



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

# Árvízvédelmi gátak komplex vizsgálata

Tamás Erzsébet

*építőmérnök III. évf. BSc hallgató*

Konzulensek:

Dr. Farkas-Karay Gyöngyi, Farkas Dávid

*BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék*

# Tartalom

1. Bevezetés .....	3
1.1. Árvízvédelmi töltések Magyarországon .....	3
1.2. Gátak kialakításai .....	4
2. Alkalmazott módszerek és felhasznált adatok .....	5
2.1. A Darcy-törvény .....	5
2.2. A kisminta vizsgálatok elmélete .....	5
2.2.1. Részleges mechanikai hasonlóság .....	6
2.2.2. Mosonyi-Kovács modelltörvénye torzításra .....	7
2.3. A laboratóriumi minta bemutatása .....	9
2.3.1. A fizikai modell geometriája .....	9
2.3.2. A tervezett gátkeresztmetszetek .....	10
2.3.3. Peremfeltételek .....	11
2.3.4. A modellben alkalmazott anyagok .....	13
2.3.5. A felhasznált iszapos homok tulajdonságai .....	15
2.4. A kisminta modellen végrehajtott mérések menete .....	21
2.5. A kézi számítási módszerek bemutatása .....	23
2.6. A Rocscience véges elemes szoftver bemutatása .....	24
2.6.1. A program ismertetése .....	24
2.6.2. A végeselemes modell felépítése .....	24
3. Eredmények bemutatása és értékelése .....	26
3.1. Laboratóriumi mérések .....	26
3.1.1. A kialakult vízfelszín .....	26
3.1.2. Átszivárgó vízhozam .....	29
3.1.3. A töltés tönkremenetele .....	31
3.2. Kézi számítások eredményei .....	34

3.2.1. A gát méretei .....	34
3.2.2. Kialakult vízfelszín.....	35
3.2.3. Térfogatsúlyok.....	37
3.2.4. Átszivárgó vízhozam és hidraulikai állékonyság .....	37
3.2.5. Statikai állékonyság számítása .....	38
3.3. A numerikus modellezés eredményei.....	43
3.3.1. Kialakult felszín görbék.....	44
3.3.2. Átszivárgó vízhozam .....	47
3.3.3. Szilárdságtani vizsgálatok .....	49
3.4. A különböző végeredmények összevetése .....	52
3.4.1. Kialakult vízfelszín.....	52
3.4.2. Az átszivárgó vízhozamok összehasonlítása .....	53
3.4.3. Tönkremenetel .....	55
4. Eredmények összefoglalása, kitekintés .....	56
Irodalomjegyzék .....	58
Köszönetnyilvánítás.....	60
Melléletek .....	61

# 1. Bevezetés

A munkám során célul tűztem ki két gát keresztmetszet megtervezését. A kialakított töltéseket laboratóriumi kisminta- és numerikus modellezéssel, valamint kézi számításokkal vizsgálom. A kutatásom során meghatározom az átszivárgó víz felszingörbójét, annak hozamát és a lehetséges töltés tönkremeneteleket.

## 1.1. Árvízvédelmi töltések Magyarországon

Magyarország alvízi országnak számít. A határainkon kifolyó vízhozam több, mint 90%-a nem hazánkban ered, hanem szomszédos országokból folyik be területünkre. Sok folyam középső szakasz jellegű tulajdonságokkal bír, mikor beér Magyarországra. Ez a fajta viselkedés magában foglalja, hogy kis esésen, kis sebességgel halad előre egy vízfolyás, miközben sok hordalékot lerak a meder alján, más helyeken azonban rombolja a partot. Ennek következtében tud kialakulni a meanderező vonalvezetés, sok kanyarulattal. Bár a felső, középső és alsó jellegű szakaszok rendszertelenül tudják váltani egymást függetlenül a forrástól már megtett úttól, a síkvidéki területek velejárója ez a fajta viselkedése a vízfolyásnak. A meder és a part változékonysága a szabályozást nagymértékben nehezíti. Az ilyen függőmedrek mellett az árvíz kialakulása is nagyobb eséllyel történik meg (Csoma 2019).

A folyószabályozási és árvízvédelmi intézkedések jelentős része az 1840-es évek közepétől az 1930-as évekig tartott. Az első lépés természetesen a Duna és a Tisza melletti partszakaszok kezdetleges mentése volt. Széchenyi István fellépésével, az ő korában, még több árvízvédelmi töltés építése és azok egyesítése lett a cél, hogy egy összefüggő gátrendszer alakuljon ki. Ezen rendszernek hála körülbelül 2 millió hektár lett mentesítve a középarvizektől. Ezek az ármentesítési munkálatok eredményesnek tekinthetők, de a XVIII.-XIX. századforduló környékén több nagyvíz is gátszakadást és súlyos károkat okozott. Legnagyobb hiányosságok a gátak magassági méretezésénél léptek föl, valamint a problémák kialakulásának okai között szerepelt, hogy a töltéseket felépítő alapanyagok rossz minőségűnek számítottak. A felmerült problémák orvoslására úgynevezett szabvány szelvényeket állapítottak meg, így egységesítették a töltések keresztmetszetét. Az egyszerű vagy összetett trapéz alakú szabvány szelvény lényeges javulásokat eredményezett az ármentesítés terén, majd a még jobb védekezés érdekében a helyi adottságokhoz való alkalmazkodás került előtérbe. Fő szempontok lettek az altalaj megismerése helyszíni talajmechanikai feltárásokkal, illetve a mértékadó árvízszint pontosabb meghatározása. Ezen lépések végeredményeként alakult ki hazánkban a körülbelül

4220 km hosszú elérő árvízvédelmi gátrendszer, ami a mai napig szolgálatot teljesít. Mai viszonylatokat tekintve az árterek több mint 95%-a mentesítettnek mondható (OVH 1987).

Az elmúlt évtizedekben már nem a töltésépítés az árvízvédekezés lehangsúlyosabb része. A szélsőségesen nagy árhullámok megjelenésére egyfelől a már meglévő gátak megerősítésével, rekonstrukciójával válaszolnak a vízépítők, másfelől pedig az alternatív megoldások kialakítása kerülhetett előtérbe. Alternatív árvízvédekezési módok közé tartozik például az árvízi tározók vagy mobilgátak létrehozása (Csoma 2019).

## 1.2. Gátak kialakításai

A gátak két csoportba oszthatók. Létezik földgát és árvízvédelmi fal. Az utóbbi alkalmazása általában belterületen jellemző, kisebb helyigénye miatt. Alapanyaga beton vagy kő, amit függőlegesen alakítanak ki a vízfolyás mentén. Sok vízparti városban megtalálhatóak ezek, többek között a szegedi, a győri és a budapesti rakpart mentén is húzódik árvízvédelmi fal.

A földgát, ahogy a nevében is szerepel, különböző talajokból épül fel, valamint a műtárgy szerves részét képezi az alatta elterülő altalaj is. A töltéstest trapéz alakú kialakításának elveit a következőkben mutatom be.

A korona legyen alkalmas minimum egy sávos közlekedésre, ezért a szélessége 3-5 méter között változhat. Ennek kihasználása akár árvízmentesítésnél is történhet, de a természetjárók és kerékpárosok kedvelt útvonala is lehet. A gát magasságát leginkább a mértékadó árvízszint és mellette a biztonsági magasság határozza meg. A kialakítások alapjául általában az 1%-os előfordulású árvízszint szolgál, de természetesen a védett területtől is függ, hogy milyen magasságot tekintünk mértékadónak. Lakott területen, nagyobb folyóknál előfordulhat kisebb százalékra való méretezés. A gát oldalának rézsúhajtása vízdalon legalább 1:3 arányú kell legyen. Ennek oka a hullámfelfutás és hullámverés okozta károk minimalizálása és a gépi fenntartás kivitelezhetősége.

Többféle gátkialakítás létezik a gáton való átszivárgás megelőzésére. Legnagyobb különbség köztük, hogy milyen anyagok felhasználásával készültek. Ezt főként az határozta meg, hogy az adott területen milyen talajféleségek álltak a rendelkezésre. A csupán egyféle talajból épült védműveket homogén gátaknak nevezzük. Ez a legegyszerűbb, itt csak a gát geometriának változtatásával lehet eltérő biztonságot adó kialakításokhoz jutni.

Vízáró anyag beépítésekor a víz kizárása a fő cél. Ez a szigetelés elhelyezkedhet közvetlenül a vízdali rézsún, de egy belső mag is kialakítható belőle. Ennek a fordítottja, mikor nem egy plusz vízáró rész kialakítása történik, hanem egy szőnyeg-, talp- vagy oszlopszivárgó beépítésével összegyűjtjük a gátestbe bejutott vizet, majd innét elvezetjük

például egy dréncső segítségével. Az előbbi általában agyag vagy erősen iszapos talajjal valósítjuk meg, míg az utóbbi előállítása kavicsból, homokos kavicsból történhet (Herzog és Krempels 1966, OVH 1987).

## 2. Alkalmazott módszerek és felhasznált adatok

### 2.1. A Darcy-törvény

A ma már Darcy-törvényként jól ismert összefüggést, 1856-ban publikálta Henry Darcy francia hadmérnök. A vizsgálatai porózus közegben történő vízáramlásra irányultak.

Darcy a folytonossági egyenletből származó vízhozam és a teljes, szemcséket tartalmazó keresztmetszeti felület hányadosából létrejövő paramétert számította vizsgálataiban. Ezen paramétert látszólagos szivárgási sebességnek hívjuk. A szivárgási sebesség ( $v_{sz}$ ) fogalma alatt azt a sebességet értjük, ami ugyanazt a vízhozamot szállítaná valamely teljesen szabad felületen keresztül, mint a tényleges sebesség ( $v_{eff}$ ), mely a szemcsékkel csökkentett felületen át eredményezi azt. A tényleges középsebesség, ami a szemcsék között létrejön, nagyobb, mint a szivárgási sebesség. Mivel a két sebesség közötti különbség a felületek eltéréseiből származik, a köztük fennálló kapcsolatot a porozitás, vagy más néven hézagterfogat ( $n$ ) teremti meg. A porozitás a talajban levő hézagok térfogatának és a teljes térfogatnak a hányadosaként áll elő.

$$v_{eff} \cdot n = v_{sz} \quad [1]$$

Darcy azt állapította meg, hogy a szivárgási sebesség egyenes arányosságban áll a hidraulikus gradienssel. Az előbbi megállapítás összefüggésként felírva:

$$v = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial r} = -k \cdot I \quad [2]$$

ahol

- $v$  a látszólagos szivárgási sebesség [m/s],
- $k$  szivárgási tényező [m/s],
- $\frac{\partial h}{\partial r}$  a mozgást eredményező vízszintkülönbségek és szivárgási úthosszak hányadosa,
- $I$  hidraulikus gradiens [-] (Kovács 1972).

### 2.2. A kisminta vizsgálatok elmélete

A hidraulikai kismintakísérleteknek többféle célja van. Egyfelől kutatási célokra lehet felhasználni, másfelől a kivitelezés előtt a tervváltozatok áramlástani tesztelésében nyújt segítséget. A kísérletek természetesen a tervezéskor már szerepet kaphatnak, de a már meglévő

épitmények vizsgálatokor is célravezetők lehetnek a felmerülő problémák esetén. A kismintakísérletek egyik előnye, hogy olyan esetek állíthatók elő, melyek a valós méretben nehezen megfigyelhetők. Ezen felül gazdaságosság és nyersanyagszükséglet szempontjából is sok esetben kedvezőbb, mint a valóságban végzett megfigyelések, illetve a zavaró mellékkörülmények kizárása a laborban történő mérések közben is jobb helyzetet biztosít. Tehát ezek alapján kijelenthető, hogy a kismintakísérletezésnek helye van a vízmérnök palettáján, értékes eredmények születhetnek ezen vizsgálatokból (Mosonyi és Kovács 1952).

A kismintakísérletek alapvető feltétele, hogy lehetséges legyen a laboratóriumi eredmények átszámítása a valóságra, így a valós jelenség közvetlen tanulmányozása nélkül minőségi és mennyiségi megállapításokat tehetünk a modellezett folyamatról. Az átszámítás fizikai összefüggéseken nyugszik, melyeket matematikai formába öntve használunk. Ilyen formulák felállíthatók, ha valamennyi valós és neki megfeleltethető modellbeli fizikai mennyiség közt hasonlóság áll fenn. A vízépítéssel kapcsolatos kisminták terén elegendő a részleges mechanikai hasonlóság, ami a geometriai, a kinematikai és a nem teljes dinamikai hasonlóságot foglalja magába. A nem teljes dinamikai hasonlóságnál elég csak a mozgást legjobban befolyásoló erők viszonyának állandóságát biztosítani (Mosonyi és Kovács 1952).

Ahogy az feljebb olvasható, a kismintamodell kísérletek elmélete a jelenségek, rendszerek és folyamatok hasonlóságára épül. Két rendszerben végbemenő folyamat hasonlóságáról akkor beszélünk, ha az egymásnak megfelelő mennyiségei között a modellben és a valóságban ugyanaz a matematikai összefüggés áll fenn. Mivel fizikai jelenségekről beszélünk, ezért a matematikai összefüggéseknek vannak érvényességi határaik.

### 2.2.1. Részleges mechanikai hasonlóság

Geometriai hasonlóság:

$$C = \frac{l'}{l''} \quad [3]$$

Geometriailag hasonlóak azok a vizsgált rendszerek, melyben pontnak pont, egyenesnek egyenes úgy felel meg, hogy a megfelelő távolságok aránya állandó. Az egymásnak megfelelő pontok modellbeli ( $l''$ ) és valóságos távolságának ( $l'$ ) arányát jelöljük  $C$ -vel. Ez az arány a méretarány. A méretarány érvényességi határai zérus és végtelen, közöttük elvileg bármely értéket felvehet (Mosonyi és Kovács 1952).

Kinematikai hasonlóság:

$$C_t = \frac{t'}{t''} \quad [4]$$

A kinematikai hasonlóság fogalma akkor értelmezhető, ha a két összehasonlított rendszerben mozgás van. Kinematikailag, azaz a mozgások lefolyása szempontjából hasonlóak azok a vizsgált rendszerek, melyekben a mozgási folyamatok úgy játszódnak le, hogy lefolyásuk egymásnak megfelelő időtartamai kielégítik a feljebb látható egyenletet. Természetesen ezt az arányszámot is, mint a méretarányt is a két határérték közötti nyílt intervallumon bárhol felvehetjük (Mosonyi és Kovács 1952).

Ha  $C$  és  $C_t$  értékeit felvettük, akkor a hosszúságból és az időből összetett dimenziójú mennyiségek viszonya már nem önkényesen állapítható meg, hanem az csak meghatározott érték lehet, melyet le lehet vezetni a felvett viszonzszámok alapján. Ennek példája a sebesség arányszámának kiszámolása (Mosonyi és Kovács 1952).

Dinamikai hasonlóság:

$$C_f = \frac{p'}{p''} \quad [5]$$

Dinamikailag, azaz erőtanilag hasonlóak azok a vizsgált rendszerek, melynél a feljebb látható arány állandó. Az erők arányának állandósága a dinamikai hasonlóság feltétele.  $C_f$  arányszámot, mint az előző kettőt is zérus és végtelen között szabadon választhatjuk, kivéve a két határt (Mosonyi és Kovács 1952).

Ha már szabadon felvettük  $C_f$ ,  $C_t$  és  $C$  arányszámokat, az erő (vagy tömeg), idő és hosszúság alapidimenziókból származtatható mennyiségek arányszámait nem lehet szabadon választani, hanem csakis a levezetés útján kapott viszonzszámok használhatók (Mosonyi és Kovács 1952).

Ezeket a mennyiségcsoportokat kismintatörvényeknek is nevezik, mert a különböző méretekben lezajló folyamatokban az egymásnak megfelelő mennyiségek között egyértelmű matematikai kapcsolatokat fejez ki.

### **2.2.2. Mosonyi-Kovács modelltörvénye torzításra**

A Mosonyi-Kovács modelltörvény gyakorlati példajaként sok helyen a szemcsés talajban kialakuló szivárgást említik, de az említett törvény általában a szivárgási kismintamodelleknél csak kötöttségekkel használható a torzítás miatt. A torzítás oka, hogy a szemcseméreten nem változtatunk, nem kicsinyítünk a méretaránynak megfelelően a kísérleti modellben. Ennek oka, hogy nehezen kivitelezhető lenne pontosan méretarányos szemcsékkel dolgozni, valamint a talaj fizikai állapotában és a talajvíz mozgásállapotában beállhat minőségi változás (Mosonyi és Kovács 1952). A modellben és a valóságban használt anyagunk szemnagysága és hézag tényezője egyezik.



Mosonyi Emil a nehézségi és belső súrlódásból származó erők egyezőségéből indult ki az átszámítási tényezők meghatározása során, és a nagyméretű szivárgási folyamat, valamint kicsinyített megfelelője esetére a következő egyenletet írta fel.

Nehézségi és a súrlódó erők egyenlősége nagyméretű folyamatnál:

$$I' \gamma' l' z'^2 \pi = 2 \pi z' l' \frac{dv'}{dz'} \eta' \quad [6]$$

Nehézségi és a súrlódó erők egyenlősége kicsinyített megfelelője esetén:

$$I'' \gamma'' l'' z''^2 \pi = 2 \pi z'' l'' \frac{dv''}{dz''} \eta'' \quad [7]$$

Ebből:

$$\frac{v'}{v''} = 1 = \frac{C}{C_t} \quad [8]$$

Tehát az idő és a hossz átszámítási összefüggése  $C = C_t$ , a sebességek egyenlősége miatt (Mosonyi 1955).

A fenti egyenletek alapján igaz, hogy a két sebesség egyenlő. Ha a Darcy-törvény érvényes és ugyanazon talajfizikai paramétereket alkalmazzuk (két szivárgási tényező állandó), akkor ebből következik, hogy a hidraulikus gradiensek is egyenlők lesznek:

$$k' \cdot I' = v' = v'' = k'' \cdot I'' \quad [9]$$

Ezek alapján, ha

$$k' = k'' \quad [10]$$

, akkor

$$I' = I'' \quad [11]$$

Kiinduláskor megfogalmaztuk, hogy a modellbeli és a valóságos talaj közt különbség nincsen, ezért  $k' = k''$ , tehát  $I' = I''$ , azaz a dimenzió nélküli potenciálesés is azonos. (Mosonyi 1955). Az általam használt arányszámokat az 1. és 2. táblázat mutatja be.

1. táblázat A Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámjai az egyik általam használt méretarányban (Mosonyi és Kovács 1952)

	Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszorzói			
		Torzítatlan		Torzított
Hossz	C	20	C	20
Terület	C <sup>2</sup>	400	C <sup>2</sup>	400
Térfogat	C <sup>3</sup>	8000	C <sup>3</sup>	8000
Idő	C <sup>-1</sup>	0.05	C	20
Sebesség	C <sup>2</sup>	400	C <sup>0</sup>	1
Gyorsulás	C <sup>3</sup>	8000	C <sup>-1</sup>	0.05
Vízhozam	C <sup>4</sup>	160000	C <sup>2</sup>	400

2. táblázat A Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámái a másik általam használt méretarányban (Mosonyi és Kovács 1952)

	Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszorzói			
	Torzítatlan		Torzított	
Hossz	C	29.72	C	29.72
Terület	C <sup>2</sup>	883	C <sup>2</sup>	883
Térfogat	C <sup>3</sup>	26251	C <sup>3</sup>	26251
Idő	C <sup>-1</sup>	0.0336	C	29.72
Sebesség	C <sup>2</sup>	883.3	C <sup>0</sup>	1
Gyorsulás	C <sup>3</sup>	26251	C <sup>-1</sup>	0.0336
Vízhozam	C <sup>4</sup>	780180	C <sup>2</sup>	883

## 2.3. A laboratóriumi minta bemutatása

A mérésekhez használt fizikai modellt a BME Vízépítési- és Vízgazdálkodási tanszék laboratóriuma biztosította számomra. A modell 2015-ben volt legutoljára használva, Szloboda Zsófia BSc diplomamunkájához kapcsolódóan zajlottak mérések benne.

### 2.3.1. A fizikai modell geometriája

A modell alapja egy 2.05 m hosszú, 1.00 m magas és 0.20 m széles fém keret, melynek jobb, bal, hátulsó és alsó oldalait sötét műanyaglap határolja, elöl pedig átlátszó plexi biztosítja a gátmetszet láthatóságát. Előnézetből a keret jobb szélén egy 17.5 cm széles rész az alvízszint fenntartására van kialakítva. Ez nem túl optimális méret egy gát szemléltetéséhez, ugyanis egy árvízvédelmi töltés magasságának és szélességének aránya ~ 1:7, míg a keretnél ez az arány ~1:2, tehát a magassági méretek kihasználatlanok maradnak (Szloboda 2015).

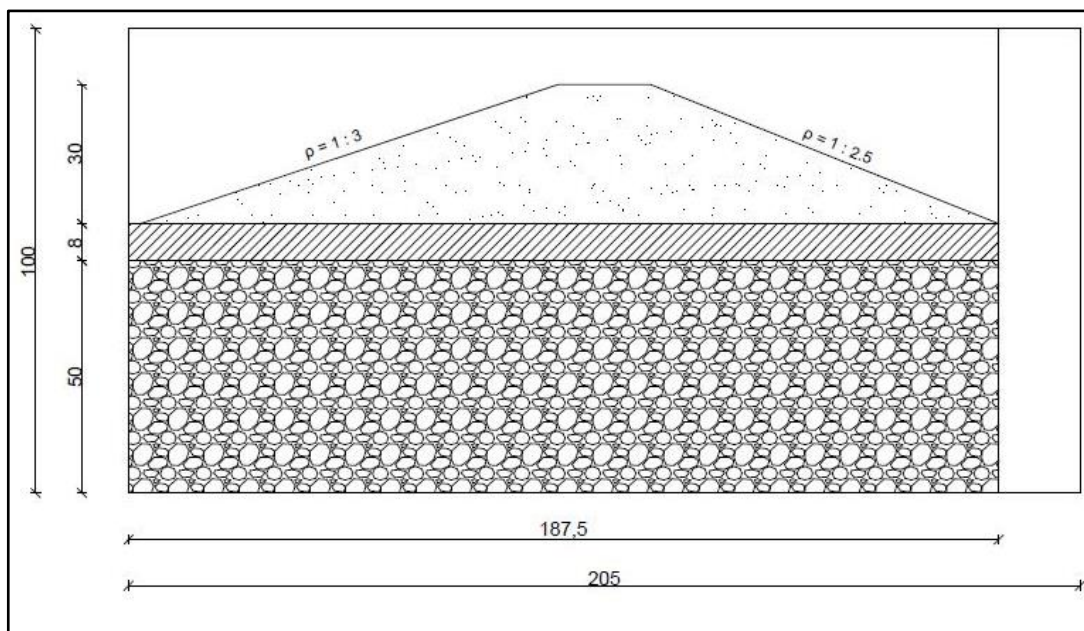
Szloboda (2015) a méretek legjobb kiaknázása érdekében M=1:10-es méretarányú kicsinyítést alkalmazott. Ez a kicsinyítés egy rétegnél lett csak elhanyagolva. A legalsó 50 cm-es kavicsréteg nagy vastagságát pusztán csak technikai okok indokolták, mert ezáltal maga a gát építése és az anyagok tömörítése könnyebben kivitelezhetővé vált így, hogy elérhető magasságban történhettek (Szloboda 2015).

A 2015-ös felépítéshez képest több változtatást eszközöltem. A leginkább meghatározó módosításokat a méretarány megadásakor végeztem az optimális helykihasználtság érdekében. Így alakítottam ki a valóságban alkalmazott irányelveknek és kialakítási paramétereknek megfelelően az új geometriákat, melynél a méretarány nagysága M=1:20, illetve M=1:29.72 lett.

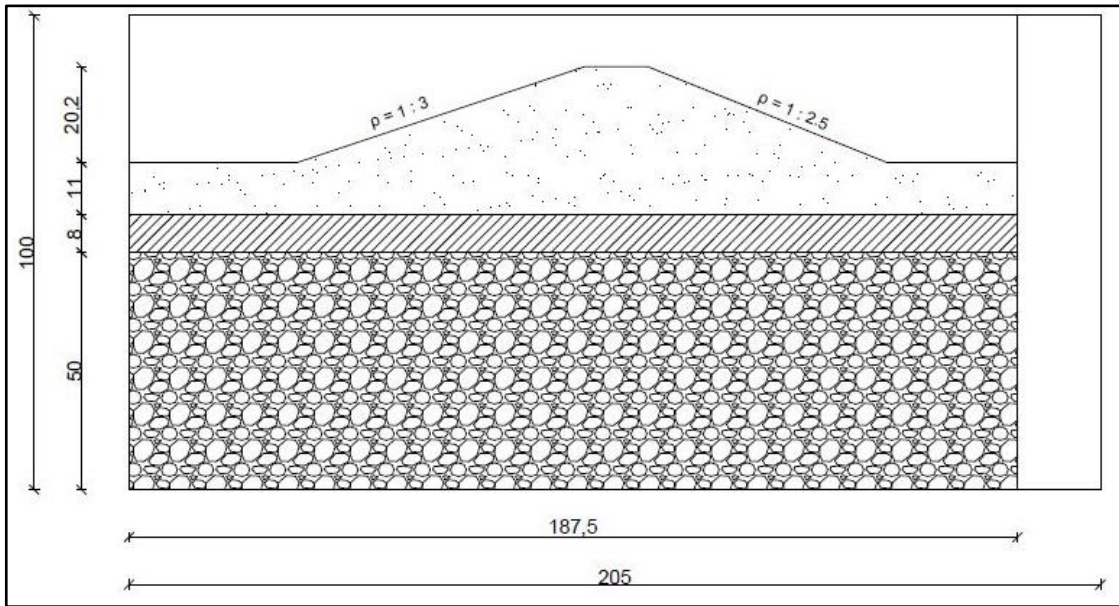
### 2.3.2. A tervezett gátkeresztmetszetek

Kétfajta kialakításnál figyeltem meg a gáton való átszivárgást. A két mérés különbségét a talaj felső rétegén való módosítás adta. Az első megfigyelésekkor a gát alatt közvetlenül agyagréteg húzódott, míg a másodjára alakított geometriánál az altalaj a gátestet is felépítő iszapos homok volt.

