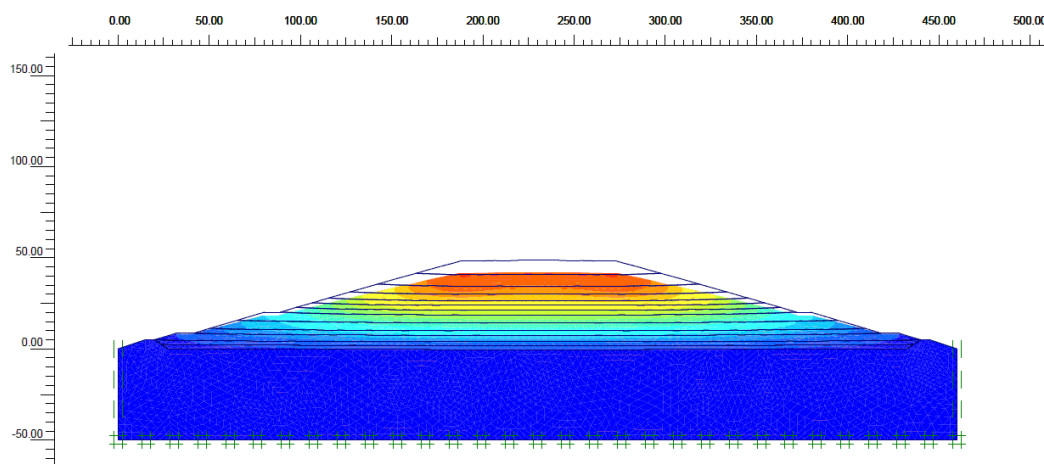
időben is modellezhető (konszolidáció). Egyszerűsége folytán egyfajta (esetleg kettő, friss és érett), hulladék fizikai jellemzőivel számolni lehetne, de a valósághoz közelebb álló a modellezés, ha a degradációnak megfelelően rétegekre osztjuk a hulladékdombot, és ezeket a rétegeket az idő előrehaladtával léptetjük a következő degradációs fázisba, és mindig az adott degradációs fokhoz és mélységhez tartozó fizikai jellemzőket adunk meg (erre a Plaxis lehetőséget ad). A lerakási ütemet és a degradáció időbeli előrehaladását is figyelembe véve, ez a léptetés évenként célszerű.

Az így felépített modellt mutatja a 4.29. ábra.



4.29. ábra A Plaxis modell felépítése építési fázisonként

Az alakváltozások nagyított értékét a 4.30. ábra szemlélteti (2015-ös állapot), megállapítható, hogy jellegében a modell leírja a valóságot.



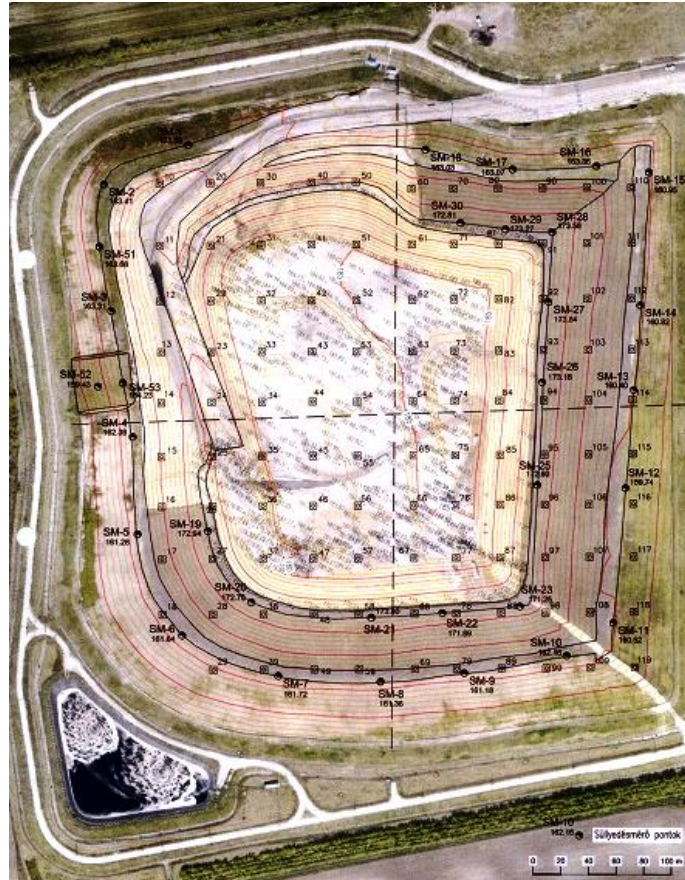
4.30. ábra A konszolidálódó hulladékhalom

A modell viselkedését célszerű a bemenő adatok szisztematikus változtatásával megvizsgálni, azaz elvégezni a paraméter érzékenység vizsgálatát. E vizsgálatból megállapítottam, hogy az alakváltozás nagyságát alapvetően az összenyomódási modulus és a teher (térfogatsűrűség) értéke szabja meg, az alakváltozás időbeli lefutását a vízáteresztő-képességi együttható szabályozza, kúszó modell esetén a kúszási tényező is. A nyírószilárdsági paraméterekre olyan szempontból érzékeny a modell, hogy értéküket egy szint alá csökkentve instabillá válik a modell (rézsűállékonysági probléma).

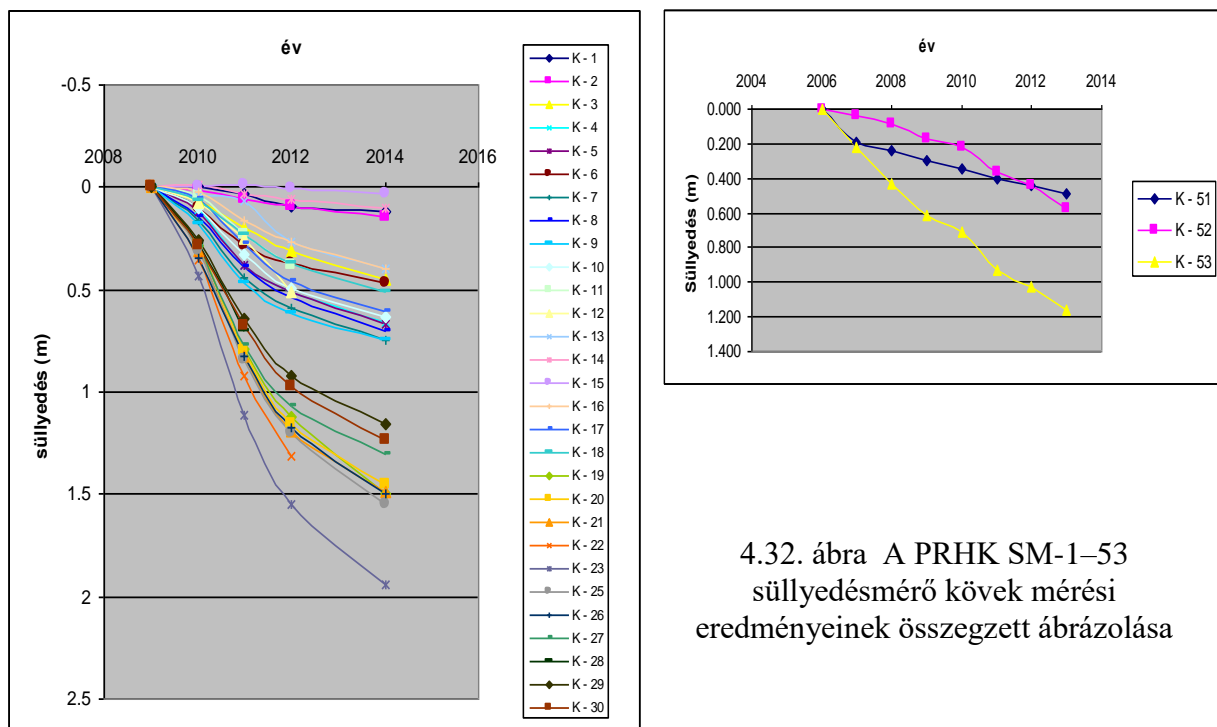
5. A modell validálása, az eredmények értékelése

Abban a szerencsés helyzetben voltam, hogy a számítással meghatározott süllyedéseket, összehasonlíthattam a lerakón mért értékekkel, és ezen ismeretek birtokában validálni tudtam a modellt. A lerakófelszín alakváltozását fixen telepített mérőpontok évenkénti (félévenkénti) felméréssel végezték, ahogy ezt a korábban (3. fejezet) ismertettem. A helyszíni méréssel előállított süllyedés értékeket a validáláshoz statisztikailag elemezni, fizikailag értékelni szükséges.

Megkaptam a felszíni süllyedésmérő kövek helyszínrajzi helyét (4.31. ábra), és az évenkénti felmérési eredményeket, melyeket feldolgoztam (4.32. ábra), táblázatos formában a mellékletben található.



4.31. ábra A PRHK SM-1-53 süllyedésmérő kövek helyszínrajzi elhelyezkedése (FKF Zrt.)k



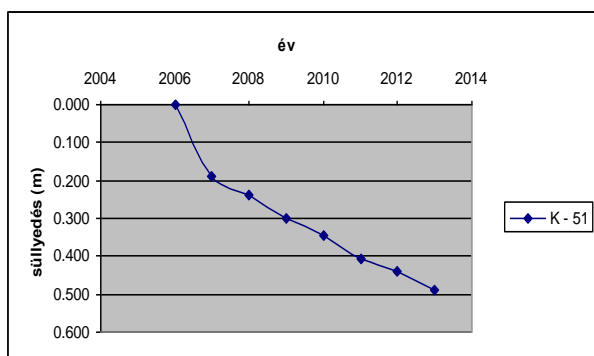
4.32. ábra A PRHK SM-1–53 süllyedésmérő kövek mérési eredményeinek összegzett ábrázolása

A modell validálásához a mért adatsort a következők szerint értékeltem:

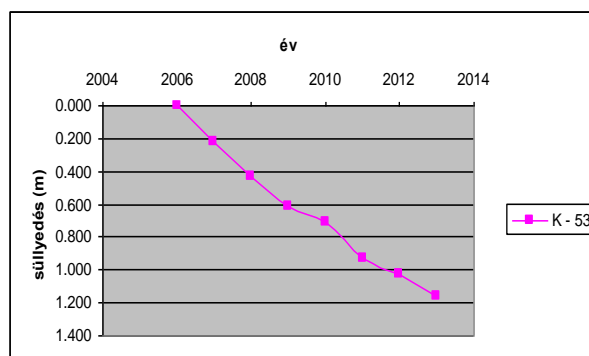
- El kell különíteni a különböző magasságokban létesített pontokat egymástól, mivel alattuk más vastagságú (és más korú) hulladék van.
- El kell különíteni a különböző oldalak pontjait egymástól, mert kezdetben a feltöltés szektorokban történt, így a nyugati és a keleti oldal mérőpontjai alatt más-más korú hulladék van.
- A sarokpontokban telepített pontok adatait, csak korlátozottan használom fel, mert itt bizonyos térbeli hatásokra is számítani lehet.
- A feljáró úthoz közeli pontok adatait figyelmen kívül hagyom, hiszen a teherforgalom dinamikus hatása és az útépités itt vélhetően befolyásolta a süllyedést.
- Ahol készült próba rekultiváció, hatását figyelembe kell majd venni.
- A fenti elvek mentén a következő ábra sorozat (4.33. ábra) mutatja, a már validáláshoz felhasználható süllyedéseket.

2006-ban telepített pontok:

≈ B 159 m-es szint, nyugati oldal
(K-51 rekultivációs rétegen)

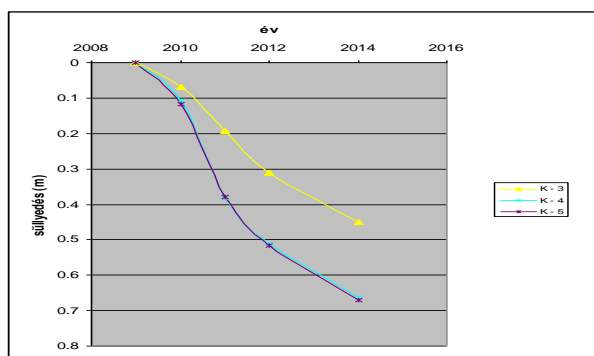


≈ B 164 m-es szint, nyugati oldal
(K-53 rekultivációs rétegen)

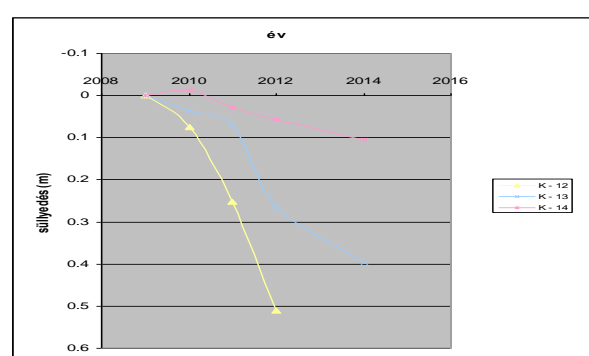


2009-ban telepített pontok:

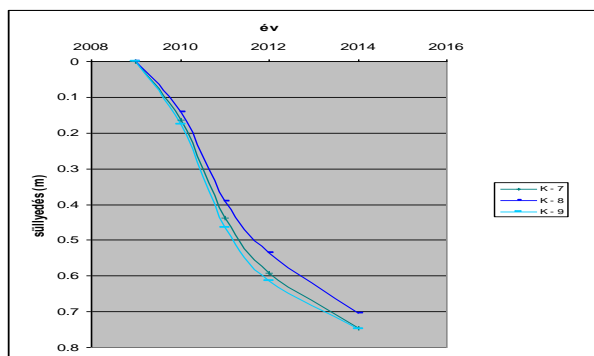
≈ B 162 m-es szint, nyugati oldal



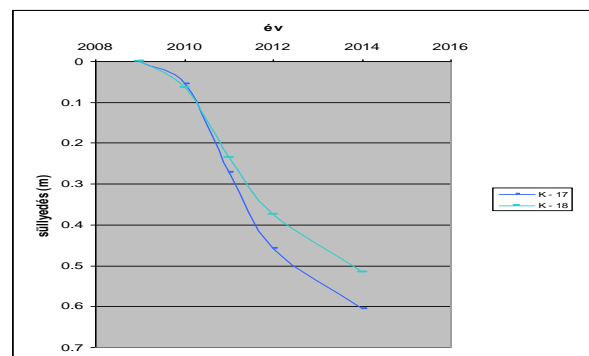
≈ B 162 m-es szint, keleti oldal



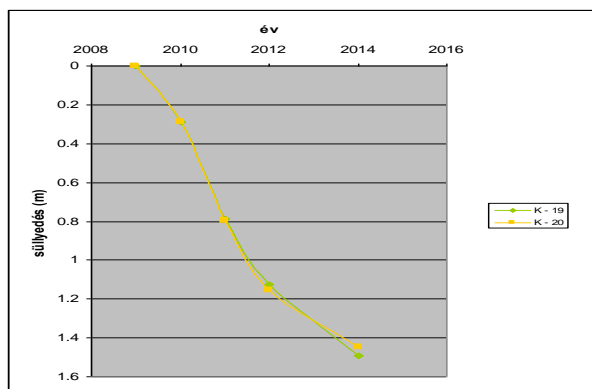
≈ B 162 m-es szint, déli oldal



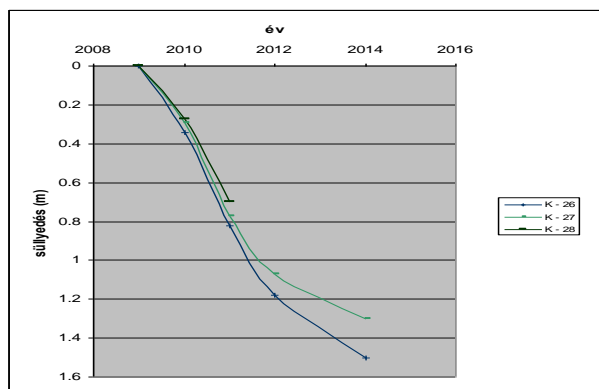
≈ B 162 m-es szint, északi oldal



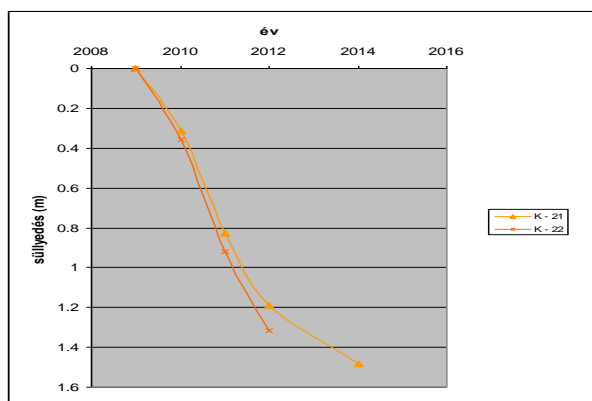
≈ B 173 m-es szint, nyugati oldal



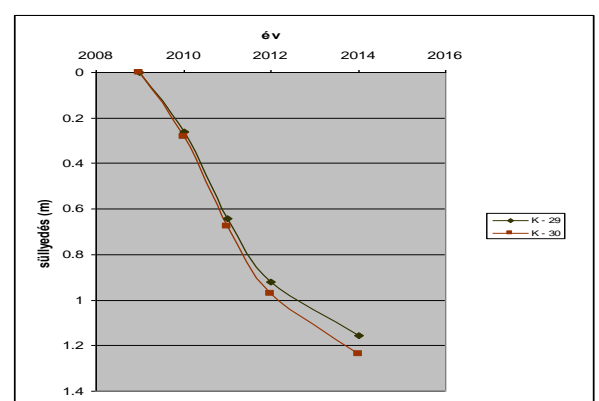
≈ B 173 m-es szint, keleti oldal



≈ B 173 m-es szint, déli oldal



≈ B 173 m-es szint, északi oldal



4.33. ábra (sorozat) A lerakó felszíni süllyedésmérésének csoportosítása

Az ábraszorozatból látszik, hogy az esetek döntő többségében az azonos csoportba tartozó pontok süllyedései jó egyezést mutatnak, tehát a geodéziai felmérés megbízhatósága megfelelő.

A következő megjegyzések szükségesek e vizsgálat kapcsán:

- A felmérés nem tudományos céllal készült, és ezért sajnos nem a kezdetektől történt, és nincs teljesen dokumentálva az éppen aktuális feltöltéshez.
- A felmérés pontszerű, ezért lokális zavaró hatások (inhomogenitás) befolyásolja a mérések eredményeit (B 162 m-es szint, keleti oldal).
- A mérési pontok telepítésének technikájából következően, a lerakó közepén nincsenek mérési pontok.
- A süllyedés értéke minden hatást magába foglal (mechanikai összenyomódás, keresztirányú nyúlás, degradáció stb.).
- E felsorolás második és harmadik pontjában leírt hiba kiküszöbölhető, a nemzetközi gyakorlatból ismert eljárással, miszerint inklinométer csöveket helyeznek el a hulladéktestben is különböző szinteken (Kölsch, 2008.). Reményeim szerint a II. ütemnél erre lesz lehetőség. Középen természetesen nagyobb süllyedés tapasztalható.

E modellezési lépés kapcsán a következők szerint jártam el:

- A validáláshoz a régebben telepített pontok süllyedési átlagát választottam, mivel ezek alatt már 5-6 éves hulladék volt a telepítéskor.

- Az időközben megépített ideiglenes rekultivációs réteget a modellbe beépíteni nem volt célszerű.
- A 4.27. táblázat alapján a kevésbé megbízható jellemzőket tekintettem változónak.
- A saját méréseim értékelése utáni adathiányokat irodalmi adatokkal pótoltam (Haque, 2007) és felhasználtam a paralel minták nyírási vizsgálatának eredményeit (Varga, 2010).

A 4.25.-4.27. táblázatokban gyűjtöttem össze a validálás utáni hulladékfizikai jellemzőket, a degradációs fokok szerint.

4.25. táblázat A Mohr-Coulomb (MC) modell validált paraméterei

	φ [°]	c [kN/m ²]	E_s [kN/m ²]	k [m/s]	ψ [°]	γ [kN/m ³]	ν [-]
1.fázis	35,42	26,15	200	1,5E-7	5,42	8,03	0,25
2.fázis	23,08	22,13	293	E-7	0	9,11	0,40
3.fázis	22,40	12,68	302	9E-8	0	9,44	0,41
4.fázis	21,74	9,87	805	7E-8	0	10,11	0,42
5.fázis	19,77	3,44	1700	5E-8	0	10,70	0,45
alapréteg	37,60	97,40	28000	E-10	7,60	20,80	0,35

4.26. táblázat A felkeményedő modell (HS) validált paraméterei

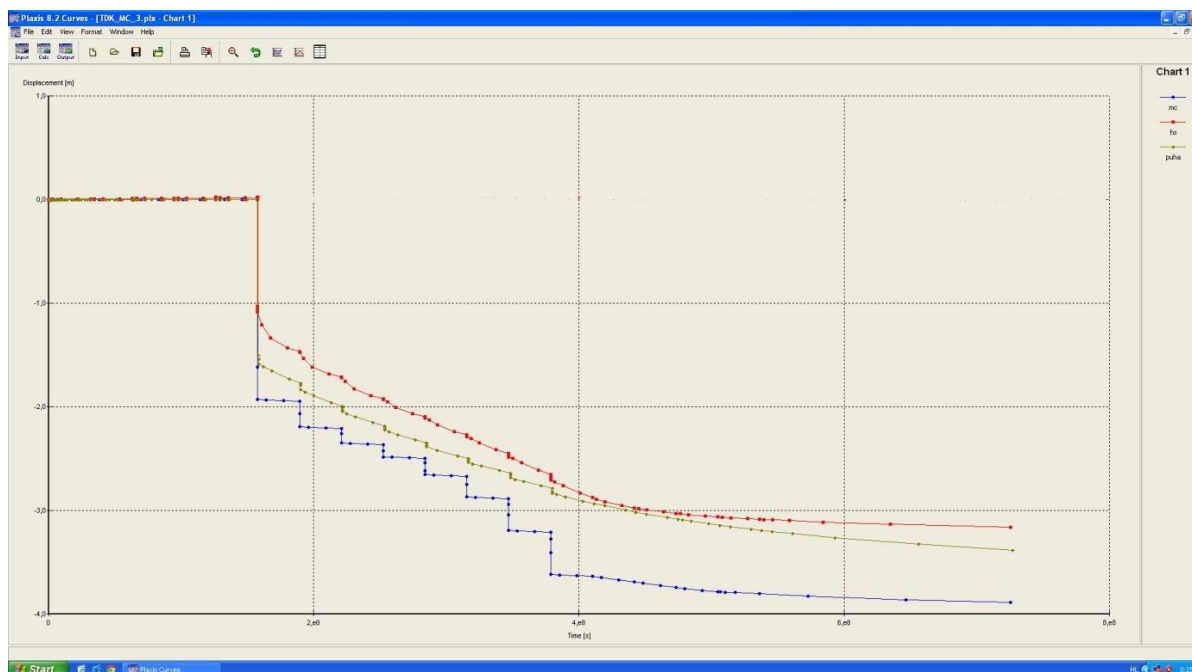
	φ [°]	c [kN/ m ²]	E_{oed}^{ref} [kN/ m ²]	E_{50}^{ref} [kN/ m ²]	E_{ur}^{ref} [kN/ m ²]	k [m/s]	p^{ref} [kN/ m ²]	K_0^{nc} [-]	m [-]	ψ [°]	γ [kN/ m ³]
1 f	35,42	26,15	1000	1000	3000	1,05 E-7	80	0,579	1,0	5,4	8,03
2 f	23,08	22,13	1212	1212	3636	7,00 E-8	80	0,437	1,0	0	9,11
3 f	22,40	12,68	1490	1490	4470	6,30 E-8	80	0,437	1,0	0	9,44
4 f	21,74	9,87	1602	1602	4806	4,90 E-8	80	0,470	1,0	0	10,1
5 f	19,77	3,44	1750	1750	5250	3,50 E-8	80	0,662	1,0	0	10,7
a r	37,60	97,4	28000	28000	84000	1,00 E-10	300	0,390	0,9	7,6	20,8

4.27. táblázat A puha modell kúszással (SSC) validált paramétereit

	φ [°]	c [kN/m ²]	λ^* [-]	κ^* [-]	μ^* [-]	k [m/s]	ψ [°]	γ [kN/m ³]
1 f	35,42	26,15	0,01660	0,01850	0,00002658	1,5E-7	5,42	8,03
2 f	23,08	22,13	0,01547	0,01628	0,00002975	1,0E-7	0	9,11
3 f	22,40	12,68	0,01449	0,01223	0,00003341	9,0E-8	0	9,44
4 f	21,74	9,87	0,01195	0,008174	0,00003725	7,0E-8	0	10,11
5 f	19,77	3,44	0,10000	0,006700	0,00003951	5,0E-8	0	10,7
a r	37,60	97,40	0,15000	0,016000	0,00400000	E-10	7,60	20,8

A validálás kapcsán a következő megállapításokat teszem:

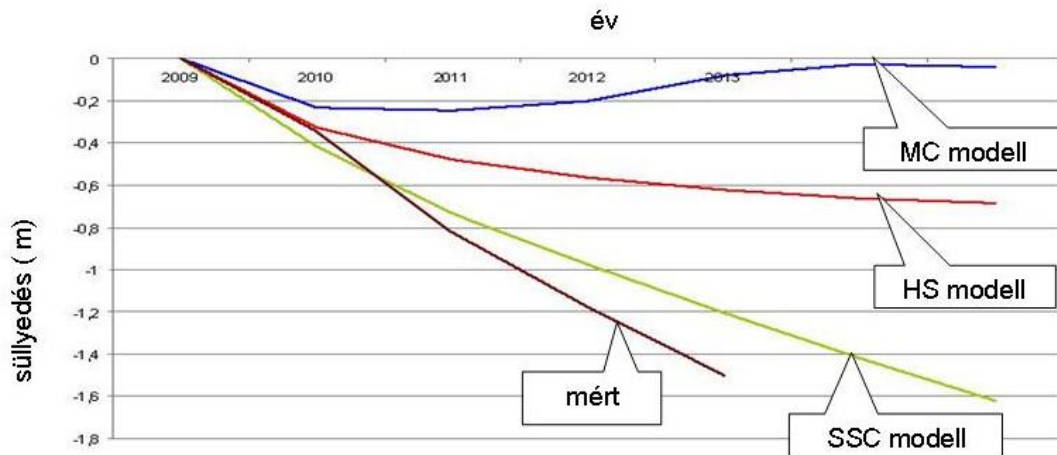
- Az összenyomódási modulus ödométeres vizsgálatból meghatározott és adott terheléshez tartozó, felső értékével célszerű számolni, ez alátámasztani látszik azt a feltételezést, hogy a minta előkészítése az ödométeres vizsgálathoz, kis mértékben lágyítja a mintát.
- Az iterációs finomhangolása a modellnek, csak a mért adatok megbízhatóságának határáig lehetséges, ez is alátámasztja azt a tapasztalatot, hogy a vizsgált lerakón mért süllyedésértékek, (és ezek megbízhatósága) alapvető fontosságúak egy felépített modell kalibrálásához (belső pontok mérése inklinométerrel).
- A program szerinti konszolidáció számítása megfelelő a hulladékok mechanikai modellezéséhez



4.34. ábra Süllyedés a lerakó egy általános pontjában
kék görbe: a MC - ; piros görbe: a HS -; zöld görbe: a SSC modell

- A számítás tovább pontosítható a lerakási fázisok és degradációs fok szerinti sűrűbb felosztással (térben és időben).
- A geometriai adatok ismerete szükséges, minél több az adat, annál kevésbé kell idealizálni.
- A három anyagmodell szerinti számítás összehasonlítása kapcsán megállapítható, hogy a MC (lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny) anyagmodell is validálható volt a mért adatok és a laboratóriumi vizsgálatok eredményeinek felhasználásával (4.34. ábra).

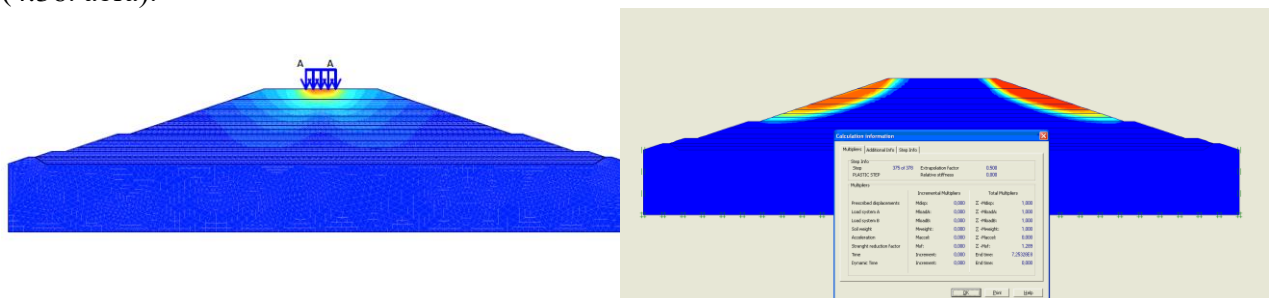
Az eredmények értékelése következett ezután. A modelleket tovább építve és időben előre léptetve a magasabban lévő süllyedésmérő pontok mért adataihoz (átlagához) viszonyítottam a számított értékeket, kontroll vizsgálatot végeztem (4.35. ábra). A megalkotott modellek közül a HS és a SSC jellegükben visszaadták a valóságot. A MC modell jellegében sem írja le a valóságot a hulladékdomb felszíni, szélső pontjaiban. A puha talajmodell kúszással (SSC) a legpontosabb, mert figyelembe veszi a kúszást is. E modellel a lerakott hulladék alakváltozása az idő függvényében jól modellezhető, annak ellenére, hogy a süllyedés összetevőinek fizikai tartalma más a talaj és a hulladék esetén.



4.35. ábra A különböző modellek kontroll vizsgálatának eredményei

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 (4.36. ábra).

