



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Töltésállékonyság-vizsgálat laboratóriumi és numerikus modellezéssel

Szabó Ferenc

építőmérnök II. évf. Bsc hallgató

Konzulensek:

Dr. Farkas-Karay Gyöngyi, Farkas Dávid

BME Vízépítési és Vízgazdálkodási tanszék

Tartalom

1. Bevezetés	2
2. Célkitűzések	2
3. Árvízvédelmi töltések jellemzése	3
3.1. Árvízvédelmi töltések Magyarországon	3
3.2. Árvízvédelmi töltések szivárgása	4
3.3. Árvízvédelmi töltések állékonysága	5
4. Módszerek bemutatása	6
4.1. Kisminta módszer	6
4.2. Numerikus modellezés	8
5. Laboratóriumi vizsgálatok	9
5.1. Homokos iszap töltés megtámasztással	10
5.2. Homokos kavics töltés megtámasztással	14
5.3. Homokos kavics töltés megtámasztás nélkül	16
5.4. Homokos kavics töltés megtámasztással, közbenső kavicsréteggel.....	20
6. Numerikus vizsgálatok.....	24
6.1. Homokos iszap töltéshez készült numerikus modell	24
6.2. Homokos kavics töltéshez készült numerikus modell megtámasztással	26
6.3. A harmadik kismintához készült numerikus modell	26
6.4. A negyedik kismintához készült numerikus modell	27
6.5. Kismintaként meg nem épített numerikus modellek	29
6.5.1. Megtámasztás agyagrétegből kialakítva	29
6.5.2. Az árvíz oldali rézsű és a megtámasztás agyagrétegből kialakítva	29
6.5.3. Az árvíz oldali rézsű agyagrétegből kialakítva	31
7. Eredmények összehasonlítása, értékelése	31
8. Összegzés	34
9. Irodalomjegyzék	34

1. Bevezetés

Magyarország egy folyókban gazdag ország, ahol az árvízi védekezés mind a múltban, mind a jelenben kiemelt feladat. A modern eszközök mellett a földgátak szerepe továbbra sem elhanyagolható.

A dolgozatom témája a töltésállékonyság vizsgálata, amelyet laboratóriumi körülmények között, saját kezűleg épített kismintákkal, illetve numerikus modellezéssel vizsgálok. Kutatásom során olyan keresztmetszetekkel, rézsűszögekkel és különféle töltésekbe épített anyagokkal foglalkozom, amelyek alkalmazása, kivitelezése ezen a területen nem szokványos.

Azért tartom fontosnak a töltések témakörével való foglalkozást, mert Magyarországon a globális klímaváltozás következményeként erősen megnövekedhetnek az árvizek gyakoriságai és vízállásai, így véleményem szerint ez egy örökzöld téma lesz az elkövetkezendő időkben.

2. Célkitűzések

A TDK dolgozatom megírása során az árvízvédelmi töltések állékonyságát kívántam vizsgálni, egy extrém, 1:1,5-ös rézsű esetén, mivel a hagyományos szerkezeteknek rendkívül magas az anyagigényük. Ha lehetséges volna ilyen meredek rézsűhajlással töltéseket kialakítani, az nagyban csökkentené a felhasznált anyag mennyiségét, így jóval gazdaságosabbá is válna egy-egy beruházás.

Kezdetekben legalább négy laboratóriumi minta megépítése, illetve ezekhez numerikus modellek készítése volt a cél. Ezt szerencsére sikerült teljesíteni. Ezeken kívül, mivel a numerikus modellezést a laboratóriumi vizsgálatokkal párhuzamosan készítettem, ezért a kísérletezgetés közben akadt három geometriai kialakítás, amelyet csak numerikus formában készítettem el, mivel a szoftver által kiszámolt értékek rosszabbak voltak, mint az elődeik, így nem tartottam érdemesnek megépíteni őket, ettől függetlenül a dolgozatomban említést teszek róluk.

3. Árvízvédelmi töltések jellemzése

3.1. Árvízvédelmi töltések Magyarországon

Az árvízvédelmi töltések már nagyon régre visszamenően szerves részét képezik az áradásokkal szembeni küzdelemnek, mondhatni ez az első védvonal a legtöbb helyen. Ennek okán kimagasló figyelmet és folyamatos kutatást igényel, hogy a lehető legjobban kihasználjuk az anyagok és geometriák kombinációit, így kialakítva a leoptimálisabb töltéseket.

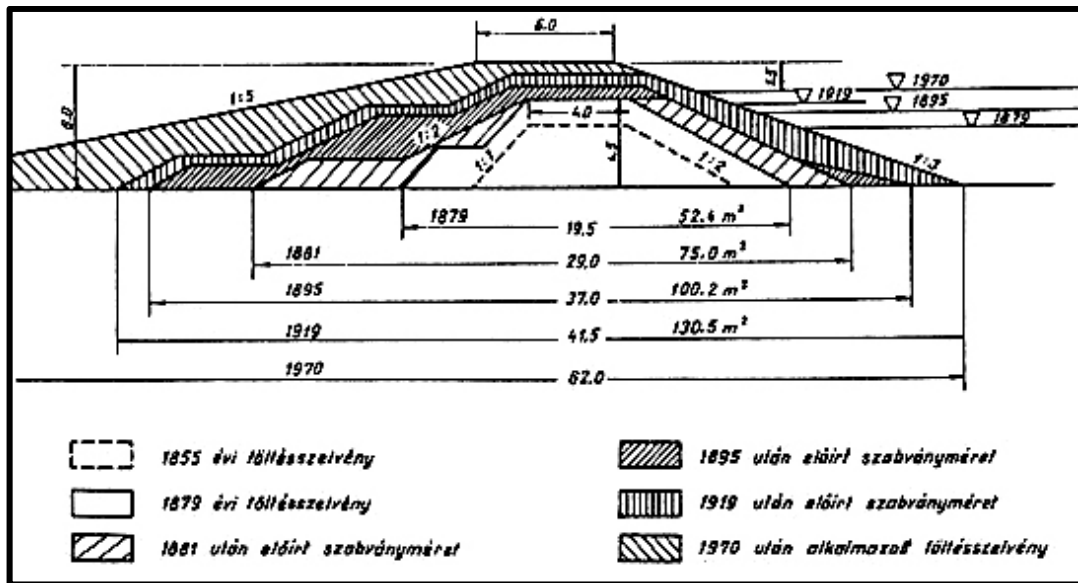
A töltések Magyarországon már az 1800-as években is megjelentek, ám ekkor még nem voltak annyira kiépítettek, jól megtervezettek, mint napjainkban.