Az első kialakításnál használt agyagot vízzárónak tekintjük, így a víz mozgása feltételezhetően csak a gátestben történik. A másodjára felépített keresztmetszetenél az altalaj is vízvezetőként működik, együtt dolgozva a trapéz alakú földművel. Az eltérő altalaj választás oka, hogy a valóságban is előfordulhat mindkettő féle eset. Az előbb említett vízzáró rétegen fekvő töltés modellezi azt a gátat, melynél a helyi, nem vízáteresztő talajtól eltérő, vízszivárgást megengedő alapanyagot hoztak máshonnan és abból építkeztek, míg az utóbbinál az olyan, helyben rendelkezésre álló talajfajta tudták alkalmazni a földműben is, melyben a víz mozgása teljesülhet (1. és 2., valamint 3. és 4. ábra).



1. ábra A gát első kialakítása, melynél az altalaj vízzáró agyag



2. ábra A gát második kialakítása, az altalaj a gáttestben is található homokos iszap

A gát rézsűhajlásain nem változtattam, vízoldalon  $\rho=1:3$ , mentett oldalon pedig  $\rho=1:2.5$ , Szloboda (2015) geometriájához hasonlóan. A korona szélessége, a minimum egy sávós közlekedés biztosítása érdekében a modellbeli léptékben elsőnek 20 cm, másodiknak 13.46 cm, ez a méret a valóságban 4 m-nek felel meg. A töltés magasságát 30 cm majd 20.20 cm magassággal alakítottam ki, ami tényleges léptékben 6 m-es gátmagasságot jelent. A valóságban létrejövő földgát egy jóval robosztusabb műtárgynak hat a 2015-ös megvalósításhoz képest, hiszen jelentősen nőttek a méretei már, ha csak a jelen mérésből valós méretre átszámított 37 m-es talpszélességre gondolunk, érzékelhetjük a különbséget a közel 18 méterhez viszonyítva.

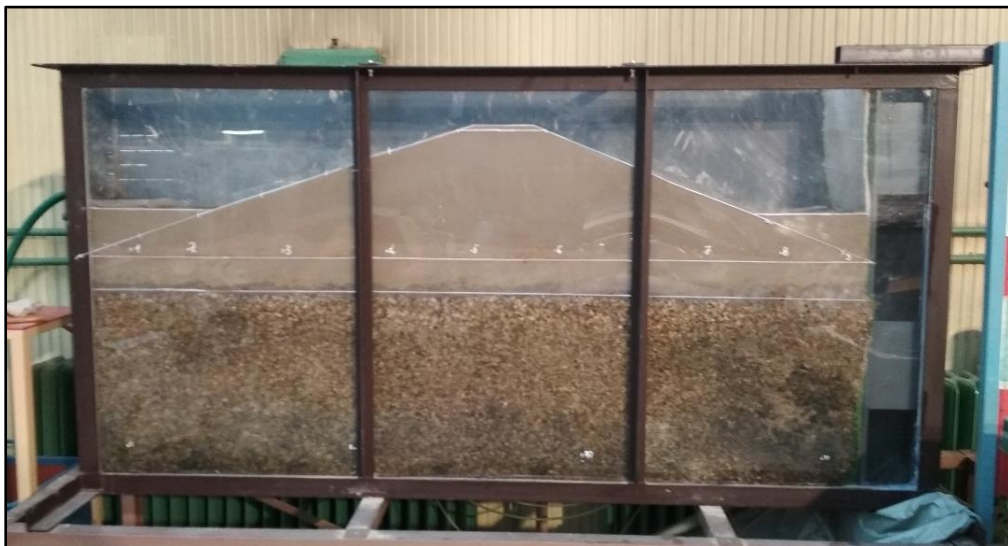
### 2.3.3. Peremfeltételek

A méréseimet különböző vízfelszín magasságok mellett valósítottam meg. A legmagasabb vízálláshoz a biztonsági magasságot 1 m-nek feltételeztem. Ez az érték reálisnak mondható, hiszen a 2000-es évek elején ez volt a szabványban az elvárás, (Nagy 2005) így rengeteg hazai gát méretezésénél ezt a magasságot vették figyelembe. A többi mérést 1 méteres csökkentések mellett végeztem el, tehát a kísérleteknél vízoldal magasságai 5, 4, 3, és 2 méteresek voltak a valós léptékébe átszámítva. A másik vizsgálati módoktól eltérően, itt az 1 méteres vízállás vizsgálata fizikai akadályokba ütközött, így nem tudtam kivitelezni azokat a méréseket. A magasságok a modellben a vízzáró altalajjal rendelkező kialakításnál a meder aljától mért 25, 20, 15 és 10 cm-nek feleltek meg, míg a másik felépítésnél a vízfelszín magassága kerekítve 16.8, 13.5, 10.1, és 6.7 cm a már megemelt fenéktől számítva.

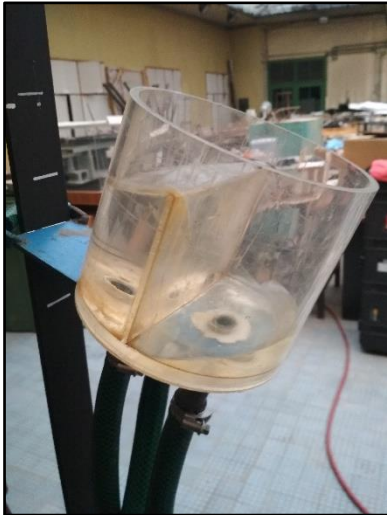
A mentett oldalon a vízszinteket a gát talpának szintjéhez igazítottam. Ebben a vízszintesben helyezkedik el a mederfenék is. Így először az agyagréteg, másodsor az iszapos homok összetételből álló sáv felső határáig állt a víz. A kismintamodellben ezek rendre 58 cm-t és 69 cm-t jelentenek a kavicsréteg aljától mérve. Szloboda (2015) kísérletéhez képest itt is változtattam, én egy mentett oldali vízszint mellett vizsgáltam csak a változókat.



**3. ábra Az vízzáró réteggel határolt gát**



**4. ábra A vízáteresztő réteggel határolt gát**



5. ábra A használt bukótípus

A víz modelltérbe jutása és az onnan való kivezetése bukókkal történik (5. ábra), melyek így a vízszinteket is tudták szabályozni túlfolyókként. A bukók beszerelésében a laborban dolgozó munkatársak segítettek. A vízoldalon is és a mentett oldalon is kis vízhozamok mellett, folyamatosan sikerült a megfelelő szintek tartása. A két beállított bukó szintkülönbsége generálta a modellben való szivárgáshoz szükséges nyomáskülönbséget.

#### 2.3.4. A modellben alkalmazott anyagok

A modell felépítéséhez háromféle anyagot használtam: a Szloboda által is használt, a modellben bennhagyott kavicsot, a vízzáró réteg biztosítása végett agyagot és a gáttöltést felépítő iszapos homokot.

##### **Kavicsréteg**

A feljebb említett magyarázatra hivatkozva az 50 cm-es kavicsrétegen nem változtattam, csak a többi rész beépítése előtt egy átmosó elárasztást végeztem rajta, egyrészt a fizikai modell csepegésének leellenőrzése végett, másrészt a kavicsréteg tisztítása, a keresztmetszet megjelenésének javítása miatt. A réteg összetétele 1-8 mm szemátmérőjű kavicsokból áll. Ez a réteg, a mélyebben található vízáteresztő talajok modellezésére szolgál, jelen modellben szivárgás ezen keresztül nem történik (Szloboda 2015).

##### **Agyagréteg**

A kavicságyon 8 cm vastagon agyagréteg helyezkedik el. Az agyagokat a BME Geotechnika és Mérnökgeológia tanszékének laboratóriumából kaptam, a már bevizsgált és nem használt mintákat adták nekem (6. ábra). Vízben áztattam őket pár napig, ahol gyúrható állagúvá vált, és amennyire tudtam, összekavartam a homogenizálás érdekében. Ezt követően kézfejnyi nagyságú adagokban a lágy agyag kiszáradását próbáltam elősegíteni. A beépítésnél is egy tömör, egynemű réteg előállítása volt a cél. Az agyag modelltérben való kiszáradására is hagytam több napot a nyári melegben.

Az első kialakításnál ez az agyagréteg közvetlenül a gáttest alatt terül el, ezzel lett a vízzáró altalaj biztosítva. Hasonló elrendezéssel Szloboda (2015) is eredményes mérésorozatot hajtott végre, ezért döntöttem a megvalósítása mellett.



6. ábra A beépített agyagok sokszínűsége

Szloboda az agyagréteg beépítését lereszeléssel, majd a modellterben való tömörítéssel végezte. Mivel a kísérletének maradványait még volt szerencsém látni, összehasonlítást tudok végezni utólag. Az agyagrétege igazán repedezett volt, hogy a mérései során milyen állapotú volt, azt nem tudom, de ha ilyen repedések mellett is vízzáróként működött, akkor az én agyagrétegem is tekinthető annak. A homogenizálást nem tudta tökéletesen elérni a lereszeléssel, ezért választottam más formáját a beépítésnek.

### Iszaposhomok-réteg

Az iszapos homok egyik részét szintén a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumának köszönhetem, a maradék összetevőjéül pedig a Vízépítési és Vízgazdálkodási tanszék előre osztályozott 0.1 mm-es szemátmérőjű homokja szolgált. A két típus összekeverése után, a beépítés közel szárazon történt. Tömörítéséhez kézi erőt, illetve saját testsúlyomat is felhasználtam (7. ábra), a legmagasabb tömörítési fok elérésének érdekében. Az iszapos homok volt a víz szivárgásának legfőbb helyszíne, ezért az anyag tulajdonságainak részletes megismeréséhez különböző vizsgálatokat hajtottam végre, ezek bővebb kifejtése olvasható a következő fejezetben.



7. ábra A gát építésekor az anyagok tömörítésére volt szükség

### 2.3.5. A felhasznált iszapos homok tulajdonságai

A felhasznált anyag jellemzőinek megállapításához különböző méréseket folytattam. A kísérletek megvalósítása a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék munkatársainak, illetve a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék oktatóinak segítségével történt.

#### Szivárgási tényező meghatározása

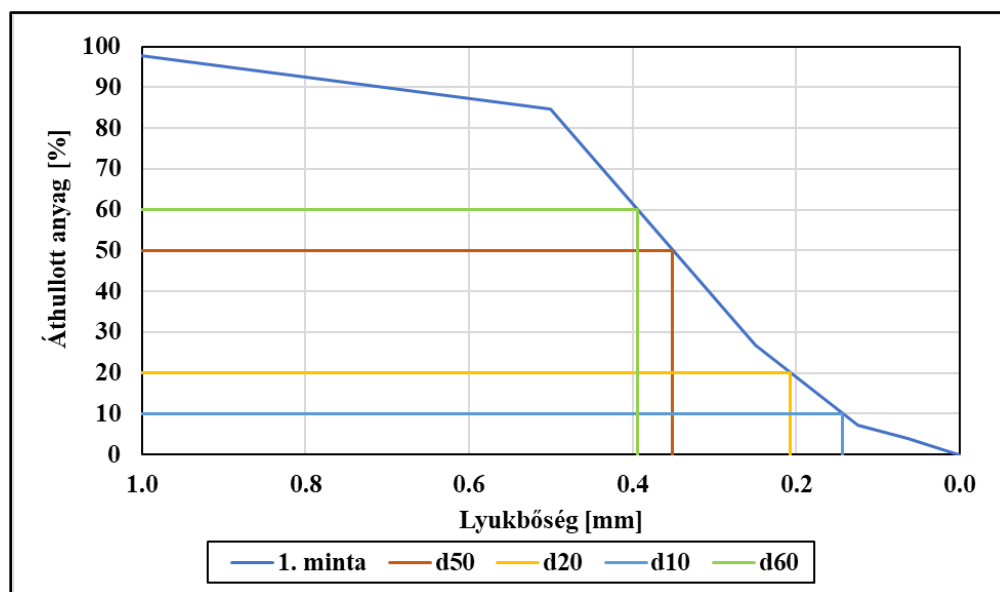
##### *Szemeloszlási görbékkel történő vizsgálat*

A még beépítés előtt álló homokos iszapból három mintát vettem. A Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában volt lehetőségem kiszárítani (8. ábra), majd szabványos szitasorral leszitálni a keveréket. Ennek eredményeképp kirajzolódtak a szemeloszlási görbék.



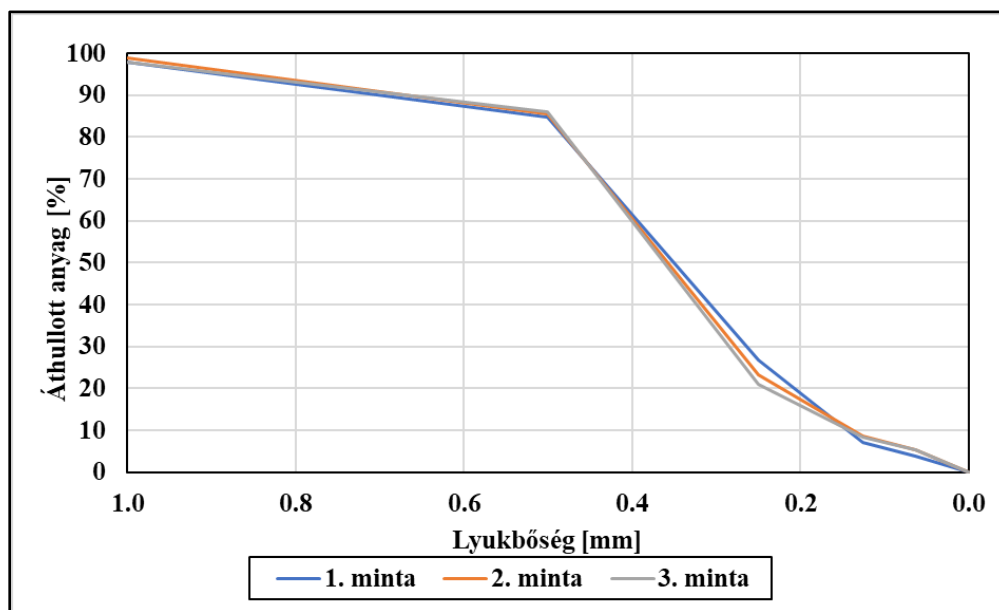
8. ábra A szárítás folyamata

Az egyik minta szemeloszlási görbéje látható az 9. ábrán, amit a három minta összegzésének ábrája követ.



9. ábra Az 1. minta szemeloszlási görbéje





10. ábra A három mintaszemeloszlási görbéi

A 10. ábrán látható összegzés alapján kijelenthető, hogy az anyagot homogénnek tekinthetjük, hisz az összekevert anyag különböző helyeiről vett minták igen hasonló szemeloszlási képet eredményeztek. A szemeloszlási görbék ábrázolásakor az X tengelyen logaritmusos lépték alkalmazása szokás, de ilyen kicsiny lyukbőségeknél ettől eltekinthetünk.

Az 1 mm-nél nagyobb lyukátmérőjű szitán fennmaradt anyag jelentős része összeállt finomabb szemcsékből állt. Ez azt mutatja, hogy a szárítással sem sikerült elérnem a teljesen száraz állapotot.

A görbék az anyag jellemzői közül a következők megállapítását segítették elő:

- $d_{60}$  átesett tömegmennyiség 60 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm],
- $d_{50}$  átesett tömegmennyiség 50 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm],
- $d_{20}$  átesett tömegmennyiség 20 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm],
- $d_{10}$  átesett tömegmennyiség 10 %-ához tartozó szemcseátmérő (hatékony szemcseátmérő) [mm],
- U egyenlőtlenségi mutató [-].

U  $d_{60}$  és  $d_{10}$  hányadosaként áll elő.

3. táblázat A három mintáról leolvasott szemeloszlási jellemzők

1. minta		2. minta		3. minta	
$d_{60}$	0.3938	$d_{60}$	0.39744	$d_{60}$	0.400231
$d_{50}$	0.3506	$d_{50}$	0.35737	$d_{50}$	0.36171
$d_{20}$	0.20705	$d_{20}$	0.222789	$d_{20}$	0.240157
$d_{10}$	0.14295	$d_{10}$	0.13776	$d_{10}$	0.1417323

A szemeloszlási görbék felhasználásával több számítási módszer segítségével az anyag szivárgási tényezőjére kaptam egymástól eltérő értékeket.

Seelheim (1880) állította fel az első olyan összefüggést a szivárgási tényező kiszámítására, mely szemeloszlási görbével történik.

$$k \left[ \frac{m}{s} \right] = A * d_{50}^2 [mm] \quad [12]$$

ahol

- $A$  konstans,
- $k$  szivárgási tényező [m/s].

Az „ $A$ ” felvett paraméterre saját kutatásaik alapján Seelheim (1880) 0.0037, Hagen (1869) 0.0036, Kröber (Éliás és Juhász 1966) 0.0041 értéket állapították meg. Az én mintáim esetében a különböző paraméterrel számított szivárgási tényezőre a 4. táblázatban bemutatott

	A értéke	1. minta	2. minta	3. minta	Átlaguk	Szórásuk
Seelheim	0.0037	$4,55 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-4}$	$4,84 \times 10^{-4}$	$4,70 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-5}$
Hagen	0.0036	$4,43 \times 10^{-4}$	$4,60 \times 10^{-4}$	$4,71 \times 10^{-4}$	$4,58 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-5}$
Kröber	0.0041	$5,04 \times 10^{-4}$	$5,24 \times 10^{-4}$	$5,36 \times 10^{-4}$	$5,21 \times 10^{-4}$	$1,63 \times 10^{-5}$

eredményeket kaptam.

4. táblázat Vízáteresztési tényezők értékei különböző számítások alapján

Hazen (1892), eltérve az eddig említettektől, újításként egy  $C_d$  dimenzió nélküli konstans bevezetéséhez folyamodott. Ez a  $C_d$  állandó, az egyenlőtlenségi együttható függvényében határozható meg (lásd még Farkas és társai 2019).

$$k \left[ \frac{m}{s} \right] = C_d * d_{10}^2 [mm] * (0,7 + 0,03 * T_{GW} [^{\circ}C]) \quad [13]$$

ahol

- $T_{GW}$  a felszín alatti víz hőmérséklete [ $^{\circ}C$ ],
- $C_d = 0,0139$ , ha  $1,0 < U < 3,0$ , és  $C_d = 0,0116$  ha  $3,0 < U < 5,0$  (Skaballanowitsch 1954).

A minták pontos  $U$  paramétereit a Mellékletben közöltem, az érték mindenhol 2.7 és 2.9 közé esett. Ennek a számítási módszernek, az átlagos szobahőmérsékletként  $T=20$   $^{\circ}C$ -nak felvett értékkel, az 5. táblázat mutatja végeredményeit.

5. táblázat Hazen számítása alapján kijött szivárgási tényezők

	$C_d$	1. minta	2. minta	3. minta	Átlaguk	Szórásuk
Hazen	0.0139	0.000369	0.000342	0.000362	$3,58 \times 10^{-4}$	$1,38 \times 10^{-5}$

A „U.S.-Bureau of Soil Classification” által javasolt áteresztő képességi együttható meghatározására alkalmas összefüggést több szerző is idézi, többek között Bialas és Kleczkowski (1970) is. Az egyenlet a szemeloszlási görbe  $d_{20}$ -hoz tartozó értékét használja.

$$k \left[ \frac{m}{s} \right] = 0,0036 * d_{20}^2 [mm] \quad [14]$$

A kapott eredményeket összefoglalja a 6. táblázat.

6. táblázat A Bialas és Kleczkowski képlete alapján kijött szivárgási tényezők

	1. minta	2. minta	3. minta	Átlaguk	Szórásuk
Bialas és Kleczkowski	0.000154	0.000178	0.000208	1.80x10 <sup>-4</sup>	2.67x10 <sup>-5</sup>

Farkas és társai (2019) cikke alapján, melyben hasonló tulajdonságokkal rendelkező homok talajt vizsgáltak a Bialas és Kleczkowski által meghatározott  $k$  értéket fogom a legrealisabbnak tekinteni és beépíteni a numerikus modellbe továbbá alkalmazni a kézi számításokhoz is (6. táblázat, zöld cella).

### Geotechnikai vizsgálatok



11. ábra Változó víznyomású készülék

A szemeloszlási görbék mellett még a  $k$  szivárgási tényező meghatározható geotechnikai mérés segítségével is. A kísérlet elvégzésére a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában volt lehetőségem. A mérést változó víznyomású készülékkel végeztem (11. ábra).

A kísérlet első lépéseként egy a szabványnak megfelelő 3.8 cm átmérőjű és 5.5 cm magas réz hengert töltöttem meg az iszapos homokkal, majd azt vízzel teli tálkába helyezve telítettem. Szabad szemmel is látható volt, ahogy a kapilláris úton felszívódik az anyagban a víz, egészen a minta tetejéig. Ezt követően a telített mintára ráhelyeztem egy légtelenített vízzel feltöltött beosztásos nyomócsövet. A nyomócső csapjának megnyitásával egyidőben elindítottam egy stopperórát is. A folyamat közben leolvasásokat végeztem, hogy a nyomócsövön belüli bizonyos vízszint magasságok elérése mennyi idő alatt következett be az eredeti vízmagassághoz képest. A víz által bekövetkezett vízszint csökkenés és ahhoz tartozó időintervallum

adatok kiértékeléseként előállt a keresett  $k$  szivárgási tényező.

Ezt a kísérletet kétféle mintán végeztem el. Az egyik még beépítés előtt álló anyag volt, a másik pedig az 1:20-as méretarányúmodellből a vízoldali rézsű talpszegélyénél kivett iszapos homok volt. Ez utóbbin már lezajlottak mérések, így nedvesebb, átmosottabb volt, és kérdéses volt, hogy a töltéslábnál változtak-e az anyagjellemzők. A még nem felhasznált anyag szivárgási tényezőjére  $k = 1.978 \cdot 10^{-5}$  végeredményt kaptuk. A másik mintán két mérés

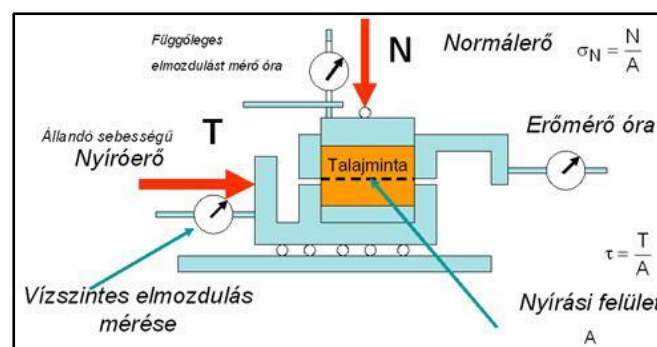
zajlott, eredményképp  $k = 4.213 \cdot 10^{-7}$  és  $k = 4.805 \cdot 10^{-7}$  állt elő. A szivárgási tényezőre kijött értékek azt mutatják, hogy az iszapos homok kissé frakcionálódott a fizikai mérések során és a mentett oldalra mosódtak a kisebb szemcsék. Így a nedvesnek nevezett kísérletek alapanyaga nem számít jó mintavételnek, ha a gáttestet felépítő alapanyagra vagyunk kíváncsiak, mert iszaposabb.

A vizsgálatok alapján kapott vízáteresztőképességi együtthatók közül a Bialas és Kleczkowski (1970) képletében kijött értéket fogom használni. Ennél a számításnál jött ki a szemeloszlási görbék alapján legkisebb érték, de nagyobb, mint a geotechnikai kísérletek útján kaptak. Galli László szerint (OVH 1987) ez a paraméter megfelel az átmeneti folyósodó talajra. A geotechnikai kísérleteknél a „száraz” minta paramétere egy reális adat lehet, viszont az emberi tényező okozta pontatlanság miatt nem ezt a paramétert használtam a továbbiakban.