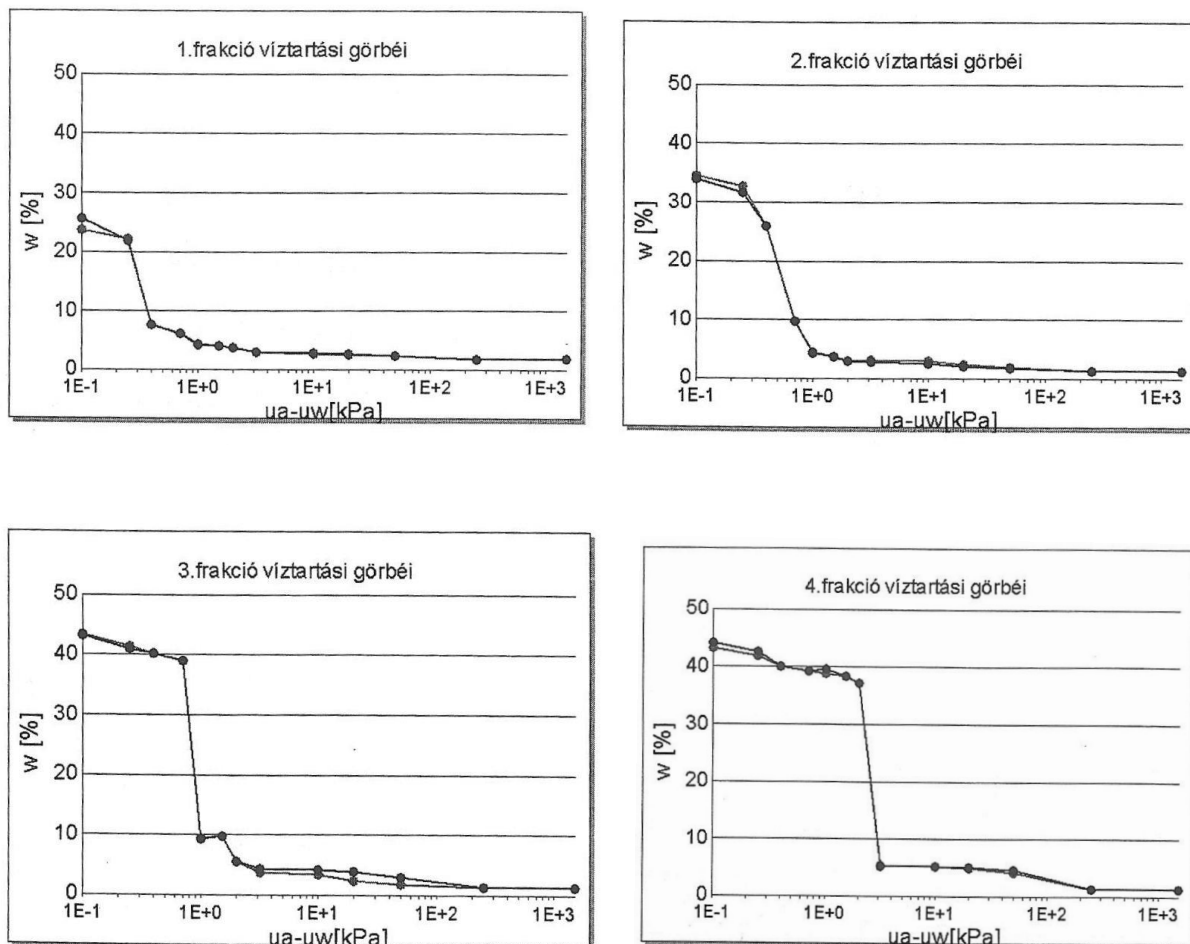


4.36. ábra Teherfelvitel miatti alakváltozás és az állékonyság vizsgálata

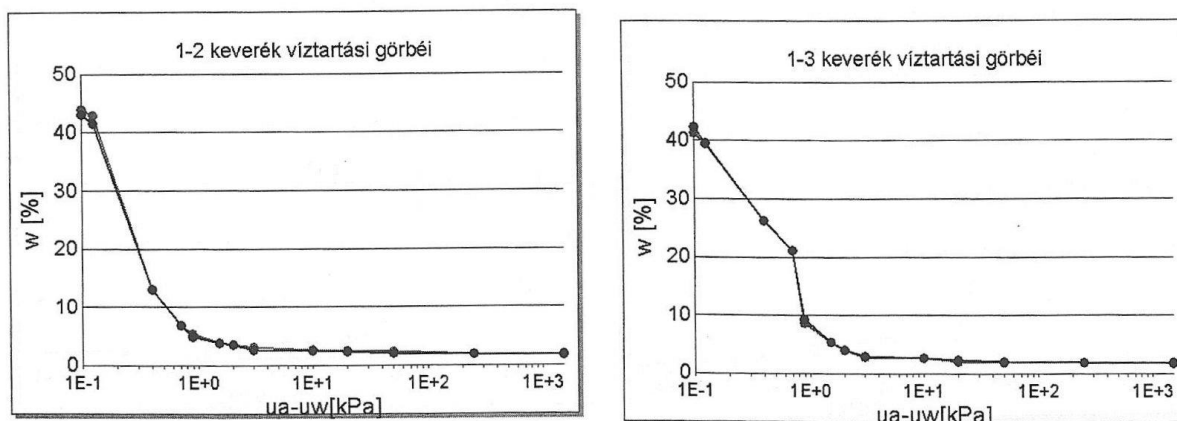
4.5. Hulladékhalomhoz kapcsolódó hidraulikai modellezés

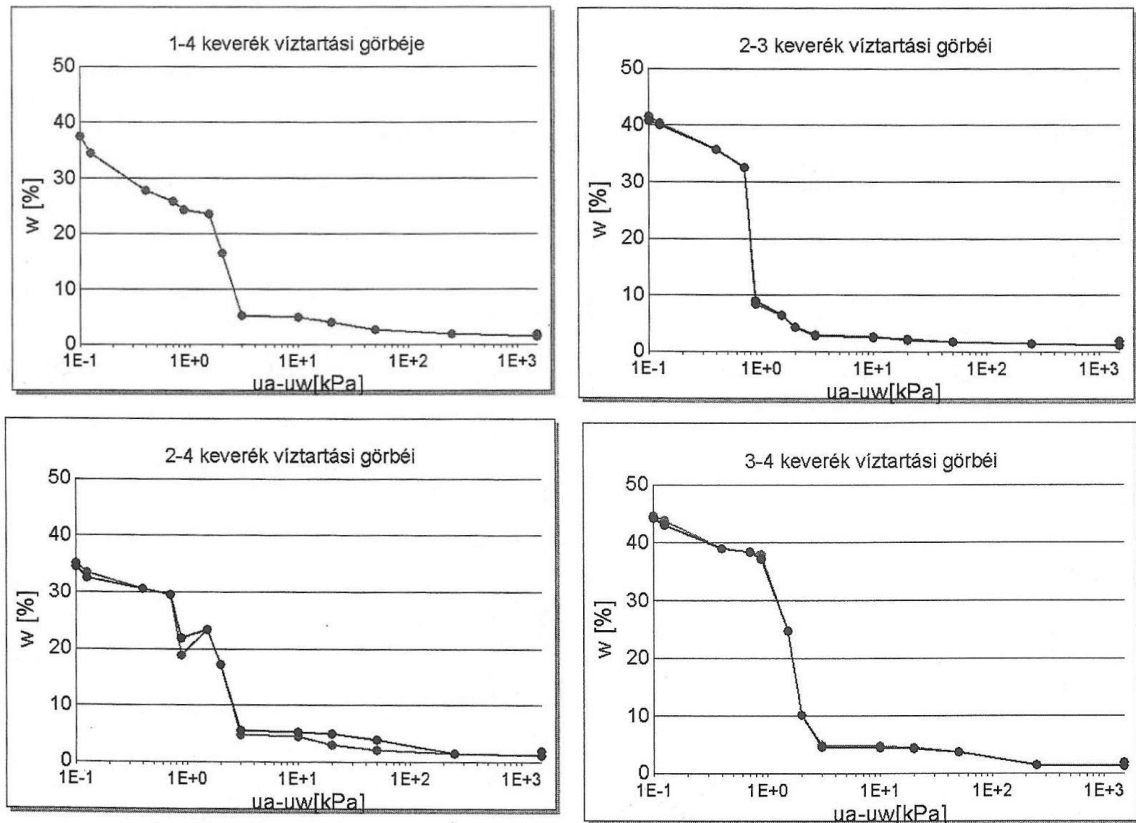
A kutatás célkitűzése szerint (2. fejezet), a hidraulikai modell fejlesztése az alsó és felső lezáró és vízgyűjtő rétegek vizsgálatát jelenti. E rétegek vízáramlási kérdéseinek modellezéséhez is szükséges a víztartási görbéjük meghatározása, amely a szemcsés talajt alkotó frakciók víztartási görbéinek ismeretében is lehetséges. Céлом e módszer pontosítása.

Homoklapos berendezés mérési eredményeit a 4.37 - 4.38 ábrák mutatják.



4.37. ábra Az 1-4 frakciók homoklapos berendezéssel mért víztartási görbéi (Imre, Havrán, Firgi)





4.38. ábra Keverékek homoklapos berendezéssel mért víztartási görbéi (Imre, Havrán, Fírgi)

Megállapítható, hogy a 3. frakció és a 2-4. keverék mérését a 10 cm-es szívófelesztés értéknél hiba terheli, illetve a szemeloszlás visszaméréséből megállapítható, hogy az 1. frakció kis mértékben szennyezett volt, így e mérések eredményei csak korlátozottan használhatóak.

A vizsgált frakciók mért víztartási görbéiből, a szemeloszlás ismeretében, az egyszerű modellel (Imre et al., 2003), a keverékek víztartási görbéjét számítással is meghatároztuk.

Az alkalmazott modell a következő. A keverékek szemeloszlása a frakciók szemeloszlásának súlyozott összege:

$$S_{NJ}(d) = \sum_{k=1}^i x_k S_k(d), \quad (4.34)$$

ahol: x_k a k -adik frakció gyakorisága.

Hasonló megállapítás igaz a keverékek víztartási görbéjére is (Imre et al., 2006):

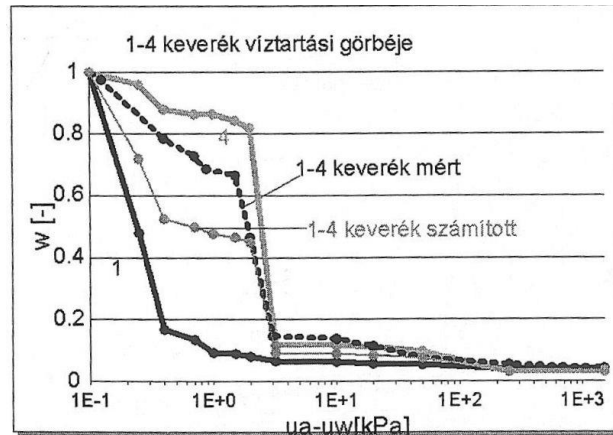
$$w_{NJ}(u_a - u_w) = \sum_{k=1}^i c_k w_k(u_a - u_w), \quad (4.35)$$

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

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.

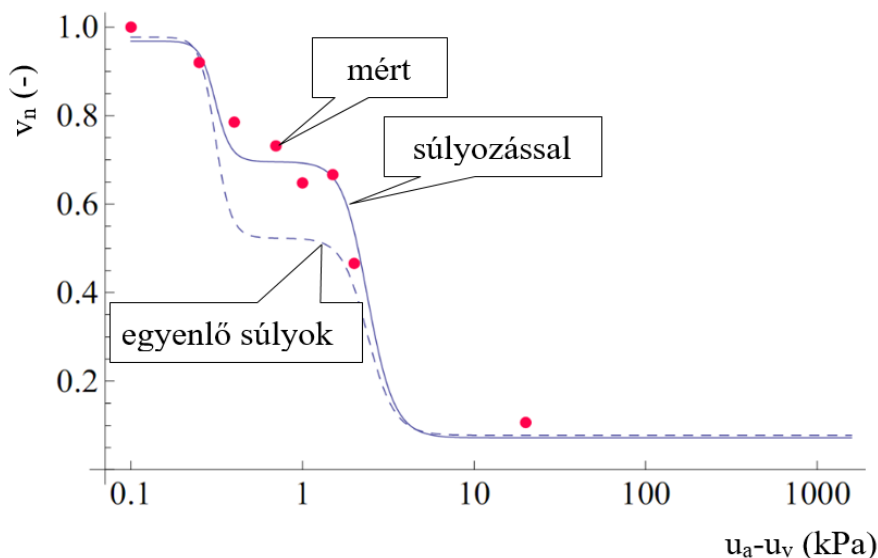
Az eredményeket példaként a 4.39. ábra szemlélteti. Megállapítható, hogy ez az egyszerű modell, a most vizsgált keverékek esetében is jellegetben leírja a mérések eredményeit, mivel a víztartási görbék nem konstans részei közel lineárisak, és ez összhangban van a korábbi modellezés eredményeivel. A modell pontossága nőtt a korábbi mérésekhez képest, ez két okból történt, az ideálist jobban megközelítő szemeloszlás, és a terhelési lépcsők sűrítése, de az is megállapítható, hogy ezek pontosítása a modell használhatóságát alapvetően befolyásolja.



4.39. ábra Az 1-4 keverék mért és számított víztartási görbéje (a frakciók mért víztartási görbéinek feltüntetésével) (Imre et al., 2006)

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 (1980) (2.13) függvényt illesztettem, melyet a keverékek mért víztartási görbéire illesztett van Genuchten függvénnyel hasonlítottam össze. A súlyok változtatásával a modell pontossága javult (4.40. ábra).

A van Genuchten függvény illesztésével és a legjobb regresszió keresésével, a súlyok a (4.28.) táblázat szerint alakultak. A számításokat számítógépes program segítségével (Wolfram Mathematica) végeztem, részletek a mellékletben találhatóak.



4.40. ábra Az 1-4 talajkeverék víztartási görbéjének változása az azonosítól eltérő súlyozással

4.28. 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

Összességében megállapítható, hogy a vizsgált keverékekre alkalmazható az egyszerű modell, melynek 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 a modell pontossága javul.

A fenti modellezés gyakorlati jelentősége az, hogy a telítetlen talajok (felső lezáró réteg, vízelvezető rétegek stb.) vizsgálatának egyik "kulcsa" a víztartási görbe, hiszen ismeretében pl. a vízáramlás modellezése kiterjeszhető a telítetlen zónákra is, alkalmazható az általános Darcy-törvény. A mérésekből, illetve a frakciók víztartási görbéjéből számítással előállított görbékről leolvasható adatok, a függvény felírása után számított adatok, mint bemenő paraméterek használhatók.

Az áramlás differenciálegyenlete (2D esetben) telítetlen talaj, két dimenziós áramlás, állandó teljes feszültség és levegőnyomás mellett:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \gamma_w m_2^w \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (4.36)$$

Az egyenlet szerint az elemi testből ki- és az elemi testbe beáramló víz mennyiségének különbsége egyenlő a térfogati víztartalom változásával. Az áramlás egyenletében felhasználásra kerül az m_2^w paraméter a talaj tározási jellemzője (Press et al., 1986), mely a víztartási görbe meredeksége:

$$m_2^w = \frac{\partial v}{\partial(u_a - u_w)}. \quad (4.37)$$

A matematikailag leírt víztartási görbe deriválásával számítható is az m_2^w paraméter.

A telítetlen vízáteresztő-képességi együttható – szívófeszültség függvény az előzőekben bemutatott van Genuchten féle egyenlet alapján kiszámítható. Természetesen ismertek más egyenletek is (Fredlund et al., 1994; Leong, Rahardjo, 1997) a függvény kiszámítására, de mindegyikhez szükséges a talaj víztartási görbéjének ismerete.

4.6. Új tudományos eredmények

Az elvégzett kutatómunkám új tudományos eredményeit a következőkben foglalom össze.

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:

$$\begin{aligned} \text{A 2. degradációs fok esetén:} & \quad \text{A 3. degradációs fok esetén:} & \quad \text{A 4. degradációs fok esetén:} \\ \varepsilon = 0,096 \ln(\sigma) - 0,0311. & \quad \varepsilon = 0,0708 \ln(\sigma) + 0,0547. & \quad \varepsilon = 0,0587 \ln(\sigma) + 0,0619. \end{aligned}$$

Ezek az összefüggések a számításokhoz jól felhasználhatók. A terhelési szakaszonként linearizálva, az előterhelés utáni szakasszal számolva és azt extrapolálva, a hulladék degradációs foka szerint az összenyomódási modulus (σ [kN/m²]):

$$\begin{aligned} \text{A 2. degradációs foknál:} & \quad \text{A 3. degradációs foknál:} & \quad \text{A 4. degradációs foknál:} \\ E_s = 9,734 \sigma - 322,98, & \quad E_s = 12,085 \sigma - 269,94, & \quad E_s = 13,099 \sigma - 29,463, \\ E_s = 9,0216 \sigma. & \quad E_s = 11,523 \sigma. & \quad E_s = 13,127 \sigma. \end{aligned}$$

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. Hiszterézis 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.

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.

A vízáteresztő-képességi együttható, degradációs fokonkénti, visszszámításos elemzéséből megállapítottam, hogy a függőleges normál feszültség növelésével csökken, a degradációs fok növekedésével pedig kisebb mértékben szintén csökken (best trend) a vízáteresztő-képességi együttható.

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 módszert alkalmazó rutin geotechnikai programot (Plaxis), általános eszköznek tekintettem, és a hulladékhalom sajátosságaihoz igazítva, adaptáltam. A feladat nem szokványos, így egy preconcepció 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 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 hulladékomb 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 előállítás, 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 ($k=1\dots N$) egyenlőek, 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

Értekezésem, a települési szilárd hulladékok ártalmatlanítására épített hulladéklerakókhoz kapcsolódó mérnöki feladatok megoldásához járult hozzá. A szükséges modellezések közül az alakváltozási - és a hidraulikai modellek kapcsán dolgoztam ki számítási és mérés technikai módszereket.

A hulladékból épülő domb alakváltozásának modellezésére a következő utat jártam. A hulladékból mintavétel történt, amely félig zavart mintákat szolgáltatott. A 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 hulladékfizikai paramétereket a degradációs fok és a mélység (nyomás) függvényében vettem fel és az idő előrehaladtával léptetem a következő degradációs fázisba. 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, amelyet a nagymélységű talajfeltárás lehetővé tesz a geotechnikában ismert módszerek segítségével, de ez esetben helyszíni kontroll mérésekre nem volt lehetőség. 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. A talajok víztartási függvényének mérése kapcsán tovább fejlesztettük, megújítottuk a talajtanban alkalmazott homoklapos berendezést. Elvégeztem a hazai talajtani és geotechnikai honosítását a feszültségkamrás berendezésnek, próbaméréseket és mérési eljárási protokollt készítettem. 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.

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, például a lerakóhelyi gázkihozatal, a keletkező csurgalékvíz mennyisége, stb. 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. Így e komplex modellek részmodelljeinek kidolgozása, pontosítása hozzájárul e feladatok megoldásához is.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

HULLADÉKHALMOK MODELLEZÉSE

A környezetgazdálkodás, ezen belül is a hulladékgazdálkodás műszaki fejlesztéséhez kívánt hozzájárulni az értekezésem, célom a biztonságosabb, kisebb környezeti kockázatot jelentő és gazdaságosabb hulladék-elhelyezés fejlesztéséhez való hozzájárulás 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, a kompresszió és konszolidáció vizsgálatával, meghatároztam a fontosabb alakváltozási jellemzőket. És 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. A frakciók víztartási görbéiből számítással - a szemeloszlás ismeretében - előállított keverék víztartási görbék hipotézist pontosítottam.

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 továbbgondoltam, 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. A kiválasztott lerakó saját méréseinek eredményeit is átgondolva, elemezve, értékelve a laboratóriumi mérésekre támaszkodó modellezésem megbízható kontrollját biztosították. 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 mely elfogadható pontosság mellett, egyszerű számítást eredményez, hiszen gyakorlati szempontból általában ez a legkedvezőbb.

Természetesen a kutatási téma nincs lezárva, ezt folytatni érdemes, hiszen a lerakó I. üteme lezárásra került, de a süllyedések mérése tovább folyik, így lehetőség lesz a modell további pontosítására. A szerzett tapasztalatok a II. ütem kapcsán felhasználhatók (inklinométer csöveket helyeztek a hulladékhalom alá, és reményeim szerint majd a hulladéktestbe is), így tovább pontosítható a modell. Célszerű továbbá 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. A kidolgozott módszerek, méretezési eljárások, mérés-technikai megoldások a műszaki gyakorlat más területein is használhatóak.

Személyes célom volt a különböző tudományterületek, úgymint geotechnika -, agrár-, talajtan-, környezetgazdálkodás 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. SUMMARY

MODELLING OF WASTE HILLS

My dissertation was intended to contribute to the technical development of environmental management, including waste management. My aim was to contribute to the development of a safer, environmentally less risky and more economical waste disposal. This is naturally linked to agriculture, as much of the waste disposed comes from the direct products of the agrarian product or related packaging materials.

I determined the most important deformation characteristics with the laboratory measurements of the waste samples collected from a municipal solid waste deposit (PRHK), by compression and consolidation. And change in the nature of the waste physics as a function of degradation and load. With this knowledge, I modelled the deformation of the total dump in time by numerical calculation, simulating the rate of deposition and degradation, and validating the model with the data of field measurements. I was dealing with the hydraulic model with the examination of drainage and sealing layers. Within this I have focused on the determination of a key water flow curve in many ways. From the fractional flow curves I calculated the hydraulic curves hypothesis calculated by comparing the size of the mixture.

My dissertation relies essentially on my own measurement results. I used a self-developed new laboratory instrument and measuring method for the oedometric test of waste samples. I have reshaped, adapted and renewed the laboratory method of measuring the soil water retention function.

The results of the selected landfill's own measurements - on-site descent measurements - were considered, analyzed, evaluated, and the reliable control of my modelling based on laboratory measurements was ensured. The spatial and temporal descriptions of deformations are of course only possible with some simplifications and idealizations, since the number of influencing factors is extremely high, so I was looking for a path which, with acceptable accuracy, results in a simple calculation, since this is usually the most beneficial from a practical point of view.

Of course, the research topic is not closed and it is worth pursuing that as the 1st installment of the landfill has been closed but the desaturation is still being measured so it will be possible to further refine the model. Experience gained in the II. (inclinometer tubes are placed under the waste shale, and I hope it will also be in the waste body) to further refine of the model. It is also desirable to perform the modeling process with the data of other landfills, and to know the impact of the specific features of the landfills. It is also desirable to extend the aquatic experiments to mixtures different from the optimum and to interpret the distribution of the grain by using the spreading entropy.

The dissertation can be used to estimate the quantity of waste that can be delivered, to plan more precisely the closure of the landfill, and to provide baseline for planning of the foundation design when it is possible to utilize it later. I am confident that the elaborated methods, design procedures and metrological solutions can be used in other fields of technical practice.

My personal goal was to review, use and adapt the results of the various fields of science, such as geotechnics and agriculture - environmental management, as well as a common understanding of the same or similar concepts, thus gaining widening knowledge of my undergraduate qualification. This goal was well served by the theme chosen, as it is fundamentally interdisciplinary.

8. MELLÉKLETEK

M1 Irodalomjegyzék

1. Arya, L.M., Paris, J.F. (1981): A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data, *Soil science society of America journal* 45, pp. 1023-1030.
2. Babu, G.L.S., Reddy, K.R., Sandeep, K.C., Hanumanth, S.K. (2010): Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 14, pp. 139–150.
3. Barótfi, I. (2003): *Környezettechnika, Mezőgazda Kiadó, Budapest*
4. Bartos, S., Králik, B. (1984): *Mélyépítés I-II-III., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest*
5. Bense, L., Szendrő, P., Vincze Gy. (2007): *Mezőgazdasági aprítékhalmozok mechanikai modellezése, Mezőgazdasági technika (4), 2-3. o.*
6. Bente, S., Krase, V., Kindlein, J., Kowalsky, U., Dinkler, D. (2008): Modelling the influence of hydraulics and biodegradation on settlements of landfills, *Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest*, pp. 339-347.
7. Bishop, A.W. (1955): The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique Vol. 4*, pp. 273-328.
8. Bjarngard, A., Edgers, L. (1990): Settlement of municipal solid waste landfills, *Proceedings 13th Annual Madison Wastes Conference, Madison*, pp. 192-205.
9. Bobe, R., Hubacek, H. (1983): *Bodenmechanik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin*
10. Borgatto, A., Bauer, J., Fricke, K., Mahler, C. (2008): The influence of the soft plastic material on the shear strength parameters of the municipal solid waste, *Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest*, pp. 269-277.
11. Bowders, J., Bouazza, M., Loehr, E., Russell, M. (2000): Settlement of municipal solid waste landfill, *4th International Forum, Japan*, pp. 1-12.
12. Bódi, T. (2014): *Hévízrezervoárok, Miskolci Egyetem, Földtudományi Kar, E-learning*
13. Buckingham, E. (1907): *Studies on the movement of soil moisture, s.l.*
14. Chen, W.F. (1975): Limit analysis and soil plasticity, *Developments in geotechnical engineering, Vol. 7., Elsevier*, pp. 1-13.
15. Chang, M. (2005): Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism, *Computers and Geotechnics* 32, pp. 587–599.
16. Christensen, T.H., Kjeldsen, P. (1989): *Basic biochemical processes in landfills, Sanitary landfilling: Process technology and environmental impact, Academic Press, San Diego, CA*, pp. 29-49.
17. Coumoulus, D.G., Koryalos, T.P. (1997): Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time, *Proceedings 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany*, pp. 1807-1811.

18. Csürös, Z., Bozzay, J. (1964): Reológiai alapismeretek, Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 23-28. o.
19. DeGennaro, V., Cui, Y.J., Delage, P., DeLaure, E. (2002): On the use of high air entry value porous stones for suction control and related problems, Proceedings. 3rd International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2002), Brazil, Swets & Zeitlinger 2, pp. 435-440.
20. Déri, L., Hudák, I., Reith, I., Szabó, I., Nagy, Gy. (2002): Tervezési segédlet: A települési szilárd hulladék lerakók beruházásához, üzemeltetéséhez, és bezárásához, www. kvvm.hu
21. Edil, T.B., Ranguette, V.J., Wuellner, W.W. (1990): Settlement of municipal refuse, Geotechnics of waste fills theory and practice, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, pp. 225–239.
22. Firgi, T. (1999): A telítetlen talajok víztartási görbéjének laboratóriumi meghatározása, Diplomamunka, BME EÖ GTT
23. Firgi, T. (2006): Talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata a víztartási görbe segítségével, Diplomamunka, SZIE-YMMFK
24. Faur, K. (2012): Hulladéklerakók magasítási lehetőségeinek ellenőrzése állékonyság-vizsgálattal, Szakdolgozat, SZIE-YMÉTK
25. Fővárosi Közterület-fenntartó Zrt. (2000-2013): Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ éves jelentések, Pusztazámor, Budapest
26. Fővárosi Közterület-fenntartó Zrt. (2013): A Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ, Budapest
27. Fredlund, D.G. (1998): The modelling of saturated/unsaturated soil systems, Summary of Overheads, Symposium on Unsaturated soils, Budapest
28. Fredlund, D.G., Xing, A., Huang, S. (1994): Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil- water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal 31, pp. 533-546.
29. Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., Barbour, S.L.(1995): The relationship of the unsaturated shear strength to the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal 33, pp. 449-448.
30. Fredlund, D.G., Xing, A. (1994): Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal 31, pp. 521-532.
31. Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993): Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, New York, p. 560.
32. Fűzy, J., Vas, J. (2007): Laza szemcsés anyagok nyírási alakváltozásának leírása kontinuum-mechanikai modell segítségével, Építés- Építészettudomány XXXV (2), 159-161. o.
33. Gardner, W.R.(1958): Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water-table, Soil Science 85 (4), pp.1-13.
34. Gáspár, Zs., Németh, R. (2000): Egy egyszerű viszkoelasztikus modell elemzése, Építés-Építészettudomány XXVIII (1-4), 39-52. o.
35. Gibson, R.E., Lo, K.Y. (1961): A theory for soils exhibiting secondary compression, Acta Polytechnica Scandinavia 296, pp. 1–16.

36. Golush, V.T. (2008): Waste management research trends, Nova Science Publishers Inc., New York, pp. 179-186.
37. Haque, M.A. (2007): Dynamic Characteristics and stability analysis of municipal solid waste in bioreactor landfills, Doktori értekezés, University of Texas
38. Havrán, K. (2004): A szemeloszlás és a telítetlen talajok függvényeinek kapcsolata, Diplomamunka, BME Budapest
39. Hettiarachchi, H., Meegoda, J., Hettiarachchi P. (2009): Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement, Waste management, New York, 29(3), pp. 1018–1025.
40. Heyer K.U. (2003): Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge, Hamburger Berichte Band 21, Stuttgart, pp. 1-13.
41. Hilf, J.W. (1948): Estimating construction pore pressures in rolled earth dams, Proceedings 2nd International conference on soil mechanics and foundation engineering 3, Rotterdam, pp. 234-241.
42. Hossain, S.M., Gabr, M.A., (2005): Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation, Geotechnical special publication 142, Austin Texas, pp. 1-13.
43. Hughes, K.L., Christy, A.D., Heimlich, J.E. (2005): Bioreactor landfills, Fact sheet extension, Ohio State University, CDFS 138-05.
44. Imre, E., Czap, Z., Telekes, G. (1999): A telítetlen talajok feszültségi állapotváltozói, Hidrológiai Közlöny 3, 234-246 o.
45. Imre, E., Rajkai, K., Czap, Z., Firgi, T., Telekes, G., Aradi, L. (2000): Comparative measurements with sand box, pressure membrane extractor and pressure plate extractor, Proceedings of the Asian Conference On Unsaturated Soils From Theory To Practice, Singapore, pp. 287-291.
46. Imre, E., Czap, Z.; Telekes, G. (2002): A telítetlen talajok fizikai egyenletei, Hidrológiai Közlöny 5, 257-262. o.
47. Imre, E., Rajkai, K., Genovese, R., Jommi, C., Lőrincz, J., Aradi, L., Telekes, G. (2003): Soil water retention curve for fractions and mixtures, Proceedings for Unsat Asia, Osaka, pp. 451-456.
48. Imre, E., Havrán, K., Lőrincz, J., Rajkai, K., Firgi, T., Telekes, G. (2005): A model to predict the soil water characteristics of sand mixtures, Proceedings of the Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Taylor & Francis Group, London, pp. 359-368.
49. Imre, E., Rajkai, K., Firgi, T., Trang, Q.P., Telekes, G. (2006): Closed-form functions for the soil water-retention curve of sand fractions and sand mixtures, The Fourth International Conference On Unsaturated Soils, Arizona, pp. 2408-2419.
50. Imre, E., Farkas, J., Kovács, M., Czap, Z., Trang, Q.P. (2007): Sovány gázok sikere, Mélyépítő Tükörkép, www.mtm.hu
51. Janbu, N. (1969): An advanced method of slope stability analysis, Lecture On Soil Stability, University Of California, Berkeley

52. Jessberger, H.L., Kockel, R. (1993): Determination and assesment of the mechanical properties of waste materials, Proceedings of International Symposium Green '93, Bolton, UK. Balkema, Rotterdam
53. Kabai, I. (1994): Geotechnika I., Műegyetem Kiadó, Budapes, 128. o.
54. Klingenberg, L. J. (1941): The permeability of porous media to liquids and gases, API Drilling and production practice, pp. 200-213.
55. Koch, E. (2012): Töltésalapozási eljárások modellezése, Doktori értekezés, Győr
56. Kovács, G., Telekes, G. (2004): Felszín alatti közeg (kőzetek-vizek) kármentesítésének tervezése, SZIE-YMMFK, Budapest
57. Kondner, R.L., Zelasko, J.S. (1963): A hyperbolic stress-strain response cohesive soil, Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE 89(SM1), pp. 115-143.
58. Kölsch, F. (2008): Deformation and settlement measurements on landfills, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Tecnology, Budapest, pp.320-346.
59. König, D., Kockel, R., Jessberger, H.L. (1996): Zur Beurteilung der Standsicherheit und zur Prognose von Mischabfalldeponi, 12. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA, Grundbauinstituts, H75, pp. 93-118.
60. Laufer, I. (2005): Gravitációs elven működő víztartási görbe mérő berendezés felépítésének dokumentációja, TDK, témavezetők: Imre, E., Firgi, T., BME, Budapest
61. Leong, E.C., Rahardjo, H. (1997): Permeability functions for unsaturated soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, December 1997, pp. 1118-1126.
62. Ling, H.I., Leschchinsky, D., Mohri, I., Kawabata, T. (1998): Estimation of municipal solid wastelandfill settlement, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 124(1), pp. 21-28.
63. Liu, C.N., Chen, R.H., Chen, K.S. (2006): Unsaturated consolidation theory for the prediction of long term municipal solid waste landfill settlement, Waste Management Research 24(1), pp. 80–91.
64. Lloret, A., Alonso, E.E. (1980): Consolidation of unsaturated soil including swelling and collapse behaviour, Geotechnique (30), pp. 444-477.
65. Lőrincz, J. (1986): Talajok szemeloszlási entrópiája, Egyetemi doktori értekezés, BME, Budapest
66. Lőrincz, J. (1990): Relationship between grading entropy and dry bulk density of granular soils, Periodica Politechnica 34:3, pp. 255-265.
67. M.Csizmadia, B., Nándori, E. (2003): Modellalkotás, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 25. o.
68. Major, J. (1995): Permeabilitat des Beton als Funktion der Porositat und Wassergehaltes, Doktori értekezés, BME, Budapest
69. Major, J., Wittmann F.H. (2011): Zwei-Phasen Strömung in Zement gebundenen Werkstoffen, Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 17(2), pp. 111-116.
70. Manassero, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A. (1996): Waste disposal and containment, Proceedings of 2nd International Congress on Enviromental Geotechnical, Osaka, Balkema, Rotterdam V.3., pp. 1425-1477.