Az egyik probléma a felhasznált anyagokban rejlett, ugyanis ezek elég gyenge minőségűek voltak, nem voltak talajmechanikai szempontok alapján vizsgálva. Ennek köszönhető, hogy a töltéseink nagy részénél, a töltés fő tömegét alkotó talaj összetétele, tulajdonságai ismeretlenek.

A másik probléma a mértékadó árvízszint ismeretének hiányára, illetve ennek az évek múltával egyre erősebb növekedésére vezethető vissza. Akkoriban még nem álltak a mérnökök rendelkezésére olyan pontos eszközök, ezért legtöbb esetben a tapasztalataikra építettek. Az így kialakított töltés pár évtizeden belül már nem volt elegendő az árvíz megfékezésére, ezért magasítani kellett őket. Viszont nem lehet egyszerűen magasítani, mert akkor a rézsűszög meredekebb lesz, ami állékonysági problémákhoz vezethet, így a teljes keresztmetszetre felhordtak egy új réteget, majd ezt követte még számos réteg, míg elérték mai formájukat.

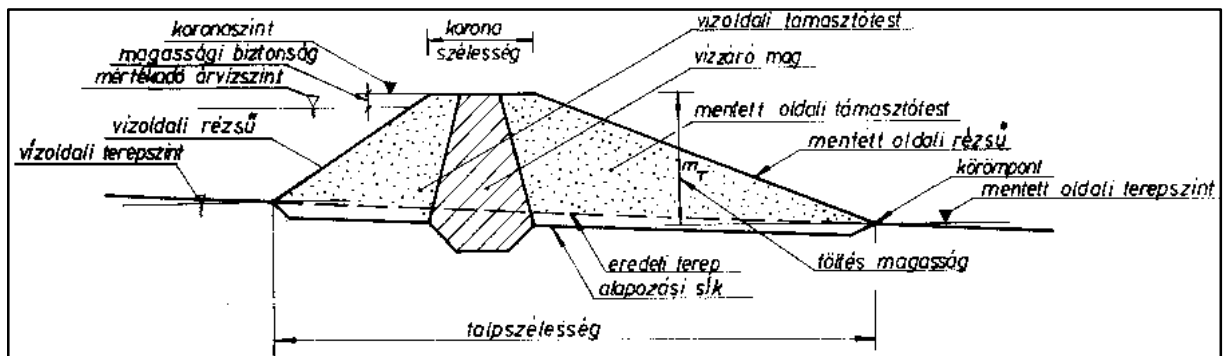
Mint ahogy az 1. ábra is mutatja, az évek során egyre kisebb rézsűszöget kellett alkalmazni, hogy a vízépítési műtárgy állékonyságával ne legyen probléma, ez viszont nagy mennyiségű anyag felhasználásával volt lehetséges, ami a legkevésbé sem volt gazdaságos.

Annak érdekében, hogy a töltéseket valamennyivel gazdaságosabbá tegyék, elkezdtek az anyagokat talajmechanikai szempontok alapján vizsgálni, különösképpen a tömöríthetőséget, természetes rézsűszöget, illetve kohéziót előtérbe helyezve.



1. ábra: Árvízvédelmi töltések magasztásának fokozatai (Vágás, 1982)

A töltésekre vannak bizonyos követelmények, melyeknek eleget kell tenni. Ilyen például az, hogy a koronának legalább olyan szélesnek kell lennie, hogy egy sávos közlekedés lehetséges legyen rajta, így az árvízi védekezés hatékonysága növelhető. Másik követelmény a magasságra vonatkozik. Itt fontos leszögezni, hogy ez függ az elhelyezkedéstől. Nem mindegy, hogy lakott területről beszélünk, vagy esetleg nincs a közelben semmi. Alapvetően a töltésnek magasabban kell lenni, mint az 1%-os előfordulású legmagasabb vízszint, de extrém esetekben előfordulhat ennél szigorúbb követelményrendszer alkalmazása. (Szlávik, 2013) Az árvízvédelmi töltések általános bemutatása a 2. ábrán látható.



2. Ábra: Árvízvédelmi töltések felépítése (Csoma, 2020)

3.2. Árvízvédelmi töltések szivárgása

Mivel a töltések valamilyen talajból épülnek fel, többnyire nem vízzáróak. Ez azt eredményezi, hogy megfigyelhető a szivárgás jelensége. A jelenséget Henry Darcy francia hadmérnök figyelte meg és vizsgálta először. Azt vizsgálta, hogy porózus talajokban egy bizonyos keresztmetszeten mekkora sebességgel folyik át a víz. Ezt nevezte v_{sz} (m/s) szivárgási

sebességnek. Ezt követően megmérte, hogy ugyanazon keresztmetszeten mekkora sebességgel folyik át a víz, ha nincs előtte semmilyen akadály. Ez volt az úgynevezett v_{eff} (m/s) effektív sebesség. Ezen kívül felvette az n (-) hézagterefogatot és megállapította, hogy az effektív sebesség hézagterefogattal történő beszorzása a szivárgási sebességet adja eredményül.

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

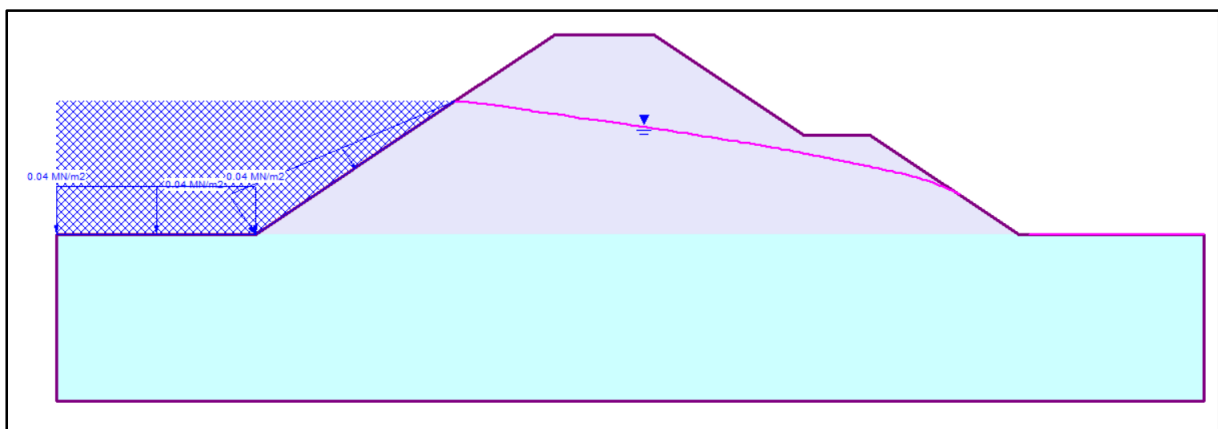
Ez a sebesség pedig egyenes arányosságban áll az úgynevezett I (-) hidraulikus gradiennel, vagyis a mozgást eredményező vízszintkülönbség és a szivárgási úthossz hányadosával.