### Talajfizikai paraméterek vizsgálata geotechnikai metódusok útján

Az iszapos homok nyírószilárdságának megmérésére is a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában került sor. A nyírószilárdsági paraméterek megállapítása közvetlen nyíróvizsgálattal történt (12. ábra). A kísérlet alapelve, hogy a mintában egy meghatározott síkon törést idézünk elő úgy, hogy ismert normál- és nyírófeszültséget működtetünk. Az erők ismeretében a kérdéses paraméterek számíthatóak.

A kísérlet kezdetén egy szabványnak megfelelő, két keretből álló nyíródobozba bekészítettem a vizsgálni kívánt mintát. A négyzetes minta méretei a következők voltak: szélessége két irányban 6 cm, magassága 2 cm, így az oldalai aránya az 1/3-ot nem haladta meg, az előírásokat kielégítve. A nyíródobozt a készülékbe behelyezve először csak a függőleges feszültséget működtetve a konszolidáció kivárása történt és a függőleges elmozdulásokat mértük meg. Aztán a doboz felső keretét egyik irányba húzva, elkezdtük működtetni a nyíróerőt. A kísérlet közben számítógép rögzítette, mekkora függőleges és vízszintes elmozdulás keletkezett a nyíróerő függvényében, ez alatt a normálerő konstans volt. A mérések jegyzőkönyvei a Mellékletekben találhatóak. A kísérletet a 12. és 13. ábrák szemléltetik.

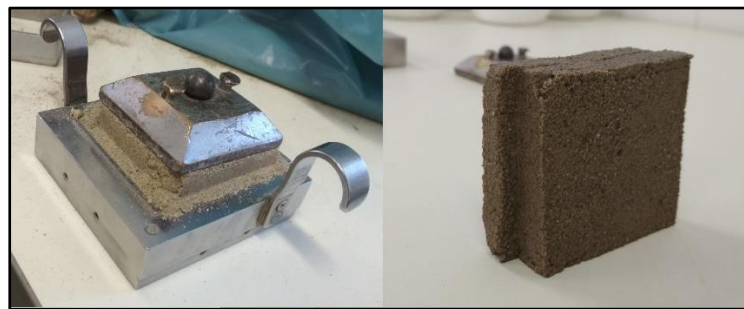


12. ábra A közvetlen nyíróvizsgálat felépítésének szemléltetése (MECSI 2009)

A kísérlet nagy előnye, hogy egyszerű és viszonylag könnyen és olcsón kivitelezhető. Kritikaként viszont ellene szól, hogy a létrejövő feszültség eloszlása nem egyenletes, a széleken indul meg a törési állapot, tehát a nyírt felület folyamatosan változik.

A végeredményként kapott talajfizikai paraméterek értékei a kohézió és a belső súrlódási szög csúcs- és maradó értékei, illetve a vizsgálat során megállapíthatók a különböző sűrűségek, a hézagtényező valamint a telítettség paraméterei is. Ezeket az adatokat építettem be a numerikus modellező programba is.

Ezt a mérést is kétfajta mintán végeztem el: száraz töltésanyagon és a töltésből kiemelten (13. ábra). Az eltérés a kapott paraméterek között jóval kisebb, mint a szivárgási tényező meghatározásánál.



13. ábra Balra a száraz még be nem épített, jobbra a nedves, már elnyírt minta.

A kétfajta mintán végrehajtott mérések alapján kijött jellemző paramétereket a következő táblázatok foglalják össze (7. és 8.. táblázat).

7. táblázat A nedves minta anyagjellemzői

Nedves	Mértékegység	Kezdeti állapot			Terhelés utáni állapot		
		50	100	150	50	100	150
Terhelés	kPa						
Szemcsesűrűség	g/cm <sup>3</sup>	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Száraz sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1.87	1.87	1.87	1.88	1.90	1.91
Nedves sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	2.14	2.14	2.14	2.15	2.17	2.18
Hézagtényező	-	0.42	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39
Telítettség	-	0.90	0.90	0.90	0.92	0.95	0.97

8. táblázat A száraz minta nyírószilárdsági tulajdonságai

Száraz	Belső súrlódási szög	Kohézió
Csúcsérték	34°	5.7 kPa
Reziduális (vég) érték	34°	1.6 kPa

Az előbbi tulajdonságok bemutatása azért történt, mert ezeket használtam fel talajfizikai paraméterként a további vizsgálatok és számítások elvégzésekor. A nedves mintán kapott anyagi jellemzők alkalmazása mellett döntöttem, mert úgy véltem az a vízzel telt állapot jobban jellemzi az helyzetet melynél a vizsgálatokat végezzük. A napokig eltartó árvíz mellett egy gát nagy része biztos telítetté válik, mely állapotot inkább ezek a tulajdonságok írják le. Viszont nyírószilárdsági paraméterek kiválasztásakor a száraz minta eredményeit vettem alapul, mert a nedvesen kapott eredményekben látványos hiba tűnik fel, ugyanis a reziduális értékeket nagyobbak jegyezte a program, mint a csúcsértékeket.

## 2.4. A kisminta modellen végrehajtott mérések menete

A fizikai modellen 63 szivárgási mérést végeztem el. A megfigyelések 4 különböző vízszint mellett zajlottak, a két egymástól eltérő gátkialakításnál egyaránt.

Egy mérés indítása a két oldali vízállás beállításával kezdődött. A vízoldalon első mérésnél csak a pontos vízszintre kellett beállítani, majd a vízszintek változtatását kellett megvalósítani a vizsgálatok között. Két mérés között meg kellett várni, hogy az áramlás permanenssé és így a hozam konstanssá váljon, valamint a gáttestben kialakult vízfelszín leolvasott magasságai is változatlanok maradjanak.

A vízfelszín csökkentésénél ügyelni kellett a szintváltoztatás sebességére. Ha rögtön a valóságban 1 méternek számító magasságkülönbséget okoztam a bukóval, jelentős anyagszerkezeti hibák jelentek meg, pl. láthatóan porózusabb lett az anyagváz (14 és 15. ábra).



14. ábra A gyors víz leeresztésnél fellépő anyagszerkezeti változás felülnézetből



15. ábra A gyors víz leeresztésnél fellépő anyagszerkezeti változás oldalnézetből

A mentett oldali bukón csak egyszer kellett jelentősen változtatni, amikor a gát átalakítása történt. A mentett oldali vízszintet mindig a gát talpának magasságához igazítottam.

Miután ezeknek a beállítása megtörtént és a modellterben a vízszint láthatóan már nem ingadozott, bizonyos időközönként történhetett az adatok regisztrálása.

A modellbe 10 darab piezokivezetés lett építve. Egy híján az összes az agyagréteg felső síkja fölött 2 cm-rel, 60 cm magasságban került elhelyezésre. 6 db közülük a 2015-ös modellből változatlanul a helyén maradt, a maradék hármat pedig Szloboda (2015) méréseire támaszkodva a kavicsréteg aljáról helyeztem feljebb, ugyanis ő is belátta, hogy a mérések szempontjából nem sok szerepet játszottak a kavicsrétegben, hisz csak az agyag vízzáróságát bizonyították. Az én összeállításomban csak egy piezocső maradt a legalsó rétegben, hogy igazolja, hogy az agyagon nem szívárog át víz. A nyomásmérő kivezetések konkrét helyei a következő táblázatban olvashatók, ezt az 3. és 4. ábrák is illusztrálják.

9. táblázat A piezokivezetések elhelyezkedése

	Sorszama	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Piezokivezetések	Magassági elhelyezkedés alulról mérve [cm]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	12
	Horizontális elhelyezkedés balról a modell szélétől mérve [cm]	15	29	51	75	95	115	150	167.5	181.5	124
	Horizontális elhelyezkedés balról a gát vízoldali talpától mérve [cm]	12.5	26.5	48.5	72.5	92.5	112.5	147.5	15	179	121.5

A mérések során arra törekedtem, hogy beálljon a permanens állapot és az akkor kialakuló vízfelszín megállapítása volt a célom. Ehhez a peremfeltételek pozicionálása után, általában fél, egy és két óra elteltével is megmértem a vízhozamot és leolvastam a piezométereken beállt vízszinteket. Ez a pár mérés csak az összehasonlítás alapjául szolgált, legtöbbször napokat kellett várni, hogy állandó vízhozam alakuljon ki, míg előfordult, hogy a nyomásszintek csak minimálisan változtak, akár a beállítás után két órával történt leolvasáshoz képest is. A leingadozóbb mérésnek az első bizonyult, akkor valószínűleg a gát vízzel való telítődése is megtörtént, azt követően már gyorsabban létrejött az állandó vízáramlás. A vízhozam mérését köbözéssel végeztem, ez megmutatta, hogy egy perc alatt mennyi űrtartalmú víz folyt keresztül a változatlan vízszintek mellett a töltéstesten.

## 2.5. A kézi számítási módszerek bemutatása

A tervezett gát állékonyságának ellenőrzését és a szivárgásának vizsgálatát Galli László (1976) módszerével elemeztem. A számítások vonalas létesítményként kezelik a földművet, így a hosszirányú kiterjedést elhanyagoljuk és csak a keresztmetszvény jellemzőit használjuk. Így a kapott adatokat mindig egy folyóméterben értjük, de ennél a módszernél a dimenziók is jelölik majd ezt a folyómétert, a másik vizsgálatokkal ellentétben

Már az állékonyság megvizsgálásához is elkerülhetetlen a szivárgási felszín görbe felállítása, melynek alapja a Kozeny-Casagrande-féle feltételezett szivárgási felszín egyenlete, melyet a kilépési pontnál Mallett egyszerűsített. Sokféle egzakt számítási módszer létezik a felszín meghatározására, a legtöbb differencia a kilépési pont meghatározásában van. A választottnak az az előnye, hogy bármilyen töltésalakhhoz rugalmasan és egyszerűen alkalmazható, a szakirodalom is évégett preferálja. A számítás a víz mozgásának felső határát egy parabolával közelíti, ami csak a geometriai tulajdonságok függvénye. A felszín görbe alapfeltevése, hogy a gátban már kialakult az állandó jellegű permanens áramlás (Galli 1976).

A stabilitási vizsgálatok elvégzéséhez javarészt a szivárgási görbének csak pár mértékadó szelvényében kell meghatározni az ordinátáját. Az állékonysági mutatók meghatározására elég csak a be- és kilépő magasságot a mentett- és vízdali koronaél szelvényében, továbbá a töltéslábtól számítva a mentett oldali rézsű 0.6-szoros függvényében levő vízfelszíneket megállapítani. Értelemszerűen a pontosabb szivárgási görbe érdekében ajánlott minél több helyen kiszámítani az ordinátákat (Galli 1976).

A két kialakítás között különbséget csak a vízhozam számításnál kell figyelembe venni. Az eltérést a szivárgás helyszíne adja. Míg a vízzárónak feltételezett altalajnál a vízmozgás egyedül a trapéz töltéstesten át történik, addig a második változatban az áramlás az altalajban is játszódik, ezzel is a vízhozamot növelve egy függvényben.

A hidraulikai állékonyság ellenőrzését követően a teljes gátat leíró, illetve a mentett oldali rézsűt jellemző elcsúszáshoz tartozó ellenállások és terhek hányadosát hasonlítottam össze a biztonsági előírásokkal.

Az eddigiekkel ellentétben a vízdali rézsű statikai ellenőrzésénél már szerepet játszott az időfaktor is. A hirtelen vízszintapadás jelenségénél a víz felszíne már lecsökkent, míg a gáttest még vízzel telítve áll, amely így a víz felőli rézsűben könnyen tönkremenetelt idézhet elő. Természetesen az apadás gyorsaságának függvényében dől el, hogy meghibásodik-e a váz. Lassú vízállás-fogyatkozásakor a töltésben levő víztelítettség tudja követni az ürülést.



Az említett jelenséghez hasonló én is megtapasztaltam, mikor nem a megfelelő tempóban állítottam a vízóldali peremfeltételen, hanem rögtön a vizet beengedő bukóval a valóságban 1 méterrel egyező vízszintcsökkenést idéztem elő (lásd 14. és 15. ábra).

## **2.6. A Rocscience véges elemes szoftver bemutatása**

A keresztmetszet vizsgálatának harmadik módja a végeleemes modellezés. A munkám során Rocscience szoftvercsomag RS<sup>2</sup> modulját alkalmaztam.

### **2.6.1. A program ismertetése**

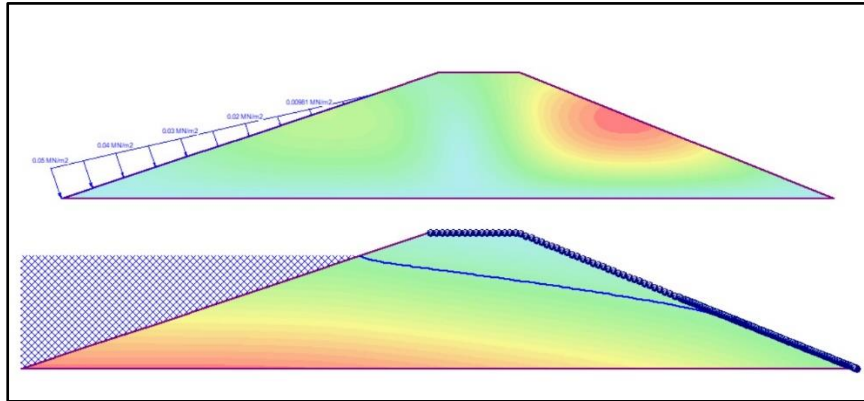
A Rocscience cég főként geotechnikai problémák megoldására szánt programokat készít. A program, mind kőzet, mindpedig talaj modellezésére is megfelelő. Az RS<sup>2</sup> modellező nagy előnye még, hogy igen változatos lehetőségeket kínál fel, hogy a már megépült vagy az épp tervezett szerkezetek ellenőrzése minél pontosabban történhessen, ezért nyílik lehetőség arra, hogy a modellbe többek között cölöpök, geotextiliák és támfalak is beépítésre kerülhetnek. Az eredetileg is sokszínű talajmechanikai feladatok (alagutak, üregek, töltések, rézsúállékonyság) megoldása mellett mára már naprakésznek tekinthető vízáramlástan törvényszerűségek terén is, ezért használhattam fel én is a felszín alatti szivárgások számításához.

A programot igazán felhasználóbarát felület és gyors számítás jellemzi. Az egyszerű kezelhetőség a jó felépítésnek is köszönhető. Az RS<sup>2</sup> három modulból tevődik össze: egy modellező, egy számító és egy eredményeket szemléltető része van

### **2.6.2. A végeleemes modell felépítése**

Ennek a résznek a segítségével elkészíthetjük, majd módosíthatjuk a kívánt modellt. Az alapvető tulajdonságok között megszabhatók különféle modellbeállítások, például a modellezendő építési fázisok száma, a talajvíz-adatok, iterációk részletei, használt mértékegységek. Ezt a geometria megrajzolása követi, ami megoldható a program keretein belül is, de a nagyobb eszköztárral rendelkező CAD programok felhasználásával elkészített dxf fájl is beimportálható. Ebben a modulban zajlik az anyagok tulajdonságainak definiálása.. A modellezőben kell elkészíteni a végelemekre történő felosztást és a peremfeltétel-beállítást is. A behálózás történhet automatikusan a program által generálva, de a felhasználó is megadhatja. A behálózásnál érdemes a háló minőségi kialakítására törekedni, (ennek ellenőrzésére is van lehetőség az RS<sup>2</sup>-ben), illetve ahol a fontos jelenségeket várjuk, praktikus sűríteni a felosztáson. A modellező részben kell a vonalmenti, felületen megoszló vagy koncentrált terheket is felrakni a vizsgálandó szerkezetre, ha azokra szükség van.

A vízzel kapcsolatos beállítások is ebben a modulban történnek. A víz jelenlétét kétféle módon lehet modellezni: ha a vízzel statikai számításokat szeretnénk végezni, akkor elég vízteherként definiálni. Ekkor a modell a későbbi modulokban a vízteherből származó feszültségeket és elmozdulásokat fogja kiadni. De ha a felhasználó a víz szivárgásából származó következmények vizsgálata érdekében folytatja a futtatást, akkor vizes peremfeltételként kell kezelni, melynek eredményeképp előállhat többek között pórúsvíznyomási ábra vagy a kialakult vízfelszín görbéje.



16. ábra Vízteher, illetve víznyomás peremfeltétel definiálásakor kapott eredményábrák,

Felül: Elmozdulás ábra, Alul: Kialakult vízfelszín

A két gát felépítését AutoCad rajzolóprogram segítségével ábrázoltam, majd ezt importáltam be az RS<sup>2</sup>-be. A vízzáró altalajjal határolt gát modellezésénél többnyire csak a gáttest kontúrját vittem át, hiszen a fizikai kísérletek is igazolták a vízzáróságát az agyagnak. A másik kialakításnál a gát alatti rétegek is bekerültek a végeleemes modellbe.

Az alapbeállítások között a talajvízhez kapcsolódóan állítottam be a Steady State FEA (=permanens végeleemes-modellezés) állapotot. Ezzel a fontos beállítással tettem lehetővé a vízzel való számításokat.

A tervezés során akárhány talajtípust definiálhatunk, melyeket modellterülethez egy gombnyomással hozzáadhatunk. Az anyagtulajdonságok beírásához külön felugró ablak tartozik, mely fülein végig haladva minden jellemzőre megadhatjuk a mintáinkon mért saját értékeinket.

Az modellezéseim során alkalmazott három különböző típusú talaj tulajdonságait a 10. táblázat foglalja össze.

Az iszapos homok nyírószilárdsági paramétereit a száraz mintán végzett geotechnikai kísérletből, az anyagjellemzőit a nedves mintán végzett kísérletek alapján, a szivárgási tényezőt Bialas és Kleczkowski (1970) képletéből állapítottam meg. Az agyag és a kavics használt tulajdonságai szakirodalomból származó adatok (Bowles, 1996, OVH 1987).

10. táblázat A beépített anyagok tulajdonságai

Talajfizikai jellemzők értékei				
	Homokos iszap	Agyag	Kavics	Mértékegység
Fajlagos súly	21	18	27	kN/m <sup>3</sup>
Poisson tényező	0.3	0.3	0.3	
Young modulus	20 000	100 000	200 000	kPa
Húzószilárdság	0	0	0	kPa
Belső súrlódási szög	34	0	35	Fok
Kohézió	5.7	100	0	kPa
Reziduális húzószilárdság	0	0	0	kPa
Reziduális belső súrlódási szög	34	0	35	Fok
Reziduális kohézió	1.6	100	0	kPa
Porozitás	0.4152	0.5	0.5	-
Szivárgási tényező	$1.80 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-4}$	m/s

Az anyagok tulajdonságainak meghatározásánál állítottam be azt, hogy az önsúlyt vegye figyelembe a program, valamint, ahogy a táblázatból is sejthető, esetenként különböző lehet a szükséges anyag viselkedés is. Az elastic beállításnál rugalmas anyagmodell feltételezésével élünk, míg a plastic beállításnál képlékenyedő modellel. Ha az utóbbit hagyjuk jóvá, akkor tönkremenetellel is számol a szoftver, biztonsági tényező számolása is ezzel valósítható meg.

A gát megtámasztását a vízszintes irányban csuklós támaszokkal oldottam meg, a függőleges oldalak mentén görgős támaszok vannak.

### 3. Eredmények bemutatása és értékelése

#### 3.1. Laboratóriumi mérések

A 63 mérésből 43 történt vízzáró altalajjal, a maradék 20 a vízvezető altalajjal rendelkező kialakításban valósult meg. A részletes mérési folyamatról bővebben a Mérések menete, 2.4. fejezetben írtam.

##### 3.1.1. A kialakult vízfelszín

A vízáramlást szemléltető szivárgási görbék pontos helyzetéről a behelyezett piezocsövek segítségével nyertem képet. A leolvasó táblán a háttérben milliméterpapír és mérőszalagok könnyítették a munkámat.

Míg a vízhozamok állandóságáig napokat kellett várni, addig a szivárgási felszín görbe egy-egy pontját szemléltető piezométerekben rövid időn belül arra a magasságra kúszott a víz, ahol

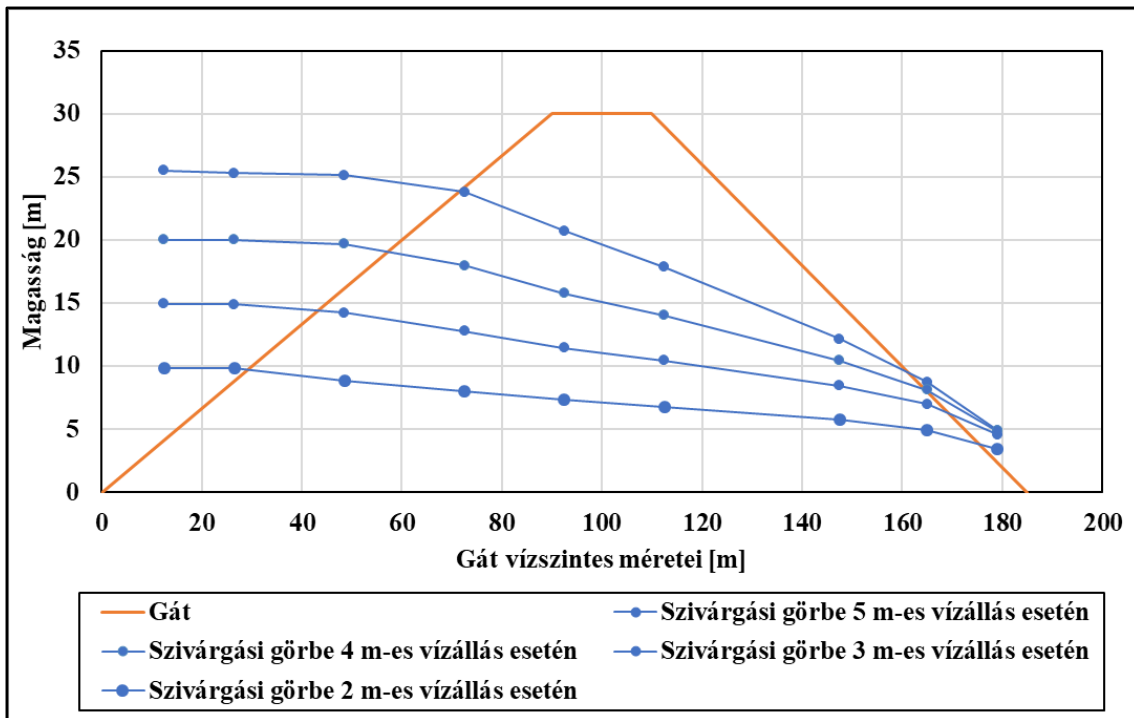
a mérés teljes lejátszódása alatt csupán egy-néhány mm ingadozás történt még. A mm-es eltérések nyilvánvalóan pontatlan leolvasásokból is eredhetnek. A 2015-ben Szloboda által folytatott méréseknél a piezotáblán leolvasott értékek állandóságakor történt átszivárgásra mennyiség mérés, akkor is csak egyszer. Szloboda vízhozam értékeit nem tekinteném relevánsnak, hiszen a piezometrikus nyomásszintek jóval gyorsabban közel állandó állapotot mutattak, mint hogy a vízhozam állandósága bekövetkezett volna. Véleményem szerint szükség volt a vízhozam többszöri lemérésére, hogy a permanens állapotot egyértelműen ki lehessen mutatni. A 2015-ben mért vízhozamok nagyságrendekkel eltérnek az általam mértektől, ennek elsődleges oka az általam kialakított nagyobb valós méretű gáttest és az alkalmazott anyagok különbsége lehet.

A gáttestet felépítő anyagok jelentős különbségét bizonyítja az a megállapítás, miszerint kimosódás valószínűleg csak az én munkám során következett be. Ebben az irányban Szloboda nem ír semmit, de a diplomamunkájában előforduló képeken semmi hasonló alakváltozás nem látható. Feltételezésem szerint ha valami elmozdulást észlelt volna, legalább pár mondatban megemlítette volna. Szloboda kísérleteihez képest a piezokivezetéseket sűrítettem, és a mentett oldali talpszegélyhez közelebb is lett elhelyezve egy piezocső, így az én méréseim részletesebbek ugyan, de az eltérő anyag miatt további összehasonlításra nincs mód.