71. Manassero, M. (2000): Solid waste containment systems, GeoEng 2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, Conference Proceeding on CD ROM
72. Martin, B., Puskás, J. (2014): Hulladéklerakók alakváltozásának modellezése, OTDK dolgozat, témavezető: Firgi, T., SZIE-YMÉTK, Budapest
73. Märtnér, B., Zeuner, B. (2002): Standortsspezifisch optimierte Oberflächenabdichtung von Deponien und Altavlagerungen unter Einbeziehung der Wasserhaushaltsberechnung, M&S Umweltprojekt GmbH
74. Marques, A.C.M., Filz, G.M., Vilar, O.M. (2003): Composite compressibility model for municipal solid waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE 129., pp. 372–378.
75. McDougall, J. (2008): ABCD of landfill hydraulics modelling, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 299-323.
76. Müller, Z. (2011): Növényi anyagok mechanikai vizsgálata, SZIE-GK, Gödöllő
77. Olivier, F., Gourc, J.P. (2008): Geomechanical monitoring of sanitary landfill sites: control of settlement and associated parameters, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 225-245.
78. Omraci, K., Merrien-Soukatchoff, V., Tisot, JP., Pigué, JP. (2003): Stability analysis of lateritic waste deposits, Engineering Geology 68, pp. 189–199.
79. Oweis, I.S., Khera, R.P. (1990): Geotechnology of waste management, Butterworths, p. 273.
80. Oweis, I.S. (2006): Estimate of landfill settlements due to mechanical and decompositional process, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 132(5), pp. 644-650.
81. Park, H.I., Lee, S.R. (1997): Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition, Journal of solid waste technology and management 24 (4), pp. 159–165.
82. Park, H.I., Park, B., Lee, S.R., Hwang, D. (2007): Parameter evaluation and performance comparison of MSW settlement, Prediction models in various landfill types, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 133(1), pp. 64-72.
83. Pathak, D.R., Gharti, H.N., Singh, A.B., Hiratsuka, A. (2008): Stochastic modeling of progressive failure in heterogeneous soil slope, Geotechnical and Geological Engineering 26, pp.113–120.
84. Petkovšek, A., Majes, B., Mladenovič, A. (2008): The influence of the mineralogical and physical properties of chemical gypsum on the compaction behavior and stability of the gypsum mono-landfill bodies – a case study from Slovenia, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 257-265.
85. Petrovic, I. (2008): Probabilistic stability analysis of sanitary landfill Jakusevec, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 289-297.
86. Povrie, W., Beaven, R.P., Hudson, A.P. (2005): Factors affecting the hydraulic conductivity of waste, International Workshop, LIRIGM, Grenoble

87. Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Wetterling, W.T. (1986): Numerical recipes, Cambridge University Press, Cambridge
88. Rajkai, K. (1993): A talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálati módszerei, Búzás I. (szerk): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv, INDA4321 Kiadó, Budapest 115-160. o.
89. Rajkai, K. (2004): A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest
90. Rajkai, K., Várallyay, Gy.(1993): Talajfizikai és mezőgazdasági-vízgazdálkodási fogalmak (definíciók, jelölések, mértékegységek), Búzás I. (szerk): Talaj- és Agrokémiai Vizsgálati Módszerkönyv, INDA4231 Kiadó, 221-231. o.
91. Ramke, H-G. (2008): Leachate collection systems, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 143-181.
92. Rao, S.K., Moulton, L.K., Seals, R.K. (1977): Settlement of refuse landfills, Geotechnical practice for disposal of solid waste materials, Ann Arbor, Michigan, pp. 574-599.
93. Ray, R. (2016): Geotechnical engineering in the digital age, In: Huszák, T., Koch, E., Mahler, A. (ed.), 2. Széchy Károly Emlékkonferencia, MGE-MMK-GT, pp. 22-23.
94. Reddy, R.K., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Bogner, J.E. (2011): Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation, Waste management 31(11) pp. 2275-2286.
95. Rétháti, L., Imre, E. (1991): Árvízvédelmi gátak komplex geotechnikai vizsgálata, melléklet, PC-SEEP program kezelési utasítása, Földmérő és Talajvizsgáló Vállalat
96. Rettenberger, G. (2008): Landfill gas collection and utilization, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 421-439.
97. Rettenberger, G., Mezger, H. (1992): Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen Leitfaden Deponiegas, Herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
98. Royal Haskoning, Canor. (2003): HU 9911-01. számú Phare projekt HIR (Linsy) adatbázis
99. Schofield, R.K., (1935): The pF of Water in Soil, 3rd International Congress of Soil Sciences 2, Oxford, pp. 37-48.
100. Sembery, P., Tóth, L. (2005): Hagyományos és megújuló energiák, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 522 o.
101. Singh, S., Murphy, B.J. (1990): Evaluation of the stability of sanitary landfills, Geotechnics of Waste Fills, pp. 240-258.
102. Sowers, G.F. (1973): Settlement of waste disposal fills, Proceedings of 8th International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol.2(2), pp. 207-210.
103. Stanciucu, M. (2005): Evaluation of waste embankment slope stability: Valea Manastirii, Gorj, Romania, BullEngGeol 64, pp. 341–346.
104. Stefanovits, P., Filep, Gy., Füleky, Gy. (1999): Talajtan, Mezőgazda Kiadó, Budapest

105. Stegmann, R., Spendlin, H.H. (1985): Research activities on enhancement of biochemical processes in sanitary landfills, Proceedings of the Conference New Directions and Research on Enhancement of Biochemical, Processes in Sanitary Landfills, University of British Columbia, Vancouver
106. Szabó, A., Szabó, I. (2008): Landfills in Hungary-The current state, closure and rehabilitation of old landfills, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 469-478.
107. Szabó, I. (1995): Hulladékéelhelyezés II., Tervezés-méretezés kialakítás, Ipar a környezetért Alapítvány, Budapest 135 – 155. o.
108. Szabó, I., Szabó, A., Németh, Cs. (2007): Hulladéklerakók lezárása és rekultivációja, Tervezési műszaki segédlet, sl.
109. Szabó, I., Szabó, A. (2012): Hulladéklerakók rekultivációja, utógondozása, Miskolci Egyetem, Miskolc
110. Szendrő, P., Bense, L. (1997): Measuring of rheological properties of silage, Agricultural Engineering 10, pp. 56-59.
111. Szendrő, P., Bense, L. (1999): A kukoricaszecska reológiai tulajdonságainak közelítése lineáris anyagmodellekkel, MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, Gödöllő, FVMMI, 5. o.
112. Szepesházi, R. (2000): Geotechnikai példatár I-II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
113. Szepesházi, R. (2001): Geotechnika, SZIF-Universitas Kft., Győr
114. Taylor, D.W. (1948): Fundamentals of soil mechanics, New York, Wiley, 700. p.
115. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Eliassen, R. (1977): Solid wastes: engineering principles and management issues, McGraw-Hill Book Co., New York, 13 p.
116. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. (1993): Integrated solid waste management, Mc Graw-Hill Inc., 913. p.
117. Tomcsányi, P. (2000): Általános kutatás módszertan, SZIE, Gödöllő
118. Xiang-rong, Z., Jian-min, J., Peng-fei, F.(2003): Geotechnical behavior of the MSW in Tianziling landfill, Journal of Zhejiang University 4 (3), pp. 324 – 330.
119. Yen, B.C., Scanlon, B. (1975): Sanitary landfill settlement rates, Journal of geotechnical engineering division-ASCE 101, pp. 475–487.
120. Yong, C., Booth, C. D. (2008): The Wenchuan earthquake of 2008, Science Press, Beijing, pp. 1-10.
121. Van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sciences American Journal 44., pp. 892-898.
122. Várallyay, Gy. (1973): A talajok nedvességpotenciálja és új berendezés annak meghatározására az alacsony (atmoszféra alatti) tenziótartományban, Agrokémia és Talajtan 22., 1-22. o.
123. Várallyay, Gy., Rajkai, K., Pacsepszikij, JA., A., Mironenko, E.V. (1979): A pf görbék matematikai leírása, Agrokémia és talajtan 28(1,2), 15-38. o.

124. Várallyay, Gy. (2003): A mezőgazdasági vízgazdálkodás talajtani alapjai, Budapest-Gödöllő
125. Varga, G. (2010): Hulladéklerakók állékonysági kérdései, Doktori értekezés, BME, Budapest
126. Varga, G. (2011): Some geotechnical aspects of bioreactor landfills, *Periodica polytechnica* 55/1, pp. 39-44.
127. Vásárhelyi, B., Póczy, M. (1956): Földművek III. Földcsúszások, Tankönyvkiadó, Budapest
128. White, J., Beaven, R. (2008): Modelling the liquid phase in the University of Southampton landfill model LDAT, Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 235-254.

M2 Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk listája*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

3. 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.
4. 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.
5. **Firgi, T.** (2015): Települési hulladék domb alakváltozás vizsgálata, *Economica* 8:(3), 95-104. o.
6. **Firgi, T.**, Telekes, G. (2017): Települési szilárd hulladékból épülő dombok, *Magyar építéstechnika*, 2017/8-9., 34-37. o.
7. Imre, E., **Firgi, T.** (2018): A víztartási görbe talajmechanikai alaklamazása, *Hidrológiai Közlöny* 98(4), 24-33. o.
8. **Firgi, T.**, Keszeyné 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.

Nemzetközi konferencia kiadvány

9. Imre, E., Rajkai, K., Czap, Z., **Firgi, T.**, Telekes, G., Aradi, L. (2000): Comparative measurements with sand box, pressure membrane extractor and pressure plate extractor, In: Rahardjo H., Toll DG., Leong EC. (ed.) *Unsaturated Soils for Asia*, Proceedings of the 1st Asian Conference (UNSAT-ASIA 2000) Singapore, Rotterdam, Balkema Publishers, pp. 287-291.
10. Imre, E., Havrán, K., Lőrincz, J., Rajkai, K., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2005): A model to predict the soil water characteristics of sand mixtures, In: Tarantino, Romero, Cui (ed.) *Proceedings of the Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Trento, London, Taylor & Francis Group, pp. 359-368.
11. Imre, E., Rajkai, K., **Firgi, T.**, Trang, P., Telekes, G. (2006): Closed-form functions for the soil water-retention curve of sand fractions and sand mixtures, In: Miller G.A., Zapata C.E., Houston S.L., Fredlund D.G. (ed.), *4th International Conference on Unsaturated Soils*, Arizona, American Society of Civil Engineers, pp. 2408-2419.

12. Imre, E., Laufer, I., Trang, P., Lőrincz, J., Rajkai, K., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2007): The soil water characteristics of two-component sand mixtures, In: Schanz T. (ed.), Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics, Proceedings in Physics vol.113, Springer - Physica-Verlag, pp. 45-59.
13. **Firgi, T.** (2008): Soil water characteristic curve of some sand mixtures, In: Mahler A., Scharle P., Szepesházi R., (ed.), Proceedings of the 19th European Young Geotechnical Engineers' Conference, Győr, Magyarország, Széchenyi István Egyetem, pp. 136-144.
14. Imre, E., Laufer, I., Rajkai, K., Scheuermann, A., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2008): The soil functions of sand mixtures, In: Toll D.G., Augarde C.E., et al (ed.), Unsaturated Soils. Advances in Geo-Engineering. Proceedings of the 1st European Conference, 1/2 E-UNSAT 2008, Durham, London, CRC Press Taylor and Francis Group, pp. 299-305.
15. Lőrincz, J., Imre, E., Trang, P., Rajkai, K., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2008): Entropy based criteria for granular filters, In: Telekes G., Imre E., Witt K.J., Ramke, H.G., Firgi T. (ed.), Proceedings of the 1st Middle European conference on Landfill Technology, Budapest, pp. 197-206.
16. Imre, E., Trang, Q.P., Laufer, I., Kovács, M., Nédli, P., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2009): Inverse problem solution to predict long term behaviour of a landfill using short term data, In: Proceedings Sardinia 2009, XII. International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Paper 658., pp. 1-11.
17. Laufer, I., Imre, E., Rajkai, K., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2009): Data acquisition for a soil water retention curve transfer function of sands, In: Proceedings of YGEC, Alexandria, pp. 17-20.
18. Imre, E., Varga, G., **Firgi, T.**, Rajkai, K., Czap, Z., Telekes, G. (2011): Laboratory and in situ tests of a landfill, In: Proceedings of Fourth International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills", Santander, pp. 1-10.
19. Imre, E., **Firgi, T.**, Rajkai, K., Telekes, G., Mile, G., Módos, J., Subert, I. (2011): Laboratory and in situ tests of a landfill, In: Sardinia Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari., Paper 12. pp. 1-9.
20. Imre, E., **Firgi, T.**, Tompai, Z., Törös, E., Telekes, G., Mile, G., Subert, I. (2013): Oedometer and in situ tests on landfill material, In: Proceedings of The 5th International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills" Edinburgh, pp. 1-10.
21. Imre, E., **Firgi, T.**, Juhász, M., Hazay, M., Hegedűs, M., Bakacsi, Zs., Singh, V. (2014): CPTu pore water pressure dissipation tests in saline environment, In: 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, pp. 675-682.

Magyar nyelvű konferencia kiadvány

22. Imre, E., Rajkai, K., Czap, Z., **Firgi, T.**, Aradi, L., Telekes, G. (2000): Összehasonlító mérések homoklapos, nyomásmembrános és kaolinlapos készülékekkel, Geotechnika 2000 konferencia CD kiadványa, Ráckeve, Paper Ybl. 1-8. o.
23. **Firgi, T.**, Telekes, G. (2015): Szilárdhulladék-lerakó alakváltozásának vizsgálata, Szendefy J., Vámos M. (szerk.), 4. Kézdi Árpád Emlékkonferencia ISBN:978-963-313-180-0, 73-85. o.

Egyéb kiadvány

24. Imre, E., **Firgi, T.**, Telekes, G. (2014): Evaluation of the oedometer test of municipal landfill waste material, *Ybl Journal of Built Environment* 2:(1) pp. 42-64.

M3 Ábrák jegyzéke

1.	2.1. ábra Megvalósult megújuló energiatermelés hulladéklerakókon a) Napelemek a Hickory Ridge Lerakón (USA) b) Szélerőművek a Hamburgi Lerakón (Németország) (www.foresightusa.com); (www.renewableenergyfocus.com)	13
2.	2.2. ábra A HU 9911-01 Phare projektben felmért lerakók hálózata (Royal Haskoning – CANOR, 2003)	14
3.	2.3. ábra 2019. július 16. után működő települési szilárdhulladék-lerakók (www.orszagoszoldhatosag.gov.hu)	15
4.	2.4. ábra A tömörítéssel elért térfogatsűrűség alakulása az egyszerre leterített rétegvastagság függvényében (Tchobanglous et al., 1977)	17
5.	2.5. ábra Helyszíni vizsgálatokkal meghatározott térfogatsűrűség értékek különböző korú hulladékok esetén (Oweis, Khera, 1990)	18
6.	2.6. ábra A hulladék nyírószilárdsági paraméterei irodalmi adatok, laboratóriumi és helyszíni mérések alapján (Singh, Murphy, 1990)	18
7.	2.7. ábra Települési hulladékok nyírószilárdsági vizsgálatainak összefoglaló eredményei (Manassero et al., 1996)	19
8.	2.8. ábra Különböző lerakóknál mért felszínsüllyedések (König et al., 1996)	21
9.	2.9. ábra A hulladékok konszolidációjának jellemző lefutása és fázisai (Manassero et al., 1996; Bowders et al., 2000; Szabó, Szabó, 2012)	22
10.	2.10. ábra Egy hulladéklerakó várható süllyedése különböző számítási eljárásokkal (Babu et al., 2010)	23
11.	2.11. ábra A települési szilárd hulladékok idealizált süllyedés-idő görbéje (König et al., 1996)	25

12.	2.12. ábra A három alakváltozási forma szemléltetése a) rugalmas (lehet nem lineáris (lágyuló ill. keményedő anyag)); b) képlékeny; c) viszkózus (Müller, 2011)	25
13.	2.13. ábra Gibson és Lo – féle reológiai modell rajza (Golush, 2008)	26
14.	2.14. ábra Különböző korú hulladékokon nagyméretű kompressziós kísérlettel meghatározott összenyomódási modulus értékek (Jessberger, Kockel, 1993)	27
15.	2.15. ábra Nem veszélyes hulladék-lerakó szigetelése (22/2001. (X. 10.) KÖM rendelet)	30
16.	2.16. ábra A pF-görbéről leolvasható talaj-vízgazdálkodási jellemzők (Várallyay, 2003)	32
17.	2.17. ábra Jellegzetes víztartási görbe ábrázolása a talajmechanikában (Fredlund, Rahardjo, 1993)	33
18.	2.18. ábra Hulladéokra jellemző víztartási görbék (McDougall, 2008)	33
19.	2.19. ábra Különböző hulladékok laboratóriumban mért szivárgási tényező értékei (Povrie et al., 2005)	37
20.	2.20. ábra A vízáteresztő-képességi függvény hulladékokra (McDougall, 2008)	38
21.	2.21. ábra A hulladéklerakó vízháztartása (Szabó, 1995)	40
22.	2.22. ábra A depóniagáz és a csurgalékvíz összetevőinek alakulása a lebomlási fázisban (Christensen, Kjeldsen, 1989; Rettenberger, 1992, 2008)	42
23.	2.23. ábra A McDougall-Pyrah kapcsolt modell vázlata (Imre et al., 2007)	43
24.	3.1. ábra Pusztazámori Regionális Hulladékkezelő Központ elhelyezkedése (FKF Zrt., 2013)	46

25.	3.2. ábra Aljzatszigetelés és mélyponti szivárgó kialakítása (FKF Zrt., 2013)	47
26.	3.3. ábra A lerakó üzemeltetése a) hídmérleg b) tömörítés kompaktossal	48
27.	3.4. ábra A Pusztazámori Hulladékkezelő Központ a) a lerakó műholdas képe (Google) b) az 1. ütem hulladék dombja (FKF Zrt., 2013)	48
28.	3.5. ábra SZIE-YMÉTK-ÉI-GTL a nagyméretű ödométer	49
29.	3.6. ábra MTA-TAKI víztartási görbe mérése	49
30.	3.7. ábra A hulladéktest feltárása a) feltárási helyszínrajz b) nagyátmérőjű geotechnikai fúrás a PRHK-ban	50
31.	3.8. ábra A vizsgált keverékek, normalizált koordináta rendszerben a maximális és minimális normált entrópia növekmény vonallal	53
32.	3.9. ábra Szemeloszlási görbék a) vizsgált frakciók b) vizsgált keverékek (1-2,1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4 közül egy folytonos és egy frakcióhiányos) idealizált szemeloszlási görbéi	53
33.	3.10. ábra Az új ödométer a) próbamérés közben; b) az oldalnyomásmérő	55
34.	3.11. ábra A teher felvitele a mérés során: a) súlyokkal; b) hidraulikus sajtóval	55
35.	3.12. ábra Próbamérés a) bekészített homokos kavics; b) a terhelő lap; c) d) terhelés hidraulikus sajtóval	55-56
36.	3.13. ábra A függőleges elmozdulás mérésének változtatása	56

37.	3.14. ábra A csurgalékvíz elvezetése, összegyűjtése	56
38.	3.15. ábra Az M-1 jelű minta kompressziós görbéje	57
39.	3.16. ábra Az M-1 jelű minta szemeloszlási görbéje	58
40.	3.17. ábra A beszállított minta egy része és az átlagminták képzése	58
41.	3.18. ábra Az ödométeres vizsgálat előkészítő munkarészei a) beszállított minta válogatása; b) súlymérése; c) víztartalmi minták	59
42.	3.19. ábra Az ödométeres vizsgálat a) terhelés súlyokkal (250 kg); b) terhelés sajtóval (16t)	59
43.	3.20. ábra Az ödométeres vizsgálat mérőórái és mintavétel a) a függőleges összenyomódás mérése; b) az oldalnyomás mérése; c) "magmintavétel"	59
44.	3.21. ábra Homoklapos berendezés, a talaj nedvességpotenciáljának meghatározására pF 0–2,0 tenziótartományban a) elvi elrendezés b) működés közben (Várallyay, 2003); (MTA)	60
45.	3.22. ábra A plexi doboz tervrajza (kicsinyített rajz), és kész állapotban a perforált lappal	61
46.	3.23. ábra A bokszt kiegészítő elemei	61
47.	3.24. ábra Geotextília előkészítése és a sikertelenség	62
48.	3.25. ábra Bazaltgyapot előkészítése és a sikertelenség	62
49.	3.26. ábra Kerámiagyapot alkalmazása a) vízlégszivattyúzás közben; b) az elkészült box	63
50.	3.27. ábra A tengelyeltolási technikát alkalmazó berendezések a) Nyomásmembrános készülék b) Feszültségkamrás készülék (MTA-TAKI)	63

51.	3.28. ábra Feszültségkamrás alapkészülék szétszerelt állapotban	64
52.	3.29. ábra Feszültségkamrás berendezéssel mért víztartási görbék	65
53.	3.30. ábra Homoklapos berendezés működés közben	67
54.	3.31. ábra Az S-3k jelű hulladékminta rutin kompressziós vizsgálata a) a minta bekészítés és simító terhelése; b) az ödométer működés közben; c) a növekvő terhelés	68
55.	3.32. ábra Az 1-es számú szintezési pont (örkő)	69
56.	4.1. ábra S-1 jelű minta (2. degradációs fok) kompressziós görbéje	70
57.	4.2. ábra S-2 jelű minta (3. degradációs fok) kompressziós görbéje	71
58.	4.3. ábra S-3 jelű minta (4. degradációs) kompressziós görbéje	71
59.	4.4. ábra A 2-3-4 (S-1, S-2, S-3) degradációs fokú hulladékminták kompressziós görbéje	72
60.	4.5. ábra A mért kompressziós görbék matematikai leírása	72
61.	4.6. ábra Az összenyomódási modulus feszültség és degradációs fok szerinti változása	74
62.	4.7. ábra Az összenyomódási modulus feszültség és degradációs fok szerinti változásának matematikai leírása: $y=ax+b$ formában	74
63.	4.8. ábra Az összenyomódási modulus feszültség és degradációs fok szerinti változásának matematikai leírása: $y=ax$ formában	75
64.	4.9. ábra Degradációs fok tartományok a kompressziós görbékkel értelmezve	76
65.	4.10. ábra Degradációs fok tartományok az összenyomódási modulussal értelmezve	76
66.	4.11. ábra S-3k jelű minta kompressziós görbéje	78
67.	4.12. ábra Az S-3k jelű minta összegzett konszolidációs görbéje	78

68.	4.13. ábra Az S-3 és S-3k jelű minta alakváltozásának összehasonlítása	79
69.	4.14. ábra A lerakó aljzatsüllyedés számítása GEO5 programmal	80
70.	4.15. ábra Az S-1 jelű minta összegzett konszolidációs görbéje	81
71.	4.16. ábra Az S-2 jelű minta összegzett konszolidációs görbéje	81
72.	4.17. ábra Az S-3 jelű minta összegzett konszolidációs görbéje	81
73.	4.18. ábra Magyarázó ábra a konszolidáció értékeléséhez (HEFOP/2004/3.3.1/0001.01)	83
74.	4.19. ábra Konszolidációs modell illesztése a mért értékekre (mintaábra) "T" modell szerint (módosított Terzaghi modell)	85
75.	4.20. ábra Konszolidációs modell illesztése a mért értékekre (mintaábra) "B" modell szerint (módosított Bjerrum modell)	87
76.	4.21. ábra Talajmechanika alapú modellek alkalmazása az S-1 jelű minta első terhelésénél a) Terzaghi modell szerint; b) "T" modell szerint (módosított Terzaghi modell); c) "B" modell szerint (módosított Bjerrum modell)	90
77.	4.22. ábra A vízáteresztő-képességi együttható változása	91
78.	4.23. ábra Poyting-Thomson - modell	92
79.	4.24. ábra Burger - modell	92
80.	4.25. ábra A PRHK felszínfelmérése 2006. 11. és 2009. 12. (FKF Zrt. 2000-2013)	97
81.	4.26. ábra Hiperbolikus feszültség összenyomódás összefüggés (Plaxis)	98
82.	4.27. ábra A módosított kúszási tényező ($C = \mu^*$), a módosított duzzadási tényező (κ^*) és a módosított kompressziós tényező (λ^*) értelmezése, meghatározása (Plaxis)	99
83.	4.28. ábra Geometriai felvétel	101

84.	4.29. ábra A Plaxis modell felépítése építési fázisonként	101
85.	4.30. ábra A konszolidálódó hulladékhalom	102
86.	4.31. ábra A PRHK SM-1-53 süllyedésmérő kövek helyszínrajzi elhelyezkedése (FKF Zrt.)	103
87.	4.32. ábra A PRHK SM-1–53 süllyedésmérő kövek mérési eredményeinek összegzett ábrázolása	103
88.	4.33. ábra (sorozat) A lerakó felszíni süllyedésmérésének csoportosítása	104- 105
89.	4.34. ábra Süllyedés a lerakó egy általános pontjában	107
90.	4.35. ábra A különböző modellek kontroll vizsgálatának eredményei	108
91.	4.36. ábra Teherfelvitel miatti alakváltozás és az állékonyság vizsgálata	108
92.	4.37. ábra Az 1-4 frakciók homoklapos berendezéssel mért víztartási görbéi (Imre, Havrán, Firgi)	109
93.	4.38. ábra Keverékek homoklapos berendezéssel mért víztartási görbéi (Imre, Havrán, Firgi)	109- 110
94.	4.39. ábra Az 1-4 keverék mért és számított víztartási görbéje (Imre et al., 2006)	111
95.	4.40. ábra Az 1-4 talajkeverék víztartási görbéjének változása az azonostól eltérő súlyozással	111

M4 Táblázatok jegyzéke

1.	2.1. táblázat Települési hulladék kezelése Magyarországon 2004, 2017 között (www.ksh.hu)	13
2.	2.2. táblázat Hulladékok nyírószilárdsági paraméterei (Petrovic, 2008)	19
3.	2.3. táblázat A másodlagos konszolidáció együttható és szakaszainak jellemző értékei helyszíni mérések alapján (König, 1996)	28
4.	2.4. táblázat Települési hulladék lerakók esetén mért kompressziós index (C_c) és kúszási index (C_α) értékek (Oweis, Khera, 1990)	28
5.	2.5. táblázat Hulladékok jellemző szivárgási tényező értékei (Heyer, 2003)	37
6.	2.6. táblázat A geotechnikában használt szakkifejezések talajtani megfelelői	39-40
7.	2.7. táblázat A hulladékot alkotó összevont frakciók arányának alakulása a bomlási folyamat során (Varga, 2010)	42
8.	3.1. táblázat A lerakó kapacitása és várható működési időtartama (FKF Zrt., 2013)	47
9.	3.2. táblázat A lerakó saját tömeg és térfogat mérései	51
10.	3.3. táblázat A kezelésre átvett hulladék összetétele (2006-2013 átlaga)	52
11.	3.4. táblázat A G12-FR jelű geotechnikai fúrásban észlelt talajok fontosabb talajfizikai jellemzői	52
12.	3.5. táblázat A vizsgált frakciók	53
13.	3.6. táblázat M-1 jelű minta kompressziós vizsgálatának eredményei	57
14.	3.7. táblázat Az M-1 jelű minta fontosabb talajfizikai jellemzői	58
15.	3.8. táblázat A feszültségkamrába bezárt levegő tömegeváltozásának korrekciós táblázata	66

16.	4.1. táblázat S-1 jelű minta (2. degradációs fok) kompressziós vizsgálatának eredményei	70
17.	4.2. táblázat S-2 jelű minta (3. degradációs fok) kompressziós vizsgálatának eredménye	71
18.	4.3. táblázat S-3 jelű minta (4. degradációs) kompressziós vizsgálatának eredményei	71
19.	4.4. táblázat Összenyomódási modulus a degradációs fok függvényében	73
20.	4.5. táblázat A Poisson-tényező [-] változása	76
21.	4.6. táblázat Az alakváltozások aránya	76
22.	4.7. táblázat S-3k jelű minta kompressziós vizsgálatának eredményei	77
23.	4.8. táblázat Az S-1 jelű minta fontosabb konszolidációs jellemzői	82
24.	4.9. táblázat Az S-2 jelű minta fontosabb konszolidációs jellemzői	83
25.	4.10. táblázat Az S-3 jelű minta fontosabb konszolidációs jellemzői	83-84
26.	4.11. táblázat Az S-1 jelű minta "T" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői	85
27.	4.12. táblázat Az S-2 jelű minta "T" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői	85
28.	4.13. táblázat Az S-3 jelű minta "T" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői	86
29.	4.14. táblázat Az S-1 jelű minta "B" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői	87
30.	4.15. táblázat Az S-2 jelű minta "B" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői	87
31.	4.16. táblázat Az S-3 jelű minta "B" modellel meghatározott fontosabb konszolidációs jellemzői	88
32.	4.17. táblázat A konszolidációs jellemzők átlagértékei a degradációs fok függvényében	88
33.	4.18. táblázat A süllyedés összetevőinek aránya (átlag)	88