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [2]$$

Ez a következő összefüggést adja,

$$v = -k \times I \quad [3]$$

ahol k (m/s) az a szám, melyre a szakirodalom szivárgási tényezőként hivatkozik (Darcy, 1856). Ennek a jelenségnek köszönhetően a töltés keresztmetszetében kialakul az úgynevezett szivárgási görbe, mely a töltésen belüli víz magasságát mutatja meg (3. ábra).



3. Ábra: Szivárgási görbe (lila, saját modelleredmény homogén gátra)

3.3. Árvízvédelmi töltések állékonysága

A töltéseknél, a szivárgáson túl a másik jellemző szempont az állékonyság. Alapvetően hat rájuk az önsúlyból származó teher és emellett a külső terhek, melyekből a leghangsúlyosabb a vízteher. Ezek együttesen a talajban nyírófeszültséget keltenek, ami így elcsúszik, és a külső határoló felület megváltozik. Ezért fontos tulajdonsága a töltéseknek a rézsúhajlás. A rézsúszög függ a talaj tulajdonságaitól, így fontos a megfelelő anyagok használata.

4. Módszerek bemutatása

A TDK dolgozatom készítése közben két módszert használtam az árvízvédelmi töltések vizsgálatára, adatok kinyerésére. A két módszerből származó eredményeket összehasonlítottam és vizsgáltam a hasonlóságokat, eltéréseket.

4.1. Kisminta módszer

A kismintamódszernek több előnye is van a valós méretű kísérletek lefolytatásával szemben. Egyrészt a valós méretben nem, vagy csak nehezen megfigyelhető jelenségeket könnyebben tudunk tanulmányozni. Másrészt a felhasznált anyag nagyságrendekkel kevesebb, mint amit egy valós méretű kísérlet esetében használnánk fel, így sokkal gazdaságosabbnak mondható. Ezenkívül a laboratóriumi körülmények miatt kiszűrhetünk olyan káros tényezőket, melyek torzíthatnák a kapott eredményeinket. Terepen nincs lehetőségünk rá, hogy a gáton belüli deformációkat megfigyelhessük, ami résmodellt használva szintén előnye a laboratóriumi vizsgálatoknak.

A kismintamódszer szivárgáshidraulikában azonban csak akkor használható, ha egy bizonyos matematikai alapokon nyugvó torzítást alkalmazunk, melyet a következő táblázatban fogok ismertetni. Ennek alapja, hogy az árvízvédelmi töltés méreteit lecsökkentjük, azonban a felhasznált anyagban lévő szemcsék méretét körülményes lenne a megfelelő méretarányal csökkenteni, illetve ez a talajminta fizikai tulajdonságainak drasztikus megváltozásával is járhat, ezért alkalmazzuk a torzítást (1. Táblázat). Dolgozatomban a geometriai, kinematikai és dinamikai hasonlóságokat Mosonyi és Kovács kismintatörvénye alapján biztosítottam (Mosonyi és Kovács 1952).

	Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszorzói			
	Torzítatlan		Torzított	
Hossz	C	14,3	C	14,3
Terület	C ²	204,5	C ²	204,5
Térfogat	C ³	2924	C ³	2924
idő	C ⁻¹	0,070	C	14,3
Sebesség	C ²	204,5	C ⁰	1
Gyorsulás	C ³	2924	C ⁻¹	0,070
Vízhozam	C ⁴	41816	C ²	204,5

1. Táblázat: Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámjai

Ennél a módszernél egy 2,05*1*0,2 méter méretű, egyik oldalán plexifalú tartályban végeztem a méréseket. Ezt 0,5 méterig feltöltöttem kavicssal, mely a teherhordást végzi, illetve könnyíti az átépítéseket, mivel így nem kell a tartály legaljára lenyúlni. A kavicsfeltöltés másik oka, hogy ez a tartály nem a legoptimálisabb töltések vizsgálatára, mert egy töltés magasság-szélesség aránya többnyire 1:7, míg ez a tartály esetében közel 1:2, és ezen az arányon módosít ez a kis változtatás. Ezt követte egy geotextília réteg, mely a szemcsék átmosódása ellen véd. Erre került rá egy vízzáró agyagréteg, majd még egy geotextília réteg. Erre az alapra építettem az összes kisminta modelleket (1. Kép).

A tartály mindkét végén található egy bukó (2. Kép), mely az árvízszint szimulálására szolgál, illetve a hátoldalán található 10 darab piezométer-cső segítségével meghatározható a töltésen belüli szivárgási szint (3. Kép). Az előbbieken leírt alapra felépítettem a keresztmetszeteket M1:14,3-as méretarányban. Azért ilyen rendkívüli méretarányt választottam, mivel így tölti ki a keresztmetszet a legoptimálisabban a tartályt, és a kisminta modelleknél általánosan elmondható, hogy minél kisebb, annál pontatlanabb a mérés, annál nagyon torzítások vannak benne (Tamás, 2019).

A vizsgálatokat minden esetben 4 méteres árvízszinttel végeztem (a töltés lábától számolva), mely így ezzel a méretarányal számolva 28 cm.



1. Kép: Keresztmetszet kialakítás közben



2. Kép: Felvízi bukó



3. Kép: Piezométer-csövek

4.2. Numerikus modellezés

A másik módszer kevésbé kézzelfogható, ám annál modernebb. Ez nem más, mint az RS2 szoftverrel való numerikus modellezés. A szoftver a végeselemes módszerrel számol elmozdulást, talajban ébredő feszültségeket, vízszivárgást és biztonsági tényezőket is. A program segítségével egyszerű vonalrajz segítségével meg lehet határozni a keresztmetszeti szelvényt. Ezt követően be lehet táplálni az anyagokra vonatkozó, hidraulikai és állékonysági szempontból fontos adatokat. Meghatározhatunk vízterhet, illetve víznyomást, melyből a program képes kiszámítani az elmozdulásokat, szivárgási vízszintet, és még rengeteg hasznos információt. Ennél a módszernél fontos leszögezni, hogy sok esetben nem képes helyettesíteni a gyakorlatiasabb kísérleteket, mert a későbbiekben is látható lesz majd, hogy erős eltérések lehetnek a két módszer között, tehát nem tükrözi minden esetben a valóságot. A program, az anyagokat teljes mértékben homogénnek tekinti, ez azonban sem a kismintában, sem a valóságban nincs így. Ezenkívül a rácsháló változtatása túl nagy befolyással bír az eredményekre. Egy bizonyos számú rácsig az eredmények egyre finomabbak lesznek, azonban egy bizonyos határ felett már csak a lefutási időt növeli, és az is előfordulhat, hogy nem ad eredményt a számítás.