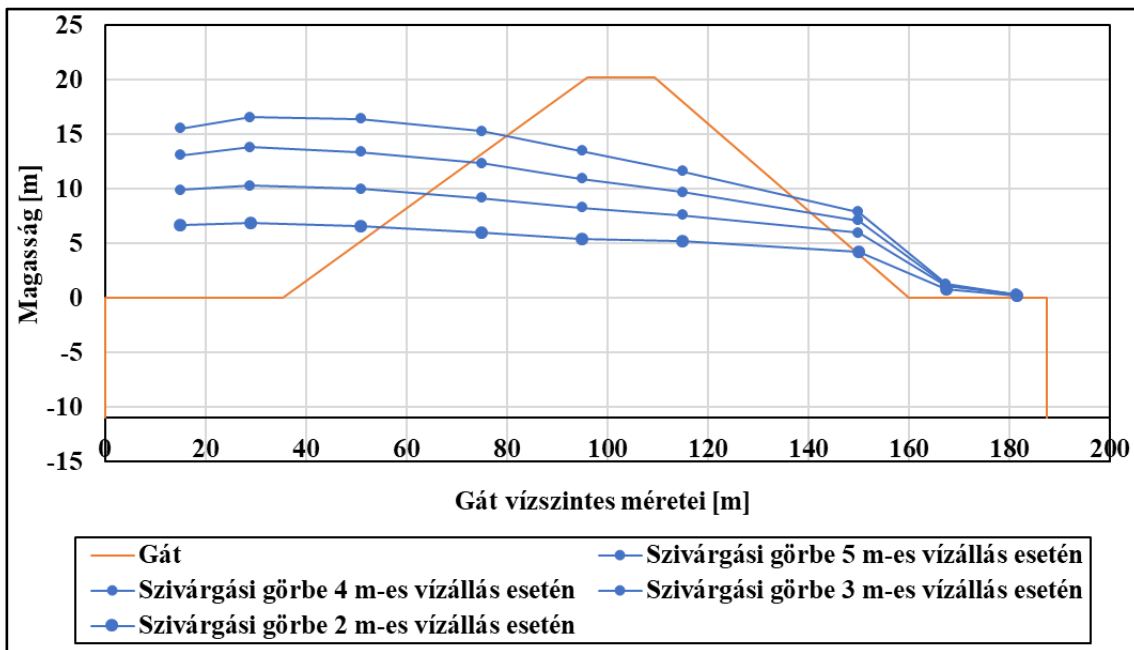
A jelen esetben zajlott kimosódást a szivárgási görbéim is igazolják. Magasabb nyomásszint uralkodik a 9-es szelvényben minden mérés esetében, míg a második kialakításnál a 7-es és 8-as kivezetésnél is, mint maga a mentett oldali részsű. Túlnyomásra enged következtetni a kísérlet, ez eredményezheti az iszapos homok megfolyását.

A gáttestbeli áramlás felső határát kirajzoló görbék egymást nem keresztezve közel egyeneseket írnak le töltésen belül, egész addig, míg a részsűn levő kilépés be nem következett, utána hirtelen töréssel, egymáshoz egyre jobban közeledve érik el a mentett oldali vízállást. A vízáteresztő talajon az utolsó két mérési pontban már igazán hasonló nyomásértékek adódnak, közel a talajszinthez (17. ábra).

A vízáteresztő altalajjal rendelkező kialakításnál néhány piezometrikus szintnél egyértelmű hibát érzékelttem, a piezocsövek a vízállás magasságát hibásan alacsonyabbra adják vissza a szabad víz felszíne felett is. A piezocsöveket ellenőrzés alá vettem, de úgy tűnt, nem azok a hibák forrásai (18. ábra).



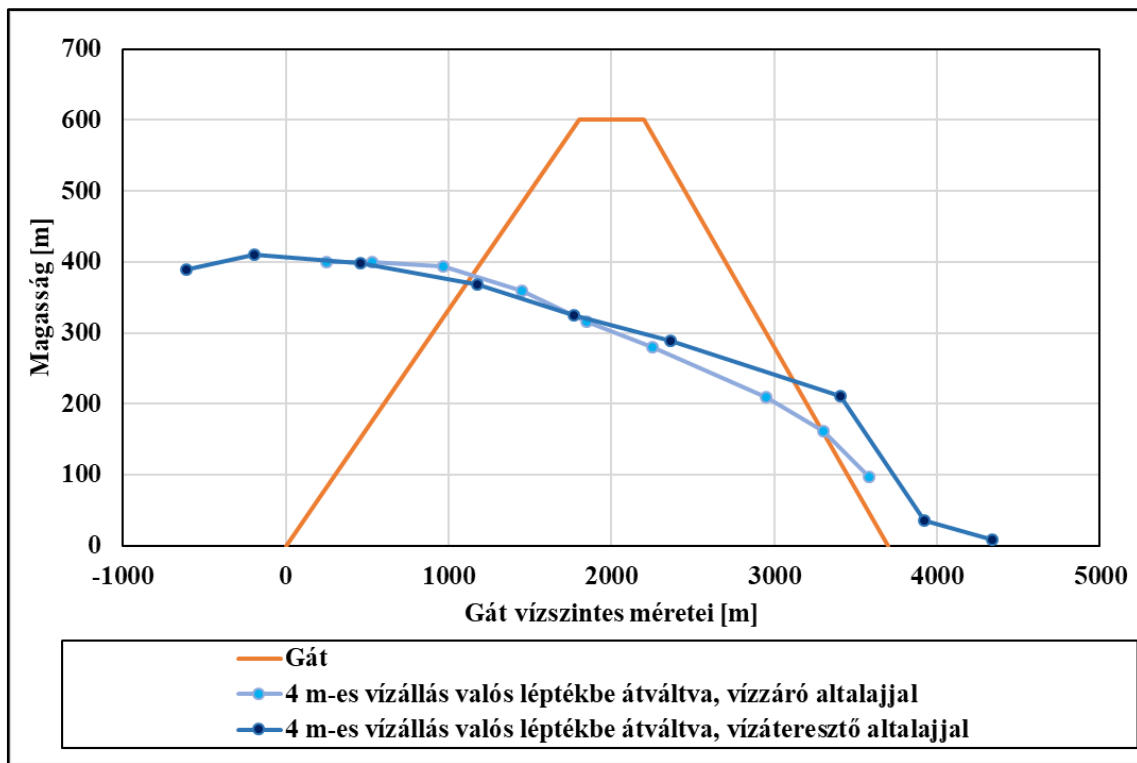
17. ábra Piezometrikus nyomásszintek a vízzáró általajon elhelyezkedő gátban.



18. ábra Piezometrikus nyomásszintek a vízáteresztő általajon elhelyezkedő gátban

A két kialakítás közötti összehasonlítás nem egyszerű, mert az eltérő méretarány miatt a piezok által figyelt függélek nem esnek egybe. Így az összevetést csak valóságos méretbe átváltva, grafikus ábrázolás útján tudtam megvalósítani. Mindegyik vízállás esetén a szemléltető ábrán az látszódik, hogy a két felszín görbe metszi egymást, ez látható a 19. ábrán

is. Mivel az előző bekezdésben említett mérési hiba kiküszöbölésére nem találtam lehetőséget, ezért többek között minden belépési pont lejjebbre csúszott a második kialakítás megvalósításánál, pedig a gáttestbe való belépés helye egyértelmű, nem lehetne eltérés. Ezért gondolatban a megfelelő belépési pontra igazítva a két görbe azon két értékét már kivehető lenne, hogy a jobban kicsinyített modellfelépítésnél, a szivárgás görbe a várakozásaimmal ellentétben (az altalajon is átszivárogha kevesebb víz áramlik a töltésen át) magasabban fut mindenütt.



19. ábra A két kialakítás nyomásszintjei egy ábrában összegezve.

### 3.1.2. Átszivárgó vízhozam

A fizikai modellben történő mérések egyik fontos momentuma volt, hogy a vízhozammérés mindig megtörténjen, hiszen a vízfelszín is csak akkor tekinthető elfogadhatónak, ha közben az áramlás permanens. Ezért mindig legalább kétszer mérőhengerrel, köbözéssel megállapítottam, hogy 1 perc alatt mennyi vízmennyiség szivárgott át. A mérés többszöri megismétlése, az emberi tényezők hatása miatt bekövetkező pontatlanságok csökkentése végett is indokolt. Ha a víz mennyisége csak csekély mértékben (kisebb, mint 10% eltérés) változott az előző mérésekhez képest, akkor időben állandónak tekintetem az állapotot. Az utolsó 2-4 mérés már

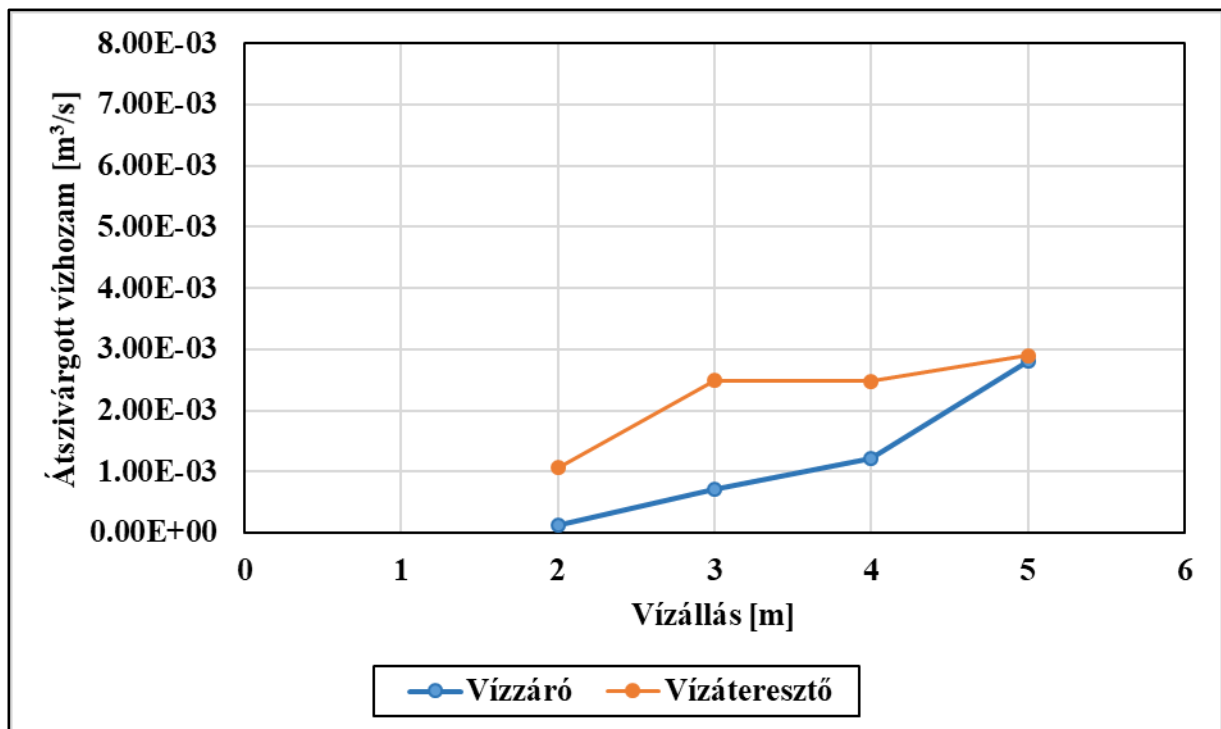
az állandó vízhozam mellett kellett történnjen, ezek átlagolásával kaptam meg a mértékadónak számító vízhozamot az adott vízállásra.

Ami igazán szembetűnő különbség a két különböző talajrétegzettségű modellváltozatnál, hogy míg a vízzáró altalajnál a hozamok közel egyenes arányban változnak a vízállással, úgy a vízáteresztő altalajjal rendelkező kialakításnál az egyik vízállás növekedés következtében fogyatkozott a hozam. Bár a hozamok nagyobbak lettek kisminta törvénnyel átváltva a gáttesttel egyező altalajúnál, de a laborban ez igen kicsiny vízszivárgást jelentett (jegyzőkönyvekben látható, ami a Mellékletek között olvasható). Így pár százalékos köbözési hiba ilyen kis mennyiségeknél is nagyobb hibát eredményezhet, amennyiben azt egy nagyobb arányszámmal kell megszoroznunk az átváltás érdekében. Ennek kiküszöbölése érdekében kis hozamoknál már egy  $1 \text{ cm}^3$  leolvasási pontosságot biztosító üvegmérőhengert alkalmaztam.

Ahogy azt korábban említettem, valós léptékbe átváltott vízhozam nagyságoknál az alul agyagréteggel határolt töltés esetén volt kisebb a szivárgás (11. táblázat és 20. ábra). Ez előre sejthető volt, hiszen a mederfenék egyik helyen engedi a beszivárgást, míg az agyagnál közel vízzárónak tekinthetjük. Ez a hossz nem nagy a modellben (kb. 2.5 cm), de számíthat, mert így az előbbinél nagyobb a beszivárgást engedő felület. Másik indok lehet a beszivárgási felület geometriájának eltérése, az egyiknél az iszapos homok hegyesszöget zár be, míg a másikinál egy tompaszög figyelhető meg. Feltételezésem szerint egy szűk hegyesszögön kevesebb víz tud beáramlani, mint egy olyan hegyesszögön, ahol körülötte még alul is vízáteresztő anyag veszi körül (ez a tulajdonképpeni tompaszög).

11. táblázat A laborban mért vízhozamok értékei különböző vízállásoknál

Fizikai labormérések		2 m	3 m	4 m	5 m
Vízzáró talajon	Kismintáról számított valóság [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$1.36 \times 10^{-4}$	$7.07 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-3}$	$2.80 \times 10^{-3}$
Vízáteresztő talajon	Kismintáról számított valóság [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$1.06 \times 10^{-3}$	$2.49 \times 10^{-3}$	$2.47 \times 10^{-3}$	$2.90 \times 10^{-3}$



20. ábra A laborban mért vízhozamok nagysága

### 3.1.3. A töltés tönkremenetele

Bár a munka kezdetekor nem volt a konkrét céljaim között a tönkremenetel-vizsgálat, az időközben lezajló kísérletek során láthatóvá vált, hogy a gát az anyagából kifolyólag hajlamos arra is.

Elsőnek a már említett hirtelen vízszint-csökkenésnél tapasztaltam a szerkezetben való látványos anyagszerkezeti változást (14. és 15. ábra). A korábban hét napig konstans vízállás csökkentése szabad szemmel is felfedezhető pórusokat hagyott maga után. A kézi számítások nem jelezték, hogy ez a jelenség felmerülhetne, de a vízoldali rézsű a legnagyobb víz levonultával aktív földnyomás hatására megrongálódhat. A jelen modellen észlelt vízoldali tönkremenetel nem teljesen tekinthető mérvadónak, mert a valóságban csak igazán extrém esetben történhet ilyen gyorsan lezajló apadás.

Ezen fellelkesülve megpróbáltam a víz parti rézsű megcsúszást szándékosan is előállítani olyan léptékben, hogy az a valódi léptékekre visszaszámolva is reális lehessen. A kísérletben a 10 óra alatt lejátszódó 2 méteres vízszintcsökkenést próbáltam modellezni. Annak ellenére, hogy ez egy folyónál még mindig igen jelentős fogyatkozásnak számít, a kísérlet nem adott értékelhető eredményt, a kézi számításoknak megfelelően. A töltés függőleges irányú megoszló erővel való terhelése esetén lehet, hogy megvalósult volna a tönkremenetel. Ez alapján az egy mérés alapján úgy tűnik, hogy ebben a földműben nem keletkezik vízoldali állékonyságvesztés,



ha semmilyen külső terhelés nem működik rajta, és 10 órán belül végbemenő vízszint fogyatkozás kevesebb, mint 2 méter.

A másik feltűnő változás a megvalósult szerkezeten a mentett oldalon történt. Az előbbi szituációval ellentétben ez a jelenség többször is bekövetkezett. Már az elsőként összeállított gátban megfigyelhető volt a 8-as piezokivezetéséhez közeli szelvényben, a 8-astól kb. 3 cm-re a talpszegélyhez közeledve, hogy kimosódás megy végbe. Az iszapos homok egy része megfolyt és az altalajra rácsúszott. A két nagyobb mérési etap között jobban kiszárítva megpróbáltam helyreállítani a töltést, és a tervezett geometriát visszaépíteni, de az azután történő elárasztást a helyreállított geometria sem bírta. Mikor a gát kialakítás a vízáteresztő talajra épült, az első vízállás beállításnál, külön figyelmet szenteltem, hátha a jelenség megismétlődik és valóban a kimosódás teljesen egyértelműen lejátszódott. Mind a három kimosódást rögzítettem fényképen (21. ábra).



**21. ábra Bal:** Az első észrevett tönkremenetel. Közvetlenül vízzáró rétegen álló töltés mentettoldali megfolyása. **Középső:** A második kialakításon az első feltöltéskor bekövetkezett a megfolyás. Először V alakban, majd fél nap alatt az alakja kiegyenesedett. **Jobb:** Megpróbáltam helyreállítani, de a végeredmény hasonló lett.

Amint korábban említettem, a már elárasztott mentett oldalból kitermelt mintán geotechnikai vizsgálatot is elvégeztem. A legszembetűnőbb eltérést a két mérés közt az átszivárgási tényezőre kaptam. A változó víznyomású készüléken mért k a két „nedves” -nek nevezett mintán átlagosan  $4,5 \times 10^{-7}$  m/s értékű lett, a száraz mintán mért  $2 \times 10^{-5}$  m/s-nál közel két nagyságrenddel kisebb. Ez azt igazolja, hogy az iszapos homok kicsiny szemcséi mosódtak a mentett oldalra.

A vízzáró talajra épített modellnél a maximális helykihasználásra törekedtem, ezért a talpszegély mindegyik oldalon a kerethez igen közel esett. Mikor kialakult a megfolyás megfogalmazódott a kérdés: Csak azért nem alakult ki a csúszólap, mert kevés hely maradt és a fizikai lehetőségek tartották vissza?

A kimosódás körülbelüli értékeit képek és szemrevételezés segítségével állapítottam meg (12. táblázat).

12. táblázat Kimosódás nagysága

Valóságra átszámított kimosódás	Horizontális nagyság	Vertikális nagyság	A lefolyás ferde hossza	Mélység
Gát vízzáró talajon, 1:20	~6.9 m	~2.8 m	~7.4 m	~15 cm
Gát vízáteresztő talajon, 1:29.72	~8.2 m	~3.3 m	~8.8 m	~30 cm

Az értékek összehasonlításakor már egyértelmű, hogy a nagyobb kicsinyítés alkalmazásakor jelentősebb elmozdulás keletkezett, nagyobb mélységekkel. Egyik oka ennek lehet, hogy az ekkora kicsinyítés már nagyobb pontatlansággal dolgozik, a másik ok pedig a már említett, a kialakuláshoz rendelkezésre álló terület nagysága.

A leolvasott piezometrikus nyomásszintek, melyek ezen a területen találhatóak, nagyon sokszor mutattak magasabb vízállást, mint amekkora a gát magassága abban a függvényben. Ezek tanulságaképp kimondható, hogy a túlnyomás hatására a víz a kisebb szemcséket felfelé irányította, majd a felszínen a vízzel együtt lefolytak, ameddig tudtak.

A geotechnikai vizsgálatok alapján az iszapos homok, amit felhasználtam, nem túl jó alapanyag egy ilyen szerkezet építésére és a tapasztalatok is azt mutatták, hogy vízzel telítve könnyen mozdul és nem állékony. Ezen indokok miatt tettem egy kísérletet arra, hogy a mérések befejeztével, 5 m-nek megfelelő vízszint mellett a gátkoronán lévő megoszló teherrel a töltést tönkretégyem. Az 5 méter magas vízszint mellett következik be elmozdulás a legkönnyebben. A kísérletet megelőzően numerikus modellben futtatásokat végeztem, hogy mekkora hatásra jön létre számottevő és jól kivehető elmozdulás. Ezek alapján az alkalmazandó tömeg nagyságát 13.6 kg-nak határoztam meg.

A laboratóriumban a gátra helyezett edényekbe vizet töltve egyenletesen növeltem a súlyt. Mikor már ezzel elértem az előre megtervezett tömeget és nem történt változás, akkor próbálkoztam az átmenet nélküli, hirtelen nagy erőbevezetéssel is. Igazán jelentős teher mellett is csak a koronába vájódott bele az teherelosztó fémlap, a rézsűn semmiféle alakváltozás nem következett be.

A terhelési próbák nagysága:

- Kezdetben folyamatos vízeresztés mellett a 24 kg-ot értük el.
- Ezután lefelé ható húzóerőbevezetéssel a körülbelül 45 kg-nyi terhelést engedtem rá.
- Végző próbaképp az emberi ránehezedés terhe hatott rá 80 kg nagyságúnak becsülve.

Mikor a végső hirtelen terhelés lezajlott, majd annak hatását szemléltem, megfogalmazódott, hogy az alsó terhelőlap nem megfelelő erre az erőátadásra, mert lehet, hogy nem az egész felszint terhelte, de nem állt rendelkezésre jobb eszköz. Mivel a bevájódás is csak a szélsőséges esetre történt meg, kijelenthető, hogy a megterhelést a földmű a vártnál sokkal jobban bírta.

## 3.2. Kézi számítások eredményei

A gáton végzett számításokban azokat a talajfizikai paramétereket alkalmaztam, melyeket már a 10. táblázatban is bemutatam. Az értékeket szakirodalomból vagy laboratóriumi vizsgálatokból nyertem. Ezekon kívül a Galli-módszer (1976) számításaihoz még a víz fajsúlyára volt szükségem. Ennek jele  $\gamma$ , és Magyarországon használatos értéke  $9.81 \text{ kN/m}^3$

### 3.2.1. A gát méretei

A számításokban alkalmazott méreteket és számításukat az alábbiakban mutatom be:

- $H$  vízoszlop magassága [ $m$ ],
- $MÁSZ$  mértékadó árvízszint [ $m \text{ B. f.}$ ], jelen esetben a mederfenékhez viszonyítva [ $m$ ],
- $TSZ$  talajszint [ $m \text{ B. f.}$ ], jelen esetben a mederfenékhez viszonyítva [ $m$ ].

Ezek alapján felírható az alábbi összefüggés:

$$H = MÁSZ - TSZ \quad [15]$$

- $m_t$  töltésmagasság [ $m$ ],
- $MB$  magassági biztonság [ $m$ ].

$$m_t = H + MB = 5 + 1 = 6 \text{ m} \quad [16]$$

- $KSZ$  koronaszint [ $m \text{ B. f.}$ ], jelen esetben a mederfenékhez viszonyítva [ $m$ ].

$$KSZ = MÁSZ + MB = 5 + 1 = 6 \quad [17]$$

- $K$  korona szélessége [ $m$ ].

$$K_{min} = K = 4 \text{ m, az általunk is használt minimális koronaszélesség} \quad [18]$$

- $\rho_v=3$  rézsű hajlása vízoldalon,
- $\rho_m=2,5$  rézsű hajlása a mentett oldalon.

Az előző értékeket felhasználva számítható a talpszélesség:

- $B$  talpszélesség [ $m$ ].

$$B = K + (\rho_v + \rho_m) \cdot m_t = 4 + (3 + 2.5) \cdot 6 = 37 \text{ m} \quad [19]$$

### 3.2.2. Kialakult vízfelszín

A vízszint (H) megegyezik a mértékadó árvízszinttel (MÁSZ), ami jelen esetben az 1 m-es magassági biztonság (MB) figyelembevételével 5 m lett.

$$H = m_t - MB = 6 - 1 = 5 \text{ m} \quad [20]$$

A gáton átszivárgó víz felszíne egy parabola egyenletével írható le:

$$y = \sqrt{(x + y_0)^2 - x^2} \quad [21]$$

ahol

$$y_0 = \sqrt{H^2 + d^2} - d = \sqrt{5^2 + 26.5^2} - 26.5 = 0.468 \quad [22]$$

$$d = B - 0.7 \cdot \rho_v \cdot H = 37 - 0.7 \cdot 3 \cdot 5 = 26.5 \text{ m} \quad [23]$$

A parabola egyenletével leírható görbétől eltérő lesz a felszín a belépési és a kilépési helyeken.

A belépési pont koordinátái:

$$x = b = B - \rho_v \cdot H = 37 - 3 \cdot 5 = 22 \text{ m} \quad [24]$$

$$y = H = 5 \text{ m} \quad [25]$$

A kilépési pont koordinátái:

$$x = \rho_m \cdot h_m = 2.5 \cdot 1.270 = 3.175 \text{ m} \quad [26]$$

$$y = h_m = \frac{H^2}{2d} \cdot \sqrt{1 + \rho_m^2} = \frac{5^2}{2 \cdot 26.5} \cdot \sqrt{1 + 2.5^2} = 1.270 \text{ m} \quad [27]$$

Amint már korábban említettem, a Galli-módszer (1976) bemutatásakor, a következő három szelvény meghatározásának szerepe az állékonysági vizsgálatoknál fog előjönni.