34.	4.19. táblázat A vízáteresztő-képességi együttható [m/s] változása	90
35.	4.20. táblázat Az S-1 jelű minta "PT" és "BU" modellillesztéssel meghatározott modell állandói	92
36.	4.21. táblázat Az S-2 jelű minta "PT" és "BU" modellillesztéssel meghatározott modell állandói	92
37.	4.22. táblázat Az S-3 jelű minta "PT" és "BU" modellillesztéssel meghatározott modell állandói	93
38.	4.23. táblázat A bemenő adatok és megbízhatóságuk értékelése	94
39.	4.24. táblázat Hulladékfizikai jellemzők a degradációs fok függvényében (Varga, 2010)	95
40.	4.25. táblázat A Mohr-Coulomb (MC) modell validált paraméterei	105
41.	4.26. táblázat A felkeményedő modell (HS) validált paraméterei	105
42.	4.27. táblázat A puha modell kúszással (SSC) validált paraméterei	106
43.	4.28. táblázat A talaj keverékek víztartási görbéinek frakciókra vonatkozó súlyozása	111

M5 Mérési jegyzőkönyvek

A módosított kompressziós és a kompressziós vizsgálat mérési jegyzőkönyvei:

Minta jele:	M-1	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések: Próbamérés 100 kg simító terhelés mellett új h=223 mm		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
A minta kezdeti fizikai jellemzői:		115	260	50 x 50	2500		
teher		eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
100	4			36.60	37.80	37.2	0.1431
1000	40			1.00	1.00	1	0.0045
2500	100			1.20	1.10	1.15	0.0096
5000	200			1.20	1.20	1.2	0.0150
10000	400			0.90	1.30	1.1	0.0200
20000	800			0.60	0.80	0.70	0.0231

Minta jele:	M-1				
teher		oldalnyomás			
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	p1 (bar)	p2 (bar)	p (bar)	p (kN/m ²)
100	4	nm.	nm.		
1000	40	0.15	0.15	0.15	15.00
2500	100	0.37	0.35	0.36	36.00
5000	200	0.66	0.56	0.61	61.00
10000	400	1.05	0.91	0.98	98.00
20000	800	1.61	1.33	1.47	147.00

Minta jele:	S 1	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések: minden terhelési lépés előtt az alakváltozást mérő óra nullázva lett		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	61,5	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
1000	40	0	0	7.90	7.90	7.900	0.29439
		2	120	8.62	8.62	8.620	0.30610
		5	300	8.92	8.92	8.920	0.31098
		10	600	9.03	9.03	9.030	0.31276
		15	900	9.17	9.15	9.160	0.31488
		30	1800	9.26	9.26	9.260	0.31650
		60	3600	9.42	9.41	9.415	0.31902
		120	7200	9.54	9.52	9.530	0.32089
		180	10800	9.63	9.63	9.630	0.32252
		240	14400	9.67	9.67	9.670	0.32317
		300	18000				
		1440	86400	9.99	9.95	9.970	0.32805
2880	172800						
4320	259200						
2000	80	0	0	2.10	2.05	2.075	0.36179
		2	120	2.57	2.52	2.545	0.36943
		5	300	3.01	2.91	2.960	0.37618
		10	600	3.12	3.04	3.080	0.37813
		15	900	3.22	3.14	3.180	0.37976
		30	1800	3.41	3.32	3.365	0.38276
		60	3600	3.60	3.52	3.560	0.38593
		120	7200	3.79	3.67	3.730	0.38870
		180	10800	3.98	3.84	3.910	0.39163
		240	14400				
		300	18000				
		1440	86400	4.23	4.11	4.170	0.39585
2880	172800						
4320	259200						

Minta jele:	S 1	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések: minden terhelési lépés előtt az alakváltozást mérő óra nullázva lett		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	61,5	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
4000	160	0	0	1.95	2.20	2.075	0.42959
		2	120	2.41	2.75	2.580	0.43780
		5	300	2.66	3.01	2.835	0.44195
		10	600	2.81	3.17	2.990	0.44447
		15	900	2.92	3.31	3.115	0.44650
		30	1800	3.09	3.47	3.280	0.44919
		60	3600	3.27	3.66	3.465	0.45220
		120	7200	3.47	3.90	3.685	0.45577
		180	10800	3.60	4.05	3.825	0.45805
		240	14400	3.74	4.20	3.970	0.46041
		300	18000	3.82	4.30	4.060	0.46187
		1440	86400	4.04	4.54	4.290	0.46561
2880	172800						
4320	259200						
8000	320	0	0	1.70	2.10	1.900	0.49650
		2	120	2.12	2.67	2.395	0.50455
		5	300	2.33	2.88	2.605	0.50797
		10	600	2.44	3.01	2.725	0.50992
		15	900	2.51	3.08	2.795	0.51106
		30	1800	2.69	3.28	2.985	0.51415
		60	3600	2.80	3.41	3.105	0.51610
		120	7200	2.98	3.61	3.295	0.51919
		180	10800	3.09	3.68	3.385	0.52065
		240	14400	3.17	3.82	3.495	0.52244
		300	18000				
		1440	86400	3.33	3.99	3.660	0.52512
2880	172800						
4320	259200						

Minta jele:	S 1	Módosított komprssziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések: minden terhelési lépcső előtt az alakváltozást mérő óra nullázva lett		tömeg m_{m0} (kg)	magasság h (mm)	ktm. méret a x b (cm x cm)	ktm. terület A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	61,5	50 x 50	2500		
teher m_t (kg)	teher σ (kN/m ²)	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv. (ϵ) (-)
		t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	
16000	640	0	0	2.25	1.85	2.050	0.55846
		2	120	2.50	2.04	2.270	0.56203
		5	300	2.55	2.09	2.320	0.56285
		10	600	2.61	2.14	2.375	0.56374
		15	900	2.66	2.19	2.425	0.56455
		30	1800	2.73	2.26	2.495	0.56569
		60	3600	2.81	2.36	2.585	0.56715
		120	7200	2.91	2.49	2.700	0.56902
		180	10800	3.00	2.59	2.795	0.57057
		240	14400	3.04	2.70	2.870	0.57179
		300	18000	3.16	2.83	2.995	0.57382
		1440	86400				
		2880	172800	3.37	2.95	3.160	0.57650
		4320	259200	3.41	3.19	3.300	0.57878

Minta jele:		S-1						Módosított komprssziós kísérlet - kiegészítő mérés 1. - visszaterhelés	
teher		eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.		
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ε) (-)		
16000	640	nm.	nm.	36.07	35.12	35.60	0.57878		
8000	320	nm.	nm.	-0.67	-0.11	-0.39	0.57244		
4000	160	nm.	nm.	-1.21	-0.24	-0.73	0.56699		
2000	80	nm.	nm.	-1.42	-0.30	-0.86	0.56480		
1000	40	nm.	nm.	-2.28	-0.62	-1.45	0.55520		
500	20	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
250	10	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
125	5	nm.	nm.	-3.95	-2.31	-3.13	0.52789		
0	0	nm.	nm.	-4.05	-2.42	-3.24	0.52618		

Minta jele:		S-1				Módosított komprssziós kísérlet - kiegészítő mérés 2.	
teher		oldalnyomás					
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	p1 (bar)	p2 (bar)	p (bar)	p (kN/m ²)		
125	5	nm.	nm.				
250	10	nm.	nm.				
1000	40	0.55	0.2	0.38	37.50		
2000	80	0.8	0.3	0.55	55.00		
4000	160	1.2	0.6	0.90	90.00		
8000	320	1.45	0.85	1.15	115.00		
16000	640	1.8	1	1.40	140.00		

Minta jele:	S 2	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	97.10	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
125	5	0	0	2.80	2.25	2.525	0.02600
		2	120	3.92	3.15	3.535	0.03641
		5	300	4.37	3.53	3.950	0.04068
		10	600	4.74	3.83	4.285	0.04413
		15	900	4.95	4.01	4.480	0.04614
		30	1800	5.49	4.42	4.955	0.05103
		60	3600	5.92	4.84	5.380	0.05541
		120	7200	6.48	5.34	5.910	0.06087
		180	10800				
		240	14400				
		300	18000	6.93	5.75	6.340	0.06529
		1440	86400				
		2880	172800	7.50	6.00	6.750	0.06952
		4320	259200				
250	10	0	0	1.05	1.30	1.175	0.08162
		2	120	1.53	1.95	1.740	0.08744
		5	300	1.69	2.21	1.950	0.08960
		10	600	1.85	2.42	2.135	0.09150
		15	900	1.95	2.55	2.250	0.09269
		30	1800	2.16	2.81	2.485	0.09511
		60	3600	2.39	3.09	2.740	0.09773
		120	7200	2.61	3.34	2.975	0.10015
		180	10800	2.74	3.51	3.125	0.10170
		240	14400	2.83	3.66	3.245	0.10294
		300	18000	2.93	3.76	3.345	0.10396
		1440	86400	5.12	6.26	5.690	0.12812
		2880	172800	5.67	7.32	6.495	0.13641
		4320	259200				

Minta jele:	S 2	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	97,1	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
500	20	0	0	2.40	3.60	3.000	0.16730
		2	120	2.69	4.24	3.465	0.17209
		5	300	3.21	5.00	4.105	0.17868
		10	600	3.73	5.15	4.440	0.18213
		15	900	4.03	5.23	4.630	0.18409
		30	1800	4.46	5.46	4.960	0.18749
		60	3600	4.87	5.74	5.305	0.19104
		120	7200	5.24	6.04	5.640	0.19449
		180	10800	5.54	6.31	5.925	0.19743
		240	14400				
		300	18000				
		1440	86400	6.74	7.54	7.140	0.20994
		2880	172800				
		4320	259200	7.50	8.51	8.005	0.21885
		12960	777600	8.33	9.39	8.860	0.22765
1000	40	0	0	3.90	3.77	3.835	0.26715
		2	120	4.33	4.25	4.290	0.27183
		5	300	4.59	4.55	4.570	0.27472
		10	600	4.89	4.88	4.885	0.27796
		15	900	5.07	5.10	5.085	0.28002
		30	1800	5.19	5.21	5.200	0.28120
		60	3600	5.63	5.73	5.680	0.28615
		120	7200	5.80	5.90	5.850	0.28790
		180	10800	5.89	6.03	5.960	0.28903
		240	14400	6.00	6.15	6.075	0.29022
		300	18000	6.30	6.45	6.375	0.29331
		1440	86400	6.60	6.80	6.700	0.29665
		2880	172800	7.10	7.41	7.255	0.30237
		4320	259200	7.55	8.00	7.775	0.30772
		7200	432000	7.65	8.03	7.840	0.30839

Minta jele:	S 2	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	97,1	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
2000	80	0	0	1.61	1.71	1.660	0.32549
		2	120	2.15	2.26	2.205	0.33110
		5	300	2.47	2.59	2.530	0.33445
		10	600	2.75	2.87	2.810	0.33733
		15	900	2.85	3.00	2.925	0.33852
		30	1800	3.49	3.68	3.585	0.34531
		60	3600	3.74	3.95	3.845	0.34799
		120	7200	4.05	4.30	4.175	0.35139
		180	10800	4.31	4.53	4.420	0.35391
		240	14400	4.63	4.89	4.760	0.35742
		300	18000				
		1440	86400	4.90	5.35	5.125	0.36117
		2880	172800	5.61	6.11	5.860	0.36874
		4320	259200	5.71	6.22	5.965	0.36982
		10080	604800	5.84	6.23	6.035	0.37055
4000	160	0	0	1.25	1.57	1.410	0.38507
		2	120	1.63	2.01	1.820	0.38929
		5	300	2.01	2.41	2.210	0.39331
		10	600	2.25	2.62	2.435	0.39562
		15	900	2.39	2.74	2.565	0.39696
		30	1800	2.62	2.97	2.795	0.39933
		60	3600	2.91	3.27	3.090	0.40237
		120	7200	3.12	3.46	3.290	0.40443
		180	10800	3.33	3.67	3.500	0.40659
		240	14400	3.49	3.84	3.665	0.40829
		300	18000	3.58	3.89	3.735	0.40901
		1440	86400	3.73	4.09	3.910	0.41081
		2880	172800	4.28	4.75	4.515	0.41704
		4320	259200	4.59	5.19	4.890	0.42091

Minta jele:	S 2	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések:		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	97,1	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
8000	320	0	0	1.21	1.58	1.395	0.43527
		2	120	1.61	2.04	1.825	0.43970
		5	300	1.88	2.37	2.125	0.44279
		10	600	2.15	2.67	2.410	0.44573
		15	900	2.27	2.79	2.530	0.44696
		30	1800	2.46	3.00	2.730	0.44902
		60	3600	2.67	3.22	2.945	0.45124
		120	7200	2.90	3.41	3.155	0.45340
		180	10800	3.06	3.58	3.320	0.45510
		240	14400	3.22	3.75	3.485	0.45680
		300	18000	3.31	3.84	3.575	0.45772
		1440	86400	3.83	4.31	4.070	0.46282
		2880	172800	3.87	4.34	4.105	0.46318
		4320	259200	3.91	4.39	4.150	0.46365
16000	640	0	0	1.30	1.40	1.350	0.47755
		2	120	1.80	1.85	1.825	0.48244
		5	300	2.09	2.14	2.115	0.48543
		10	600	2.23	2.29	2.260	0.48692
		15	900	2.33	2.41	2.370	0.48805
		30	1800	2.57	2.67	2.620	0.49063
		60	3600	2.72	2.81	2.765	0.49212
		120	7200	2.87	2.99	2.930	0.49382
		180	10800	2.98	3.14	3.060	0.49516
		240	14400	3.07	3.25	3.160	0.49619
		300	18000				
		1440	86400	3.38	3.60	3.490	0.49959
		2880	172800	3.77	4.08	3.925	0.50407
		4320	259200	4.01	4.37	4.190	0.50680
		12960	777600	4.22	4.57	4.395	0.50891

Minta jele:		S-2						Módosított komprssziós kísérlet - kiegészítő mérés 1. - visszaterhelés	
teher		eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.		
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(s) (-)		
500	20	nm.	nm.	21.50	22.71	22.11	0.22765		
125	5	nm.	nm.	-1.41	-1.53	-1.47	0.21251		
16000	640	nm.	nm.	47.71	51.12	49.42	0.50891		
8000	320	nm.	nm.	-0.31	-0.11	-0.21	0.50675		
4000	160	nm.	nm.	-0.74	-0.67	-0.71	0.50165		
2000	80	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
1000	40	nm.	nm.	-1.11	-1.24	-1.18	0.49681		
500	20	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
250	10	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
125	5	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
0	0	nm.	nm.	-3.35	-2.54	-2.95	0.47858		

Minta jele:		S-2				Módosított komprssziós kísérlet - kiegészítő mérés 2.	
teher		oldalnyomás					
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	p1 (bar)	p2 (bar)	p (bar)	p (kN/m ²)		
125	5	nm.	nm.				
250	10	nm.	nm.				
1000	40	0.41	0.29	0.35	35.00		
2000	80	0.59	0.45	0.52	52.00		
4000	160	0.95	0.79	0.87	87.00		
8000	320	1.12	0.98	1.05	105.00		
16000	640	1.31	1.09	1.20	120.00		

Minta jele:	S 3	Módosított kompressziós kísérlet						
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor			
Mjegyzések:			tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
			m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:			né.	72.70	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.	
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)	
125	5	0	0	3.30	2.70	3.000	0.04127	
		2	120	3.85	3.31	3.580	0.04924	
		5	300	4.11	3.59	3.850	0.05296	
		10	600	4.29	3.81	4.050	0.05571	
		15	900	4.41	3.98	4.195	0.05770	
		30	1800	4.60	4.19	4.395	0.06045	
		60	3600	4.79	4.57	4.680	0.06437	
		120	7200	4.93	4.64	4.785	0.06582	
		180	10800					
		240	14400					
		300	18000					
		1440	86400	5.00	4.55	4.775	0.06568	
		2880	172800					
		4320	259200	5.13	4.64	4.885	0.06719	
250	10	0	0	1.15	1.83	1.490	0.08769	
		2	120	1.40	2.18	1.790	0.09182	
		5	300	1.61	2.41	2.010	0.09484	
		10	600	1.79	2.61	2.200	0.09746	
		15	900	1.89	2.71	2.300	0.09883	
		30	1800	2.12	2.95	2.535	0.10206	
		60	3600	2.36	3.19	2.775	0.10536	
		120	7200	2.66	4.43	3.545	0.11596	
		180	10800	2.85	4.65	3.750	0.11878	
		240	14400	3.18	4.89	4.035	0.12270	
		300	18000					
		1440	86400	3.78	4.37	4.075	0.12325	
		2880	172800					
		4320	259200	4.47	4.84	4.655	0.13122	

Minta jele:	S 3	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	72,7	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
500	20	0	0	1.40	1.65	1.525	0.15220
		2	120	1.71	1.97	1.840	0.15653
		5	300	1.92	2.12	2.020	0.15901
		10	600	2.14	2.24	2.190	0.16135
		15	900	2.19	2.31	2.250	0.16217
		30	1800	2.54	2.48	2.510	0.16575
		60	3600	2.77	2.62	2.695	0.16829
		120	7200				
		180	10800				
		240	14400	3.33	2.94	3.135	0.17435
		300	18000				
		1440	86400	4.12	3.42	3.770	0.18308
		2880	172800				
		4320	259200	4.68	4.04	4.360	0.19120
1000	40	0	0	2.10	2.60	2.350	0.22352
		2	120	2.56	3.08	2.820	0.22999
		5	300	2.93	3.44	3.185	0.23501
		10	600	3.22	3.81	3.515	0.23955
		15	900	3.38	3.89	3.635	0.24120
		30	1800	3.59	4.14	3.865	0.24436
		60	3600	3.83	4.36	4.095	0.24752
		120	7200	4.04	4.54	4.290	0.25021
		180	10800	4.18	4.68	4.430	0.25213
		240	14400	4.48	5.01	4.745	0.25646
		300	18000	4.61	5.14	4.875	0.25825
		1440	86400	4.65	5.36	5.005	0.26004
		2880	172800	4.83	5.57	5.200	0.26272
		4320	259200	5.07	5.77	5.420	0.26575

Minta jele:	S 3	Módosított kompressziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor		
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		né.	72.70	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
2000	80	0	0	0.89	1.19	1.040	0.28006
		2	120	1.26	1.58	1.420	0.28528
		5	300	1.48	1.82	1.650	0.28845
		10	600	1.67	2.03	1.850	0.29120
		15	900	1.77	2.21	1.990	0.29312
		30	1800	2.03	2.41	2.220	0.29629
		60	3600	2.19	2.57	2.380	0.29849
		120	7200				
		180	10800	2.27	2.74	2.505	0.30021
		240	14400				
		300	18000				
		1440	86400	2.47	3.01	2.740	0.30344
		2880	172800	2.72	3.32	3.020	0.30729
		4320	259200	3.24	3.73	3.485	0.31369
		7200	432000	3.33	3.89	3.610	0.31541
4000	160	0	0	1.04	1.44	1.240	0.33246
		2	120	1.40	1.90	1.650	0.33810
		5	300	1.57	2.09	1.830	0.34058
		10	600	1.79	2.34	2.065	0.34381
		15	900	1.84	2.38	2.110	0.34443
		30	1800	1.94	2.52	2.230	0.34608
		60	3600	2.08	2.66	2.370	0.34801
		120	7200	2.19	2.79	2.490	0.34966
		180	10800	2.28	2.86	2.570	0.35076
		240	14400				
		300	18000				
		1440	86400	2.44	3.15	2.795	0.35385
		2880	172800	2.96	3.86	3.410	0.36231
		4320	259200	3.17	4.04	3.605	0.36499
		8640	518400	3.17	4.09	3.630	0.36534

Minta jele:	S 3	Módosított kompressziós kísérlet						
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	NÖM-1	Készítette:	Firgi Tibor			
Mjegyzések:			tömeg	magasság	ktm. méret	ktm. terület		
			m_{mn} (kg)	h (mm)	a x b (cm x cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:			né.	72.70	50 x 50	2500		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.	
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)	
8000	320	0	0	0.75	1.40	1.075	0.38012	
		2	120	1.02	1.85	1.435	0.38508	
		5	300	1.18	2.06	1.620	0.38762	
		10	600	1.29	2.23	1.760	0.38955	
		15	900	1.36	2.32	1.840	0.39065	
		30	1800	1.44	2.43	1.935	0.39195	
		60	3600	1.58	2.58	2.080	0.39395	
		120	7200					
		180	10800	1.71	2.73	2.220	0.39587	
		240	14400					
		300	18000					
		1440	86400	1.90	2.88	2.390	0.39821	
		2880	172800	1.98	3.06	2.520	0.40000	
		4320	259200	2.00	3.10	2.550	0.40041	
16000	640	0	0	0.84	1.8	1.320	0.41857	
		2	120	0.98	2.31	1.645	0.42304	
		5	300	1.09	2.47	1.780	0.42490	
		10	600	1.21	2.69	1.950	0.42724	
		15	900	1.29	2.83	2.060	0.42875	
		30	1800	1.39	2.97	2.180	0.43040	
		60	3600	1.52	3.18	2.350	0.43274	
		120	7200	1.61	3.29	2.450	0.43411	
		180	10800	1.68	3.43	2.555	0.43556	
		240	14400					
		300	18000					
		1440	86400	1.82	3.57	2.695	0.43748	
		2880	172800	1.87	3.7	2.785	0.43872	
		4320	259200	1.89	3.77	2.830	0.43934	
		2 év				4.520	0.46259	

Minta jele:		S-3						Módosított komprssziós kísérlet - kiegészítő mérés 1. - visszaterhelés	
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.		
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)		
500	20	nm.	nm.	14.28	13.52	13.90	0.19120		
125	5	nm.	nm.	-1.54	-0.7	-1.12	0.17579		
16000	640	nm.	nm.	29.74	34.14	31.94	0.43934		
8000	320	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
4000	160	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
2000	80	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
1000	40	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
500	20	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
250	10	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
125	5	nm.	nm.	nm.	nm.	nm.			
0	0	nm.	nm.	-1.15	-2.69	-1.92	0.41293		

Minta jele:		S-3				Módosított komprssziós kísérlet - kiegészítő mérés 2.	
teher		oldalnyomás					
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	p1 (bar)	p2 (bar)	p (bar)	p (kN/m ²)		
125	5	nm.	nm.				
250	10	nm.	nm.				
500	20	nm.	nm.				
1000	40	0.42	0.23	0.33	32.50		
2000	80	0.65	0.35	0.50	50.00		
4000	160	1.10	0.60	0.85	85.00		
8000	320	1.20	0.70	0.95	95.00		
16000	640	1.40	0.90	1.15	115.00		

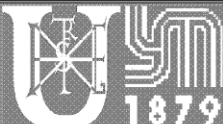
Minta jele:	S 3k	Komprssziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	Ö-SZ	Készítette:	Firgi Tibor		
		áttét:	10 X				
Mjegyzések:		tömeg	magasság	átmérő	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	D (cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		nm.	50.00	11.29	100.06		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
0.5	5	0	0	0.168	0.168	0.168	0.00840
		1	60	0.286	0.286	0.286	0.01430
		2	120	0.317	0.317	0.317	0.01585
		5	300	0.357	0.357	0.357	0.01785
		10	600	0.390	0.390	0.390	0.01950
		15	900	0.418	0.418	0.418	0.02090
		30	1800	0.449	0.449	0.449	0.02245
		60	3600	0.491	0.491	0.491	0.02455
		120	7200	0.517	0.517	0.517	0.02585
		180	10800	0.551	0.551	0.551	0.02755
		240	14400	0.579	0.579	0.579	0.02895
		300	18000	0.600	0.600	0.600	0.03000
		1440	86400	0.768	0.768	0.768	0.03840
		2880	172800	0.918	0.918	0.918	0.04590
1	10	0	0	0.100	0.100	0.100	0.05090
		1	60	0.160	0.160	0.160	0.05390
		2	120	0.184	0.184	0.184	0.05510
		5	300	0.225	0.225	0.225	0.05715
		10	600	0.257	0.257	0.257	0.05875
		15	900	0.276	0.276	0.276	0.05970
		30	1800	0.314	0.314	0.314	0.06160
		60	3600	0.365	0.365	0.365	0.06415
		120	7200	0.413	0.413	0.413	0.06655
		180	10800	0.448	0.448	0.448	0.06830
		240	14400	0.472	0.472	0.472	0.06950
		300	18000	0.500	0.500	0.500	0.07090
		1440	86400	0.725	0.725	0.725	0.08215
		2880	172800	0.871	0.871	0.871	0.08945

Minta jele:	S 3k	Komprssziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	Ö-SZ	Készítette:	Firgi Tibor		
		áttét:	10 X				
Mjegyzések:		tömeg	magasság	átmérő	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	D (cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		nm.	50.00	12	113.04		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
2	20	0	0	0.229	0.229	0.229	0.10090
		1	60	0.380	0.380	0.380	0.10845
		2	120	0.431	0.431	0.431	0.11100
		5	300	0.530	0.530	0.530	0.11595
		10	600	0.594	0.594	0.594	0.11915
		15	900	0.634	0.634	0.634	0.12115
		30	1800	0.709	0.709	0.709	0.12490
		60	3600	0.788	0.788	0.788	0.12885
		120	7200	0.880	0.880	0.880	0.13345
		180	10800	0.941	0.941	0.941	0.13650
		240	14400	0.980	0.980	0.980	0.13845
		300	18000	1.015	1.015	1.015	0.14020
		1440	86400	1.260	1.260	1.260	0.15245
		2880	172800	1.409	1.409	1.409	0.15990
		4320	259200	1.506	1.506	1.506	0.16475
4	40	0	0	0.413	0.413	0.413	0.18540
		1	60	0.623	0.623	0.623	0.19590
		2	120	0.703	0.703	0.703	0.19990
		5	300	0.824	0.824	0.824	0.20595
		10	600	0.903	0.903	0.903	0.20990
		15	900	0.972	0.972	0.972	0.21335
		30	1800	1.095	1.095	1.095	0.21950
		60	3600	1.198	1.198	1.198	0.22465
		120	7200	1.327	1.327	1.327	0.23110
		180	10800	1.451	1.451	1.451	0.23730
		240	14400	1.496	1.496	1.496	0.23955
		300	18000	1.528	1.528	1.528	0.24115
		1440	86400	1.792	1.792	1.792	0.25435
		2880	172800	1.899	1.899	1.899	0.25970

Minta jele:	S 3k	Komprssziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	Ö-SZ	Készítette:	Firgi Tibor		
		áttét:	10 X				
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	átmérő	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	D (cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		nm.	50.00	12	113.04		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
8	80	0	0	0.534	0.534	0.534	0.28640
		1	60	0.662	0.662	0.662	0.29280
		2	120	0.713	0.713	0.713	0.29535
		5	300	0.796	0.796	0.796	0.29950
		10	600	0.857	0.857	0.857	0.30255
		15	900	0.906	0.906	0.906	0.30500
		30	1800	0.989	0.989	0.989	0.30915
		60	3600	1.343	1.343	1.343	0.32685
		120	7200	1.764	1.764	1.764	0.34790
		180	10800	1.859	1.859	1.859	0.35265
		240	14400	1.939	1.939	1.939	0.35665
		300	18000	1.976	1.976	1.976	0.35850
		1440	86400	2.249	2.249	2.249	0.37215
		2880	172800				
		4320	259200				
		8640	518400	2.475	2.475	2.475	0.38345
16	160	0	0	0.759	0.759	0.759	0.42140
		1	60	0.931	0.931	0.931	0.43000
		2	120	0.996	0.996	0.996	0.43325
		5	300	1.090	1.090	1.090	0.43795
		10	600	1.178	1.178	1.178	0.44235
		15	900	1.247	1.247	1.247	0.44580
		30	1800	1.348	1.348	1.348	0.45085
		60	3600	1.464	1.464	1.464	0.45665
		120	7200	1.616	1.616	1.616	0.46425
		180	10800	1.702	1.702	1.702	0.46855
		240	14400	1.768	1.768	1.768	0.47185
		300	18000	1.719	1.719	1.719	0.46940
		1440	86400	1.968	1.968	1.968	0.48185
		2880	172800	2.036	2.036	2.036	0.48525
		4320	259200	2.068	2.068	2.068	0.48685

Minta jele:	S 3k	Komprssziós kísérlet					
Hely, dátum:	Budapest, SZIE-YMÉTK	Gép:	Ö-SZ	Készítette:	Firgi Tibor		
		áttét:	10 X				
Mjegyzések:							
		tömeg	magasság	átmérő	ktm. terület		
		m_{mn} (kg)	h (mm)	D (cm)	A (cm ²)		
Hulladékminta kezdeti fizikai jellemzői:		nm.	50.00	12	113.04		
teher	teher	eltelt idő		összenyomódás (mm)			fajl. alakv.
m_t (kg)	σ (kN/m ²)	t (perc)	t (s)	Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh (mm)	(ϵ) (-)
32	320	0	0	1.085	1.085	1.085	0.54110
		1	60	1.347	1.347	1.347	0.55420
		2	120	1.526	1.526	1.526	0.56315
		5	300	1.758	1.758	1.758	0.57475
		10	600	1.955	1.955	1.955	0.58460
		15	900	2.083	2.083	2.083	0.59100
		30	1800	2.214	2.214	2.214	0.59755
		60	3600	2.362	2.362	2.362	0.60495
		120	7200	2.485	2.485	2.485	0.61110
		180	10800	2.535	2.535	2.535	0.61360
		240	14400	2.593	2.593	2.593	0.61650
		300	18000	2.633	2.633	2.633	0.61850
		1440	86400	2.754	2.754	2.754	0.62455
		2880	172800				
		4320	259200	2.875	2.875	2.875	0.63060
		8640	518400	2.890	2.890	2.890	0.63135
64	640	0	0	0.790	0.790	0.790	0.67085
		1	60	1.130	1.130	1.130	0.68785
		2	120	1.269	1.269	1.269	0.69480
		5	300	1.455	1.455	1.455	0.70410
		10	600	1.593	1.593	1.593	0.71100
		15	900	1.670	1.670	1.670	0.71485
		30	1800	1.789	1.789	1.789	0.72080
		60	3600	1.900	1.900	1.900	0.72635
		120	7200	1.967	1.967	1.967	0.72970
		180	10800	2.044	2.044	2.044	0.73355
		240	14400				
		300	18000				
		1440	86400	2.260	2.260	2.260	0.74435
		2880	172800	2.300	2.300	2.300	0.74635
		4320	259200	2.391	2.391	2.391	0.75090
		259200	15552000	2.685	2.685	2.685	0.76560