5. Laboratóriumi vizsgálatok

A laboratóriumban összesen 4 keresztmetszet megépítésére volt lehetőségem, melyeken méréseket végeztem. Feltüntettem a keresztmetszeten belüli víz szintjét, illetve a vízhozamot is, viszont főként az alakváltozásokat, elcsúszásokat, állékonysági problémákat vizsgáltam. A szivárgással kapcsolatos mérési eredmények azonban jó támpontot nyújtanak annak megítélésére, hogy a kétféle modellezési módszer mennyire egyezik.

Mind a 4 vizsgált esetben a keresztmetszet tartályra való felrajzolásával kezdtem, majd ennek segítségével az anyag betöltése után alapos tömörítéssel kialakítottam a kívánt töltésszelvényt.

A laboratóriumi modellek felépítésénél összesen 4 anyagot használtam fel. Az első modellnél kizárólag homokos iszapot, a második és harmadik modell esetében homokos kavicsot használtam fel. A negyedik, és egyben utolsó modellnél nem teljesen homogén anyagból épült a töltésszelvény. Ebben az esetben a már említett homokos kavicsból és egy közbelső kavicsrétegből áll a keresztmetszet. Az agyag a későbbi numerikus modellezések miatt van feltüntetve, illetve a töltés alatti vízzáró réteg is ebből áll, ezért úgy gondoltam, fontos megemlíteni a felhasznált anyagok között (2. Táblázat).

Az anyagtulajdonságok meghatározásához a következő szakirodalmakat használtam fel:

- Kavics, iszapos homok, agyag tulajdonságai (Tamás, 2019)
- Homokos kavics tulajdonságai
 - Fajlagos súly (Lindenburg, 2018)
 - Belső súrlódási szög és kohézió (Ortiz, 1986)
 - Szivárgási tényező (Domenico, Schwarz, 1990)

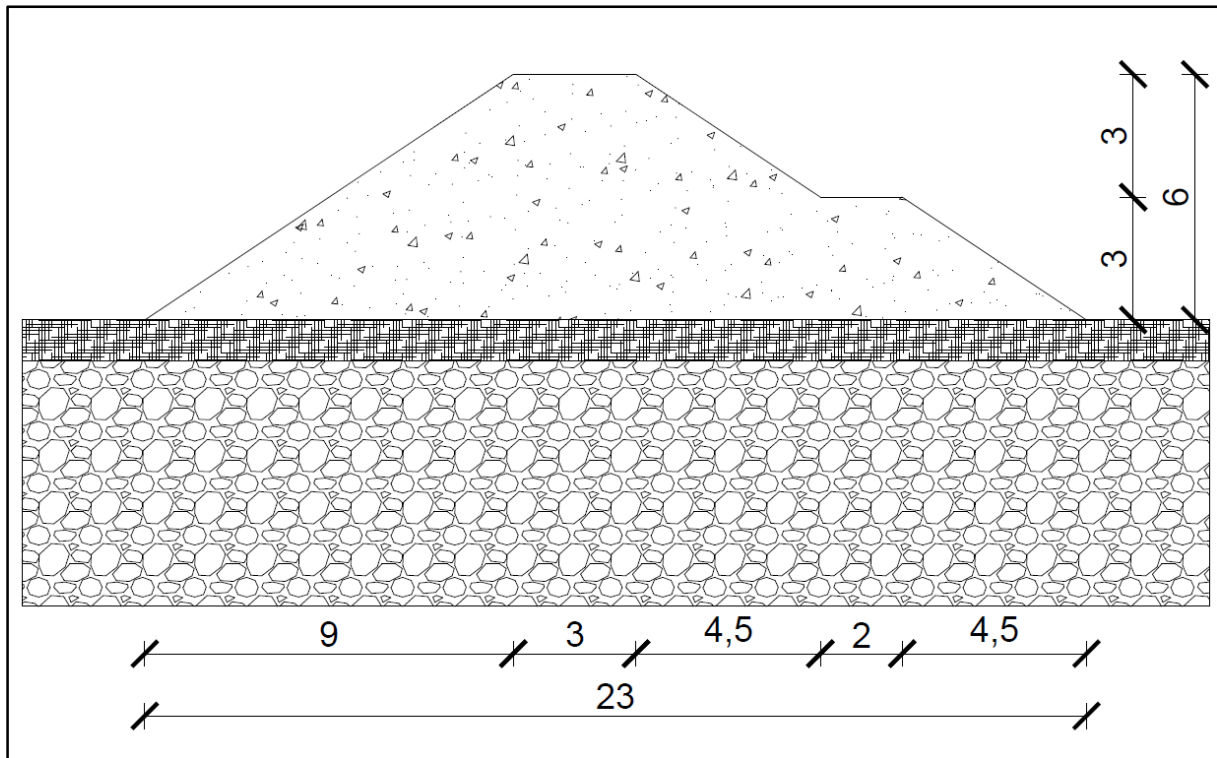
Talajfizikai jellemzők					
	Kavics	Homokos kavics	Homokos iszap	Agyag	Mértékegység
Fajlagos súly	0,027	0,021	0,021	0,018	MN/m ³
Poisson tényező	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Young modulus	200	20	20	100	MPa
Húzószilárdság	0	0	0	0	MPa
Belső súrlódási szög	35	35	34	0	Szög
Kohézió	0	0,003	0,0057	0,1	MPa
Reziduális húzószilárdság	0	0	0	0	MPa
Reziduális belső súrlódási szög	35	35	34	0	Szög
Reziduális kohézió	0	0,003	0,0016	0,1	MPa
Porozitás	0,5	0,5	0,4152	0,5	-
Szivárgási tényező	0,0001	0,001	0,000018	0,0000001	m/s

2. Táblázat: Anyagok tulajdonságai

5.1. Homokos iszap töltés megtámasztással

Az első modelletem egy homokos iszap talajtípusból építettem, egy mentett oldali megtámasztással. Szándékosan egy extrém, nem használt rézsűszöget építettem meg, 1:1,5-ös rézsűhajlást, mert ezzel a keresztmetszeti kialakítással nagyban lehetne csökkenteni az anyaghasználatot, ha valamilyen módszert találnánk az állékonysági problémák kiküszöbölésére.