I. Szelvény

$$x_I = b_1 + K = 15 + 4 = 19 \text{ m} \quad [28]$$

$$y_I = h_I = \sqrt{(x_I + y_0)^2 - x_I^2} = \sqrt{(19 + 0.4676)^2 - 19^2} = 4.241 \text{ m} \quad [29]$$

II. Szelvény

$$x_{II} = b_1 = \rho_m \cdot m_t = 2.5 \cdot 6 = 15 \text{ m} \quad [30]$$

$$\begin{aligned} y_{II} = h_{II} &= \sqrt{(x_{II} + y_0)^2 - x_{II}^2} = \sqrt{(15 + 0.4676)^2 - 15^2} \\ &= 3.774 \text{ m} \end{aligned} \quad [31]$$

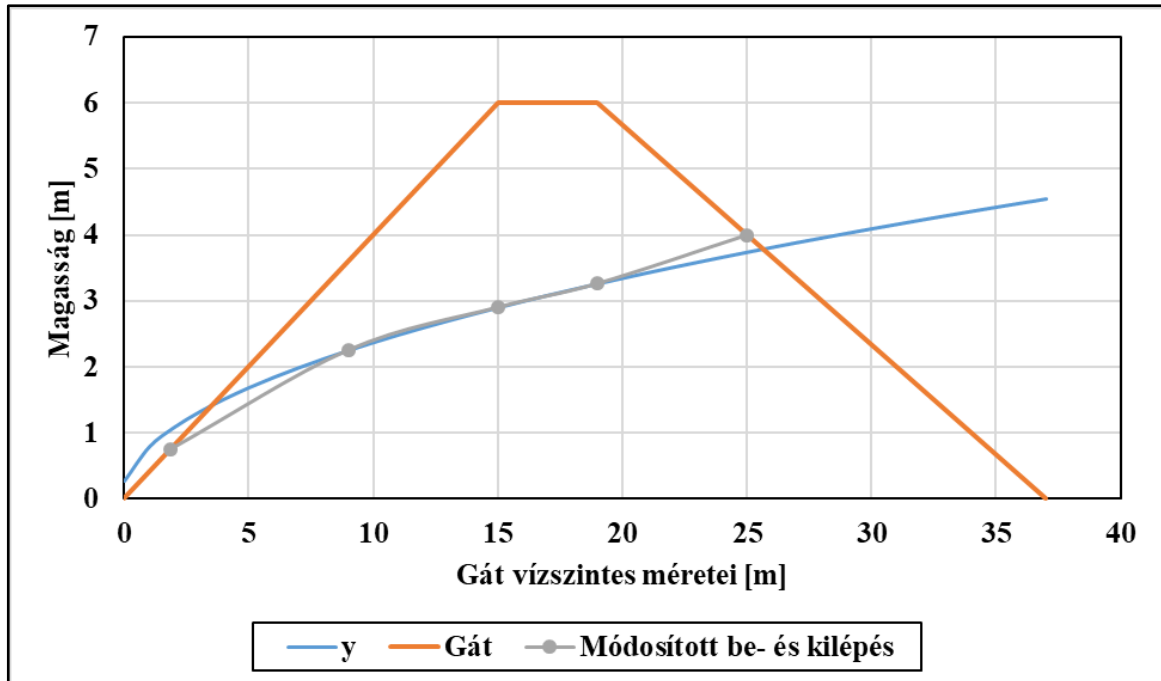
III. Szelvény

$$x_{III} = 0.6 b_1 = 9 \text{ m} \quad [32]$$

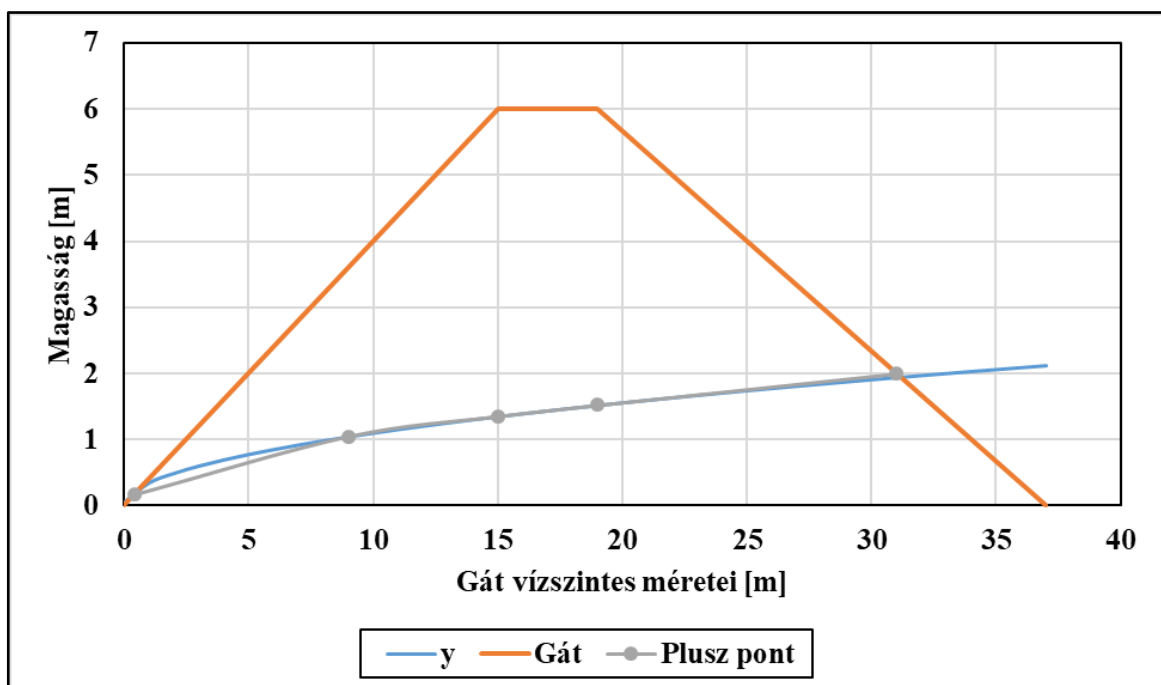
$$\begin{aligned} y_{III} = h_{III} &= \sqrt{(x_{III} + y_0)^2 - x_{III}^2} = \sqrt{(9 + 0.4676)^2 - 9^2} \\ &= 2.939 \text{ m} \end{aligned} \quad [33]$$

Mivel a tervezett árvízvédelmi töltések kialakításai csak az altalaj rétegzettségében tértek el egymástól és a gáttest trapéz geometriája egyező volt, csak eltérő léptékben kicsinyített, az

átszivárgási vízfelszínek között a metódus alapján nincsen különbség. A szivárgási görbe részletes kirajzolását is elvégeztem. Az abszcissa-ordináta párok táblázata mindegyik vízállás esetében a Mellékletek közt található meg. Az 5 méter és 2 méter magasságú vízszint esetén előálló két helyen módosított parabolákat mutatják be a 22. és 23. ábrák.



22. ábra Az 5 méteres vízállás esetén kirajzolódó szivárgási görbe



23. ábra A 2 méteres vízállás esetén kirajzolódó szivárgási görbe

### 3.2.3. Térfogatsúlyok

A geotechnikai vizsgálatok eredményei közül a gátból kitermelt mintáét használtam fel a térfogatsúlyok meghatározásánál.

A következő értékeket alkalmaztam:

- $\rho_s=2,65 \text{ g/cm}^3$  szemcsesűrűség,
- $w=14,3 \%$  víztartalom,
- $e=0,42$  porozitás.

Így a szilárd rész térfogatsúlya:

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g = 2.65 \cdot 9.81 = 26.00 \left[ \frac{kN}{m^3} \right] \quad [34]$$

Nedves térfogatsúly:

$$\gamma_n = \gamma_s \frac{1+w}{1+e} = 26 \cdot \frac{1+0.1430}{1+0.42} = 20.928 kNm^3 \quad [35]$$

Telített térfogatsúly:

$$\gamma_t = \frac{\gamma_s + e\gamma}{1+e} = \frac{26 + 0.42 \cdot 9.81}{1+0.42} = 21.211 \frac{kN}{m^3} \quad [36]$$

Víz alatti térfogatsúly:

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma}{1+e} = \frac{26 - 9.81}{1+0.42} = 11.401 \frac{kN}{m^3} \quad [37]$$

### 3.2.4. Átszivárgó vízhozam és hidraulikai állékonyság

A legnagyobb víznyomás az 5 méter magasságú vízoszlop esetén áll elő, ezért az állékonyság ellenőrzése is erre az eshetőségre történik.

Az első kialakításnál a szivárgás a csak a gáttesten át történik.

- $q$  átszivárgó hozam  $\left[ \frac{m^3}{s \cdot m} \right]$

$$q = k \cdot y_0 = 1.802 \cdot 10^{-4} \cdot 0.4676 = 8.426 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s \cdot m} \quad [38]$$

Kilépési gradiens, homokos talajnak ( $c \approx 0$ ) feltételezve a gáttestet:

$$i_{ki} = \frac{2}{3} \cdot \frac{q}{k \cdot h_m} = \frac{2}{3} \cdot \frac{8,426 \cdot 10^{-5}}{1.802 \cdot 10^{-4} \cdot 1.270} = 0.2454 \quad [39]$$

A megengedhető kilépési gradiens ugyanezen feltételezéssel:

$$i_{eng} = \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot \left( tg\varphi - \frac{1}{\rho_m} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_m^2}{1 + \rho_m^2}} = \frac{11.40}{9.81} \cdot \left( tg 34^\circ - \frac{1}{2.5} \right) \cdot \sqrt{\frac{2.5^2}{1 + 2.5^2}} = 0.2962 \quad [40]$$

A megengedhető kilépési gradiens az első kialakítású gátnál nagyobb, mint a tényleges, ezért a vízzáró altalajon álló gáttest hidraulikai állékonyság szempontjából megfelel.

A szivárgó rétegen álló gát kialakításánál a gát alatt is áramolhat a víz. A Galli-módszerrel ezt csak közvetve tudom számolni, mert a felhasznált szakirodalomban nem volt olyan számítás, mely egyszerre vette figyelembe a gáttesten és a töltés alatti rétegben való átszivárgást. (Galli 1976)

Átszivárgó hozam, fedőréteg nélküli felépítés:

- $k_0=1,802 \times 10^{-4}$  m/s vízvezető réteg szivárgási együtthatója,
- $d_0=3,269$  m vízvezető réteg vastagsága,
- $B_0$  egyenértékű gátszélesség [m].

A vizsgált keresztmetszetünk esetében a talpszélességgel ( $B$ ) helyettesítjük, hiszen nincsen a szakirodalomban leírttal megfelelő fedőrétegünk.

$$q_{altalaj} = \frac{H \cdot k_0 \cdot d_0}{B_0 + 0.8d_0} = \frac{5 \cdot 1.802 \cdot 10^{-4} \cdot 3.269}{37 + 0.8 \cdot 3.269} = 7.435 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s m} \quad [41]$$

A gáttesten átszivárgó hozam az első kialakításúéval egyező: [42]

$$q_{gáttest} = k \cdot y_0 = 8.426 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s m}$$

Ez alapján a teljes átszivárgó vízhozam, az előzőek összegeként áll elő.

$$q_{teljes} = q_{altalaj} + q_{gáttest} = 7.435 \cdot 10^{-5} + 8.426 \cdot 10^{-5} = 1.586 \cdot 10^{-4} \quad [43]$$

A kilépési gradiens:

$$i_{ki} = 1.36 \cdot \frac{H}{B_0} = 1.36 \cdot \frac{5}{37} = 0.184 \quad [44]$$

A szivárgó rétegbeli kilépési gradiens kisebb, mint a megengedett kilépési gradiens,  $i_{eng}=0,8$ . Hidraulikai állékonyság szempontjából megfelel, ezek alapján nem várunk talajban szivárgásból származó állékonyságvesztést.

### 3.2.5. Statikai állékonyság számítása

A statikai állékonyság számításainál is az 5 méteres vízszint lesz a mértékadó. Jelen esetben a külső, illetve belső vízteher jelenti az összes terhet, a hullámvízszintből származó és a jég okozta önsúlyt elhanyagolom, mert ezek hatását a laboratóriumban sem mértem. Későbbi vizsgálatok

során érdemes lehet ezeket a terheket is figyelembe venni mindhárom módszernél. Járműterhet nem veszek figyelembe, mert a gáttöltésen árvíz idején általában nem lehetséges közlekedés. A tönkremenetelt megakadályozó hatások a következők: önsúly, víz súlya, valamint a súrlódás. Bár a súrlódás határoló felületein mindkét réteg jellemzőivel meghatározandó az ellenállás és a kedvezőtlenebb a mértékadó, munkám során csak az egyikre volt mért eredményem, ezért én az iszapos homok tulajdonságaival dolgoztam. Az elmozdulást jelen esetben az alapsíkra (AS) feltételezzük, minden magasság ettől a síktól lett felvéve. A felhajtóerő figyelembevétele úgy történik, hogy a víz alatt levő részekben a nedves térfogatsúlyt alkalmazzuk. Így a két kialakítás között nem teszünk különbséget a következőkben, hiszen az alapsík felett elhelyezkedő földmű valós méretre átszámítva, mindkét esetben ugyanaz, csak az altalajrétegzettségben van különbség.

### Teljes gát statikai állékonysága elcsúszás esetén

A terhelést a víz nyomóereje jelenti.

Terhelés:

$$L = F_H = \frac{H^2}{2} \cdot \gamma = \frac{5^2}{2} \cdot 9.81 = 122.625 \frac{kN}{m} \quad [45]$$

A súrlódásból származó ellenállás:

$$R = T_g = tg \varphi \cdot \sum V + B \cdot c = tg 34^\circ \cdot 2076.915 + 37 \cdot 1.6 = 1460.097 \frac{kN}{m} \quad [46]$$

, melyben

$$\sum V = G_1 + G_2 + G_3 - F = 1123.414 + 512.051 + 441.45 = 2076.915 \frac{kN}{m} \quad [47]$$

Általános esetben az  $F$  az alapsíkra ható felhajtóerőt jelenti. ( $F = 0$ )

$\sum V$  számításához szükséges további paraméterek:

$G_1$ : Gáttest víz alatt levő része, víz alatti súllyal vesszük figyelembe.

$$G_1 = Ter_{v\acute{z} \text{ alatt}} \cdot \gamma' = 98.53 \cdot 11.401 = 1123.414 \frac{kN}{m} \quad [48]$$

$G_2$ : Gáttestbéli vízfelszín feletti gátrész, nedves súllyal vesszük figyelembe.

$$G_2 = Ter_{v\acute{z} \text{ felett}} \cdot \gamma_n = 24.47 \cdot 20.928 = 512.051 \frac{kN}{m} \quad [49]$$

$G_3$ : Vízoldalon a függőleges víznyomás nyomóereje.

$$G_3 = Ter_{v\acute{z}} \cdot \gamma = 45 \cdot 9.81 = 441.450 \frac{kN}{m} \quad [50]$$

A területeket AutoCad szerkesztő segítségével mértem le, a kiszámított felszín görbe fő szelvényeiben levő piezometrikus nyomásszintek alapján.



A terhelés és az ellenállás hányadosaként előálló biztonságot az alább láthatók.

Átlagos biztonság:

$$n_{\text{átl}} = \frac{T_g}{F_H} = \frac{1460.097}{122.625} = 11.907 > 2 \text{ Megfelelt.} \quad [51]$$

Átlagos nyíróellenállás:

$$\tau_{\text{á}} = \frac{T_g}{B} = \frac{1460.097}{37} = 39.462 \frac{kN}{m^2} \quad [52]$$

Maximális nyírófeszültség:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{2F_H}{B} = \frac{2 \cdot 122.625}{37} = 6.628 \frac{kN}{m^2} \quad [53]$$

Az így kijött állékonysági biztonság:

$$n = \frac{\tau_{\text{á}}}{\tau_{\text{max}}} = \frac{39.462}{6.628} = 5.954 > 1.5 \text{ Megfelelt.} \quad [54]$$

A számítások alapján a gát elcsúszásra megfelelt.

### Mentett oldali rézsű állékonysága

II. szelvényben, a mentett oldali rézsű határában aktív földnyomás alakulhat ki, amely a mentett oldal felé mozdíthatja a töltés anyagát.

A számításhoz szükséges az átlagos térfogatsúly megadása:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{á}} &= \frac{h_{II} \cdot \gamma' + (m_t' - h_{II}) \cdot \gamma_n}{m_t'} = \frac{3.774 \cdot 11.401 + (6 - 3.774) \cdot 20.928}{6} = \\ &= 14.935 \frac{kN}{m^3} \end{aligned} \quad [55]$$

Az aktív földnyomás és a víz hatására kialakuló terhelés:

$$\begin{aligned} L = F_A &= \left( \frac{m_t'^2}{2} \cdot \gamma_{\text{á}} + p \cdot m_t' \right) \cdot tg^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{h_{II}^2}{2} \cdot \gamma = \\ &= \left( \frac{6^2}{2} \cdot 14.935 + 0 \cdot 6 \right) \cdot tg^2 \left( 45^\circ - \frac{34}{2} \right) + \frac{3.774^2}{2} \cdot 9.81 = \\ &= 145.879 \frac{kN}{m} \end{aligned} \quad [56]$$

A súrlódásból előálló ellenállás:

$$\begin{aligned} R = T_A &= tg \varphi \cdot (G_1' + G_2') + b_1 \cdot c = tg 34^\circ \cdot (363.035 + 275.390) + 15 \cdot 1.6 = \\ &= 454.623 \frac{kN}{m} \end{aligned} \quad [57]$$

Általános esetben a  $p$  a hasznos terhet jelenti. E számítások során a hasznos teherrel nem számolunk. ( $p = 0$ )

$G_{1m}'$ : Mentett oldali rézsű víz alatt levő terület, víz alatti súllyal vesszük figyelembe.

$$G_{1m}' = Ter_{mor, víz\ alatti} \cdot \gamma' = 31.84 \cdot 11.401 = 363.035 \frac{kN}{m} \quad [58]$$

$G_2'$ : Mentett oldali rézsűben a vízfelszín feletti terület, nedves súllyal vesszük figyelembe.

$$G_2' = Ter_{mor, víz\ feletti} \cdot \gamma_n = 13.16 \cdot 20.928 = 275.390 \frac{kN}{m} \quad [59]$$

A területszámítást az előzőekben említettek alapján végeztem.

A terhelés és az ellenállás osztásával kijött biztonságok a következők lettek:

Átlagos biztonság:

$$n_{\text{átl}} = \frac{T_A}{F_A} = \frac{454.623}{145.879} = 3.116 > 2 \text{ Megfelelt.} \quad [60]$$

Átlagos nyíróellenállás:

$$\tau_a = \frac{F_A}{b_1} = \frac{145.879}{15} = 9.725 \frac{kN}{m^2} \quad [61]$$

Maximális nyírófeszültség a III. szelvényben:

$$\tau_{max} = \frac{2F_A}{b_1} = \frac{2 \cdot 145.879}{15} = 19.451 \frac{kN}{m^2} \quad [62]$$

Nyíróellenállás a III. szelvényben:

$$\tau_a = G_{0,mo,III} \cdot tg \varphi + c = 47.347 \cdot tg 34 + 1.6 = 33.536 \frac{kN}{m^2} \quad [63]$$

$G_{0,mo,III}$ : a III. szelvény egységnyi területű talajhasábjának súlya erre az esetre

$$G_{0,mo,III} = h_{III} \cdot \gamma' + (m_{III} - h_{III}) \cdot \gamma_n = 2.939 \cdot 11.401 + (3.6 - 2.939) \cdot 20.928 \quad [64]$$

$$G_{0,mo,III} = 47.347 \frac{kN}{m^2}$$

ahol  $m_{III}=3,6$  m, a III. szelvényben a rézsű magassága.

Ezek alapján az állékonysági biztonság:

$$n = \frac{\tau_a}{\tau_{max}} = \frac{33.536}{19.451} = 1.724 > 1 \text{ Megfelelt.} \quad [65]$$

A mentett oldali rézsű az ellenőrzések alapján megfelelt az esetlegesen kialakuló aktív földnyomás ellen. Az itt kijött biztonságok már jóval kisebb értékek lettek, mint a teljes gát elcsúszásának vizsgálatánál.

## Vízoldali rézsű állékonysága

Hirtelen vízszintcsökkenés hatásra előfordulhat, hogy a gáttestben levő víz még nem teljesen ürül le. Az I. szelvényben a vízoldali rézsű határában aktív földnyomás alakulhat ki, a vízoldal felé.

Feltéve, hogy a vízszint 1 napi apadása 1 méter.

$$H_a = M\acute{A}SZ - 1m = 5 - 1 = 4m \quad [66]$$

Átlagos térfogatsúly:

$$\gamma_{\acute{a}} = \frac{H_a \cdot \gamma' + (m_t' - H_a) \cdot \gamma_n}{m_t'} = \frac{4 \cdot 11.401 + (6 - 4) \cdot 20.928}{6} = 14.577 \frac{kN}{m^2} \quad [67]$$

Az aktív földnyomásból és a vízteherből származó terhelés:

$$\begin{aligned} L = F_v &= \left( \frac{m_t'^2}{2} \cdot \gamma_{\acute{a}} + p \cdot m_t' \right) \cdot tg^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{h_l^2}{2} \cdot \gamma = \quad [68] \\ &= \left( \frac{6^2}{2} \cdot 14.577 + 0 \cdot 6 \right) \cdot tg^2 \left( 45^\circ - \frac{34}{2} \right) + \frac{4.241^2}{2} \cdot 9.81 = \\ &= 162.404 \frac{kN}{m} \end{aligned}$$

Általános esetben a  $p$ , a hasznos terhet jelenti. E számítások során a hasznos teherrel nem számolunk. ( $p = 0$ )

A súrlódásból származó ellenállás:

$$R = T_v = tg \varphi \cdot G_1' + b_2 \cdot c = tg 34^\circ \cdot 615.676 + 18 \cdot 1.6 = 444.079 \frac{kN}{m} \quad [69]$$

$G_{1v}'$ : Vízoldali rézsű területe, víz alatti súllyal vesszük figyelembe (kicsi nedves sarok a biztonság javára elhanyagolva).

$$G_{1v}' = Ter_{vor} \cdot \gamma' = 54 \cdot 11.401 = 615.676 \frac{kN}{m} \quad [70]$$

A területek számítását, ahogy már írtam, AutoCad segítségével végeztem.

A terhelés és az ellenállás hányadosaiként előálló biztonságok a következőképpen alakultak:

Átlagos biztonság:

$$n_{\acute{a}tl} = \frac{T_v}{F_v} = \frac{444.079}{162.404} = 2.734 > 2 \text{ Megfelelt.} \quad [71]$$

Átlagos nyírófeszültség:

$$\tau_{\acute{a}} = \frac{F_v}{b_2} = \frac{162.404}{18} = 9.022 \frac{kN}{m^2} \quad [72]$$

Maximális nyírófeszültség a vízoldali rézsű mentén:

$$\tau_{max} = \frac{2F_v}{b_2} = \frac{2 \cdot 162.404}{18} = 18.045 \frac{kN}{m^2} \quad [73]$$

Nyíróellenállás a III.' szelvényben:

$$\tau_v = G_{0,vo,III} \cdot tg \varphi + c = 41.045 \cdot tg 34 + 1.6 = 29.285 \frac{kN}{m^2} \quad [74]$$

$G_{0, vo, III.}$ : a III.' szelvény egységnyi területű talajhasábjának súlya erre az esetre.

$$G_{0, III.} = m_v \cdot \gamma' = 3.6 \cdot 11.401 = 41.045 \frac{kN}{m^2} \quad [75]$$

ahol  $m_v=3,6$  m, a III.' szelvényben a rézsű magassága. A III.' szelvény, a vízdoldali rézsű mentén a  $b_2$  táv 3/5-nél található a rézsűéltől számítva.

Állékonysági biztonság:

$$n = \frac{\tau_v}{\tau_{max}} = \frac{29.285}{18.045} = 1.623 > 1 \text{ Megfelelt.} \quad [76]$$

Napi egy méteres víz apadásra a vízdoldal megfelelt az ellenőrző számítások alapján.

A különböző vízszint-apadásokhoz tartozó biztonságokat az itt bemutatott módon számoltam, az eredményeket az alábbi táblázatban foglaltam össze.

13. táblázat Az apadásokhoz tartozó biztonságok

Vízapadás [m]	Ellenállás (kN/m)	Terhelés (kN/m)	Átlagos biztonság	Állékonysági biztonság
1.00	444.08	162.40	2.73	1.62
2.00	444.08	170.48	2.60	1.55
3.00	444.08	178.56	2.49	1.48
4.00	444.08	186.64	2.38	1.41
5.00	444.08	194.72	2.28	1.35

A táblázat alapján kijelenthető, hogy a hirtelen vízapadás miatti vízdoldal tönkremenetele nem mértékadó. Akármekkora vízállás fogyatkozás hatására a vízdoldali rézsű tönkremenetele nem fog bekövetkezni.

### 3.3. A numerikus modellezés eredményei

A számítógépes szoftverrel történő modellezés számos előnnyel rendelkezik, például, hogy a modellek könnyen javíthatóak és másolhatóak. Ezek kihasználásával az akár kicsiny változtatásokban eltérő modellek könnyen kivitelezhetőek lesznek, így az eredmények összehasonlítása is egyszerűen történhet. A program ezen jellemzőjét én is kihasználtam, ezért tudtam a többi vizsgálatától eltérően itt a laboratóriumban felépített fizikai modellre is és a valóságnak megfelelő méretekhez is számításokat végezni.