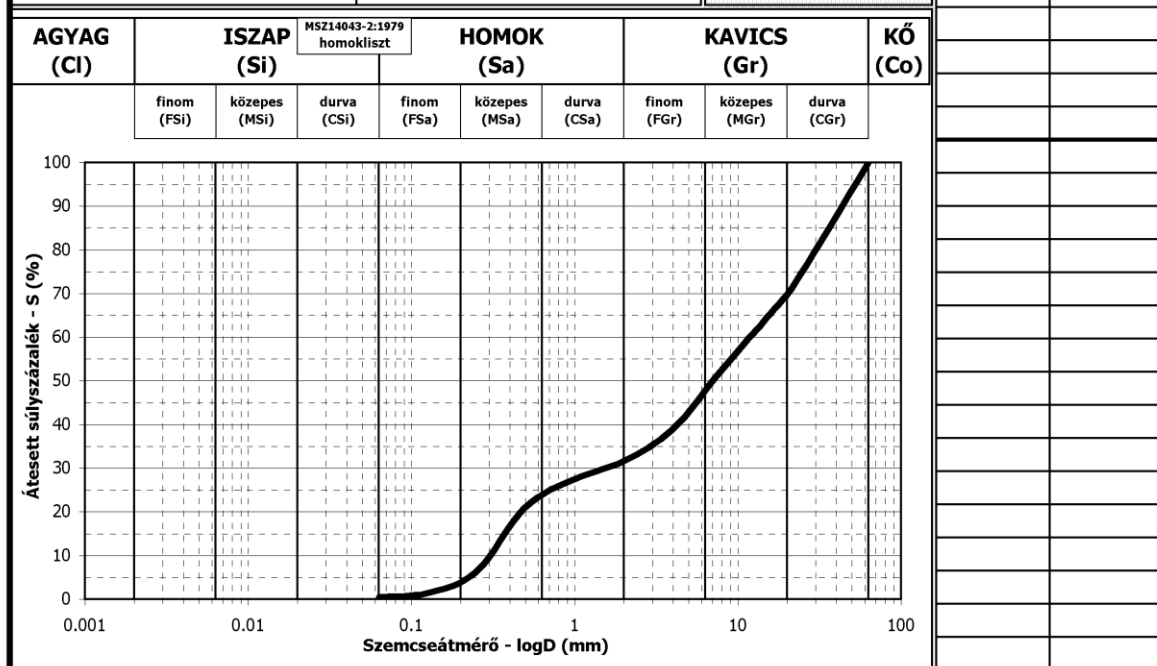
A módosított kompressziós próbaméréshez kapcsolódó szemeloszlási vizsgálat mérési jegyzőkönyvei

	SZIE Ybl Miklós Építéstudományi Kar Építőmérnöki Intézet Geotechnikai Laboratórium H-1146 Budapest, Thököly út 74.	Központi telefon: (+36-1) 252-1270 Laboratóriumi telefon: (+36-1) 252-1270/208 Laboratóriumi telefax: (+36-1) 252-1270/208 E-mail: kecskes.gabor@ybl.szie.hu

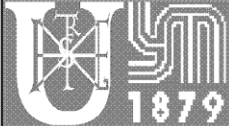
VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV
SZEMELOSZLÁSI VIZSGÁLAT (SZÍTÁLÁS - HIDROMETRÁLÁS) EREDMÉNYEI
 (az MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006, az MSZ EN ISO 14688-1:2003 és az MSZ EN ISO 14688-2:2005 szerint)

Megbízó:	Helyszín:
Mintát vette/szállította:	Mintavétel időpontja:
Munkaszám:	Beérkezés időpontja:
Kijelölés időpontja:	Jegyzőkönyv készítője: Kovács Andrea laboráns

Minta azonosító naplószáma	Minta vizsgálati naplószáma	Minta vételi hely száma	Minta vételi mélység (m)	Érkezési víztartalom (%)	A talajminta azonosító leírása, jellemzése	Szemméret D (mm)	Átesett anyag S (súly%)
/1	/1/SzH	1	vödör			63	100.00
Számított és származtatott jellemzők							
Agyag (Cl %) = 0.0			D₆₀ (mm) = 12.564		Színe:	22.4	72.40
Izlap (Si %) = 0.4			D_m (mm) = 4.719		világos szürke	16	65.64
Homok (Sa %) = 31.3			C_u (-) = 40.25		Megnevezése:	8	52.51
Kavics (Gr %) = 68.3			C_c (-) = 0.65		homokos kavics	4	39.05
Kő (Co %) = 0.0			k_{ZAMARIN} (m/s) = 1.83E-3		Szemcsék koptatottsága:	2	31.69
D₁₀ (mm) = 0.312			f₀ (m²/kg) = 2.47			1	27.53
D₃₀ (mm) = 1.594			ρ_s (g/cm³) = 2.66			0.5	21.06
Földműalkalmassági besorolás =			kiváló			0.25	6.34
Fagyveszélyességi besorolás =			fagyálló		Szemcsék anyaga:	0.125	1.44
1000 órás kapilláris emelés =			kb. 0,2 - 0,4 m /			0.063	0.42



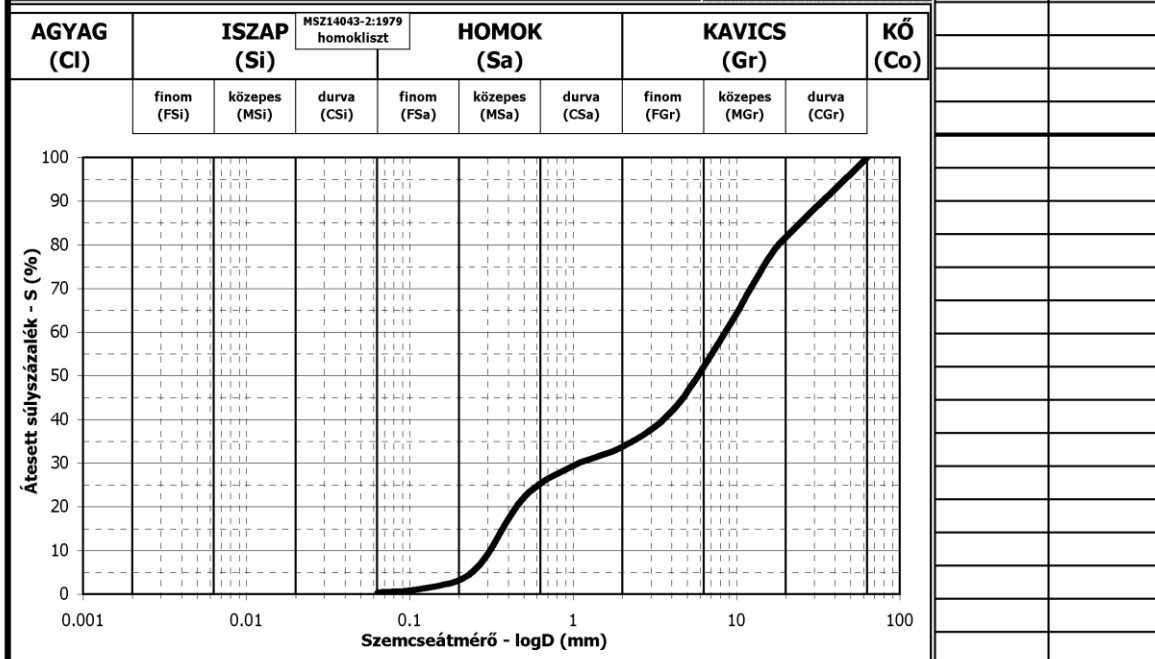
Megjegyzések: A vizsgálati eredmények csak a laboratóriumba beszállított és megvizsgált mintákra vonatkoznak. A mintavételi körülményekből és a beszállítás módjából eredő hibáért vagy károkért felelősséget nem vállalunk.	Hitelesítés: A jegyzőkönyv nyomtatásának időpontja: 2014.11.24 Ellenőrizte és kiadta: Kecskés Gábor laborvezető
--	--

	SZIE Ybl Miklós Építéstudományi Kar Építőmérnöki Intézet Geotechnikai Laboratórium H-1146 Budapest, Thököly út 74.	Központi telefon: (+36-1) 252-1270 Laboratóriumi telefon: (+36-1) 252-1270/208 Laboratóriumi telefax: (+36-1) 252-1270/208 E-mail: kecskes.gabor@ybl.szie.hu
---	---	---

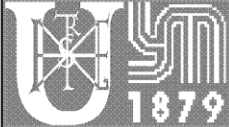
VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV
SZEMELOSZLÁSI VIZSGÁLAT (SZITÁLÁS - HIDROMETRÁLÁS) EREDMÉNYEI
 (az MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006, az MSZ EN ISO 14688-1:2003 és az MSZ EN ISO 14688-2:2005 szerint)

Megbízó:		Helyszín:	
Mintát vette/szállította:		Mintavétel időpontja:	Beérkezés időpontja:
Munkaszám:	Kijelölés időpontja:	Jegyzőkönyv készítője:	Kovács Andrea laboráns

Minta azonosító naplósám	Minta vizsgálati naplósám	Minta vételi hely száma	Minta vételi mélység (m)	Érkezési víztartalom (%)	<i>A talajminta azonosító leírása, jellemzése</i>	Szem-méret D (mm)	Átesett anyag S (súly%)	
/2	/2/SzH	2	vödör			63	100.00	
Számított és származtatott jellemzők								
Agyag (Cl %) = 0.0			D₆₀ (mm) = 8.748			Színe:	22.4	83.46
Izszap (Si %) = 0.3			D_m (mm) = 3.767			világos szürke	16	77.29
Homok (Sa %) = 33.5			C_u (-) = 27.66			Megnevezése:	8	58.22
Kavics (Gr %) = 66.2			C_c (-) = 0.47			homokos kavics	4	41.84
Kő (Co %) = 0.0			k_{ZAMARIN} (m/s) = 1.89E-3			Szemcsék koptatottsága:	2	33.83
D₁₀ (mm) = 0.316			f₀ (m²/kg) = 2.55			éles, kissé koptatott, erősen koptatott, gömbölyű	1	29.36
D₃₀ (mm) = 1.143			ρ_s (g/cm³) = 2.66				0.5	22.13
Földműveléskor besorolás =			kiváló			Szemcsék anyaga:	0.25	5.63
Fagyveszélyességi besorolás =			fagyálló			üledékes/vulkánikus kőzet, ásvány, vegyes	0.125	1.37
1000 órás kapillaris emelés =			kb. 0,2 - 0,4 m /				0.063	0.33

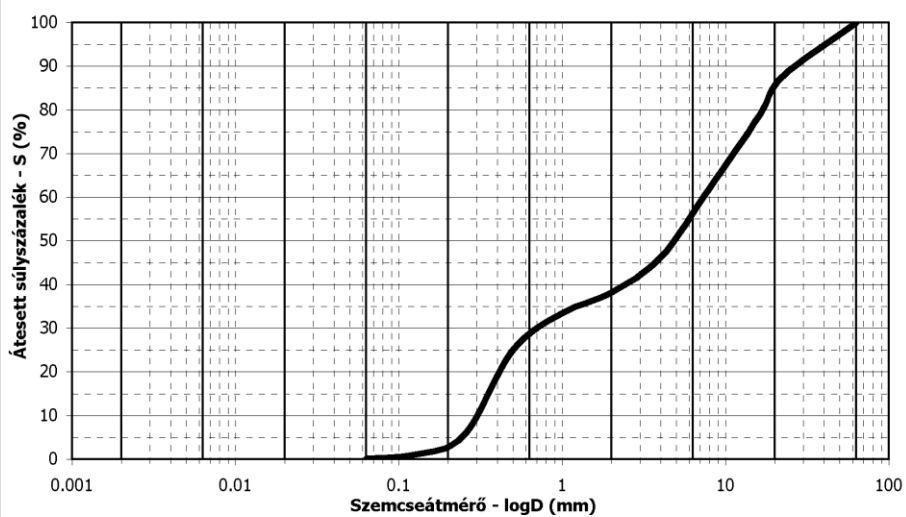


Megjegyzések: A vizsgálati eredmények csak a laboratóriumba beszállított és megvizsgált mintákra vonatkoznak. A mintavételi körülményekből és a beszállítás módjából eredő hibáért vagy károért felelősséget nem vállalunk.	Hitelesítés: A jegyzőkönyv nyomtatásának időpontja: 2014.11.24 Ellenőrizte és kiadta: Kecskés Gábor laborvezető
---	--

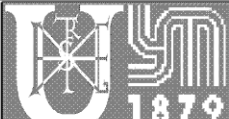
	SZIE Ybl Miklós Építéstudományi Kar Építőmérnöki Intézet Geotechnikai Laboratórium H-1146 Budapest, Thököly út 74.	Központi telefon: (+36-1) 252-1270 Laboratóriumi telefon: (+36-1) 252-1270/208 Laboratóriumi telefax: (+36-1) 252-1270/208 E-mail: kecskes.gabor@ybl.szie.hu
---	---	---

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV
SZEMELOSZLÁSI VIZSGÁLAT (SZITÁLÁS - HIDROMETRÁLÁS) EREDMÉNYEI
 (az MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006, az MSZ EN ISO 14688-1:2003 és az MSZ EN ISO 14688-2:2005 szerint)

Megbízó:		Helyszín:	
Mintát vette/szállította:		Mintavétel időpontja:	Beérkezés időpontja:
Munkaszám:	Kijelölés időpontja:	Jegyzőkönyv készítője:	Kovács Andrea laboráns

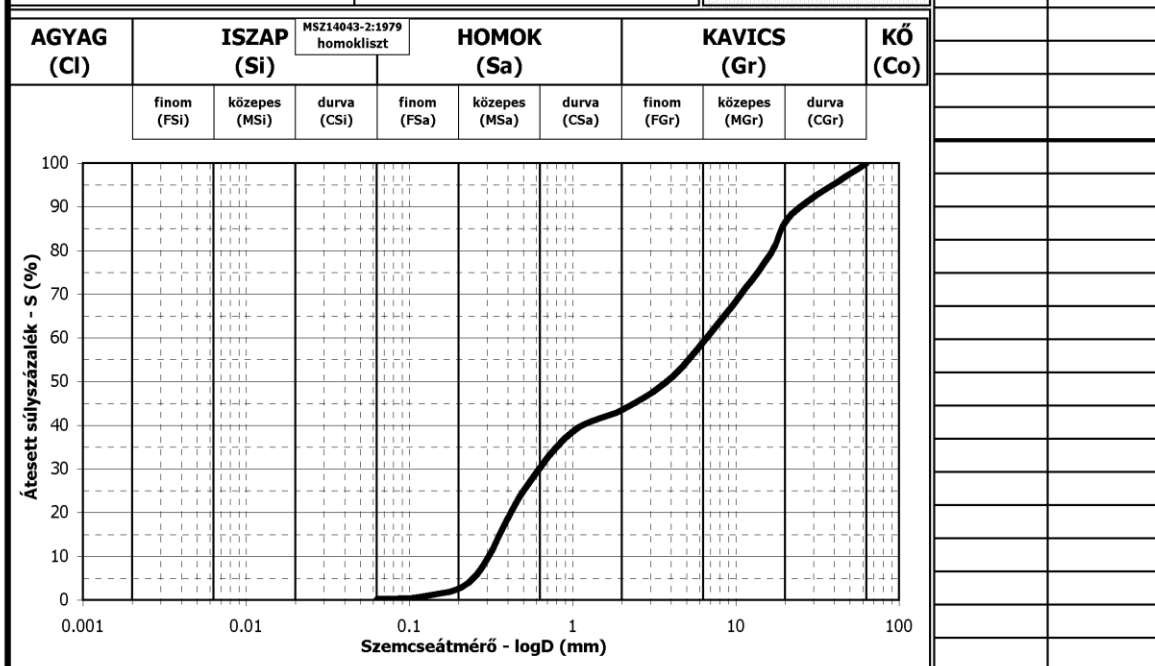
Minta azonosító naplósám	Minta vizsgálati naplósám	Minta vételi hely száma	Minta vételi mélység (m)	Érkezési víz-tartalom (%)	A talajminta azonosító leírása, jellemzése	Szem-méret D (mm)	Átesett anyag S (súly%)		
/3	/3/SzH	3	vödör				63	100.00	
Számított és származtatott jellemzők									
Agyag (Cl %) = 0.0			D₆₀ (mm) = 7.472			Színe:	22.4	87.70	
Izszap (Si %) = 0.2			D_m (mm) = 3.177			világos szürke	16	78.55	
Homok (Sa %) = 38.0			C_u (-) = 24.26			Megnevezése:	8	62.09	
Kavics (Gr %) = 61.8			C_c (-) = 0.27			homokos kavics	4	46.24	
Kő (Co %) = 0.0			k_{ZAMARIN} (m/s) = 1.91E-3			Szemcsék koptatottsága:	2	38.16	
D₁₀ (mm) = 0.308			f₀ (m²/kg) = 2.75			éles, kissé koptatott, erősen koptatott, gömbölyű	1	33.44	
D₃₀ (mm) = 0.794			ρ_s (g/cm³) = 2.66				0.5	25.08	
Földműalkalmassági besorolás =			kiváló			Szemcsék anyaga:	0.25	5.45	
Fagyveszélyességi besorolás =			fagyálló			üledékes/vulkánikus kőzet, ásvány, vegyes	0.125	1.11	
1000 órás kapilláris emelés =			kb. 0,2 - 0,4 m /				0.063	0.16	
AGYAG (Cl)	ISZAP (Si) <small>MSZ14043-2:1979 homokliszt</small>			HOMOK (Sa)			KAVICS (Gr)		KŐ (Co)
	finom (FSi)	közepes (MSi)	durva (CSI)	finom (FSa)	közepes (MSa)	durva (CSa)	finom (FGr)	közepes (MGr)	durva (CGr)
									

Megjegyzések: A vizsgálati eredmények csak a laboratóriumba beszállított és megvizsgált mintákra vonatkoznak. A mintavételi körülményekből és a beszállítás módjából eredő hibáért vagy károkért felelősséget nem vállalunk.	Hitelesítés: A jegyzőkönyv nyomtatásának időpontja: 2014.11.24 Ellenőrizte és kiadta: Kecskés Gábor laborvezető
--	--

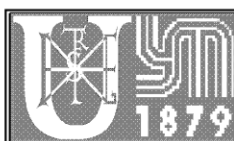
	SZIE Ybl Miklós Építéstudományi Kar Építőmérnöki Intézet Geotechnikai Laboratórium H-1146 Budapest, Thököly út 74.	Központi telefon: (+36-1) 252-1270 Laboratóriumi telefon: (+36-1) 252-1270/208 Laboratóriumi telefax: (+36-1) 252-1270/208 E-mail: kecskes.gabor@ybl.szie.hu
	VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV SZEMELOSZLÁSI VIZSGÁLAT (SZITÁLÁS - HIDROMETRÁLÁS) EREDMÉNYEI (az MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006, az MSZ EN ISO 14688-1:2003 és az MSZ EN ISO 14688-2:2005 szerint)	

Megbízó:		Helyszín:	
Mintát vette/szállította:		Mintavétel időpontja:	
Munkaszám:		Beérkezés időpontja:	
Kijelölés időpontja:		Jegyzőkönyv készítője: Kovács Andrea laboráns	

Minta azonosító naplósám	Minta vizsgálati naplósám	Minta vételi hely száma	Minta vételi mélység (m)	Érkezési víz-tartalom (%)	A talajminta azonosító leírása, jellemzése	Szem-méret D (mm)	Átesett anyag S (súly%)	
/4	/4/SzH	1	zsák			63	100.00	
Számított és származtatott jellemzők								
Agyag (Cl %) = 0.0			D₆₀ (mm) = 6.806			Színe:	22.4	88.56
Izszap (Si %) = 0.2			D_m (mm) = 2.814			világos szürke	16	78.82
Homok (Sa %) = 43.3			C_u (-) = 21.90			Megnevezése:	8	63.87
Kavics (Gr %) = 56.5			C_c (-) = 0.22			homokos kavics	4	50.91
Kő (Co %) = 0.0			k_{ZAMARIN} (m/s) = 1.75E-3			Szemcsék koptatottsága:	1	38.57
D₁₀ (mm) = 0.311			f₀ (m²/kg) = 2.87			éles, kissé koptatott, erősen koptatott, gömbölyű	0.5	25.02
D₃₀ (mm) = 0.684			ρ_s (g/cm³) = 2.66			Szemcsék anyaga:	0.125	1.00
Földműalkalmassági besorolás =			kiváló			üledékes/vulkánikus kőzet, ásvány, vegyes	0.063	0.20
Fagyveszélyességi besorolás =			fagyálló					
1000 órás kapilláris emelés =			kb. 0,2 - 0,4 m /					



Megjegyzések: A vizsgálati eredmények csak a laboratóriumba beszállított és megvizsgált mintákra vonatkoznak. A mintavételi körülményekből és a beszállítás módjából eredő hibáért vagy károért felelősséget nem vállalunk.	Hitelesítés: A jegyzőkönyv nyomtatásának időpontja: 2014.11.24 Ellenőrizte és kiadta: Kecskés Gábor laborvezető
---	--



SZIE Ybl Miklós Építéstudományi Kar
Építőmérnöki Intézet
Geotechnikai Laboratórium
H-1146 Budapest, Thököly út 74.

Központi telefon: (+36-1) 252-1270
Laboratóriumi telefon: (+36-1) 252-1270/208
Laboratóriumi telefax: (+36-1) 252-1270/208
E-mail: kecskes.gabor@ybl.szie.hu

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV
SZEMELOSZLÁSI VIZSGÁLAT (SZITÁLÁS - HIDROMETRÁLÁS) EREDMÉNYEI
(az MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006, az MSZ EN ISO 14688-1:2003 és az MSZ EN ISO 14688-2:2005 szerint)

Megbízó:		Helyszín:	
Mintát vette/szállította:		Mintavétel időpontja:	Beérkezés időpontja:
Munkaszám:	Kijelölés időpontja:	Jegyzőkönyv készítője:	Kovács Andrea laboráns

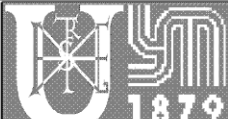
Minta azonosító naplósám	Minta vizsgálati naplósám	Minta vételi hely száma	Minta vételi mélység (m)	Érkezési víz-tartalom (%)	A talajminta azonosító leírása, jellemzése	Szem-méret D (mm)	Átesett anyag S (súly%)			
/5	/5/SzH	2	zsák			63	100.00			
Számított és származtatott jellemzők					Színe:	22.4	81.44			
Agyag (Cl %) = 0.0			D₆₀ (mm) = 10.195		világos szürke	16	71.00			
Izszap (Si %) = 0.2			D_m (mm) = 3.726		Megnevezése:	8	55.84			
Homok (Sa %) = 38.2			C_u (-) = 31.37		homokos kavics	4	44.58			
Kavics (Gr %) = 61.6			C_c (-) = 0.21			2	38.39			
Kő (Co %) = 0.0			k_{ZAMARIN} (m/s) = 2.13E-3		Szemcsék koptatottsága:	1	34.17			
D₁₀ (mm) = 0.325			f₀ (m²/kg) = 2.59		éles, kissé koptatott, erősen koptatott, gömbölyű	0.5	21.06			
D₃₀ (mm) = 0.841			ρ_s (g/cm³) = 2.66			0.25	5.26			
Földműveléskor besorolás =			kiváló		Szemcsék anyaga:	0.125	1.14			
Fagyveszélyességi besorolás =			fagyálló		üledékes/vulkánikus kőzet, ásvány, vegyes	0.063	0.20			
1000 órás kapilláris emelés =			kb. 0,2 - 0,4 m /							
AGYAG (Cl)	ISZAP (Si) <small>MSZ14043-2:1979 homokliszt</small>			HOMOK (Sa)			KAVICS (Gr)			KŐ (Co)
	finom (FSi)	közepes (MSi)	durva (CSI)	finom (FSa)	közepes (MSa)	durva (CSa)	finom (FGr)	közepes (MGr)	durva (CGr)	

Megjegyzések:

A vizsgálati eredmények csak a laboratóriumba beszállított és megvizsgált mintákra vonatkoznak. A mintavételi körülményekből és a beszállítás módjából eredő hibáért vagy károkért felelősséget nem vállalunk.

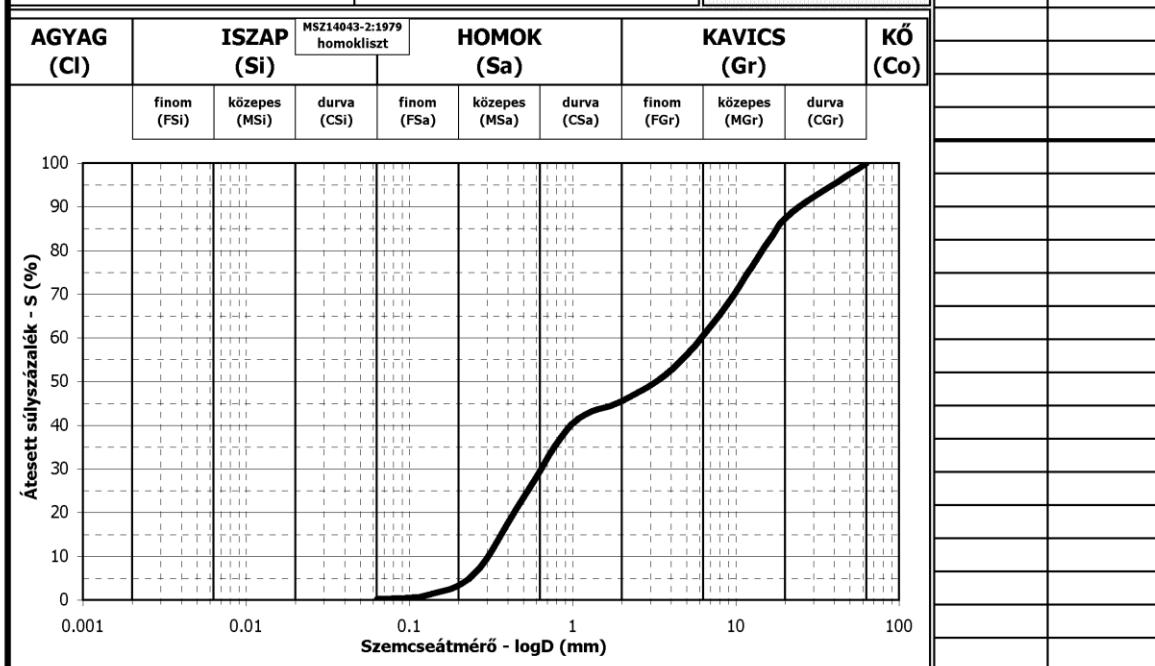
Hitelesítés:

A jegyzőkönyv nyomtatásának időpontja: 2014.11.24
Ellenőrizte és kiadta: Kecskés Gábor laborvezető

	SZIE Ybl Miklós Építéstudományi Kar Építőmérnöki Intézet Geotechnikai Laboratórium H-1146 Budapest, Thököly út 74.	Központi telefon: (+36-1) 252-1270 Laboratóriumi telefon: (+36-1) 252-1270/208 Laboratóriumi telefax: (+36-1) 252-1270/208 E-mail: kecskes.gabor@ybl.szie.hu
	VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV SZEMELOSZLÁSI VIZSGÁLAT (SZITÁLÁS - HIDROMETRÁLÁS) EREDMÉNYEI (az MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006, az MSZ EN ISO 14688-1:2003 és az MSZ EN ISO 14688-2:2005 szerint)	

Megbízó:		Helyszín:	
Mintát vette/szállította:		Mintavétel időpontja:	
Munkaszám:		Beérkezés időpontja:	
Kijelölés időpontja:		Jegyzőkönyv készítője: Kovács Andrea laboráns	

Minta azonosító naplósám	Minta vizsgálati naplósám	Minta vételi hely száma	Minta vételi mélység (m)	Érkezési víz-tartalom (%)	A talajminta azonosító leírása, jellemzése	Szem-méret D (mm)	Átesett anyag S (súly%)	
/6	/6/SzH	3	zsák			63	100.00	
Számított és származtatott jellemzők								
Agyag (Cl %) = 0.0			D₆₀ (mm) = 6.299			Színe:	22.4	88.96
Izszap (Si %) = 0.3			D_m (mm) = 2.633			világos szürke	16	82.30
Homok (Sa %) = 45.3			C_u (-) = 20.51			Megnevezése:	8	65.41
Kavics (Gr %) = 54.4			C_c (-) = 0.25			homokos kavics	4	52.69
Kő (Co %) = 0.0			k_{ZAMARIN} (m/s) = 1.61E-3			Szemcsék koptatottsága:	1	40.47
D₁₀ (mm) = 0.307			f₀ (m²/kg) = 2.95			éles, kissé koptatott, erősen koptatott, gömbölyű	0.5	23.52
D₃₀ (mm) = 0.691			ρ_s (g/cm³) = 2.66			Szemcsék anyaga:	0.25	6.00
Földműveléskor besorolás =			kiváló			üledékes/vulkánikus kőzet, ásvány, vegyes	0.125	1.12
Fagyveszélyességi besorolás =			fagyálló				0.063	0.26
1000 órás kapilláris emelés =			kb. 0,2 - 0,4 m /					



Megjegyzések: A vizsgálati eredmények csak a laboratóriumba beszállított és megvizsgált mintákra vonatkoznak. A mintavételi körülményekből és a beszállítás módjából eredő hibáért vagy károkért felelősséget nem vállalunk.	Hitelesítés: A jegyzőkönyv nyomtatásának időpontja: 2014.11.24 Ellenőrizte és kiadta: Kecskés Gábor laborvezető
--	--

Vízirtási görbe mérése

A feszültségkamrás próbamérés mintáinak talajfizikai jellemzői:

Szemcsés talajminta talajfizikai jellemzői

minta sor-száma	minta jele	d ₆₀ (mm)	d ₁₀ (mm)	U (-)	kavics (%)	homok (%)	hliszt (%)	hézagtényező (-)
1.	H	0,3	0,13	2,5	0,0	96,0	4,0	0,66

Kötött (plasztikus) talajminták talajfizikai jellemzői

minta sor-száma	minta jele	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	e ⁺ (-)	w ⁺ (%)	geológia ⁺⁺
2.	M2	35,7	18,1	17,6	0,720	27,18	Szeged környéki tavi agyag
3.	HL	53,6	24,5	29,1	0,641	23,04	budapesti pannon agyag
4.	MOL	52,5	23,1	29,4	0,720	27,85	Szeged környéki tavi agyag
5.	VI	72,4	24,5	47,9	0,750	26,24	Szeged környéki tavi agyag

+ - kiszáradási kísérlet eredményeiből számítva

++ - szakirodalomból (Rétháti, 1978)

Talajminták típusai

minta sorszáma	minta jele	zavartság	talajvízszint helyzete a mintavételhez viszonyítva
1.	H	zavart	légszáraz
2.	M2	zavartalan	talajvízszint alatt
3.	HL	zavartalan	talajvízszint felett
4.	MOL	zavartalan	talajvízszint alatt
5.	VI	zavartalan	talajvízszint alatt

A feszültségkamrás méréshez kidolgozott mérési jegyzőkönyv:

Minta jele:		Kísérlet kezdete:			
Gyűrű h= d=		Kísérlet vége:			
KEZDETI TÖMEG ADATOK					
nedves minta+gyűrű			nedves minta		
berendezés					
VÉGSŐ TÖMEG ADATOK					
berendezés					
nedves minta+ gyűrű			nedves minta		
száraz minta+ gyűrű			száraz minta		
gyűrű					
Szívás (atm)	Dátum	Eltelt idő	Tömeg	Minta tömeg	Víztartalom

A feszültségkamrás próbamérés víztartási kísérleteinek eredményei:

minta sorszáma	1. minta	2. minta	3. minta
ψ (kPa)	w (%)	w (%)	w (%)
1	22,03	27,00	25,26
5	20,27	-	-
10	18,29	26,96	24,63
20	8,57	26,38	24,42
30	3,23	26,38	24,21
50	2,68	24,68	23,58
250	2,07	18,22	21,91
400	1,58	16,40	21,28

A TAKI víztartási kísérleteinek eredményei (próbamérés)

minta sorszáma	3. minta	4. minta	5. minta
ψ (kPa)	w (%)	w (%)	w (%)
1	25,25 / 24,94	29,68 / 28,10	31,90 / 31,35
10	24,14 / 23,83	29,16 / 27,59	31,50 / 30,90
20	23,83 / 23,64	28,90 / 27,47	31,37 / 30,70
50	23,33 / 23,09	28,18 / 27,02	30,78 / 30,19
250	22,35 / 22,16	26,82 / 25,51	29,15 / 28,40
500	21,91 / 21,73	25,97 / 24,68	28,24 / 27,50

A függő vízoszlop módszerével végzett vizsgálatok (Havrán K.):

A minták tömegváltozása 4 cm szívóerőnél:

Minták jele	Tömeg [g]													
1	88,40	77,70	77,54	77,49	77,54	77,51	77,51	77,54	77,62	77,62	77,60	77,63	77,57	77,56
2	92,60	82,21	82,07	82,09	82,14	82,07	82,05	82,05	82,00	81,89	81,83	81,81	81,79	81,79
21	88,25	85,56	85,32	85,23	85,11	85,01	84,95	84,93	84,84	84,70	84,65	84,56	84,52	84,50
22	91,13	88,17	87,76	87,61	87,42	87,15	86,96	86,92	86,91	86,80	86,70	86,72	86,74	86,71
31	93,05	91,81	91,57	91,57	91,52	91,30	91,34	91,33	91,26	91,19	91,18	91,24	91,23	91,18
32	88,21	87,12	87,00	87,01	86,90	86,84	86,79	86,81	86,72	86,68	86,56	86,57	86,52	86,48
41	93,98	93,02	92,85	92,75	92,69	92,64	92,63	92,61	92,58	92,53	92,49	92,48	92,45	92,44
42	92,53	91,11	90,89	90,93	90,91	90,89	90,89	90,94	90,91	90,90	90,89	90,92	90,89	90,85
K1-2/1	93,48	87,32	86,54	86,09	86,03	85,45	85,17	85,08	85,10	84,95	84,82	84,77	84,76	84,74
K1-2/2	90,90	83,35	82,94	82,93	83,04	82,91	82,86	82,31	82,29	82,19	82,03	81,98	81,96	81,95
K1-3/1	93,35	90,10	89,87	89,71	89,66	89,53	89,48	89,39	89,38	89,33	89,28	89,21	89,20	89,16
K1-3/2	91,50	88,36	88,07	87,96	87,81	87,72	87,67	87,60	87,50	87,52	87,49	87,45	87,40	87,37
K2-3/1	94,33	93,48	93,27	93,28	93,20	93,15	93,14	93,12	93,05	92,99	92,90	92,93	92,88	92,86
K2-3/2	93,73	92,79	92,65	92,56	92,44	92,39	92,39	92,42	92,31	92,27	92,19	92,18	92,17	92,12
K2-4/1	93,30	92,21	91,96	91,97	91,91	91,86	91,85	91,85	91,82	91,77	91,75	91,79	91,82	91,76
K2-4/2	91,83	90,26	90,12	90,11	90,04	90,03	90,05	90,12	90,10	90,08	90,06	90,16	90,16	90,10
K1-4/1	94,65	93,07	92,93	92,89	92,80	92,72	92,71	92,69	92,65	92,61	92,54	92,54	92,53	92,50
K1-4/2	92,64	90,51	90,09	89,99	89,76	89,69	89,65	89,62	89,61	89,56	89,53	89,52	89,50	89,45
K3-4/1	91,51	90,70	90,63	90,66	90,63	90,55	90,59	90,55	90,53	90,46	90,43	90,40	90,39	90,34
K3-4/2	91,99	90,78	90,55	90,55	90,51	90,45	90,49	90,47	90,47	90,40	90,39	90,39	90,39	90,31

A minták tömegváltozása 7 cm szívóerőnél:

Minták jele	Tömeg[g]					
1	77,13	77,11	77,10	77,11	77,11	77,12
2	81,30	81,28	81,26	81,27	81,27	81,31
21	80,72	80,08	79,95	79,87	79,94	79,91
22	82,64	82,49	82,36	82,32	82,32	82,30
31	91,07	90,98	90,95	90,90	90,86	90,84
32	86,22	86,12	86,07	85,99	85,93	85,90
41	92,29	92,26	92,25	92,23	92,23	92,24
42	90,75	90,71	90,68	90,66	90,64	90,63
K1-2/1	83,13	83,06	83,02	83,01	83,03	83,03
K1-2/2	80,64	80,54	80,52	80,51	80,51	80,50
K1-3/1	88,51	88,20	87,99	87,85	87,78	87,72
K1-3/2	86,59	86,33	86,19	86,07	85,96	85,90
K2-3/1	92,40	92,23	92,13	92,01	91,99	91,95
K2-3/2	91,55	91,06	90,93	90,81	90,74	90,70
K2-4/1	91,71	91,66	91,67	91,59	91,51	91,48
K2-4/2	89,87	89,78	89,79	89,72	89,71	89,67
K1-4/1	92,32	92,25	92,08	92,02	91,99	91,95
K1-4/2	89,21	89,13	89,10	89,03	89,02	89,03
K3-4/1	90,29	90,26	90,27	90,22	90,19	90,14
K3-4/2	90,28	90,09	90,07	89,98	89,92	89,86

A minták tömegváltozása 15 cm szívóerőnél:

Minták jele	Tömeg[g]			
1	76,73	76,35	76,46	76,54
2	80,88	80,58	80,70	80,77
21	78,42	77,97	78,16	78,21
22	80,65	80,20	80,41	80,47
31	83,17	82,56	82,55	82,55
32	78,17	77,70	77,70	77,73
41	92,04	91,91	91,94	91,97
42	90,44	90,31	90,33	90,37
K1-2/1	82,32	81,91	82,12	82,16
K1-2/2	79,86	79,49	79,65	79,71
K1-3/1	83,52	83,10	83,23	83,24
K1-3/2	81,77	81,49	81,55	81,57
K2-3/1	84,81	84,51	84,56	84,56
K2-3/2	83,95	83,67	83,72	83,74
K2-4/1	90,33	89,85	89,77	89,74
K2-4/2	87,98	87,59	87,58	87,60
K1-4/1	91,57	91,31	91,31	91,30
K1-4/2	88,52	88,24	88,26	88,24
K3-4/1	87,23	86,48	86,32	86,27
K3-4/2	88,71	87,79	87,59	87,50

A minták tömegváltozása 15 cm szívóerőnél:

Minták jele	Tömeg[g]					
	1	2	21	22	31	32
1	76,47	76,46	76,46	76,45		
2	80,70	80,69	80,70	80,70	80,68	80,68
21	78,04	78,02	78,01	77,99		
22	80,30	80,24	80,22	80,22	80,20	80,22
31	81,43	81,38	81,36	81,34		
32	76,70	76,63	76,61	76,58	76,57	76,57
41	91,83	91,78	91,74	91,71	91,66	91,64
42	90,14	90,07	90,04	90,01	89,98	89,97
K1-2/1	82,09	82,06	82,09	82,06		
K1-2/2	79,63	79,60	79,60	79,59	79,59	79,59
K1-3/1	82,96	82,90	82,90	82,88		
K1-3/2	81,21	81,16	81,15	81,12	81,12	81,11
K2-3/1	84,02	84,00	83,99	83,96		
K2-3/2	83,22	83,17	83,16	83,13	83,13	83,13
K2-4/1	88,74	88,51	88,34	88,20	88,12	87,97
K2-4/2	86,73	86,48	86,19	86,08	86,01	85,97
K1-4/1	90,16	89,82	89,59	89,49	89,33	89,30
K1-4/2	87,08	86,85	86,66	86,59	86,54	86,51
K3-4/1	82,48	82,33	82,21	82,19	82,16	82,14
K3-4/2	83,08	82,80	82,62	82,55	82,51	82,48

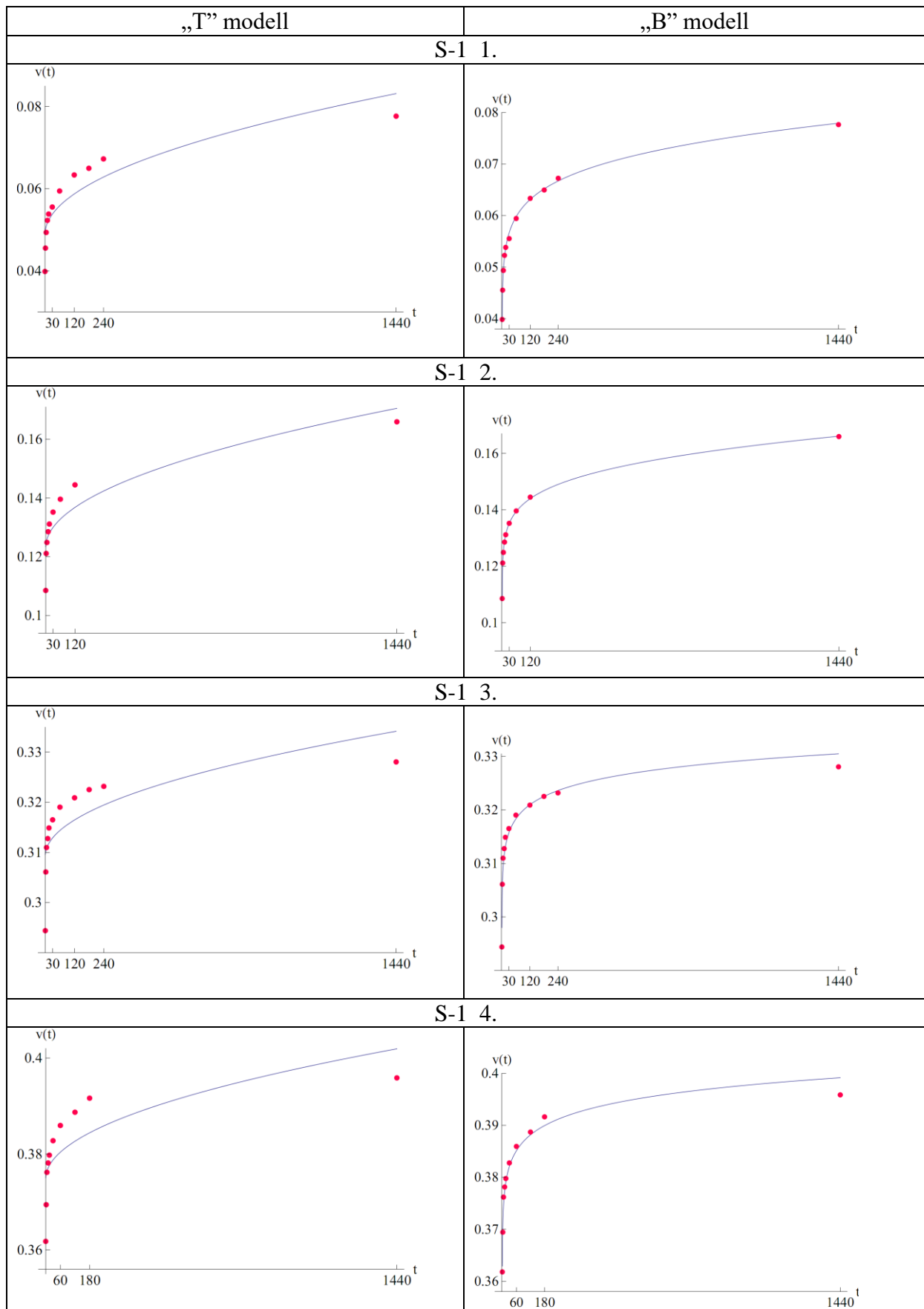
A minták víztartalma a mért szívóerőnél:

MINTA	Ts	1cm pF0	4cm pF0,602	7cm pF0,845	15cm pF1,176	20cm pF1,301
1(2-4mm)	1,53	45,9	7,7	6,1	4,1	3,8
2(1-2mm)	1,53	39,1	25,9	9,7	3,7	2,9
3(0,5-1mm)	1,58	46,8	40,2	39,0	9,7	5,5
4(0,25-0,5mm)	1,64	45,5	40,0	39,3	38,4	37,2
K1-2/1	1,69	43,8	13,0	7,0	3,9	3,5
K1-3/1	1,65	41,0	26,3	21,2	5,4	4,1
K2-3/1	1,72	41,0	35,8	32,6	6,5	4,4
K2-4/1	1,79	36,0	30,6	29,6	23,5	17,2
K1-4/1	1,82	35,4	27,8	25,9	23,6	16,5
K3-4/1	1,64	43,2	39,1	38,4	24,7	10,1

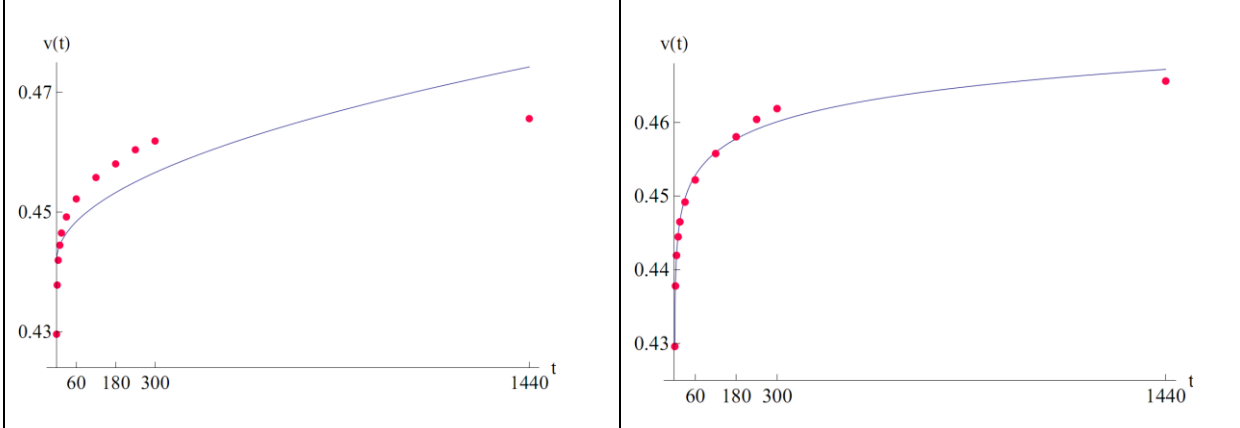
A minták víztartalma a mért szívóerőnél – kontrollmérés (TAKI):

Nagy hengerek												
Szívóerő(cm)		1	2,5	10	31,5	100	200	501		2500		15000
Minta	Ts	pF0	pF0,4	pF1,0	pF1,5	pF2,0	pF2,3	pF2,7	Ts	pF3,4	Ts	pF4,2
1(2-4mm)	1,59	23,7	22,3	4,1	3,0	2,8	2,5	2,4	1,50	1,8	1,54	1,9
1(2-4mm)	1,58	25,7	21,9	4,3	3,0	2,9	2,6	2,5				
2(1-2mm)	1,60	34,6	32,7	4,5	3,2	3,0	2,4	2,0	1,63	1,4	1,61	1,3
2(1-2mm)	1,58	33,9	31,6	4,4	2,9	2,5	2,1	1,8				
3(0,5-1mm)	1,49	43,3	41,4	9,5	3,7	3,5	2,5	1,8	1,58	1,4	1,60	1,3
3(0,5-1mm)	1,48	43,3	40,9	9,4	4,3	4,2	3,8	3,0				
4(0,25-0,5mm)	1,60	43,3	41,9	38,9	5,3	5,2	4,9	4,2	1,61	1,3	1,58	1,3
4(0,25-0,5mm)	1,61	44,1	42,7	39,7	5,4	5,3	5,1	4,6				
Kicsi hengerek												
Keverék												
Szívóerő(cm)		1,00	1,25	8,75	30,25	98,75	198,75	499,75		2498,75		14998,75
Minta	Ts	pF0	pF0,097	pF0,942	pF1,481	pF1,995	pF2,298	pF2,699	Ts	pF3,398	Ts	pF4,176
K 1-2/3	1,72	44,0	43,0	5,3	3,1	2,8	2,5	2,4	1,67	2,0	1,55	1,7
K 1-2/4	1,64	43,0	41,6	4,9	2,7	2,5	2,3	2,2				
K 1-3/3	1,64	41,3	39,4	8,6	2,9	2,7	2,2	1,9	1,67	1,9	1,71	1,8
K 1-3/4	1,64	42,3	39,7	9,3	3,0	2,7	2,4	2,1				
K 2-3/3	1,69	41,6	40,4	8,4	3,0	2,8	2,1	1,8	1,63	1,4	1,61	1,2
K 2-3/4	1,61	40,8	40,0	8,9	2,8	2,6	2,2	1,8				
K 2-4/3	1,71	35,2	33,5	18,9	4,8	4,4	3,0	2,2	1,75	1,5	1,69	1,1
K 2-4/4	1,69	34,5	32,6	21,9	5,5	5,3	4,9	3,9				
K 1-4/3	KIÖMLŐTT A MINTA !!!!											1,5
K 1-4/4	1,80	37,5	34,5	24,3	5,2	4,9	4,0	2,7	1,76	1,9	1,74	
K 3-4/3	1,69	44,6	43,9	38,0	5,0	4,8	4,5	3,8	1,65	1,4	1,67	1,3
K 3-4/4	1,68	44,3	43,0	37,3	4,7	4,4	4,3	3,7				

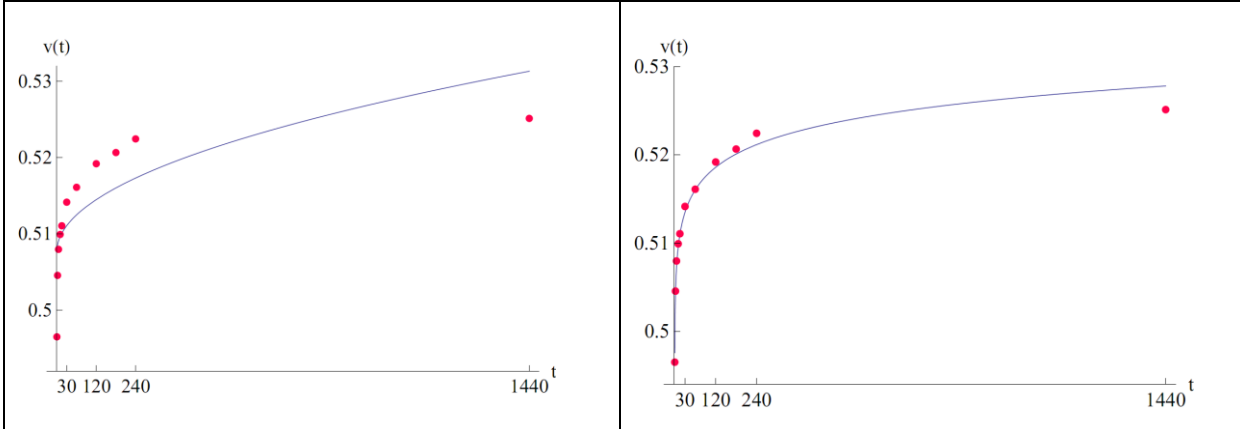
M6 Konszolidációs modellek illesztése („T” és „B” modell)



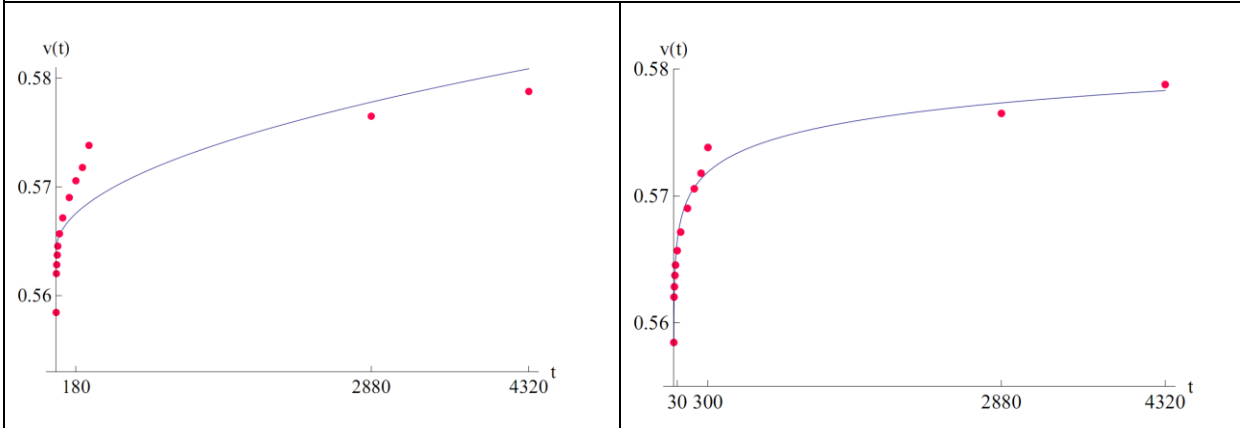
S-1 5.



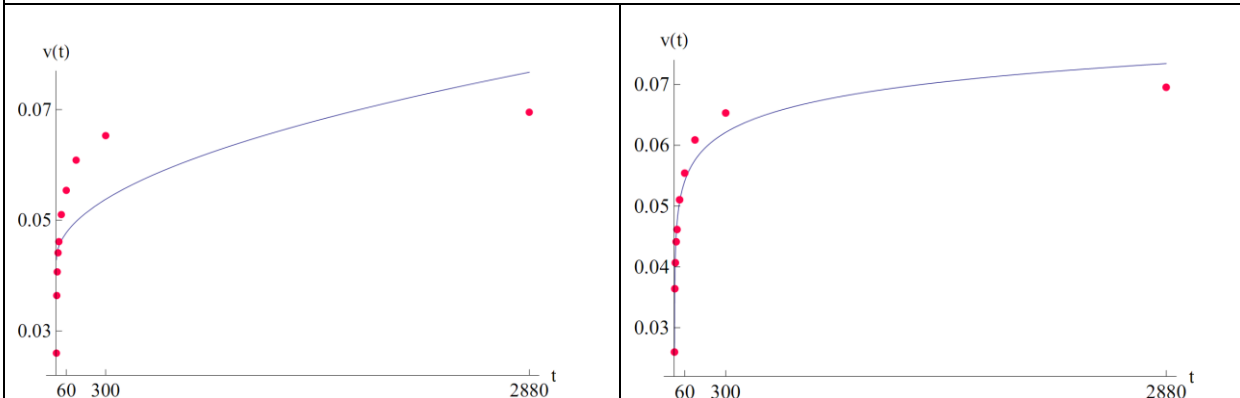
S-1 6.



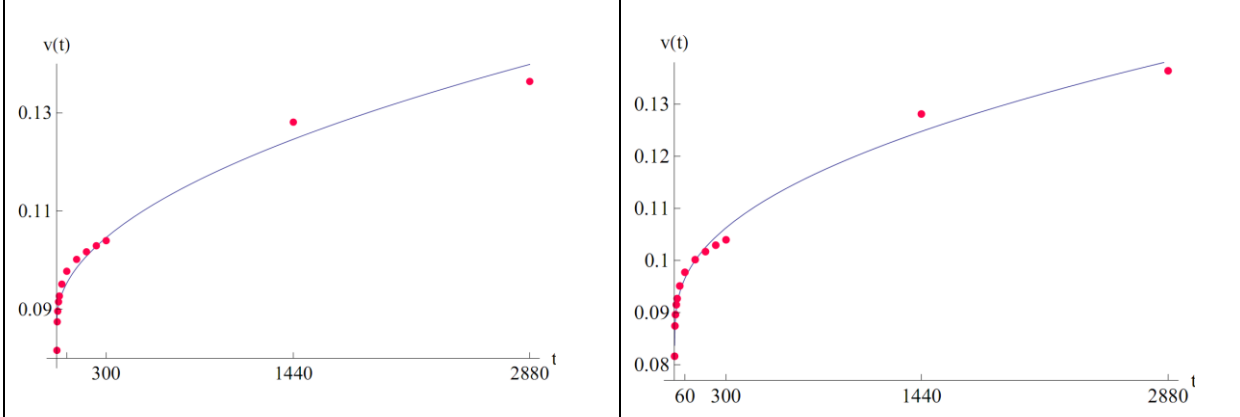
S-1 7.



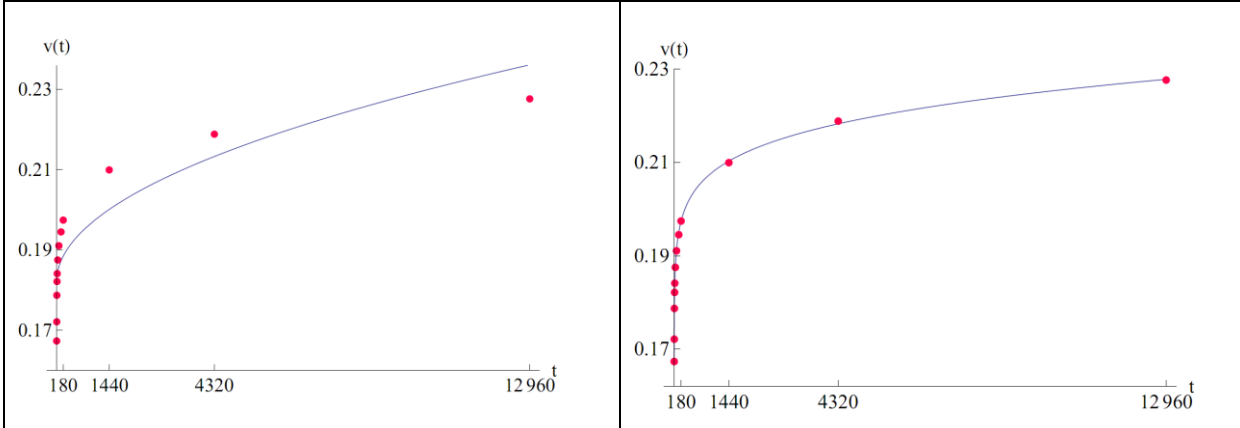
S-2 1.



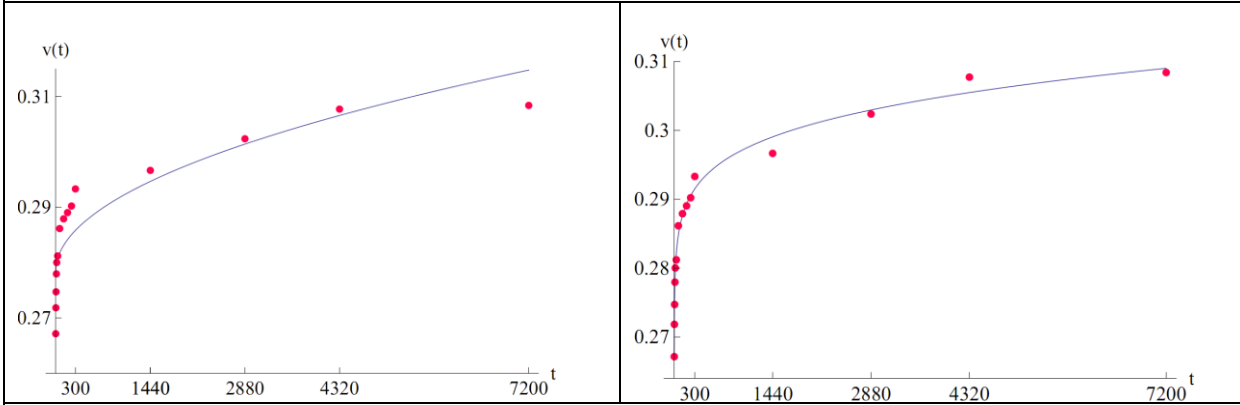
S-2 2.



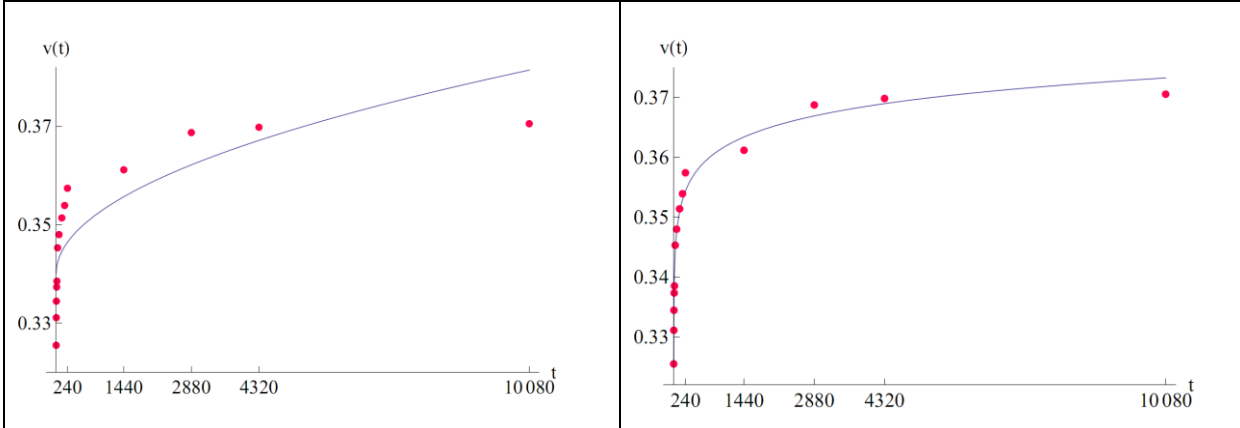
S-2 3.