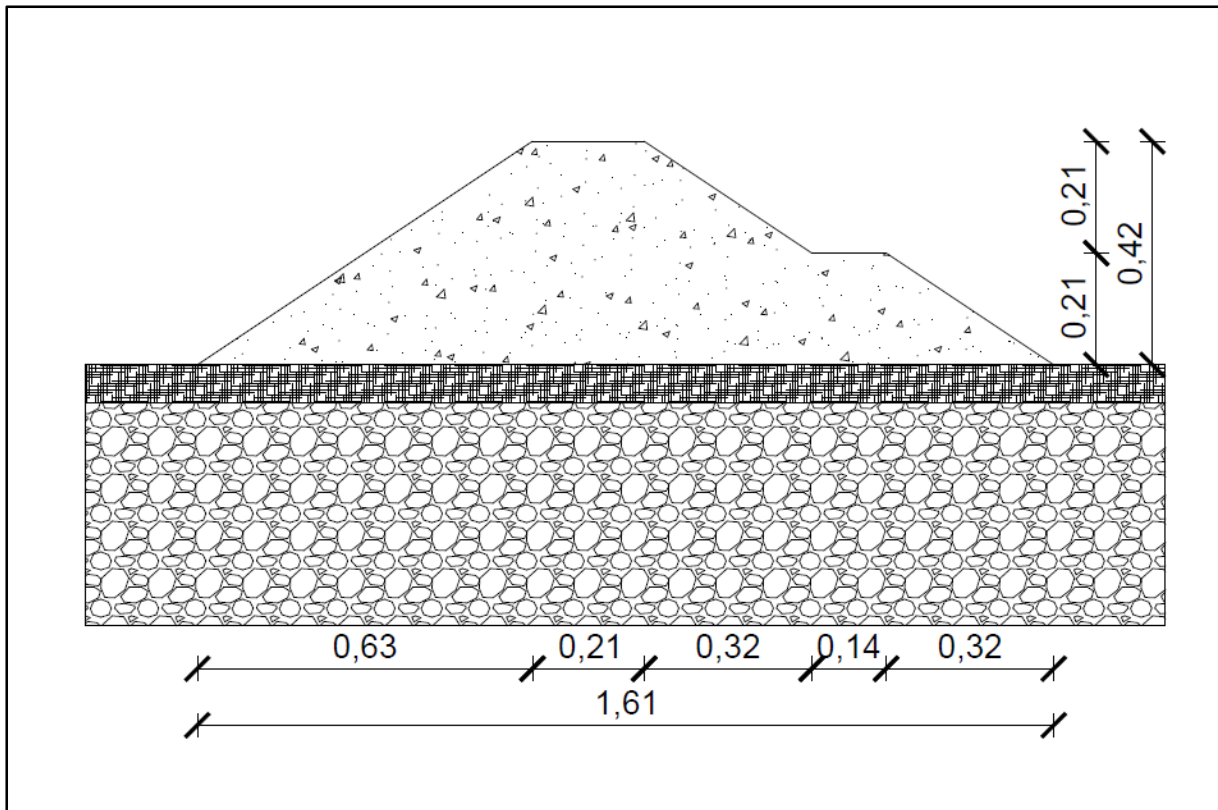
A modell valós méretei a következők. 23 méter széles az alja. 6 méter magas, így a rézsű szélessége 9 méter, a mentett oldalon két részletben van kialakítva, egy 2 méteres közbenső korona kialakításával. A koronaszélesség 3 méter (4. Ábra).



4. Ábra: Homokos iszap töltés megtámasztással, valós geometriai méretek

Ezeket az adatokat a méretarányal átszámolva a következőt adja: A töltés teljes szélessége 1,61 méter, 0,42 méter magas. A rézsű szélessége 0,63 méter, mely a védett oldalon két részletben, egy 0,14 méter széles közbenső koronával van elválasztva. A korona szélessége 0,21 méter (5. Ábra).

A 4. Kép a kismintamodell beépítését ábrázolja.



5.Ábra: Homokos iszap töltés megtámasztással, kisminta geometriai méretek



4. Kép: Homokos iszap töltés megtámasztással, építés közben

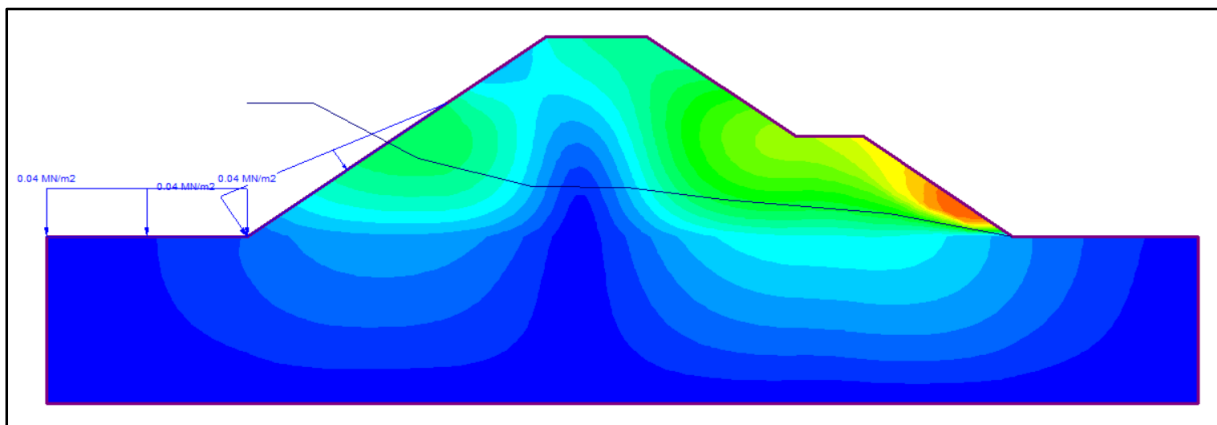
Ennél a modellnél állékonysági problémák léptek fel. Mind a mentett, mind az árvízi oldalon megcsúszott a rézsű, a keresztmetszet belsejében szemmel látható kimosódási nyomok jelentek meg. Ezen kívül a mentett oldalon a töltéstalpnál látszó módon átszivárgott a víz.

A piezométer-csövek segítségével mért vízszintmagasságok a következően alakultak.

Szivárgási szint és vízhozam				
Szivárgási szintek			Vízhozam	
#	1. mérés [mm]	2. mérés [mm]	1. mérés [ml]	2. mérés [ml]
1	743	743	200	230
2	743	743	220	230
3	615	626	210	230
4	563	569	▼	▼
5	555	567	Átlag 210	Átlag 230
6	530	541		
7	504	510		
10	449	449		

3. Táblázat: Első modell mérési adatai

Az első mérést a víz ráeresztése után 1 órával végeztem, míg a másodikat 24 óra elteltével, tehát a második mérésnél már állandósult értékeként tekinthetünk az adatokra. Ebből kifolyólag a szivárgási görbét a második mérés alapján készítettem el.