Négy különböző kialakítást alkottam meg a modellterben:

- Valós léptékben, vízzáró altalajt feltételezve,

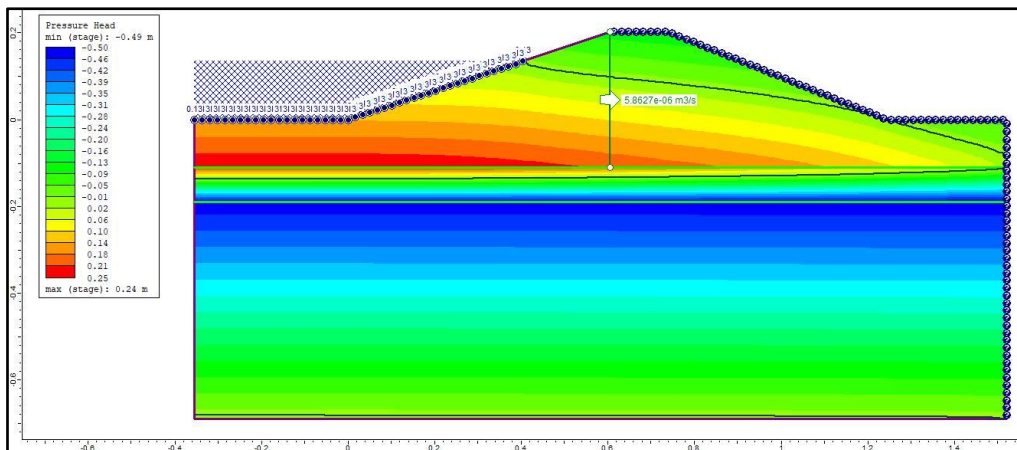
- Valós léptékben, vízáteresztő talajt feltételezve,
- Kisminta modell léptékében vízzáró altalajt feltételezve,
- Kisminta modell léptékében vízáteresztő altalajt feltételezve.

Mindegyik vizsgálatnál ötféle vízszintre futtattam le a szimulációkat, ez is több, mint a laboreredmények, ott ugyanis az 1 m valós méretű vízállást nem tudtam modellezni.

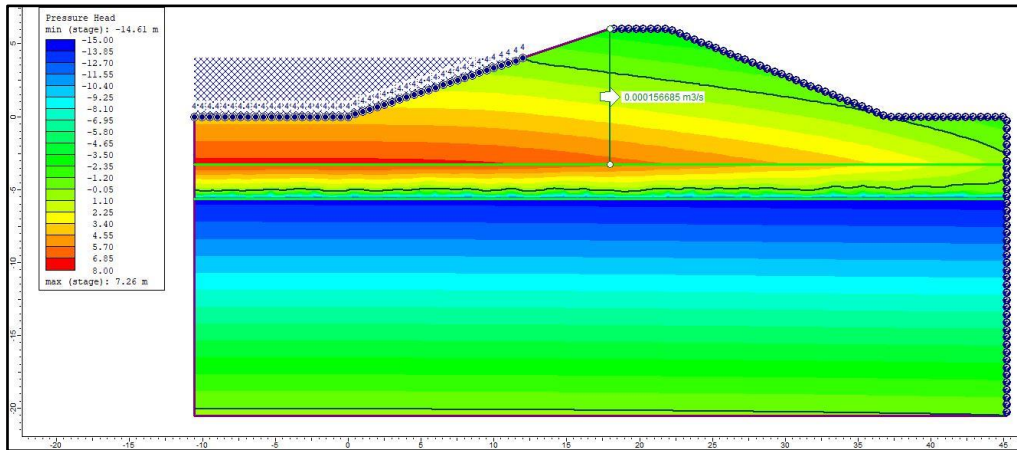
Az RS<sup>2</sup> által felajánlottak közül két lehetőséget használtam ki a vizsgálatok során. Elsőnek a „Groundwater” beállítással, a víz szivárgásával kapcsolatos paraméterek kiértékelését végeztem el. Dolgozatomban a „Groundwater” módban kiszámított jellemzők közül a permanens állapotra kirajzolódott szivárgási görbével és az átszivárgási hozam nagyságával foglalkoztam, de számos más opció is vizsgálható, melyek további kutatások során felhasználhatók lesznek. A másik típusú számítások esetén a tönkremenetel modellezése volt a cél, ezt kapcsolt talajvíz- és szilárdságtani modell megalkotásával tudtam megtenni. Ebben a modellben az elmozdulásokat és a biztonsági tényezőket vizsgáltam, de itt is számos további kutatási irány lehetséges. A modelleket csak permanens vízáramlásra végeztem.

### 3.3.1. Kialakult felszínigörbék

A négyféle kialakítás 5 féle vízállására lefuttatott vizsgálatainak mindegyike kiértékelhető és elfogadható eredményekre jutott. A futtatások közül a következő négy ábrán szeretném szemléltetni, a négy méteres vízállásra felállított különböző eseteket.

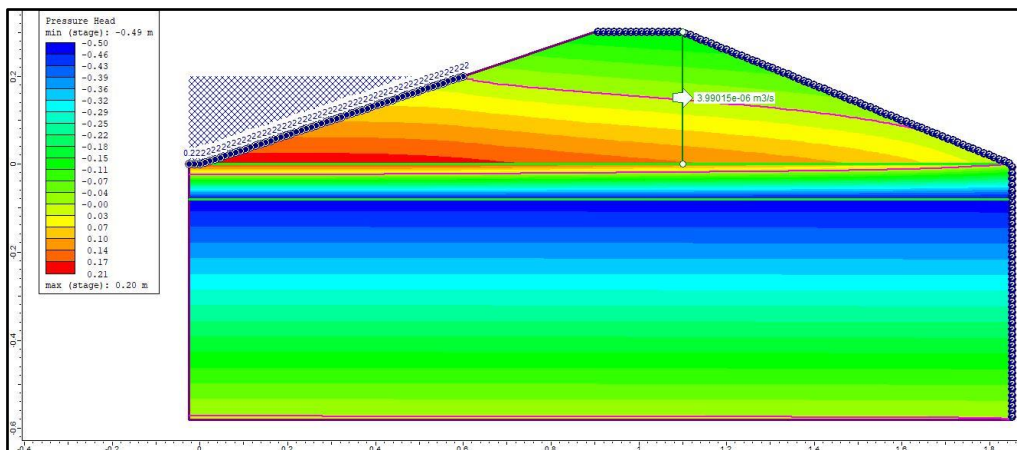


24. ábra Kismintamodell léptékben ábrázolt, vízáteresztő altalajjal rendelkező töltés, 4m-es vízállás esetén generálódó víznyomásábrája

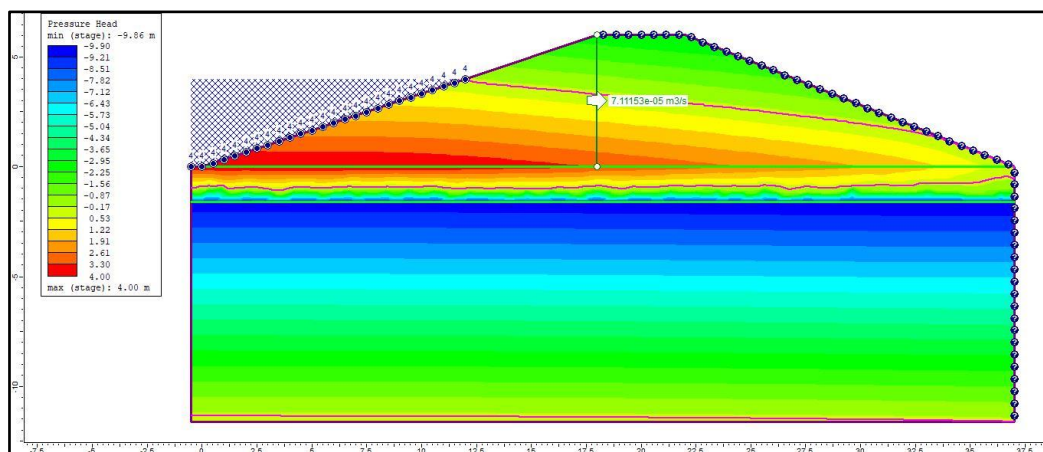


25. ábra Valós léptékben ábrázolt, vízáteresztő altalajjal rendelkező töltés, 4m-es vízállás esetén generálódó víznyomásábrája

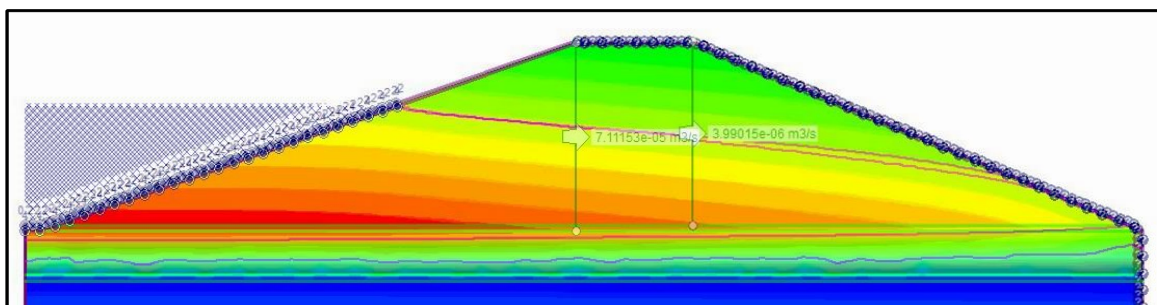
A kismintaléptékű modellek futtatása kevésbé zajos szivárgást határoló görbét eredményezett, ezek a töltéstesten húzódó zöld (24. ábra) és piros görbék (26. ábra). A valós mértékben történő futtatások alkalmával (25. és 27. ábra), a víz felülről történő beszivárgása az agyagba nagyobb mértékű, ezt az altalajban húzódó görbék mutatják. A lefelé történő szivárgást, annak a teljes áthozamhoz képesti jelentéktelen mennyisége miatt a továbbiakban zérusnak tekintetem. Az említett két eltérésen kívül az ábrázolt vízfelszínek, a valós és kisminta léptékben teljesen megfelelnek egymásnak. Ha az eredményeket egymásra helyezve összehasonlítjuk, akkor a szivárgási görbék között szinte semmi differencia sincs a vízáteresztő altalajú kialakításnál, míg a vízzárónál egy igazán minimális eltérés jelenik meg a mentett oldal fele haladva (28. ábra).



26. ábra Kismintamodell léptékben ábrázolt, vízzáró altalajjal rendelkező töltés, 4m-es vízállás esetén generálódó víznyomásábrája



27. ábra Valós léptékben ábrázolt, vízzáró altalajjal rendelkező töltés, 4m-es vízállás esetén generálódó víznyomásábrája



28. ábra A vízzáró altalajú gátra történő futtatások eltérő léptékben. Halványabb vonal a valós léptékű, míg az éles vonal a kisminta léptékű futtatás eredménye.

A két kialakítás szivárgást határoló görbéje között viszont már feltűnőbb a különbség. Az első kialakításnál, ahol az altalaj vízaramlást nem enged meg, a szivárgási felszín jóval magasabban halad, egyezve azzal, amit előre vártam. Az eltérésük a mentett oldali rézsűhöz közel már a fél méternyi szintkülönbséget is elérheti.

A víznyomás mindenhol az agyagréteg tetején maximalizálódik. Akkor nyomás terhődik a viszonylag vízzáró felületre, amilyen magasan felette a szabad vízfelszín található.

A baloldali színskála magyarázatnál láthatók a legnagyobb és legkisebb víznyomás értékek. A hideg színeknél már negatív nyomásszintről számol be, ezen árnyalatok mind a töltéstestben, mind az agyagréteg alatt feltűnnek. A valós életben negatív víznyomás fogalmát nem használjuk, ahol ilyen jelöl a program, ott mindenütt zérus érték kéne feltüntetve legyen. Ennek utánanézésre a szoftver súgójában láthattam, hogy megfogalmazták, hogy a programnak ez egy előforduló hibája.

A vízfelszín-görbe minden esetben érinti a mentett oldali rézsűt, vízzáró altalajon álló esetben viszonylag nagy hosszon. Ezek alapján feltételezhetjük a gátból való kilépést is, ennek pontos helyéről a program nem ad információt.

### 3.3.2. Átszivárgó vízhozam

A numerikus modellező program használatakor, ha a geometria és a vízállás betáplálása megtörtént, pár kattintással kiválasztva azt a szelvényt, ahol érdekel a vízhozam, az érték látható lesz az ábrán az áramlási iránnyal együtt. A függőleges szelvény kijelölése akár véletlenszerűen is történhet, hiszen elméletben egy töltés vagy más vonalas létesítmény keresztmetszetében állandónak tekinthetjük a vízhozamot. Saját munkám során a vizsgálandó szelvényeket csak a homokos iszap rétegekben állítottam fel, az alatta lévő agyag teljes vízzáróságát feltételeztem. Ellenőrzésképp végeztem néhány futtatást különböző helyen felállított függőleges szelvényekkel, és a mutatott vízhozamok különbségei valóban elhanyagolhatók. Az agyagon való zérus átszivárgás feltételezésének valóságát is kontroll alá vettem és vizsgáltam a teljes rétegsoron átszivárgó hozamot. Itt már érzékelhetőbb eltérések adódtak, de nem jelentősek, így a feltételezéshez tartva magam az agyagon nem engedtem meg átszivárgást.

Egyik ellenőrző futtatás eredményei a 14. táblázatban láthatóak.

14. táblázat Vízhozamot ellenőrző futtatás eredményei

Áramlás korona mentén, a teljes függélyben [m <sup>3</sup> /s]	Áramlás korona mentén, csak a homokos iszap rétegben [m <sup>3</sup> /s]	Áramlás rézsű mentén, teljes függélyben [m <sup>3</sup> /s]	Áramlás rézsű mentén, csak iszapos homokban [m <sup>3</sup> /s]
$1.703 \cdot 10^{-3}$	$1.567 \cdot 10^{-3}$	$1.705 \cdot 10^{-3}$	$1.578 \cdot 10^{-3}$

Látható, hogy az eltérés 10% alatti, illetve meg kell jegyezni, hogy a modellezett agyag szivárgási tényezője nem feltétlenül esik egybe a laborban beépítettével.

A vízhozam számítása a két kialakításon valós méretben is megtörtént, majd kisminta léptékben is, melyek eredményeinek valóságra való átváltását is elvégeztem.

A modellbeli futtatások alapján kapott vízhozam értékekre is konstátálható, hogy a szivárgást megengedő altalajjal rendelkező felépítés mindkét esetben nagyobb vízhozamot vált ki a mentett oldalon, mint az agyaggal határolt töltés. Ennek okaira kitértem már a 3.1.2. fejezetben.

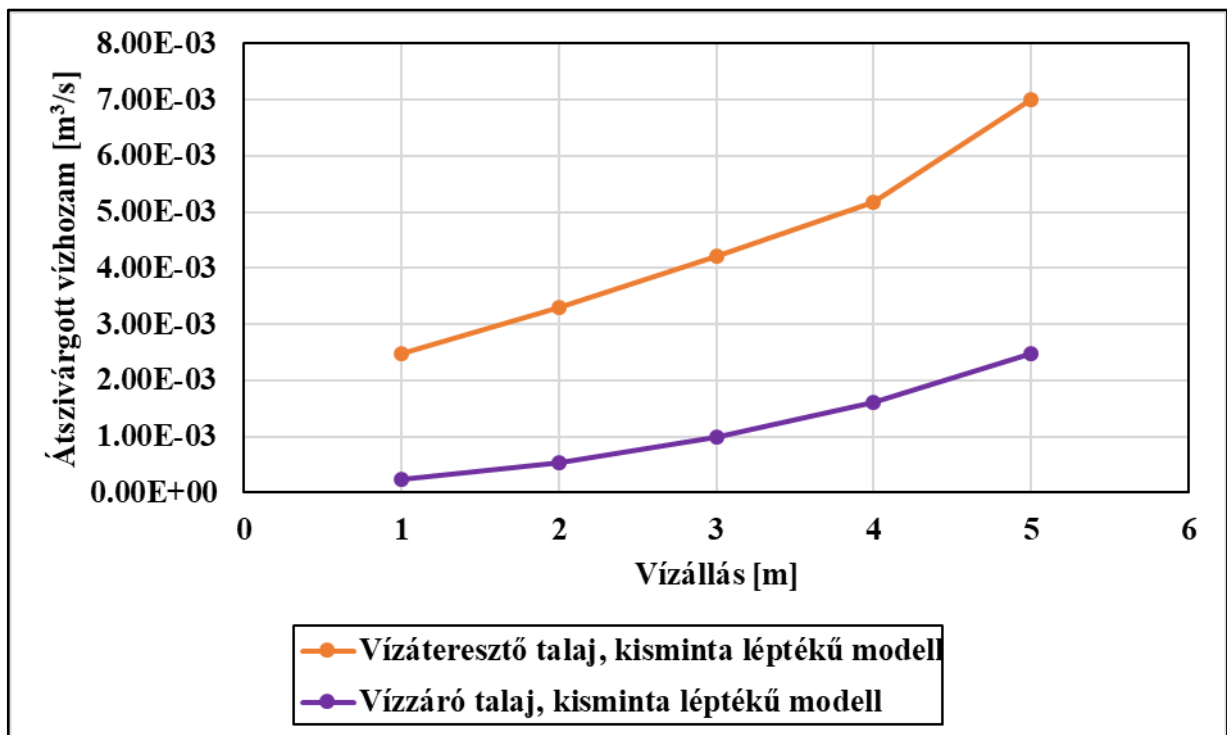
Mivel itt négy vizsgálatot hasonlítok össze, a valóságos méretű és a kisminta léptékű modellek differenciája is kiderül. A kisminta modellváltozatokra felállított végeselemes futtatások jóval, nagyságrendekkel nagyobb vízhozam fellépését mutatták a kiértékelésnél, mint a valós méretek alapján készült modellek. A valóság és kisminta vízhozamai között nagy eltérés megmagyarázása további vizsgálatokat igényel.



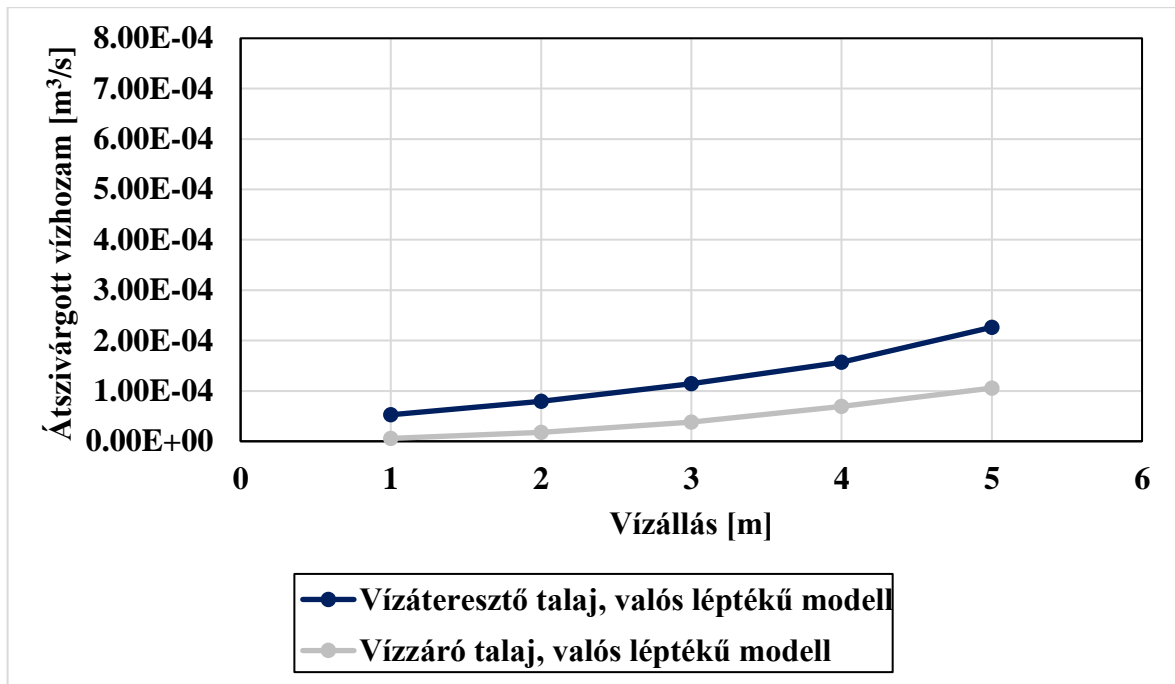
Amit viszont minden esetben megerősítenek a modell kimenetelei, hogy a vízszint függvényében ábrázolt átszivárgó hozamok nemlineáris görbét írnak le (29. és 30. ábra). A kicsiny vízállások esetén bekövetkező változások alapján egyenes arányosságot is feltételezhetnénk, de az 5 m-es víz magasságára kapott érték egyik esetben sem illeszkedik az eddigiekre ráilleszthetett egyeneshez. Ennek magyarázata, hogy a szomszédos vízállások vízhozamainak különbsége, minden esetben rendre növekszik a vízállásokkal együtt.

15. táblázat A numerikus modell vízhozam eredményei

Numerikus modell		1	2	3	4	5
Vízáteresztő talajon	Valóságban modellezett [m <sup>3</sup> /s]	5.26x10 <sup>-5</sup>	7.95x10 <sup>-5</sup>	1.14x10 <sup>-4</sup>	1.57x10 <sup>-4</sup>	2.26x10 <sup>-4</sup>
	Kismintáról számított valóság [m <sup>3</sup> /s]	2.48x10 <sup>-3</sup>	3.29x10 <sup>-3</sup>	4.20x10 <sup>-3</sup>	5.18x10 <sup>-3</sup>	7.01x10 <sup>-3</sup>
Víz záró talajon	Valóságban modellezett [m <sup>3</sup> /s]	5.74x10 <sup>-6</sup>	1.74x10 <sup>-5</sup>	3.79x10 <sup>-5</sup>	6.90x10 <sup>-5</sup>	1.06x10 <sup>-4</sup>
	Kismintáról számított valóság [m <sup>3</sup> /s]	2.28x10 <sup>-4</sup>	5.37x10 <sup>-4</sup>	9.83x10 <sup>-4</sup>	1.60x10 <sup>-3</sup>	2.49x10 <sup>-3</sup>



29. ábra Kisminta léptékű numerikus modellbeli vízhozamok



30. ábra Valós léptékű numerikus modellbeli vízhozamok

### 3.3.3. Szilárdságtani vizsgálatok

A szilárdsági vizsgálatok során már nemcsak a szivárgáshoz kötődő jellemzőkre, hanem a víz hatására megjelenő feszültség és alakváltozási mezők előállítására is történtek törekvések. Az egyik legfontosabb változás a modellezés folyamatában a víz definiálásához fűződik. Itt már a víz, azon túl, hogy peremfeltétel, még teherként is megjelenik, ezért a teherlehetőségek közül a „Ponded water”-t kell választani, mely így a hidraulikai súlyt egy megoszló erőhöz hasonlóan jeleníti meg. Emellett az anyagtulajdonság beállítási lehetőségét plasztikusra kell változtatni, hogy a gáttestben maradó alakváltozások illetve biztonsági tényező is számítható legyen, majd az ezeknél a futtatásoknál már szerepet kapó reziduális, azaz maradó talajfizikai paraméterek beadása következik.

Kétféle elrendezésben adott az  $RS^2$  az állékonysági vizsgálatoknál értékelhető eredményeket:

- A vízzáró altalajon biztonsági tényezőre történő számítás, mindegyik vízállás mellett,
- A vízáteresztő altalajon levő gáttest koronáját megterhelve felületi megoszló erővel, 5 m-es vízszint mellett végzett kalkuláció.

A vízzáró altalaj esetében az  $RS^2$ -ben a biztonsági tényezővel ekvivalens SRF (Strength Reduction Factor) értékeket számoltattam ki. Az SRF tényező megmutatja azt, hogy annak a rétegnek a talajfizikai tulajdonságait, melyben a tönkremenetel megvalósul, mekkora konstanssal kéne osztani, azaz csökkenteni, hogy a tönkremenetel megtörténjen.

A terhelés nélküli elmozdulásra végzett vizsgálatok a következő SRF tényezőket eredményezték a különböző vízállások mellett.

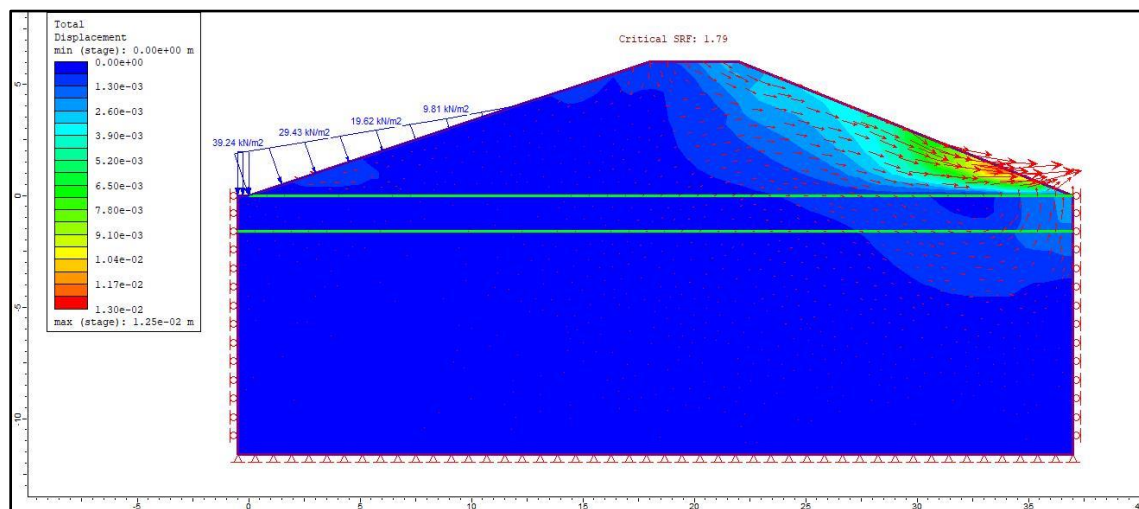
16. táblázat SRF értékre kapott adatok az eltérő vízállású futtatásokból

Vízállás	SRF
1 méter	3.15
2 méter	2.78
3 méter	2.29
4 méter	1.79
5 méter	1.43

Ahogy előre vártam, és a táblázat is jól szemlélteti, a kisebb vízállásokra nagyobb számot eredményezett a futtatás.