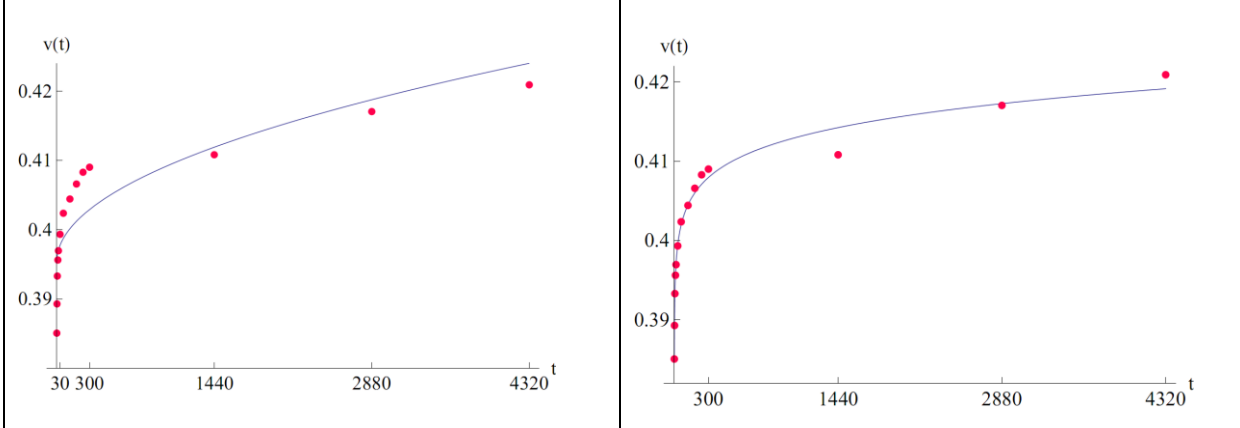
S-2 4.



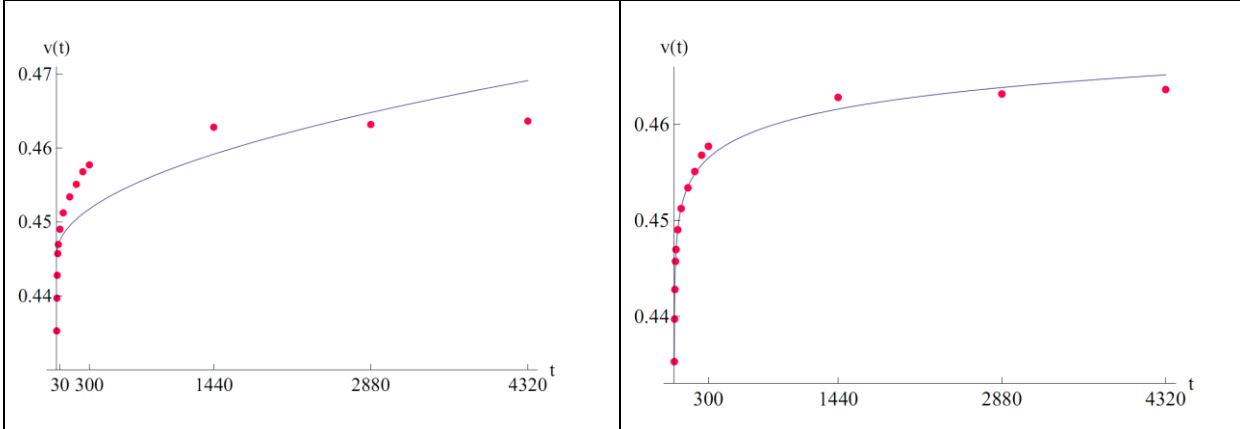
S-2 5.



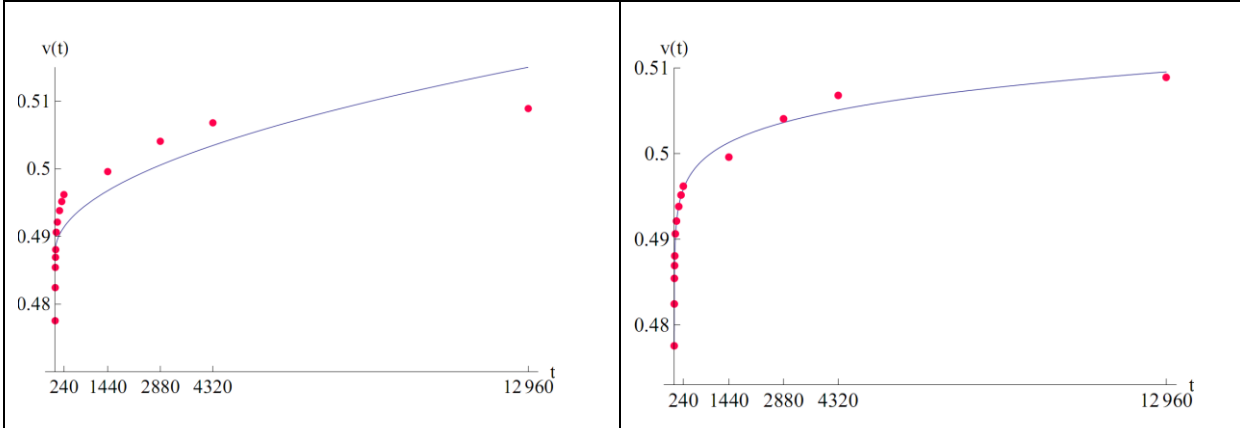
S-2 6.



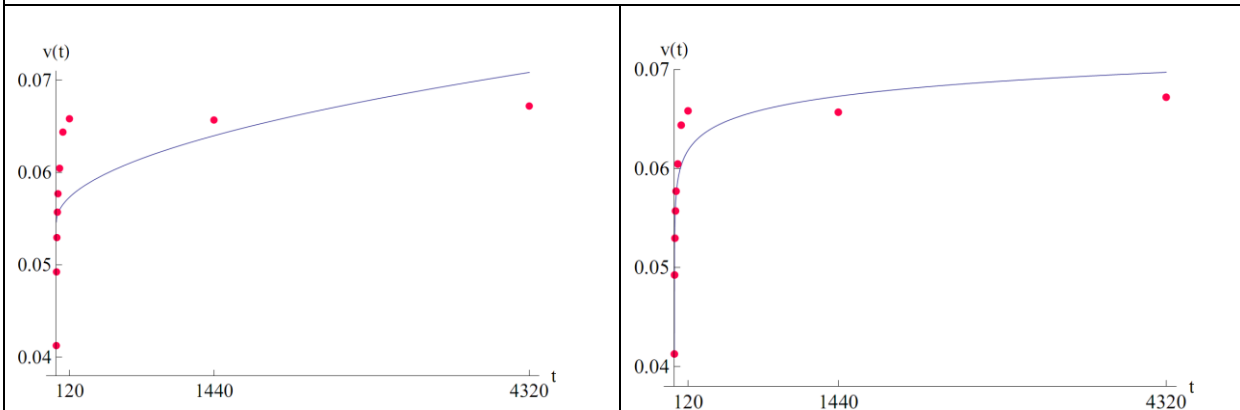
S-2 7.



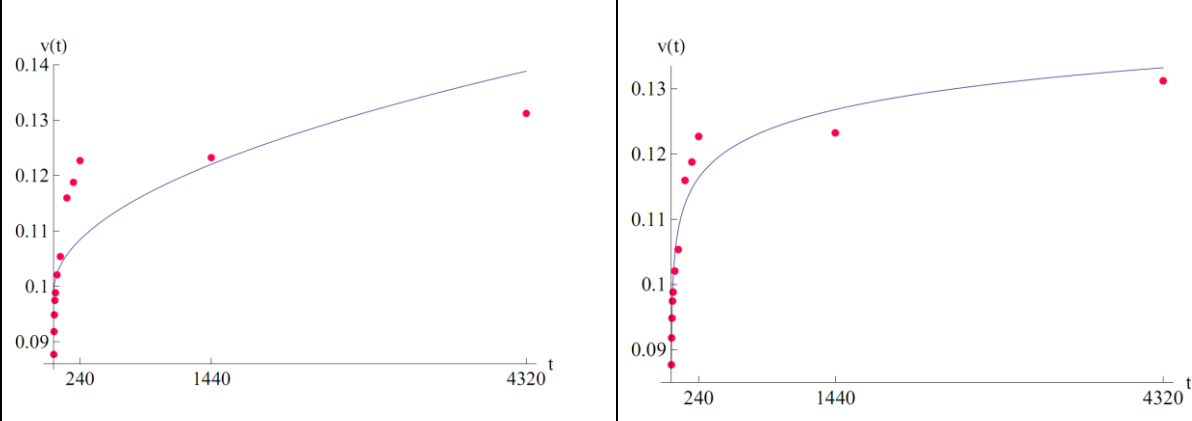
S-2 8.



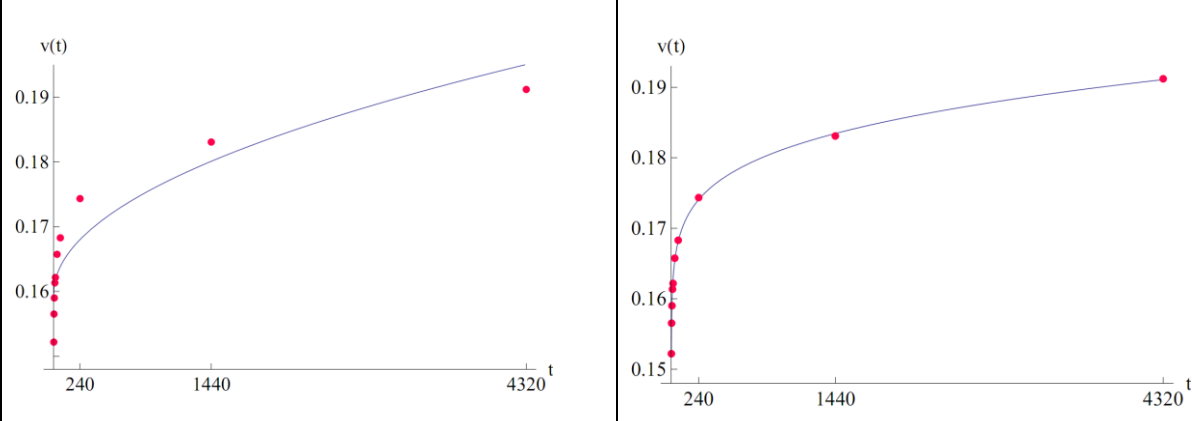
S-3 1.



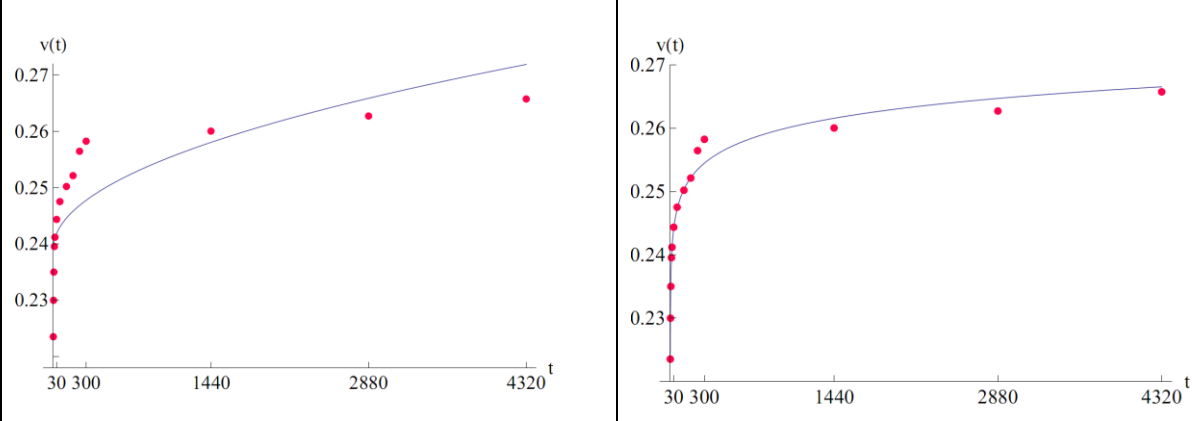
S-3 2.



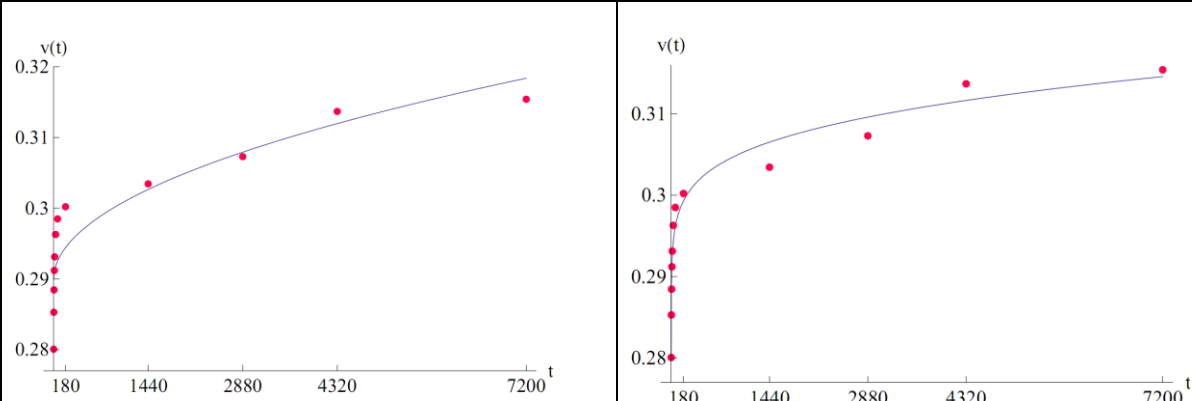
S-3 3.



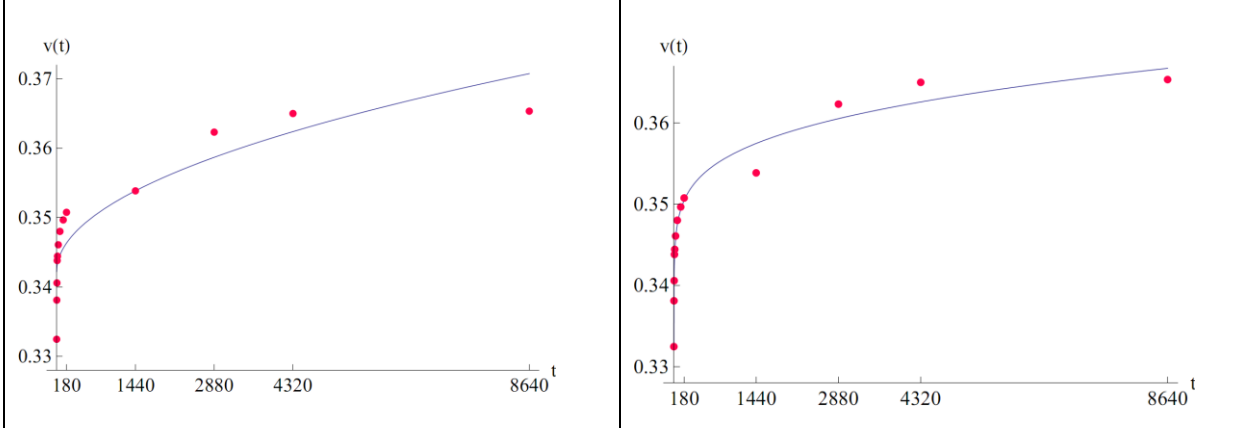
S-3 4.



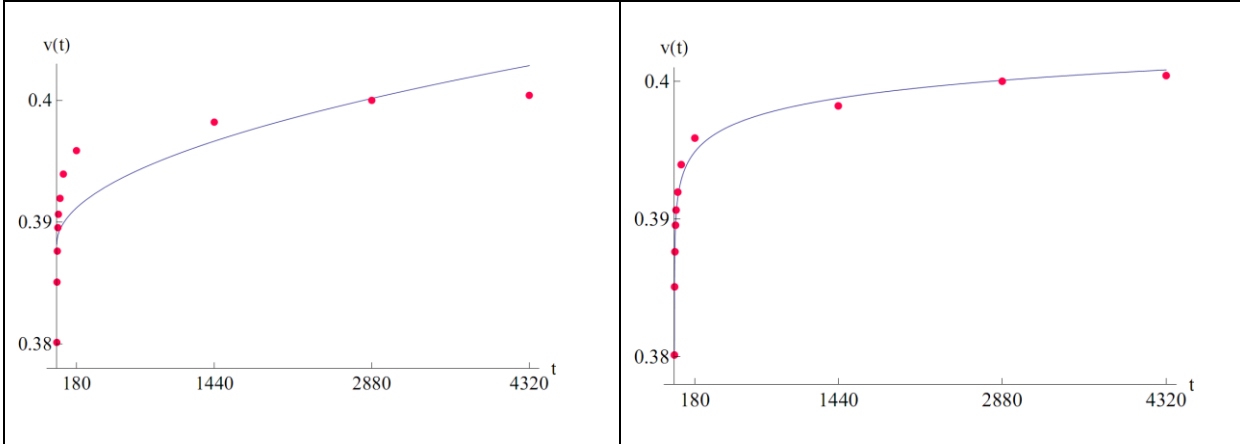
S-3 5.



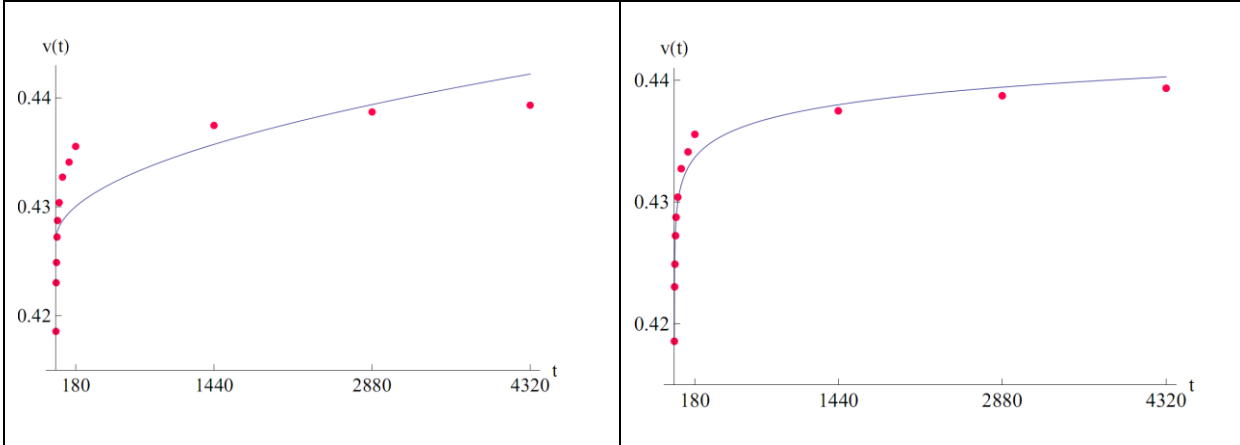
S-3 6.



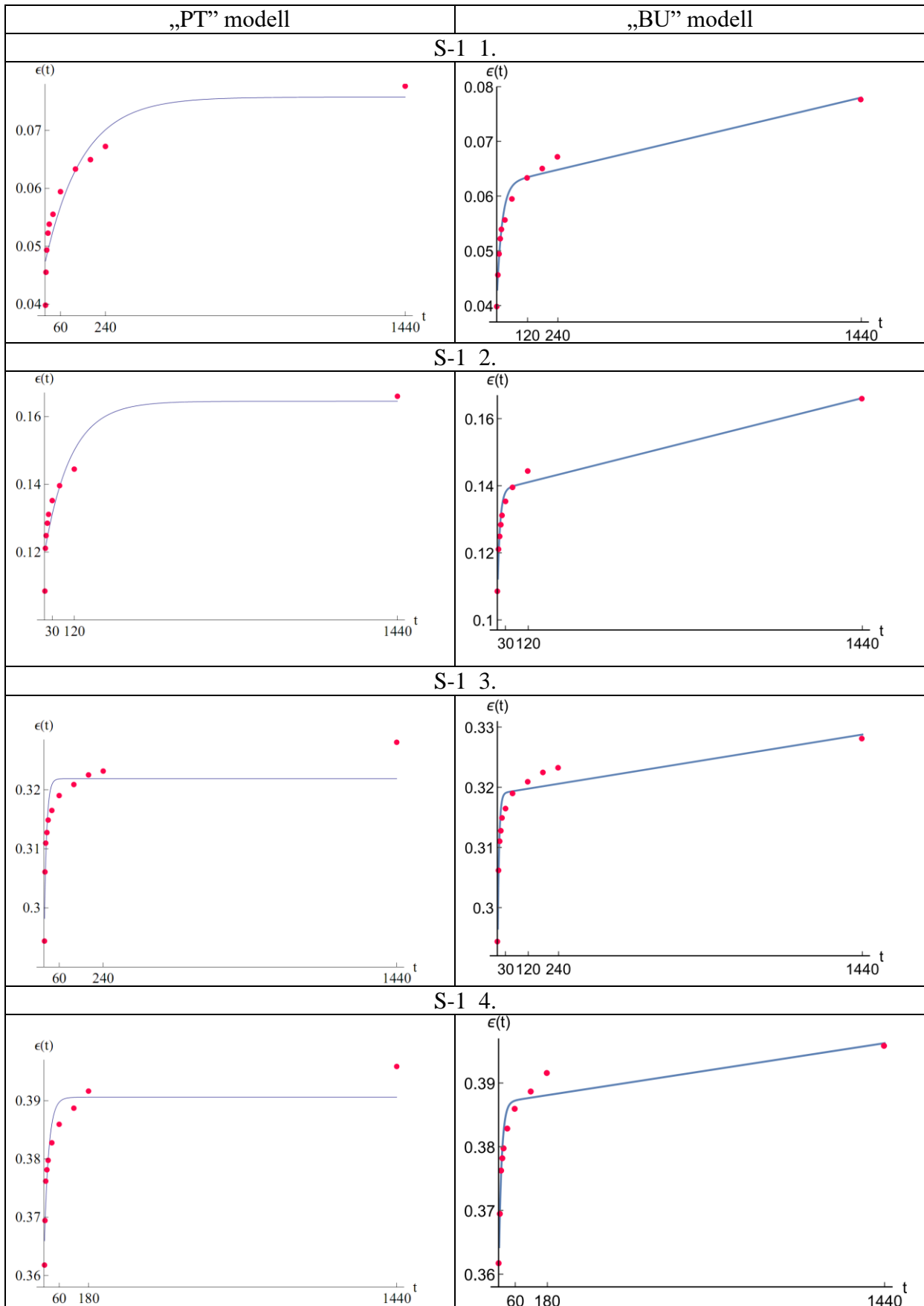
S-3 7.

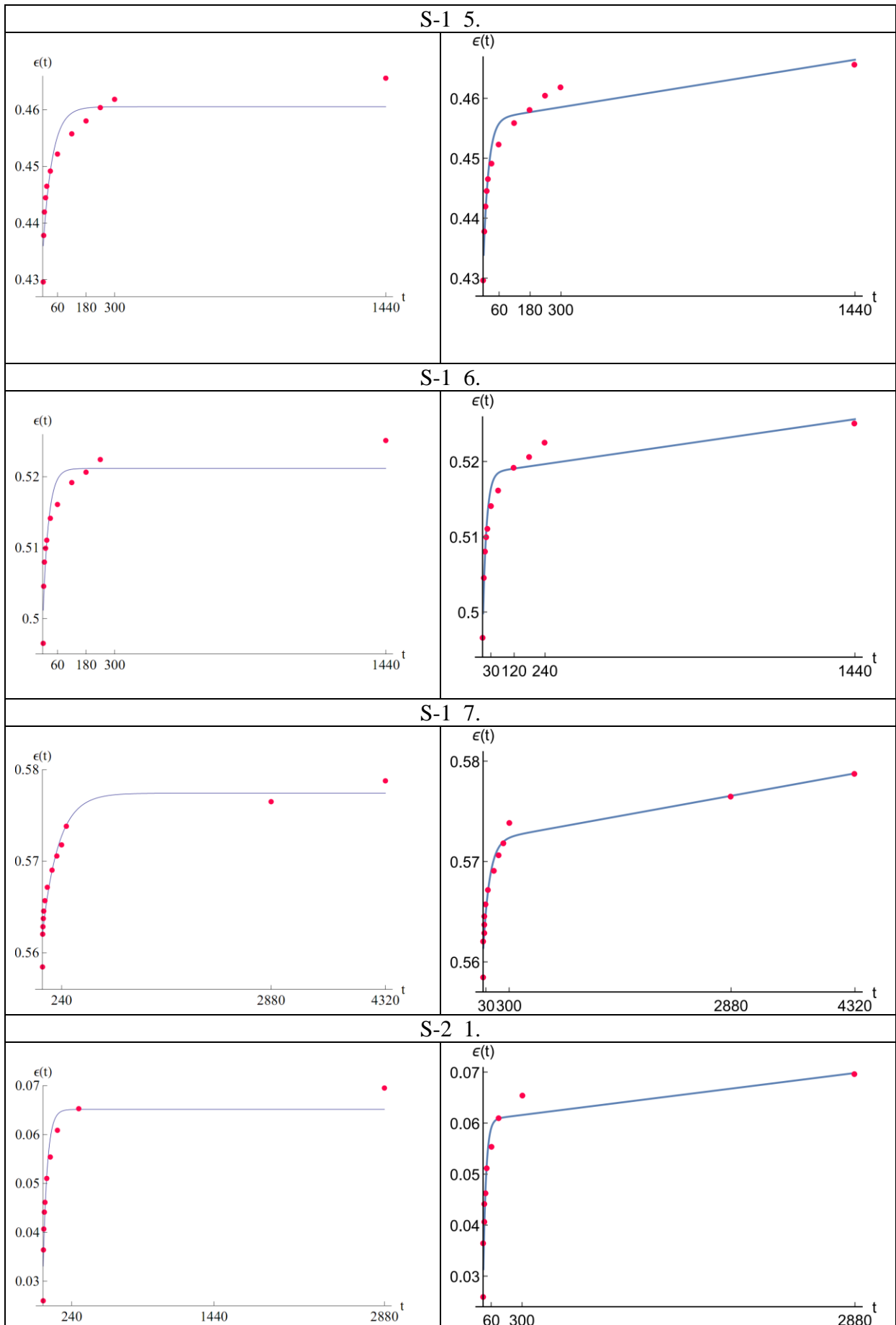


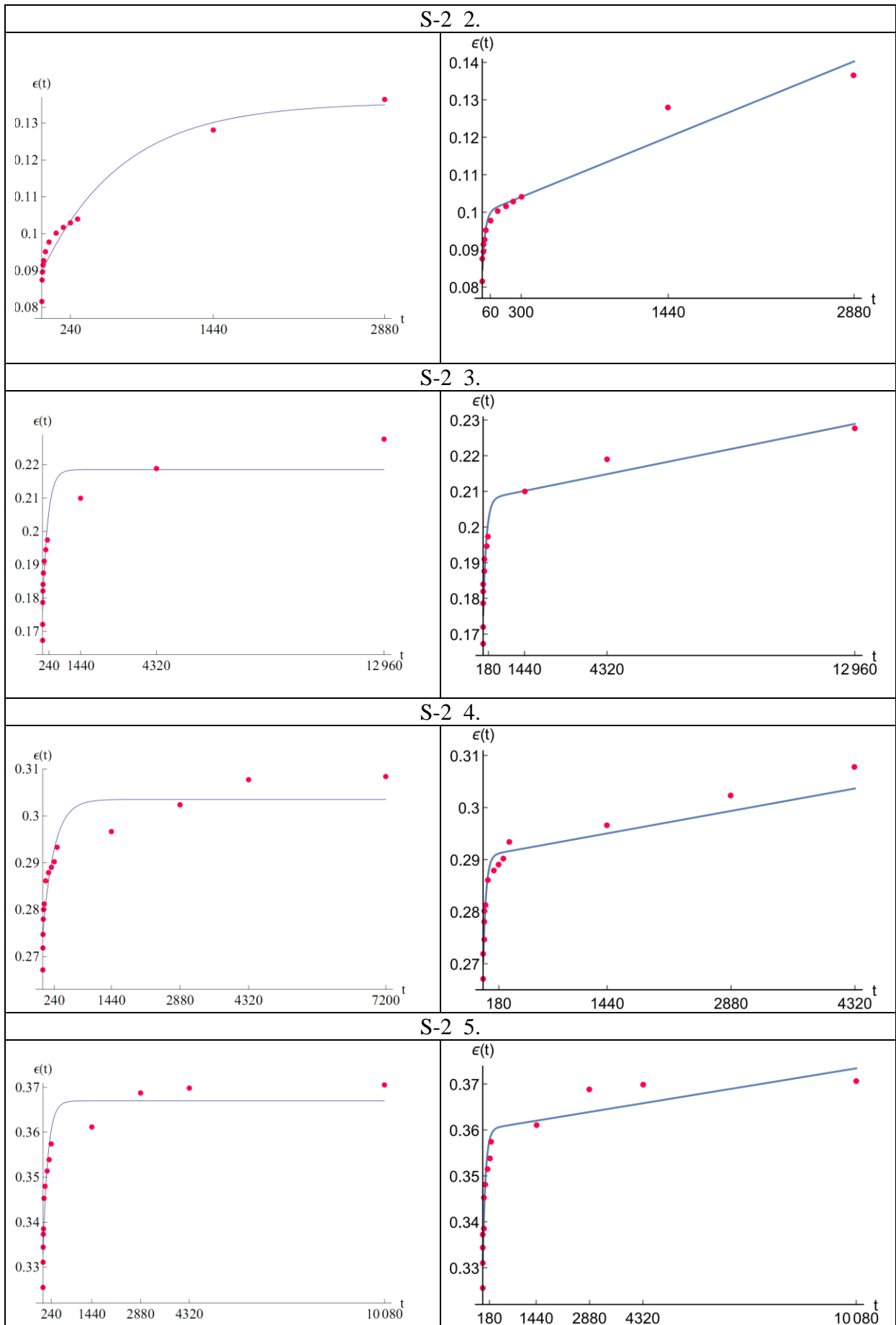
S-3 8.