6. Ábra: Homokos iszap töltésen mér adatok által szerkesztett szivárgási görbe

A kapott adatok azt mutatták, hogy ez a keresztmetszet és anyag kombináció nem megépíthető, mivel bár a deformációk nem nagyok, de ennél jóval nagyobbak is lehetnének, azonban a tartály fala akadályozza a további elmozdulásokat. A továbbiakban ugyanezt a keresztmetszetet vizsgálom egy új anyag felhasználásával.

5.2. Homokos kavics töltés megtámasztással

A második modell elkészítése előtt feltételeztem, hogy előzőleg az anyag nem volt megfelelő, így megtartottam a keresztmetszeti méretet és kialakítást. A változás tárgyát az anyag képezte. Ennél a modellnél már homokos kavicsot használtam, abban bízva, hogy a nagyobb méretű szemcsék stabilizálják a töltés falait (5. Kép).

Ez a modell már sokkal állékonyabbnak bizonyult. Az árvízi oldalon a víz alatti szakaszon kisebb kimosódás látszik, ahogy a 7. Kép mutatja. Ennek okaként a víz hullámozása tudható be, ami elsodorta a kisebb szemcséket. Ez a jelenség feltehetőleg a valós méreteken is hasonló méretű lenne, nem skálázódna fel a modell és a valós méret közti méretarányal. A mentett oldalon egy kisebb megcsúszás látható (6. Kép). A kimosódási nyomok viszont teljesen eltűntek.



5. Kép: Homokos kavics töltésszelvény megtámasztással, víz ráeresztése után



6. Kép: A megtámasztás megcsúszása a mentett oldalon



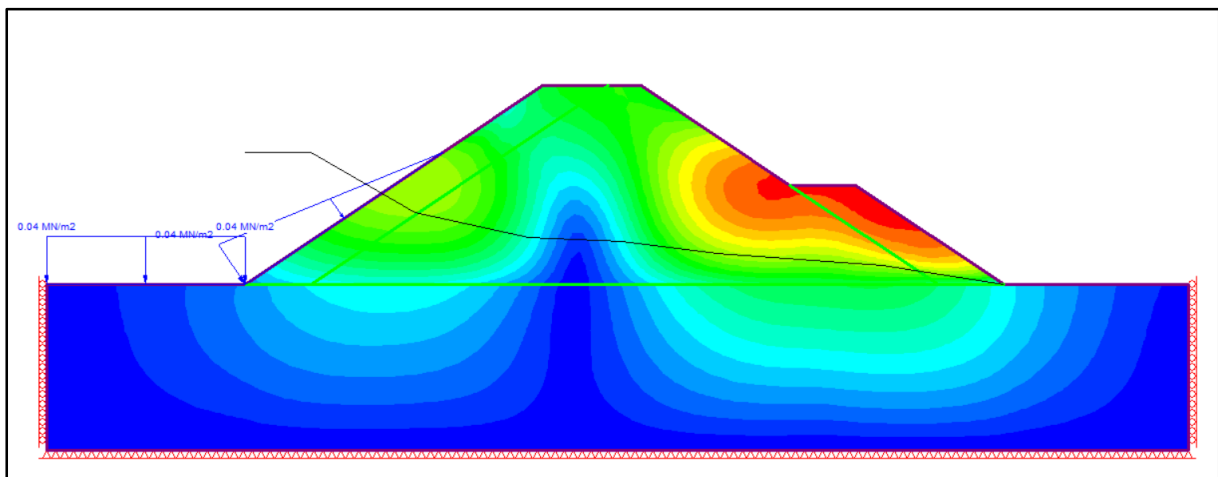
7. Kép: Árvíz oldali enyhe kimosódás

Ennél a modellnél is elvégeztem a vízhozamra vonatkozó méréseket, majd leolvastam a piezométer-csővekben fennálló vízmagasságokat. Ezek a következő eredményt adják.

Szivárgási szint és vízhozam		
Szivárgási szintek		Vízhozam
#	1. mérés [mm]	1. mérés [ml]
1	743	200
2	743	220
3	615	210
4	563	▼
5	555	Átlag 210
6	530	
7	504	
10	449	

4. Táblázat: Homokos kavics töltés megtámasztással, mérési adatok

Ennél a modellnél az víz ráengedését követő 1 órában nem végeztem mérést. A látható adatok a víz ráengedése után 24 órával lettek rögzítve.



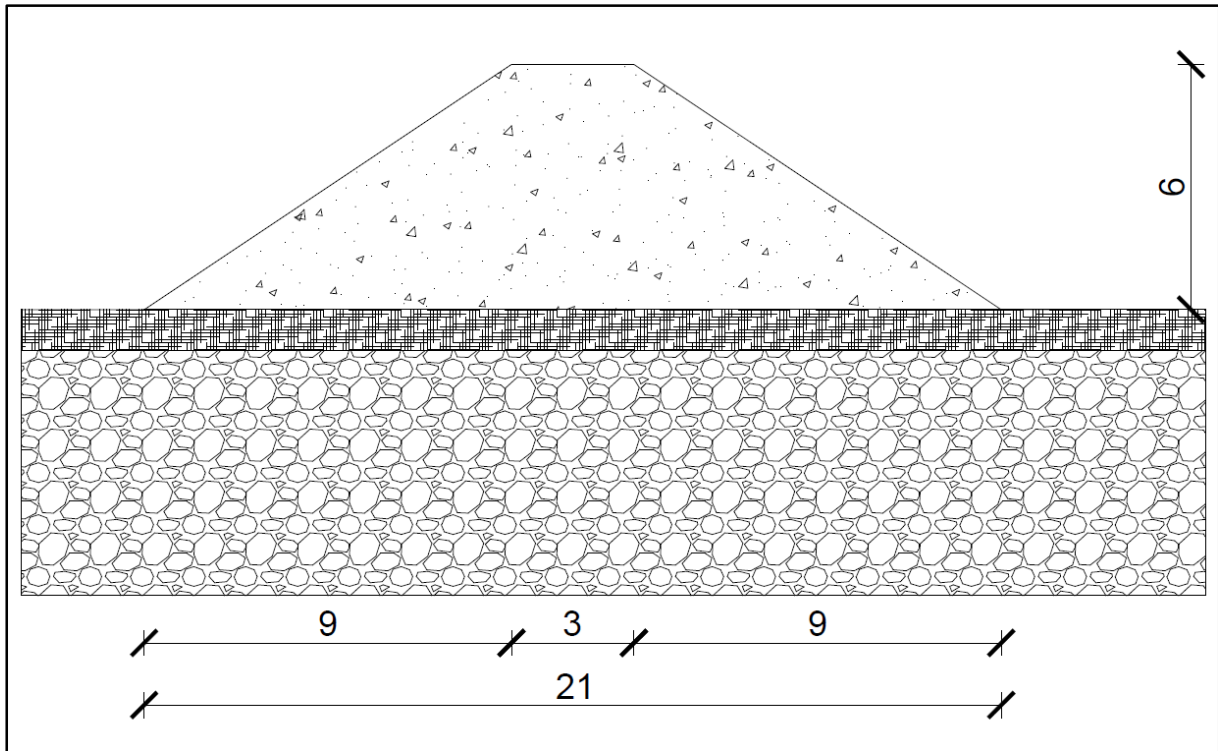
7. Ábra: Homokos kavics töltésén mér adatok által szerkesztett szivárgási görbe