Egy helyen változtattam önkényesen az agyag eredetileg zérusnak felvett húzószilárdságán. Az öt méteres vízszint mellett bekövetkező tönkremenetel az eredeti tulajdonságokkal az vízzáró réteg sarkának kiszakadásával jött létre. Ez egy peremfeltételi hibának tekinthető, ezért ennek kiküszöbölése érdekében, hogy a felső rétegben, az iszapos homokban mutasson alakváltozást a modell, megnöveltem az agyag húzószilárdságát. A legjobb megoldás a peremfeltételek újbóli definiálása lett volna, ehhez új modellgeometria megalkotására lesz majd szükség a későbbi vizsgálatoknál.

A modellezés eredményeképpen az összes vízállás mellett a gáttest részsűjén bekövetkező csúszást engedi látni a szoftver grafikus megjelenítője, melynél az alakváltozás irányát mutató vektorokat is bekapcsoltam, hogy még jobban illusztrálja az elmozdulást.



31. ábra A 4 méteres vízállás mellett kialakuló tönkremenetel

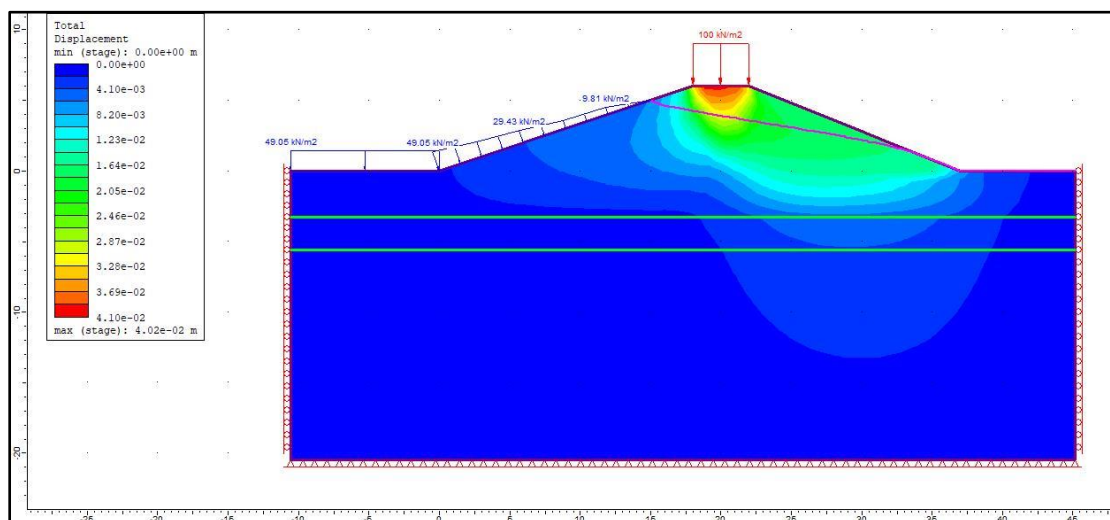
A képen is szépen kirajzolódó alakváltozás határozottan csúszólap alakúnak nevezhető (31. ábra). Az elmozdulások nagyságát centiméteres nagyságúnak jelzi a program. Ezt az állapotot a nyírószilárdsági tulajdonságok csökkentésével éri el a program, így valós elmozdulásként nem értelmezhető.

A másik kialakításnál a tönkremenetel tanulmányozásához, az előző metódus fordítottját hajtottam végre, a biztonsági tényezők helyett a valós elmozdulásokat akartam megfigyelni. Különböző nagyságú terhelésekkel megvizsgáltam a szivárgó altalajjal rendelkező töltést, hogy mekkora az elmozdulás és helyileg hol történik. Ennek a modellnek az elkészítése segítette azt a számítást, mely a laboratóriumbeli tönkremenetel-vizsgálatot előzte meg.

17. táblázat Megoszló teher hatására történő maximális elmozdulás

Megoszló teher nagysága a koronán	Maximális elmozdulás a mentett oldali rézsű mentén
50 kN/m <sup>2</sup>	2.2 cm
100 kN/m <sup>2</sup>	4.1 cm
150 kN/m <sup>2</sup>	15 cm

Ezen esetekben mindig a mentett oldalon történt alakváltozás, kisebb teher hatására kevésbé orientálódott oldal irányba, inkább a tömöredéshez hasonló volt a deformálódás. Természetesen nagyobb súlyok esetén jóval nagyobb elmozdulások keletkeznének, de igen extrém esetben terhelődik több mint 15 000 kg egy töltés egy m<sup>2</sup>-ére normál esetben is, nemhogy árvízkor. Ezen futtatásoknál csúszólap kialakulása nem figyelhető meg (32. ábra).



32. ábra 100 kN/m<sup>2</sup> megterhelés esetén keletkező elmozdulás ábra 5 m-es vízállás esetén

Bár a kutatásom során próbáltam teljes körű méréseket és vizsgálatokat végrehajtani, ezen a területen lehetőség van újabb eredmények elérésére. További futtatásokat igényelne, hogy

mindkét vizsgálatot mindkét fajta kialakításon elvégezzem, valamint ugyanezeket kisminta léptékben is megcsináljam.

A másik két vizsgálati módszernél ellenőrzött apadás hatására bekövetkező vízdali rézsű megcsúszáshoz a program nem permanens funkcióját kell alkalmazni. Az elmúlt hónapokban történtek próbálkozások a még nem állandósult vízhozamú mérések modellezésére, de érdemi eredményt nem sikerült kihoznom a futtatások folyamán. A szilárdságtani vizsgálatoknál használt modellváltozat már elvileg nem permanens, de egy-egy időlépést végtelen hosszúra vesz, így a kapott ábrák tulajdonképpen a permanens áramlást jellemzik.

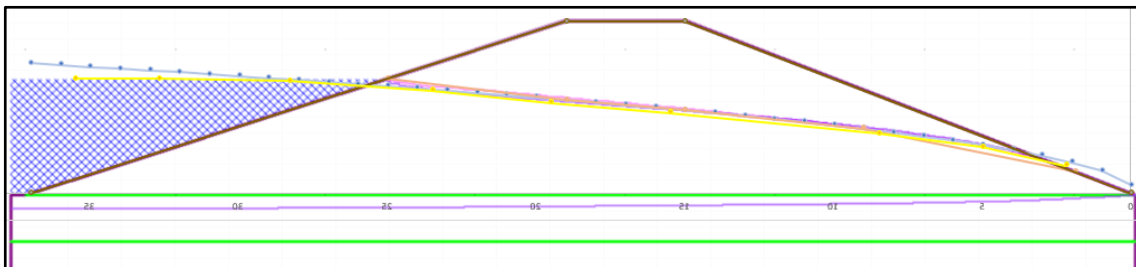
### 3.4. A különböző végeredmények összevetése

#### 3.4.1. Kialakult vízfelszín

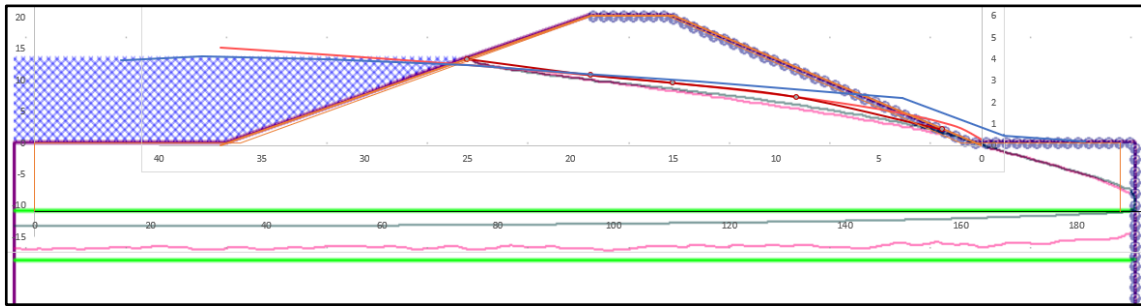
A felszín görbék kirajzolása mindhárom módszer alapján megtörtént, összevetésüket szemléltetik az alábbi képek (33. és 34. ábra).

Galli módszere a kétféle talajtípussal rendelkező felépítés között nem tesz különbséget. Az eljárás elve azon alapul, hogy az átszivárgási görbe alakja egyedül csak a geometriától függ. Láthatólag a többi metódus nem él ezzel a feltevessel. A numerikus modellezések alapján és a fizikai mérések által kirajzolódó görbék mind eltérnek a különböző altalaj rétegzettség esetén.

A vízzáró talajon elhelyezkedő felszín görbék (34. ábra) egymáshoz közelebb helyezkednek el, nincs egyértelmű magassági sorrend. A kilépési pontnál a módosított kézi módszer áll legalacsonyabb nyomásszinttel, azt a laboratóriumi mérés eredménye követi, a numerikus modellező által előállított és a nem módosított kézi számítás értékei adták a rézsűn legmagasabbra a kilépési pontot. A numerikus és a laboratóriumi vizsgálatok esetén is megfigyeltem, hogy a vízfelszín-görbe nemcsak a geometriától függ.



33. ábra Vízzáró altalajjal rendelkező gát felszín görbéi a különböző módszerek felhasználásával (sárga: labormérések, szürke: Galli-módszer, narancs: korrigált Galli-módszer, kék: numerikus modell kisminta léptékben, lila: numerikus modell valós léptékben)



**34. ábra** Vízáteresztő altalajjal rendelkező gát felszingörbék a különböző módszerek felhasználásával (kék: labormérések, narancs: Galli-módszer, piros: korrigált Galli-módszer, kék: numerikus modell kisminta léptékben, lila: numerikus modell valós léptékben)

Ez még látványosabb a vízáteresztő talajon fekvő gáttöltés esetében. Itt a két végeselemes modell mutatja a legkisebb vízszintet. Ezt követi a kézi számítás eredménye. A legmagasabb nyomásszintet a fizikai mérések alapján kaptam. Az eltérések a belépéstől távolodva növekednek, mely érthető, hiszen a belépési pont mindegyiknél teljesen ugyanaz. A mentett oldali vízkilépés a laboratóriumban figyelhető meg legjobban, a kézi számítások eredményei is a rézsű feletti víznyomás görbét adják meg. A kilépések között nagy az eltérés. Ez alapján a Galli-módszer kilépési módosítása javítható lehet, illetve a laboratóriumi mérések pontosítására is szükség lehet.

### 3.4.2. Az átszivárgó vízhozamok összehasonlítása

A vízhozammérést minden vizsgálati lehetőséggel el tudtam végezni. A numerikus modellezés segítségével, a Galli-módszerrel (1976) és a kisminta kísérletek eredményeképp kaptam értékeket a változóra.

Az összehasonlítás elvégzéséhez első lépésként, ha szükséges volt, kismintából valós léptékbe számoltam át, majd ugyanazon mértékegységre konvertáltam a különböző végeredményeket.

Az összehasonlítást szemléltető táblázat a következő:

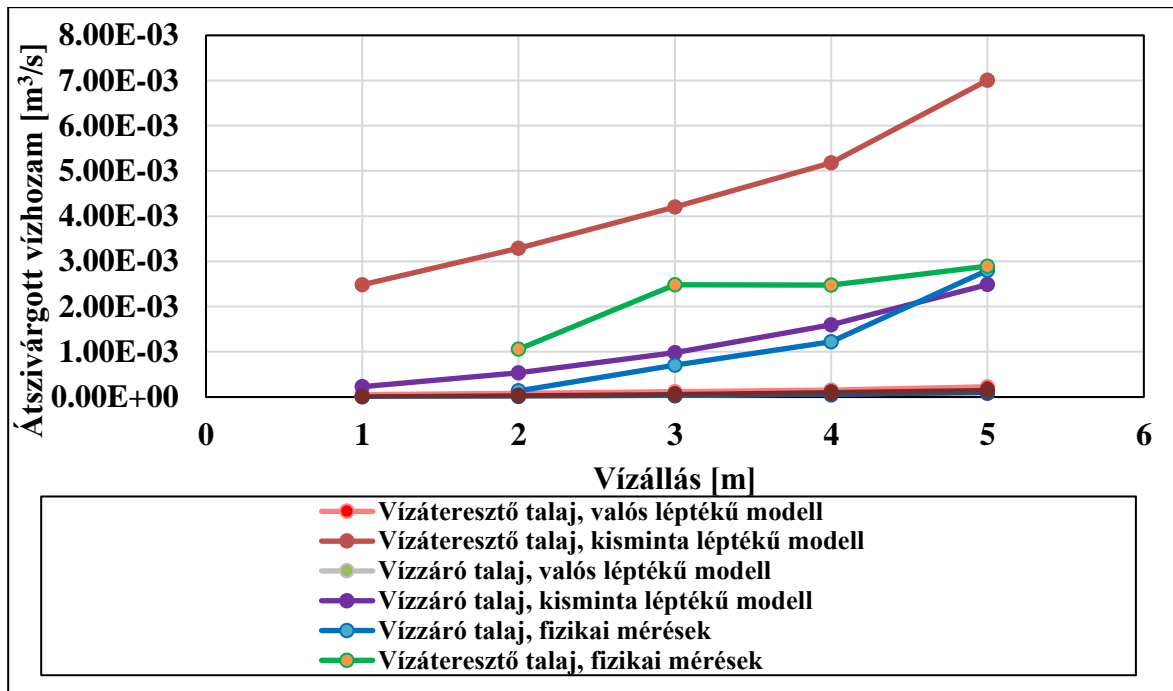
18. táblázat Vízhozam nagyságok különböző módszerekkel mérve

<b>Numerikus modell</b>		1m	2m	3m	4m	5m
Vízáteresztő talajon	Valóságban modellezett [m <sup>3</sup> /s]	5.26x10 <sup>-5</sup>	7.95x10 <sup>-5</sup>	1.14x10 <sup>-4</sup>	1.57x10 <sup>-4</sup>	2.26x10 <sup>-4</sup>
	Kismintáról számított valóság [m <sup>3</sup> /s]	2.48x10 <sup>-3</sup>	3.29x10 <sup>-3</sup>	4.20x10 <sup>-3</sup>	5.18x10 <sup>-3</sup>	7.01x10 <sup>-3</sup>
Vízzáró talajon	Valóságban modellezett [m <sup>3</sup> /s]	5.74x10 <sup>-6</sup>	1.74x10 <sup>-5</sup>	3.79x10 <sup>-5</sup>	6.90x10 <sup>-5</sup>	1.06x10 <sup>-4</sup>
	Kismintáról számított valóság [m <sup>3</sup> /s]	1.73x10 <sup>-4</sup>	4.55x10 <sup>-4</sup>	8.56x10 <sup>-4</sup>	1.43x10 <sup>-3</sup>	2.24x10 <sup>-3</sup>
<b>Fizikai labormérések</b>						
Vízzáró talajon	Kismintáról számított valóság[m <sup>3</sup> /s]		1.36x10 <sup>-4</sup>	7.07x10 <sup>-4</sup>	1.22x10 <sup>-3</sup>	2.80x10 <sup>-3</sup>
Vízáteresztő talajon	Kismintáról számított valóság[m <sup>3</sup> /s]		1.06x10 <sup>-3</sup>	2.49x10 <sup>-3</sup>	2.47x10 <sup>-3</sup>	2.90x10 <sup>-3</sup>
<b>Galli-módszer</b>						
Vízzáró talajon	Valóság [m <sup>3</sup> /s]	2.58x10 <sup>-6</sup>	1.10x10 <sup>-5</sup>	2.63x10 <sup>-5</sup>	5.01x10 <sup>-5</sup>	8.42x10 <sup>-5</sup>
Vízáteresztő talajon	Valóság [m <sup>3</sup> /s]	1.75x10 <sup>-5</sup>	4.07x10 <sup>-5</sup>	7.10x10 <sup>-5</sup>	1.10x10 <sup>-4</sup>	1.59x10 <sup>-4</sup>

A legkisebb vízhozamok a vízzáró talajon álló töltéstest Galli-módszerrel történő számításánál adódtak. Azt követve ugyenezen kialakítás valós léptékben történő modellezésének eredményei állnak, majd rendre az altalaj-szivárgást engedő felépítések. Ez a négy eredmény igazán közeli egyezést mutat. Míg a maradék négy értéke is viszonylag egymáshoz közeli, de ezektől nagyságrendekkel eltérő (35. ábra).

A vártnak megfelelően minden típusú mérésnél a vízáteresztő talajon álló töltés engedett át nagyobb vízhozamot.

A valóságra és a kismintára alapozott mérések közötti differencia láttán egyértelműen felmerült bennem az a kérdés, hogy a kisminta modell valóságba való átszámításánál a Mosonyi-Kovács átszámítási törvényt vajon teljeskörűen lehet-e alkalmazni. Ennek vizsgálata további kutatómunkát igényel.



35. ábra A vízhozamok összehasonlítása a Galli-módszer eredményei nélkül

### 3.4.3. Tönkremenetel

A szilárdsági vizsgálatok összehasonlítása nem volt egyszerű feladat, ugyanis míg a Galli-módszer csak ellenőrzést végez a legkedvezőtlenebb esetre, addig a numerikus modellező futtatásai határállapotokat számítanak és konkrét esetekre mutatnak eredményt. A fizikai labormérés megvalósítása igazán sok tényezős, amiknek eredményeit nagyon sok külső körülmény befolyásolja.

A kézi módszer alapján végzett ellenőrzések eredményeképp megkaptam, hogy a tervezett töltés és anyaghasználat megfelel mind teljes gát szinten, mind pedig a rézsű oldalak mentén is, továbbá a hidraulikus gradiensek is az engedett értékek alá estek, tehát hidraulikus talajtörés bekövetkezése nem várható.

A teljes gát statikai állékonysága igazán nagy biztonsági hányadossal rendelkezik, a megengedett biztonság majdnem négyszerese a kijött állékonyság. Ez maximálisan igazolható a fizikai kísérletekkel is és a végeselemes modellező számításaival. A gát elcsúszásával semmilyen körülmények között nem találkoztunk a numerikus modellezés során, valamint a fizikai mérések folyamán sem volt olyan jelenség, mely ilyesmire engedett volna következtetni.

A két rézsű tönkremenetelének vizsgálatára a fizikai labormérések során több különböző próbálkozás volt, de egyik sem járt sikerrel. A vízoldali rézsűnél a Galli-módszer is ezt az eredményt mutatta ki. A végeselemes programmal olyan szimulációk történtek, melyben a töltéskorona egyik esetben terheletlen, másik esetben megoszló erővel terhelt volt. A terheletlen



gát rézsúállékonyságára kijött SRF-ek valamint a terhelt gát elmozdulásai megfelelő biztonságra engedtek következtetni.

Hidraulikai állékonyság paramétereinek összevetésére nincsen lehetőségem, mert csak egy úton jutottam hozzájuk. A laboratóriumbeli kismintamodellen talajtörés jele nem tűnt fel a méréseim alatt.

A fizikai modellen megjelenő hibák anyagszerkezeti változásokra utaló jelek. Az iszap kisebb szemcséi a túlnyomás hatására elmozdultak és a felszínre kimosódtak. Ez a változás más vizsgálatnál nem került elő.

Bár a gát anyagát vizsgáló geotechnikai kísérletek alapján és a laboratóriumi tapasztalataimból tönkremenetelre hajlamos földműnek gondoltam a tervezett gátat, de az elméleti számítások más eredményeket adtak. Tönkremenetelre csak terhelés mellett láttam példát a végeselemes .futtatások során Ez alapján a gát anyaga és geometriája állékonyság és teherbírás szempontjából megfelelő, de a fizikai mérések során látott kimosódás mellett nem mehetünk el szó nélkül. Ennek stabilizálására geomóanyag beépítését javalom.

## **4. Eredmények összefoglalása, kitekintés**

A munkám során kettő gát keresztmetszetet terveztem meg. Ezeknek a keresztmetszetnek a megvizsgálása három módszerrel történt. Több paraméter különböző módokon kapott értékét hasonlítottam össze. A fő szempontok a következők voltak: vízhozam, szivárgási görbe és tönkremenetel.

A kézi számítások Galli-módszerével történtek. A vízfelszín görbe összefüggése még kiegészült egy belépési és kilépési pontot módosító egyenlettel. A vízhozam számítása után a statikai állékonyság ellenőrzését végeztem el. Az állékonyság vizsgálatok eredménye alapján a gát megfelelő.

A fizikai labormérések elvégzése érdekében felépítettem a tervezett gátat egy kismintamodellként, majd 63 mérést végeztem el rajta. A beépített piezokivezetésekkel nyomásszint méréseket tudtam végrehajtani. Köbözéssel vízhozamot mértem. A tönkremenetelt eredményező próbálkozások nem jártak sikerrel, viszont a mérések és peremfeltételek beállítása során látványos anyagszerkezeti változások jelentek meg a gáttesten: kimosódás, vízoldal csúszása.

Az RS2 modellező program segítségével több futtatást hajtottam végre. Ennél a módszernél alkottam a kisminta léptékű és valós léptékű szimulációt is, így ezek összehasonlítása is

megvalósulhatott. A vízfelszín és a vízhozam kirajzolódása egy futtatás eredményeképp állt elő. A kisminta és a valós lépték közötti hozamok összehasonlításakor felmerült a kérdés, hogy a Mosonyi-Kovács kisminta törvény hozamok közötti összefüggése teljeskörűen alkalmazható-e.

A numerikus modellek esetében már történtek nempermanens futtatások, de értékelhető eredmények nem adódtak belőlük. A nempermanens áramlás előállítására a vízdali rézsűn apadáskor bekövetkező változásokat fogja bemutatni, illetve a pórusvíznyomás hatására bekövetkező elmozdulásokat.

A Galli-módszernél két változtatást eszközölnék a továbbiakban. Elsőként a módosított pontok még nagyobb korrigálását végezném, hogy a görbék jobb illeszkedést mutassanak, a numerikus modellbeli és a fizikai, laboratóriumban történt mérések eredményeihez. Ezenkívül pedig az eltérő altaljjal rendelkező töltések felszingörbét igazítanám jobban az altalaj tulajdonságainak függvényében. A kézi számításaim során nem vizsgáltam terheléssel együtt a létrejövő aktív földnyomás nagyságát, ennek megvalósítása az elmozdulások teljes körű vizsgálatát eredményezi.

A laboratóriumi mérések fejlesztéseként a további geometriák, más anyagok kipróbálása lehet jövőbeli terv. Az anyagszerkezetben bekövetkezett változások elkerülése érdekében megerősítések kivitelezése új eredményekhez vezethet.

# Irodalomjegyzék

Białas, Z., Kleczkowski, A.S. (1970). O przydatności niektórych wzorów empirycznych dla określenia współczynnika filtracji k. Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k. Arch. Hydrotech.(Warschau) 17(3), 405–417 (1970) in poln. Sprache mit russischer (S. 416) und englischer (S. 417) Zusammenfassung

Bowles Joseph E. (1996) Foundation Analysis and Design. McDraw-Hill, 5. kiadás,

Csoma Rózsa (2019). Vízépítés és Vízgazdálkodás előadás, saját jegyzet

Darcy, H. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. p. 647, Paris

Éliás, E., Juhász, J. (1966). Az anizotrópia tényező meghatározása, MTA Szivárgási és Kúthidraulikai Ankét, Budapest, I.A.-5

Farkas Dávid, Farkas-Karay Gyöngyi, Hegedűs Noémi (2019). Szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása szemeloszlási görbe és kismintamodell felhasználásával. Hidrológiai Közlöny, közlésre elfogadva.

Galli László (1976). Az árvízvédelem földműveinek állékonysági vizsgálata. Vízügyi Dokumentációs és Tájékoztató Iroda, Budapest, 258 p.

Hagen G. (1869). Handbook of Hydraulics Structures (in German), Berlin.

Hazen, A.(1892). Some physical properties of sands and gravels with special reverence to their use in filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Bureau of Health, Pub. Doc. 34, S. 539–556. Boston

Herzog Henrik, Krempels Tibor (1966). Csatornák és földgátak. Tankönyvkiadó, Budapest, kézirat.

Kovács György(1972). A szivárgás hidraulikája. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Mecsi József (2009): Talajmechanika, Főiskolai jegyzet, Kézirat.