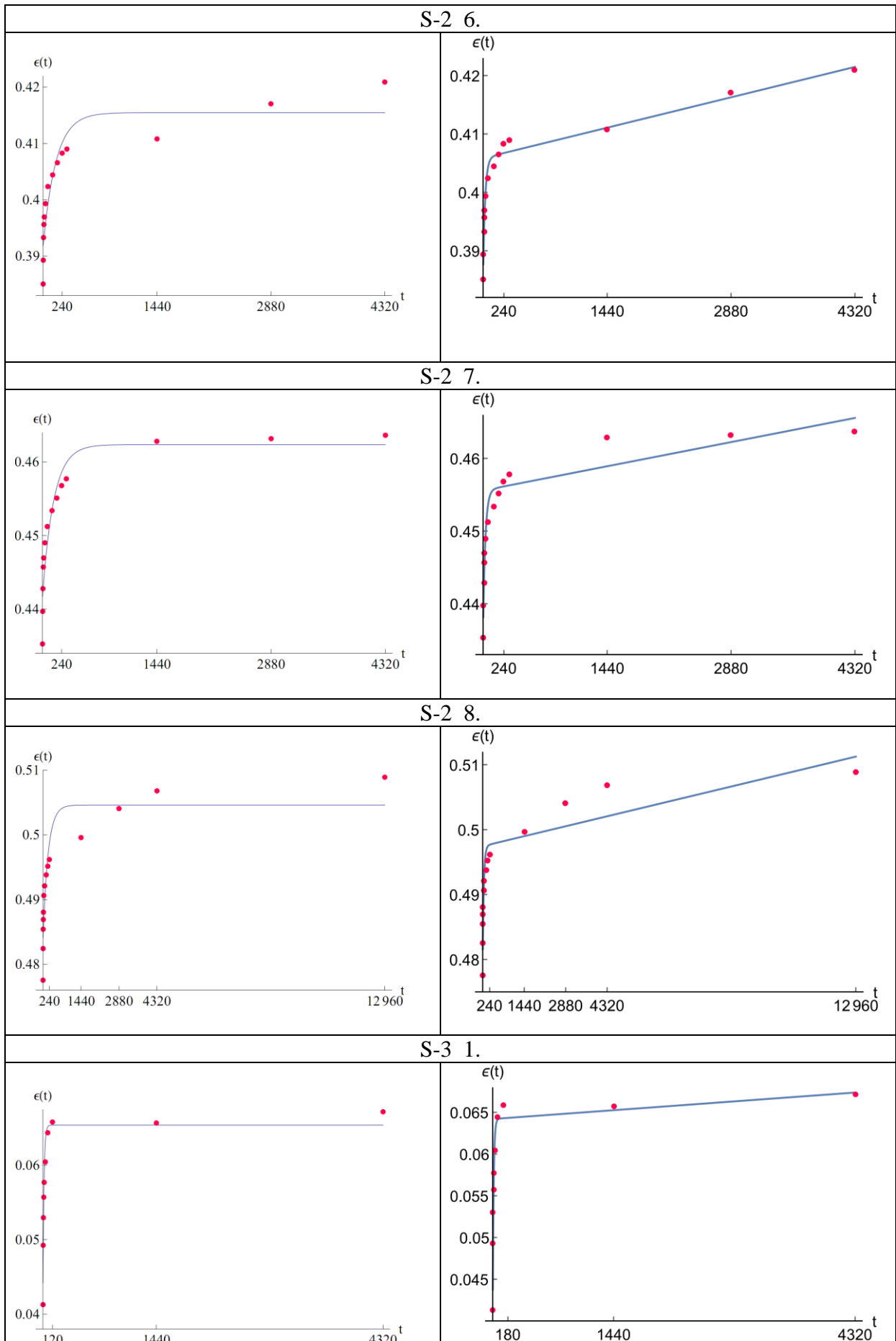


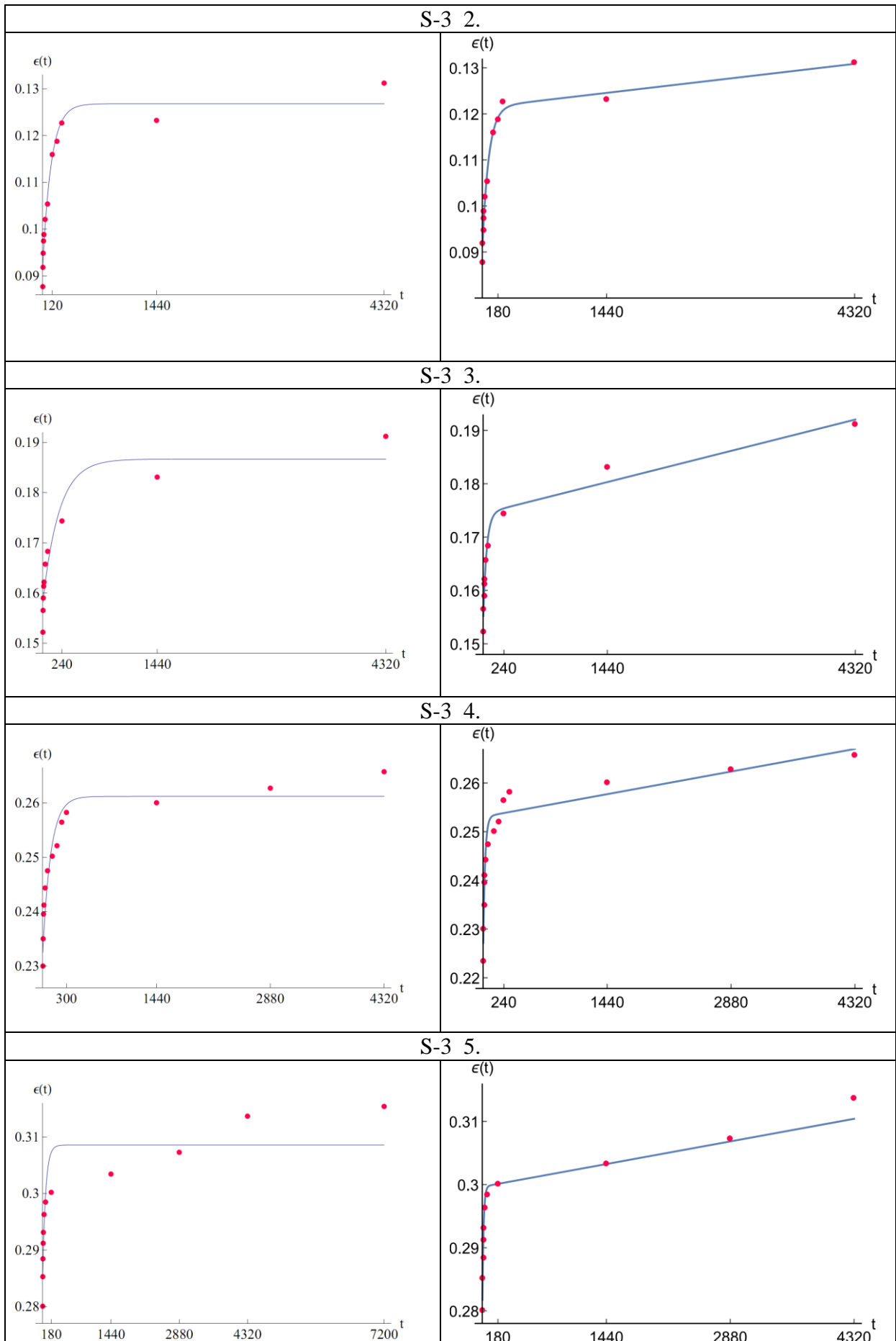
M7 Reológiai modellek illesztése („PT” és „BU” modell)

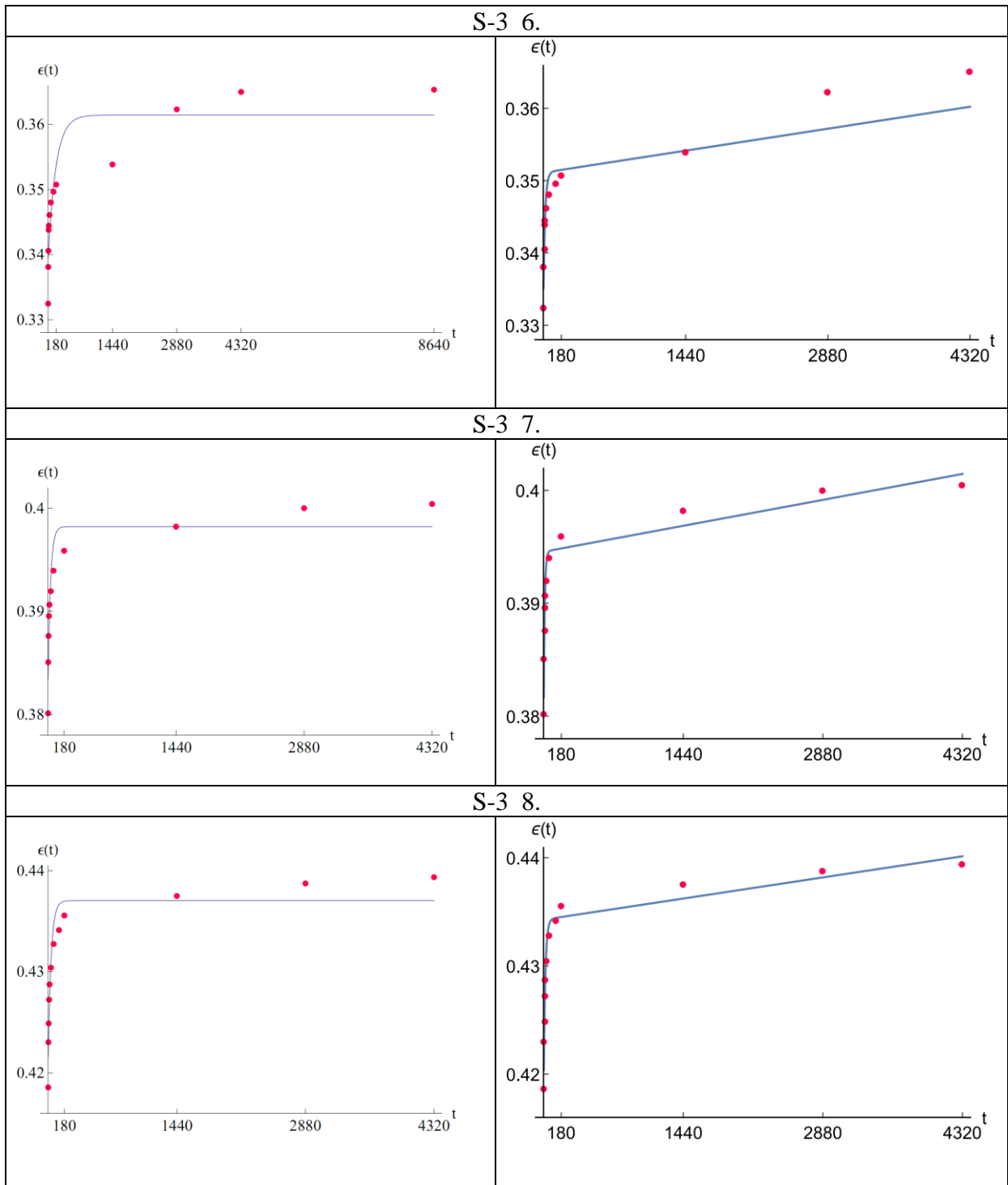




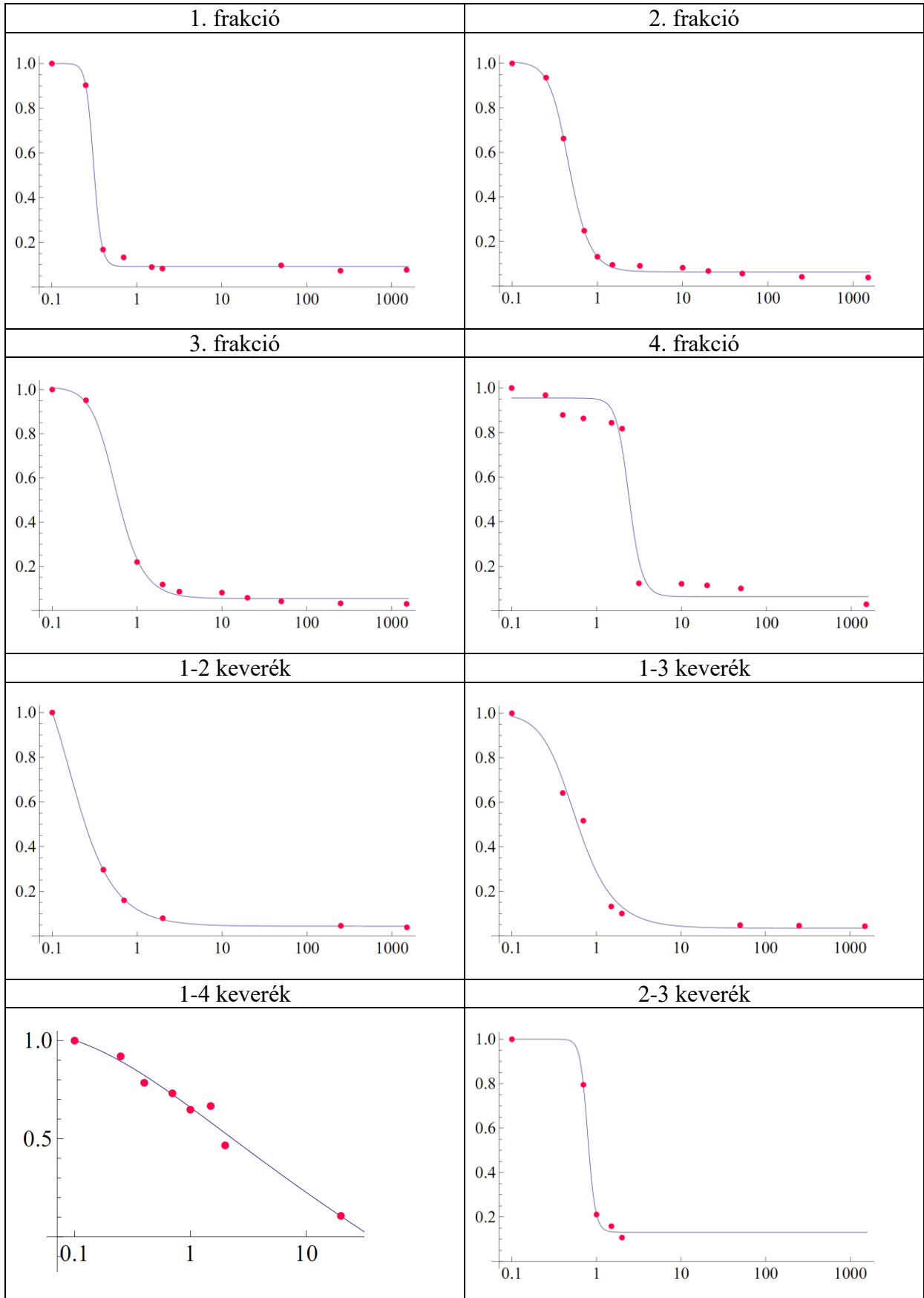


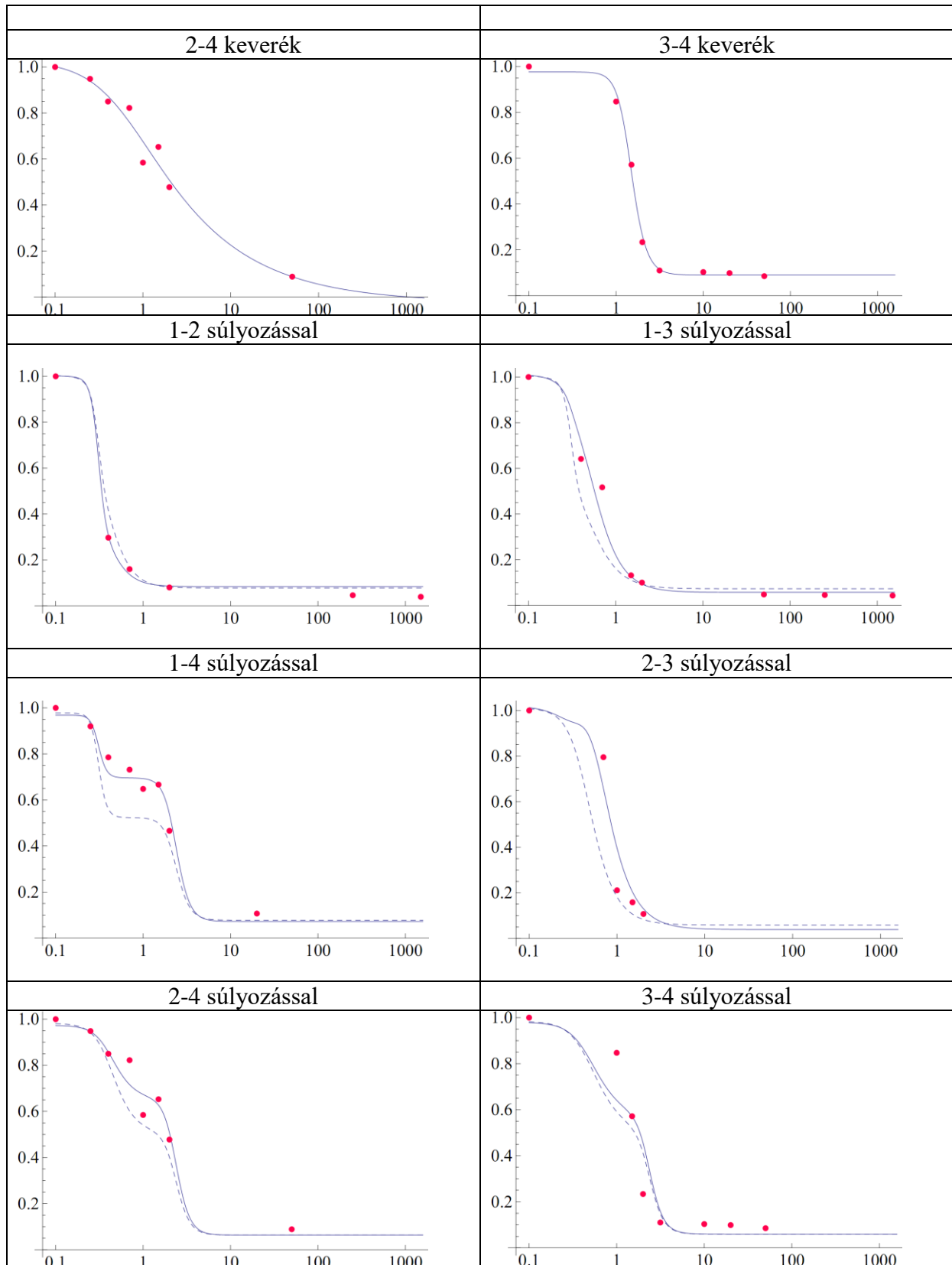






M8 Vízirtási görbe illesztése





M9 PRHK méréseinek rendszerezése

Süllyedésmérés eredményei

Y = 630... X= 225...																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2006																	
2007																	
2008																	
2009 fele	555.93	513.5	556.84	609.55	642.52	702.39	776.7	844.62	896.27	957.37	977.9	944.59	920	898.59	863.26	826.8	
	800.39	748.91	668.55	593.26	531.15	478.6	481.53	509.04	540.1	582.63	618.38	710.32	776.65	834.04	923.21	911.09	
	163.393	163.421	163.377	162.502	161.4	161.741	161.88	161.497	161.354	162.267	160.561	159.814	160.438	160.803	160.946	163.387	
2010	555.92	513.51	556.86	609.52	642.49	702.4	776.71	844.65	896.31	957.38	977.88	944.61	920	898.59	863.27	826.81	
	800.37	748.91	668.56	593.27	531.11	478.58	481.49	509.01	540.07	582.61	618.37	710.32	776.63	834.02	923.18	911.07	
	163.393	163.407	163.309	162.394	161.282	161.64	161.716	161.355	161.177	162.165	160.521	159.74	160.401	160.816	160.949	163.363	
2011	555.93	513.49	556.82	609.47	642.44	702.41	776.72	844.69	896.38	957.41	977.83	944.62	920.01	898.58	863.27	826.8	
	800.38	748.91	668.55	593.15	531.1	478.55	481.47	508.95	540.04	582.61	618.39	710.33	776.64	834.04	923.21	911.04	
	163.365	163.367	163.183	162.121	161.022	161.458	161.442	161.106	160.889	161.939	160.331	159.562	160.369	160.774	160.96	163.227	
2012	555.93	513.46	556.78	609.42	642.39	702.4	776.74	844.75	896.43	957.42	977.8	944.66	919.99	898.59	863.27	826.8	
	800.39	748.91	668.56	593.11	531.08	478.53	481.43	508.91	540.02	582.6	618.39	710.32	776.6	834.03	923.21	911.02	
	163.299	163.325	163.066	161.991	160.885	161.373	161.288	160.962	160.739	161.771	160.184	159.304	160.174	160.747	160.944	163.123	
2013	555.94	513.45	556.76	609.38	642.38	702.4	776.73	844.74	896.47	957.48	x	x	920.03	898.56	863.25	826.77	
	800.38	748.9	668.56	593.06	531.06	478.53	481.42	508.9	540.04	582.63	x	x	776.59	834.01	923.18	910.99	
	163.274	163.28	162.928	161.838	160.729	161.276	161.135	160.792	160.605	161.637	x	x	160.041	160.697	160.91	162.993	
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	51 (10)	52 (9)	53 (8)	
														529.520	571.79	586.640	
														707.000	615.39	625.400	
														164.020	159.67	164.940	
														529.730	571.83	586.720	
														706.990	615.4	625.430	
														163.830	159.63	164.720	
														529.760	571.86	586.770	
														707.010	615.41	625.440	
														163.780	159.58	164.510	
773.18	710.71	686.88	736.78	819.11	863.6	911.93	x	885.92	857.81	837.48	818.21	787.1	755.89	529.660	571.77	586.680	
883.37	869.44	554.56	521.39	547.92	572.63	600.57	x	685.14	753.56	807.84	854.59	842.14	832.67	706.940	615.39	625.380	
163.128	163.097	173.229	173.045	173.114	172.25	171.687	x	172.906	173.523	173.832	173.861	173.531	173.095	163.720	159.53 (15)	164.330	
773.2	710.71	686.87	736.79	819.13	863.7	912.04	x	886.02	857.87	837.51	818.22	787.08	755.87	529.690	571.76	586.700	
883.37	869.45	554.52	521.33	547.85	572.54	600.53	x	685.18	753.54	807.86	854.61	842.16	832.73	706.940	615.34	625.320	
163.073	163.033	172.941	172.756	172.802	171.893	171.252	x	172.595	173.18	173.54	173.585	173.27	172.814	163.676	159.48 (15)	164.229	
773.19	710.72	686.82	736.76	819.16	863.82	912.2	x	886.21	858.05	837.56	818.24	787.12	755.84	529.680	571.71	586.680	
883.37	869.46	554.44	521.22	547.68	572.37	600.47	x	685.18	753.6	807.93	854.62	842.24	832.84	706.910	615.34	625.280	
162.856	162.862	172.442	172.245	172.287	171.331	170.57	x	172.064	172.7	173.059	173.159	172.887	172.417	163.615	159.34 (15)	164.014	
773.2	710.72	686.78	736.73	819.21	863.91	912.31	556.8	886.34	858.21	837.63	x	787.14	755.85	529.664	571.700	586.682	
883.39	869.47	554.33	521.11	547.54	572.29	600.4	668.56	685.2	753.64	807.98	x	842.27	832.98	706.899	615.324	625.223	
162.67	162.722	172.103	171.89	171.926	170.936	170.135	163.066	171.704	172.345	172.758	x	172.612	172.124	163.580	159.226	163.918	
773.14	710.71	686.72	736.72	819.24	x	912.41	x	886.49	858.34	837.71	818.28	787.17	755.86	529.660	571.67	586.640	
883.44	869.54	554.24	521.01	547.44	x	600.39	x	685.2	753.64	808	854.64	842.29	833	706.880	615.33	625.270	
162.522	162.582	171.735	171.595	171.629	x	169.745	x	171.355	172.023	172.529	172.624	172.374	171.858	163.533	159.094	163.775	

A lerakott hulladék összetétele:

	2000	2001	2002	2003
papír	13.7	16	16.3	15.6
egészségügyi hulladék	1.3	2	2.3	2.5
műanyag	9.9	13	15.9	14.9
textil	3.5	2.5	3	3
növényi és konyhai hulladék	40.5	40.4	30.7	29.7
üveg	2.5	2.2	2.4	2.5
fém	1.9	1.6	1.8	1.9
egyéb finom rész	26.5	21.9	25.7	29.4
veszélyes hulladék	0.2	0.3	0.4	0.5

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
biológiailag bomló	29.3	25.1	25.6	24.4	24.7	25.3	23.10	31.1
papír	15.6	13.1	9.2	11.6	14.4	16.2	5.70	10.5
karton	5.1	3.8	6.6	4.4	4.3	2.3	4.70	5.6
kompozit	2.4	2.9	2.3	4.4	3.6	3.7	2.70	2.8
textil	3.5	4	3.5	2.8	4.1	2.7	4.70	4.9
higiéniai	1.9	3.3	3.8	3.4	4	4.1	4.70	6.2
műanyag	17.3	20.6	15.4	20.8	21.8	16.1	21.00	21.3
nem osztályozott éghető	2.7	4.4	1.7	1.6	1.7	1.4	5.90	1.8
üveg	3	2.5	4	4.1	3.2	3.2	6.10	3.8
fém	2.8	3.2	1.7	2.4	2.5	3.5	7.00	2.7
nem osztályozott éghetetlen	7.6	2.2	1.7	4	4.2	7	6.10	3.8
veszélyes	0.6	1	0.9	0.6	0.5	1.1	1.10	1
kis szemcseméretű	8.2	13.9	23.6	15.5	11	13.4	7.20	4.5
	100	100	100	100	100	100	100	100

M10 A lerakó alatti talaj rétegződése

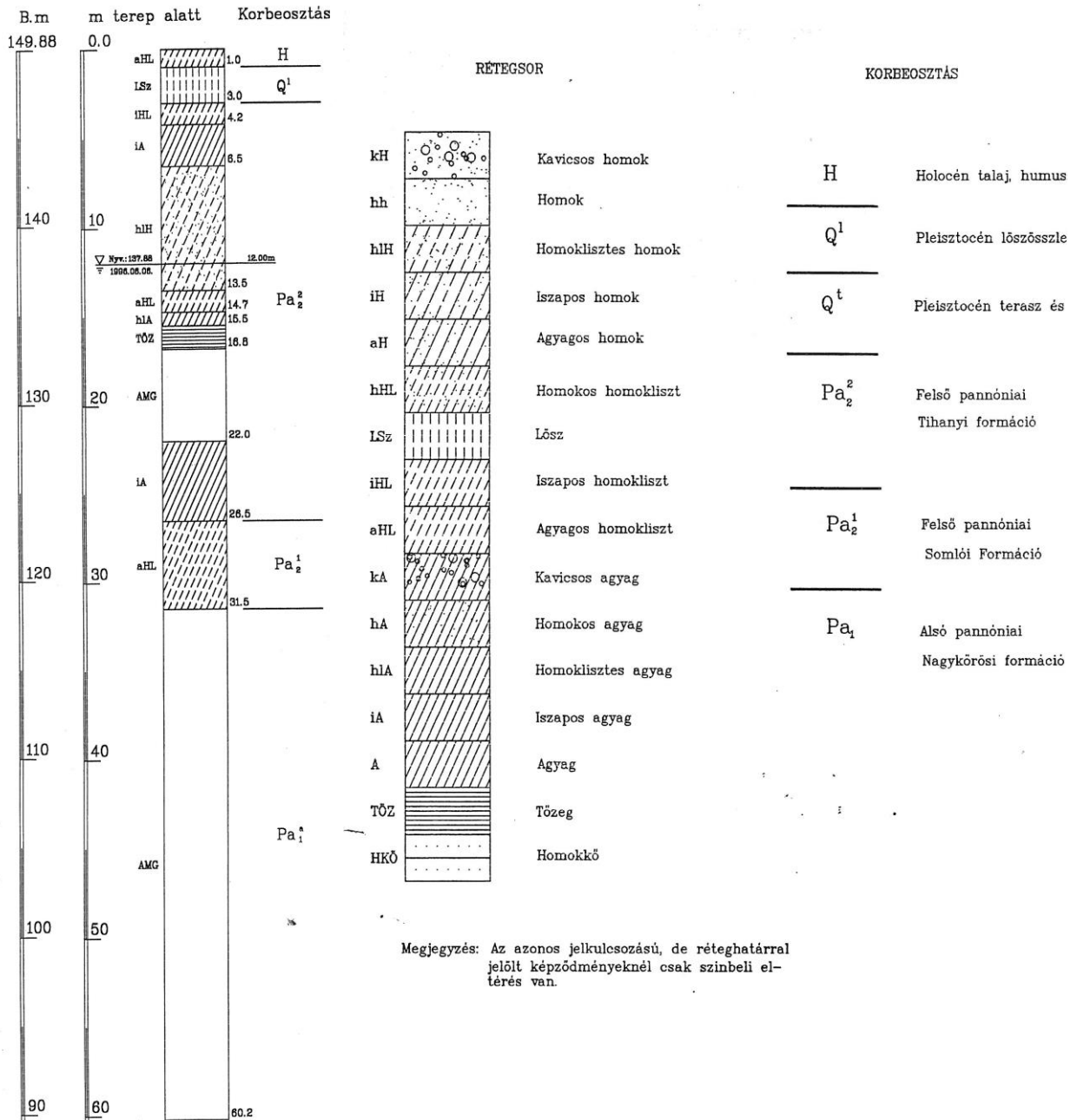
A PRHK I. ütem alatti geotechnikai fúrás

G12-FR Pusztazámor NY-i tábla közepe
Kereső fúrás

RÉTEGSOR

M → 1:20
↓ 1:200

JELMAGYARÁZAT



9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm: Témavezetőmnek, Dr. Telekes Gábornak, a kutatási munkám témavezetését, értékes tanácsait, hogy lehetővé tette a kutatási munkámhoz kapcsolódó mérnöki feladatokban való részvételemet, szervezési segítségét és türelmét. Társ-témavezetőmnek, Dr. Szendrő Péternek, hogy a tudományos kutatási tapasztalatait megosztotta velem és értékes tanácsait. A doktori iskola vezetőjének, Dr. Farkas Istvánnak az értekezésem alapos lektorálását és értékes tanácsait. Dr. Bense László egyetemi docensnek és Dr. Major János főiskolai tanárnak a műhelyvita opponensi véleményét és értékes tanácsaikat. A SZIE- MTDI vezetőinek, tanárainak, a képzés során átadott ismereteket és az értekezésemhez adott későbbi értékes tanácsaikat. A SZIE-YMÉTK vezetőinek, tanárainak, hogy befogadó intézményként támogatták munkámat. Mile Gábornak, a PRHK tervező-főmérnökének, hogy adatszolgáltatással, értékes tanácsaival, a gyakorlat területén szerzett ismeretinek megosztásával segítette munkámat. Keszeyné Dr. Say Emmának, a SZIE-YMÉTK Építőmérnöki Intézet, Geotechnika Szakcsoport vezetőjének, hogy munkámat és publikációs tevékenységemet támogatta és értékes tanácsaival segítette. Dr. Imre Emőkének, az Óbudai Egyetem docensének, hogy kutatási munkámat a kezdetektől támogatta, értékes tanácsaival segítette, valamint fontos tudományszervezési munkáját. Dr. Ladics Tamásnak, SZIE-YMÉTK docensének, hogy a matematikai modellezésben segítségemre volt. Kecskés Gábornak, a SZIE-YMÉTK mérnökstanárának, hogy az új ödométer fejlesztésében segített. Dr. Rajkai Kálmánnak, az MTA-TAKI osztályvezetőjének, hogy a víztartási görbe méréseket értékes tanácsaival és laboratóriumi háttér biztosításával segítette. Dr. Illés Zoltánnak értékes tanácsait. Laufer Imre építőmérnöknek, hogy a homoklapos berendezés készítésében döntő részben közreműködött. Havrán Krisztina építőmérnöknek, a tudományos célú laboratóriumi méréseket. Martin Béla és Puskás János építőmérnököknek, a számítógépes szimulációban végzett segítségét. Dr. Varga Gabriellának, a BME-ÉK docensének, a hulladékos társmerések elvégzését és értékes tanácsait. Vásáry Péterné, Kovács Andrea és Motsai Gézáné laboránsoknak, a laboratóriumi méréseket. És családomnak a türelmet, támogató szeretetet.