A vizsgálat azt mutatta, hogy ez az anyag és keresztmetszet kombináció állékonyabbnak mondható, mint az előző esetben. A következőkben a megtámasztás hatását vizsgálom az állékonyságra.

5.3. Homokos kavics töltés megtámasztás nélkül

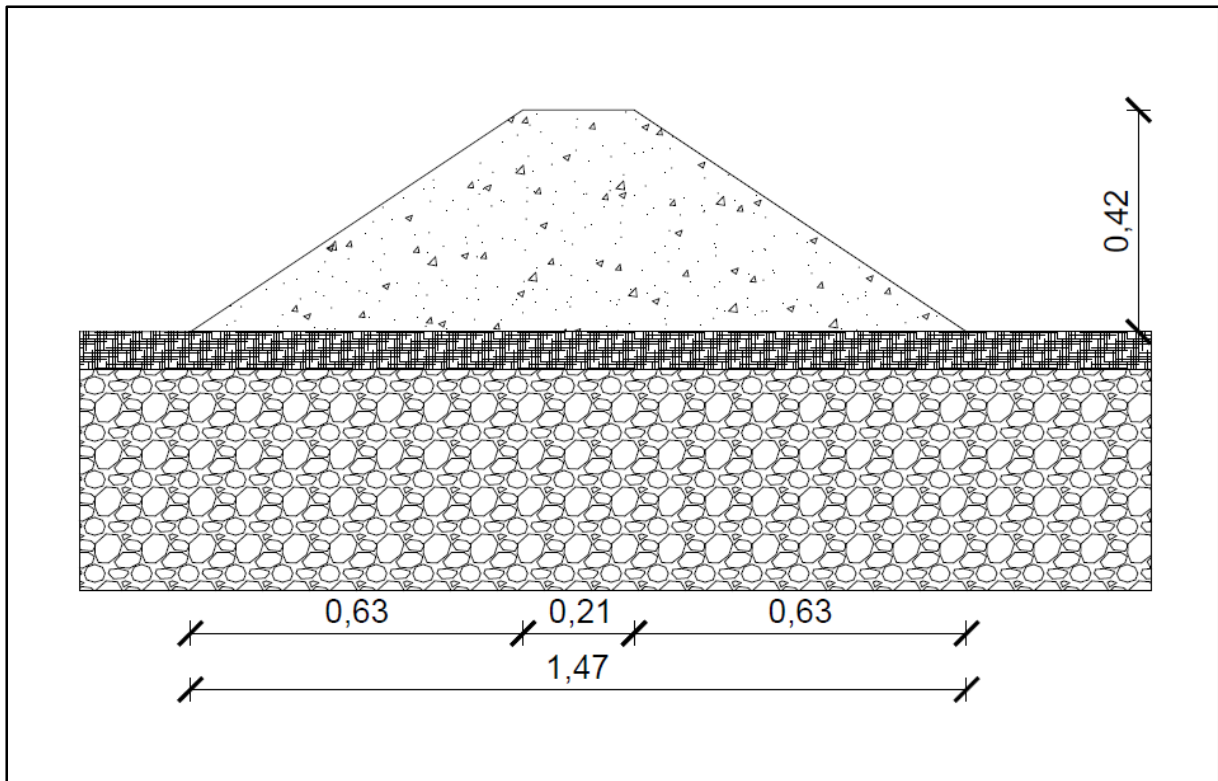
A harmadik modellnél a jobbnak bizonyuló anyagot tartottam meg, és a keresztmetszeten eszközöltem kisebb változtatásokat. Eltávolítottam a mentett oldali megtámasztást, hogy megvizsgáljam, milyen hatással van az állékonyságra a megtámasztás megléte. Az így kapott modell keresztmetszeti méretei a következőképpen alakultak. A töltés a talpánál 21 méter

széles, míg a koronaszélesség megmaradt 3 méternek, illetve a magasság is maradt a szokásos 6 méter (8. Ábra).



8. Ábra: Megtámasztás nélküli keresztmetszet valós méretei

Ez a modell esetében azt jelenti, hogy 1,47 m széles a talpánál, 0,21 méter a korona magasságában és 0,42 méter magas (9. Ábra, 8. Kép).



9. Ábra: Megtámasztás nélküli keresztmetszet kisminta méretei

A modell belsejében most sem látszódtak kimosódási nyomok. Az árvízi oldalon ugyanaz a jelenség mutatkozott meg, mint a második modell esetében, illetve a mentett oldali megcsúszás egy kicsit nagyobb mértékben jelentkezett (9. Kép).



8. Kép: Megtámasztás nélküli kisminta



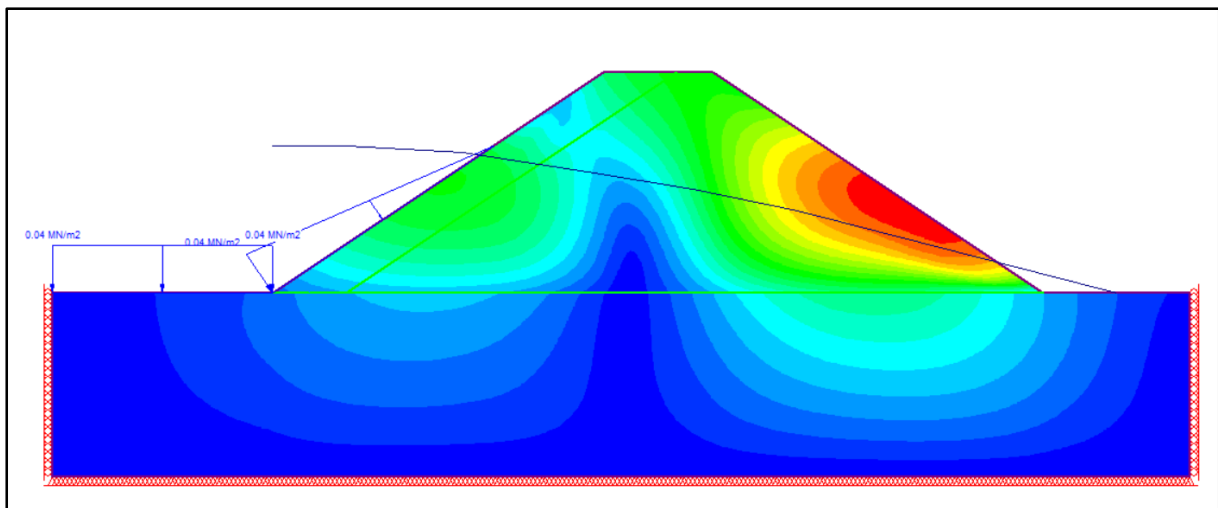
9. Kép: A mentett oldali részű alsó szakaszának megcsúszsása

A piezométer-csővekről a következő adatok voltak leolvashatóak, illetve a vízhozam így alakult a harmadik modell esetében.