Mosonyi Emil. és Kovács György (1952). Kismintatörvények a nehézségi és súrlódóerő együttes figyelembevételével, Hidrológiai Közlöny 32. évf. 7-8. sz., pp. 274-277

Mosonyi E. (1955). Hidraulikai hasonlóság a kismintatörvények és a kísérletek értékelése, a várható eredmények, Kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest. pp. 41-44.

Nagy László (2005). Árvízi kockázat az árvízvédelmi gát tönkremenetele alapján. BME Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola, PhD-értekezés, kézirat.

Országos Vízügyi Hivatal – OHV (1987). Árvízvédelmi gátak építése és fenntartása. Vízügyi Dokumentációs Szolgáltató 303 p.

Seelheim, F. (1880). Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. Z. Anal. Chem. 19, 387–418 (1836).

Skaballanowitsch, J.A. (1954). Hydrogeologische Berechnungen über die Dynamik des Unterirdischen Wassers. Vlg. UgleTechIsdat, Moskau

Szloboda Zsófia (2015). Árvízvédelmi töltések szivárgásvizsgálata. Diplomamunka, BME Építőmérnöki Kar, kézirat.

## **Köszönetnyilvánítás**

Készült a Kék Bolygó Klímavédelmi Alapítvány Fontus Vízügyi Hallgatói Ösztöndíj támogatásával.

Ezúton szeretném megköszönni konzulenseimnek Farkas-Karay Gyöngyinek és Farkas Dávidnak a folyamatos segítséget, támogatást és biztatást.

Köszönettel tartozom a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék oktatóinak és munkatársainak a fizikai kísérletek megvalósításának elősegítéséért, valamint BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumi munkatársainak.

Köszönöm barátaimnak és családomnak is a támogatásukat.

## **Mellékletek**

**Kismintamodell mérési jegyzőkönyv**

Mérés sorszáma: 55  
 Mérés kezdete: 2019.10.07. 16<sup>30</sup> Mérés vége: 2019.10.08. 10<sup>15</sup>  
 Felső perem szintje: 79,095 Alsó perem szintje: 69  
 Felső perem hőmérséklete: 17°C Alsó perem hőmérséklete: .....

Piezométereken leolvasott szintek:

1-10 piezométerek									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
72,6	73,0	72,7	71,9	71,0	70,3	68,7	63,8	63,0	62,7

Mintából érkező hozam (l/min):

1.	2.	3.
0,17	0,17	0,17

Megjegyzés: .....  
 .....  
 .....

**Kismintamodell mérési jegyzőkönyv**

Mérés sorszáma: 56  
 Mérés kezdete: 2019.10.07. 16<sup>30</sup> Mérés vége: 2019.10.08. 14<sup>15</sup>  
 Felső perem szintje: 79,095 Alsó perem szintje: 69  
 Felső perem hőmérséklete: 17°C Alsó perem hőmérséklete: .....

Piezométereken leolvasott szintek:

1-10 piezométerek									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
72,6	73,0	72,7	71,9	71,0	70,3	68,7	63,8	63,0	62,7

Mintából érkező hozam (l/min):

1.	2.	3.
0,17	0,17	

Megjegyzés: .....  
 .....

36. ábra: Az 55. és 56. sorszámú mérések jegyzőkönyvei

19. táblázat: Szivárgási görbe x-y értékpárok

X koordináta a mentett oldal talpszegélyétől [m]	Y koordináta alapsíktól mérve [m]				
	Vízállás [m]				
	5	4	3	2	1
0	0.468	0.278	0.146	0.061	0.014
1	1.074	0.796	0.560	0.354	0.170
2	1.445	1.091	0.779	0.497	0.240
3	1.739	1.322	0.948	0.608	0.294
4	1.990	1.518	1.091	0.701	0.339
5	2.212	1.691	1.218	0.783	0.379
6	2.414	1.849	1.333	0.857	0.415
7	2.601	1.994	1.438	0.926	0.448
8	2.775	2.129	1.537	0.989	0.479
9	2.939	2.256	1.629	1.049	0.508
10	3.094	2.376	1.716	1.105	0.535
11	3.241	2.490	1.800	1.159	0.562
12	3.382	2.600	1.879	1.211	0.586
13	3.518	2.705	1.955	1.260	0.610
14	3.648	2.806	2.029	1.307	0.633
15	3.774	2.903	2.100	1.353	0.656
16	3.896	2.998	2.168	1.398	0.677
17	4.014	3.089	2.235	1.440	0.698
18	4.129	3.178	2.299	1.482	0.718
19	4.241	3.264	2.362	1.523	0.738
20	4.350	3.348	2.423	1.562	0.757
21	4.456	3.431	2.483	1.601	0.776
22	4.560	3.511	2.541	1.638	0.794
23	4.661	3.589	2.598	1.675	0.812
24	4.760	3.666	2.653	1.711	0.829
25	4.858	3.741	2.708	1.746	0.846
26	4.953	3.815	2.761	1.781	0.863
27	5.047	3.887	2.814	1.815	0.880



28	5.138	3.958	2.865	1.848	0.896
29	5.229	4.028	2.916	1.881	0.912
30	5.317	4.096	2.966	1.913	0.927
31	5.404	4.164	3.015	1.944	0.942
32	5.490	4.230	3.063	1.975	0.958
33	5.575	4.295	3.110	2.006	0.972
34	5.658	4.360	3.157	2.036	0.987
35	5.740	4.423	3.203	2.066	1.001
36	5.821	4.486	3.248	2.095	1.016



Accredited Testing Laboratory according to ISO/IEC 17025 - Registration number: NAH-1-1743/2018.

## TEST REPORT

Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil.

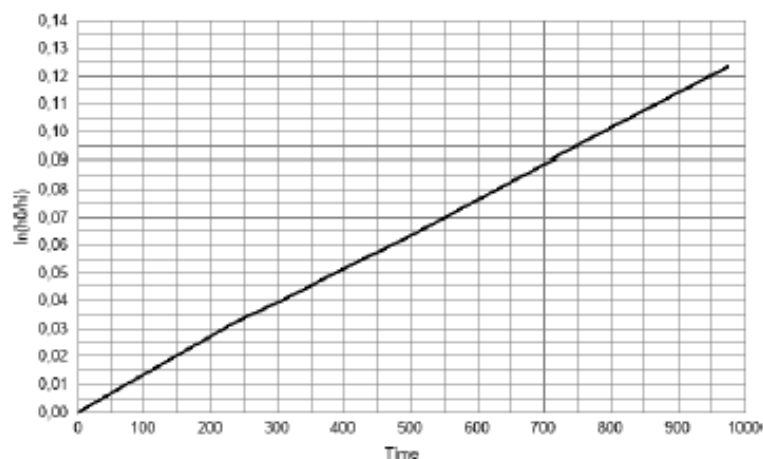
Part 11: Determination of permeability by constant and falling head (ISO/TS 17892-11:2004)

MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010

DETERMINATION OF PERMEABILITY BY FALLING HEAD TEST

Project Number :	482/2019	Report Number :	1/10/2019
Client :	Institute Orgenergostroy - ZAO OES	Sample Delivery Date :	2019.10.01
Location :	Paks II. NPP	Date of Test :	2019.10.01
Sample Code:	nedves	Sample typ./ Sample by :	Disturbed / Client

Test Conditions			Idő, t [sec]	Value, dh <sub>1</sub> [cm]	h <sub>1</sub> [cm]	h <sub>0</sub> / h <sub>1</sub>	ln(h <sub>0</sub> / h <sub>1</sub> )
Sample Height	L	5,5 cm	0	0	63,8	1,00	0,00
Sample Diameter	d	3,8 cm	236	2,0	61,8	1,03	0,03
Sample Area	A	11,3 cm <sup>2</sup>	322	2,6	61,2	1,04	0,04
Sample Volume	V	62,4 cm <sup>3</sup>	400	3,2	60,6	1,05	0,05
Pipe Cross-section	f	1,0 cm <sup>2</sup>	485	3,8	60,0	1,06	0,06
Water Temperature	T	25,0 °C	617	4,8	59,0	1,08	0,08
Temperature Correction	α	0,686	750	5,8	58,0	1,10	0,10
			974	7,4	56,4	1,13	0,12
Coefficient of Permeability, k = 4,213×10 <sup>-7</sup> m/s							



Notes :

Devices : Precision scale (KERN PLJ 4000-2M), Permeability tester (falling head (sajat)), Drying oven (KAPACITIV KKT. PKL-2002A)

Budapest, 2019.10.01

Test Performed by  
Némethy Ferenc

**BME GEOTECHNIKA ÉS  
 MÉRNÖKGEOLÓGIA TANSZÉK  
 GEOTECHNIKAI ÉS MÉRNÖKGEOLÓGIAI  
 LABORÁTORIUM**  
 H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. K. E. 20.EM  
 Tel.: (+36-1) 463-3008 Fax: (+36-1) 463-3006  
 www.gtl.bme.hu gtlab@mail.bme.hu

Head of Laboratory  
Dr. Tompai Zoltán

The test results in this report relate only to the samples tested!  
 This report shall not be reproduced, except in full, without the written approval of the laboratory!

37. ábra: k nedves



Accredited Testing Laboratory according to ISO/IEC 17025 - Registration number: NAH-1-1743/2018.

## TEST REPORT

Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil.

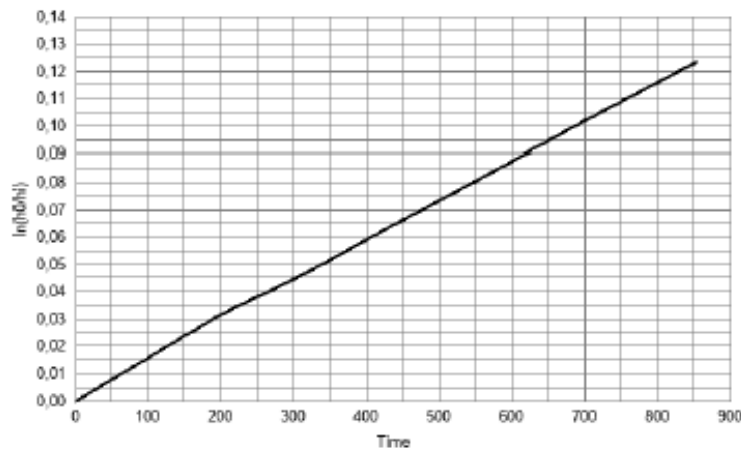
Part 11: Determination of permeability by constant and falling head (ISO/TS 17892-11:2004)

MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010

DETERMINATION OF PERMEABILITY BY FALLING HEAD TEST

Project Number :	482/2019	Report Number :	1/10/2019
Client :	Institute Orgenergostroy - ZAO OES	Sample Delivery Date :	2019.10.01
Location :	Paks II. NPP	Date of Test :	2019.10.01
Sample Code:	nedves 1	Sample typ / Sample by :	Disturbed / Client

Test Conditions		Idő, t [sec]	Value, dh <sub>i</sub> [cm]	h <sub>i</sub> [cm]	h <sub>0</sub> / h <sub>i</sub>	ln(h <sub>0</sub> / h <sub>i</sub> )
Sample Height	L	5,5	cm			
Sample Diameter	d	3,8	cm			
Sample Area	A	11,3	cm <sup>2</sup>			
Sample Volume	V	62,4	cm <sup>3</sup>			
Pipe Cross-section	f	1,0	cm <sup>2</sup>			
Water Temperature	T	25,0	°C			
Temperature Correction	a	0,686				
		Coefficient of Permeability, k = 4,805×10 <sup>-7</sup> m/s				



Notes :

Devices : Precision scale (KERN PLJ 4000-2M), Permeability tester (falling head (sajat)), Drying oven (KAPACITIV KKT. PKL-2002A)

Budapest, 2019.10.01

Test Performed by  
Némethy Ferenc

**BME GEOTECHNIKA ÉS  
 MÉRNÖKGEOLÓGIA TANSZÉK  
 GEOTECHNIKAI ÉS MÉRNÖKGEOLÓGIAI  
 LABORÁTORIUM**  
 H-1111 Budapest, Műegyetem Rkp. 3. K. F. 20./MM  
 Tel.: (+36-1) 463-3008, Fax: (+36-1) 463-3006  
 www.gtt.bme.hu, gttab@mail.bme.hu

Head of Laboratory  
Dr. Tompa Zoltán

The test results in this report relate only to the samples tested!  
 This report shall not be reproduced, except in full, without the written approval of the laboratory!

38. ábra: k\_nedves\_1



Accredited Testing Laboratory according to ISO/IEC 17025 - Registration number: NAH-1-1743/2018.

## TEST REPORT

Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil.

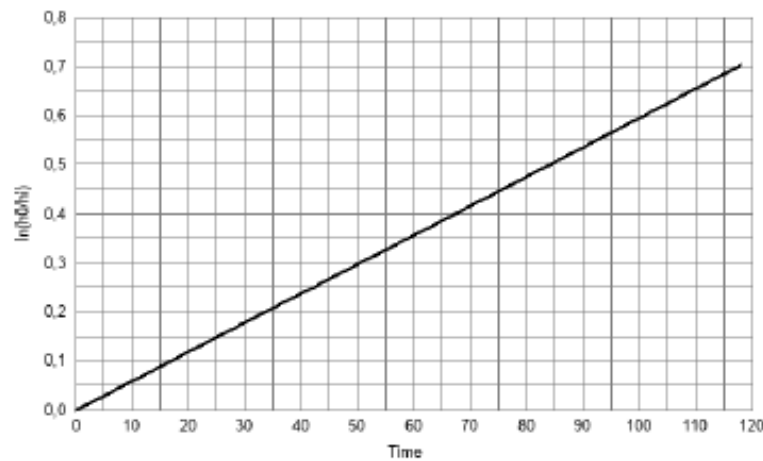
Part 11: Determination of permeability by constant and falling head (ISO/TS 17892-11:2004)

MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010

DETERMINATION OF PERMEABILITY BY FALLING HEAD TEST

Project Number :	482/2019	Report Number :	1/10/2019
Client :	Institute Orgenergostroy - ZAO OES	Sample Delivery Date :	2019.10.01
Location :	Paks II. NPP	Date of Test :	2019.10.01
Sample Code:	száraz	Sample typ./ Sample by :	Disturbed / Client

Test Conditions			Idő, t [sec]	Value, dh <sub>1</sub> [cm]	h <sub>1</sub> [cm]	h <sub>0</sub> / h <sub>1</sub>	ln(h <sub>0</sub> / h <sub>1</sub> )
Sample Height	L	5,5 cm	0	0	63,5	1,00	0,00
Sample Diameter	d	3,8 cm	14	5,0	58,5	1,09	0,08
Sample Area	A	11,3 cm <sup>2</sup>	29	10,0	53,5	1,19	0,17
Sample Volume	V	62,4 cm <sup>3</sup>	64	20,0	43,5	1,46	0,38
Pipe Cross-section	f	1,0 cm <sup>2</sup>	118	32,0	31,5	2,02	0,70
Water Temperature	T	25,0 °C	Coefficient of Permeability, k = 1.978×10 <sup>-5</sup> m/s				
Temperature Correction	α	0,686					



Notes :

Devices : Precision scale (KERN PLJ 4000-2M), Permeability tester (falling head (sajat)), Drying oven (KAPACITIV KKT. PKL-2002A)

Budapest, 2019.10.01

Test Performed by  
Némethy Ferenc

BME GEOTECHNIKA ÉS  
 MÉRNÖKGÉOLÓGIA TANSZÉK  
 GEOTECHNIKAI ÉS MÉRNÖKGÉOLÓGIAI  
 LABORATÓRIUM  
 H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. K. f. 20.MM  
 Tel.: (+36-1) 463-3008 Fax: (+36-1) 463-3006  
 www.gtl.bme.hu gtlab@mail.bme.hu

Head of Laboratory  
Dr. Tompai Zoltán

The test results in this report relate only to the samples tested!  
 This report shall not be reproduced, except in full, without the written approval of the laboratory!

A NAH által NAH-1-1743/2018 számon akkreditált vizsgálólaboratórium.

## VIZSGALATI JEGYZŐKÖNYV

Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata.  
10. rész: Közvetlen nyíróvizsgálat (ISO/TS 17892-10:2004)  
(MSZE CEN ISO/TS 17892-10:2010)

Munka száma:	0	Jegyzőkönyv száma:	0
Megrendelő:	Tamás E. TDK.	Minta érkezés dátuma:	1900.01.00
Minta számozási helye:	.	Vizsgálat dátuma:	2019.10.01
Feltárás jel / mélység:	"nedves"	Minta típusa / Mintát vette:	zavart / Megbízó

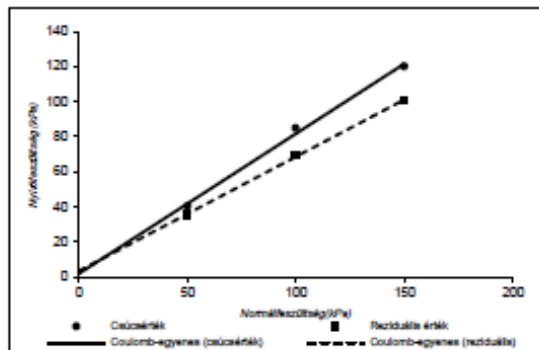
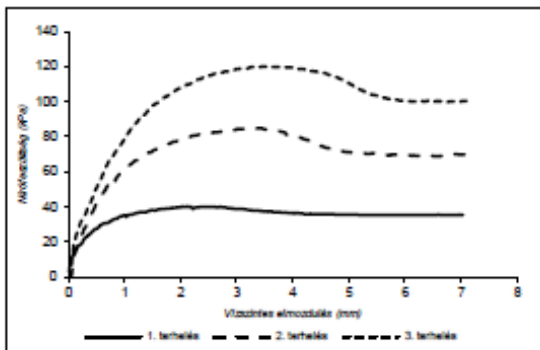
BERENDEZÉS ADATAI		
Terhelő keret hossza (L):	60	mm
Terhelő keret szélessége (B):	60	mm
Terhelő keret alapterülete (A):	3600	mm <sup>2</sup>

TERHELÉSI ADATOK	
1. terhelés (P <sub>1</sub> ):	50 kPa
2. terhelés (P <sub>2</sub> ):	100 kPa
3. terhelés (P <sub>3</sub> ):	150 kPa
4. terhelés (P <sub>4</sub> ):	- kPa

TERHELÉSI PARAMÉTEREK		
Nyírási sebesség:	0,5	mm/min
Max. elmozdulás:	6,5	mm
Terhelés típusa:	állandó sebesség	
Konzolidált:	igen	

MINTA ADATOK	KEZDETI ALLAPOT			TERHELÉS UTANI ALLAPOT				
	Terhelés (kPa):	60	100	150	60	100	150	
Talajminta magassága	H	mm	20,00	20,00	20,00	19,93	19,73	19,58
Nedves tömeg	m	g	154,00	154,10	153,90	154,00	154,10	153,90
Száraz tömeg	m <sub>s</sub>	g	134,73	134,82	134,65	134,73	134,82	134,65
Víztartalom	w	%	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
Szemcsesűrűség *	r <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Száraz sűrűség	r <sub>d</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1,87	1,87	1,87	1,88	1,90	1,91
Nedves sűrűség	r	g/cm <sup>3</sup>	2,14	2,14	2,14	2,15	2,17	2,18
Hézagányosság	e	-	0,42	0,42	0,42	0,41	0,4	0,39
Telítettség	S <sub>v</sub>	-	0,90	0,90	0,90	0,92	0,95	0,97

\* Decimál érték



TALAJFIZIKAI PARAMÉTEREK:	CSÚCSÉRTEK	$\varphi$ 38,5 °	$c'$ 1,8 kPa
	REZIDUÁLIS (VÉG) ÉRTÉK	$\varphi_r$ 33,0 °	$c_r'$ 3,3 kPa

Megjegyzés: Konzolidáló vizsgálati eredmények mellékletben.

Mérőeszközök: Minieg (Minieg1), Nyíróberendezés (Ny-2), Száritószeletrény (Szár3), Erőmérő cella (EMO-5), Elmozdulásmérő óra digitális (EOD-10), Elmozdulásmérő óra digitális (EOD-5)

Budapest, 2019. október 1.

vizsgálatot végezte  
Némethy Ferenc

Ellenőrizte és jóváhagyta  
Dr. Tompai Zoltán  
Laboregység-vezető

A vizsgálati eredmények csak a megvizsgált mintára vonatkoznak!  
A vizsgálati jegyzőkönyv a kibocsátó írásbeli hozzájárulásával és csak teljes egészében másolható!

A NAH által NAH-1-1743/2018 számon akkreditált vizsgálólaboratórium.

## VIZSGALATI JEGYZŐKÖNYV

Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata.  
10. rész: Közvetlen nyíróvizsgálat (ISO/TS 17892-10:2004)  
(MSZE CEN ISO/TS 17892-10:2010)

Munka száma:	0	Jegyzőkönyv száma:	0
Megrendelő:	Tamás E. TDK	Minta érkezés dátuma:	1900.01.00
Minta származási helye:	.	Vizsgálat dátuma:	2019.10.01
Feltárás jel / mélység:	"száraz"	Minta típusa / Mintát vette:	zavart / Megbízó

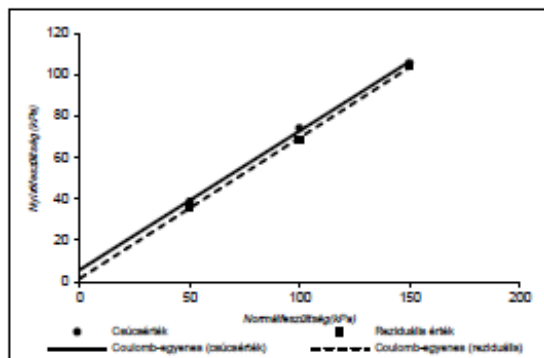
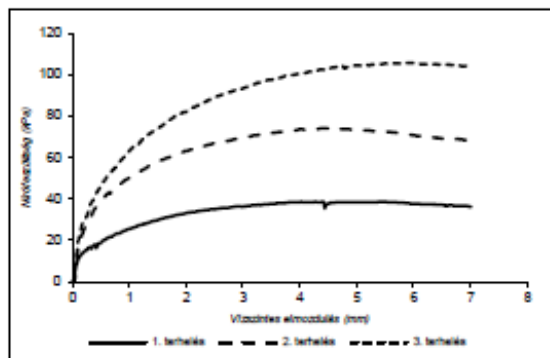
BERENDEZÉS ADATAI		
Terhelő keret hossza (L):	60	mm
Terhelő keret szélessége (B):	60	mm
Terhelő keret alapterülete (A):	3600	mm <sup>2</sup>

TERHELÉSI ADATOK		
1. terhelés (P <sub>1</sub> ):	50	kPa
2. terhelés (P <sub>2</sub> ):	100	kPa
3. terhelés (P <sub>3</sub> ):	150	kPa
4. terhelés (P <sub>4</sub> ):	-	kPa

TERHELÉSI PARAMÉTEREK		
Nyírási sebesség:	0,5	mm/min
Max. elmozdulás:	6,5	mm
Terhelés típusa:	állandó sebesség	
Konzolidált:	igen	

MINTA ADATOK			KEZDETI ALLAPOT			TERHELES UTANI ALLAPOT		
Terhelés (kPa):			50	100	150	50	100	150
Talajminta magassága	H	mm	20,00	20,00	20,00	19,83	19,65	19,15
Nedves tömeg	m	g	113,10	112,50	112,50	113,10	112,50	112,50
Száraz tömeg	m <sub>s</sub>	g	111,75	111,17	111,17	111,75	111,17	111,17
Víztartalom	w	%	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Szemcsesűrűség *	r <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Száraz sűrűség	r <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1,55	1,54	1,54	1,57	1,57	1,61
Nedves sűrűség	r	g/cm <sup>3</sup>	1,57	1,56	1,56	1,58	1,59	1,63
Hozgátnyesező	e	-	0,71	0,72	0,72	0,69	0,69	0,64
Telítettség	S <sub>v</sub>	-	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05

\* becslés értéke



**TALAJFIZIKAI PARAMÉTEREK:**  
CSÚCSÉRTÉK  $f' 34,0^\circ$   $c' 5,7 \text{ kPa}$   
REZIDUÁLIS (VÉG) ÉRTÉK  $f_r 34,0^\circ$   $c_r' 1,6 \text{ kPa}$

Megjegyzés: Konzolidáló vizsgálati eredmények mellékletben.

Mérőeszközök: Mérleg (Mérleg1), Nyíróberendezés (Ny-2), Száraztömegmérő (Szár3), Erőmérő cella (EMC-5), Elmozdulásmérő óra digitális (EOD-10), Elmozdulásmérő óra digitális (EOD-5)

Budapest, 2019. október 1.

vizsgálatot végezte  
Némethy Ferenc

Ellenőrizte és jóváhagyta  
Dr. Tompai Zoltán  
Laboregység-vezető

A vizsgálati eredmények csak a megvizsgált mintára vonatkoznak!  
A vizsgálati jegyzőkönyv a kibocsátó írásbeli hozzájárulásával és csak teljes egészében másolható!

**20. táblázat: Szemeloslási görbék alapján számított egyenlőtlenségi mutatók**

Minta száma	Egyenlőtlenségi mutató (U)
1. minta	2.75
2. minta	2.89
3. minta	2.82