Szivárgási szint és vízhozam						
Szivárgási szintek			Vízhozam			
#	1. mérés [mm]	2. mérés [mm]	3. mérés [mm]	1. mérés [mm]	2. mérés [mm]	3. mérés [mm]
1	729	729	730	300	390	390
2	729	729	730	310	390	390
3	713	715	717	310	390	390
4	666	679	680	▼	▼	▼
5	631	646	647	Átlag 306,67	Átlag 390	Átlag 390
6	594	607	607			
10	445	446	446			

5. Táblázat: Megtámasztás nélküli töltés mérési adatai

Jelen esetben 3 mérés lett rögzítve, az első a víz ráeresztését követő 1 órában, a második pedig 24 óra elteltével. A harmadik mérést több mint 72 órával a víz ráeresztését követően olvastam le, mert egy hétvégét hagytam a víz hatásainak kitéve. A második és harmadik mérés között számottevő különbség nincs, így a korábban tett feltételezésem, miszerint a terhelés megkezdése után 24 órával már állandósulnak az adatok.

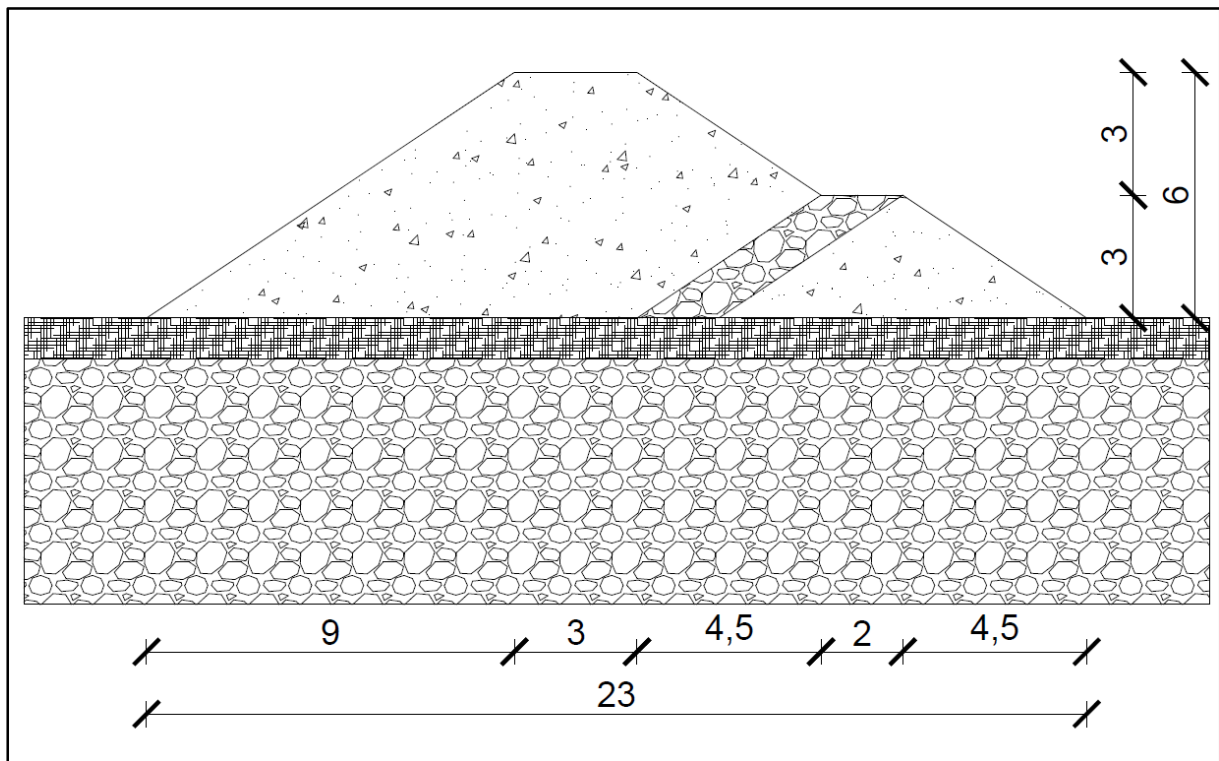


10. Ábra: Homokos kavics töltés megtámasztás nélkül, szivárgási görbe

Arra a konklúzióra jutottam, hogy a megtámasztás mindenképpen pozitív hatással van mind az állékonyságra, mind a vízszintmagasságokra egyaránt, így a következő modellnél már ismét a régi, megtámasztással erősített keresztmetszetet építem meg.

5.4. Homokos kavics töltés megtámasztással, közbenső kavicsréteggel

A negyedik és egyben utolsó modellnél visszatértem az eredeti, megtámasztással megerősített keresztmetszetre, melyet az első és második modellnél is alkalmaztam. Ugyanúgy a második és harmadik modellnél használt homokos kavicsot építettem be, ám eszközöltem egy meglepő változtatást. A közbenső koronától indítva, egy az árvízi oldal rézsűjével párhuzamos kavicsréteget építettem be (11. Ábra, 10. Kép). A kavicsréteget geotextília réteggel vontam körbe, annak elkerülése érdekében, hogy a homokszemcséket a víz bemossa a kavics közé. Ettől a meglepő kialakítástól azt vártam, hogy a megtámasztás megcsúszását stabilizálja, esetlegesen teljesen ki is küszöbölje a megcsúszást. Ezen a ponton szükségesnek érzem megemlíteni, hogy ezt a modellt kizárólag azért építettem meg, mivel előzőleg elkészült hozzá a numerikus modell és az mind állékonysági szempontból, mind a szivárgási görbe szempontjából pozitívan viselkedett.



11.Ábra: Töltés megtámasztással, közbenső kavicsréteggel, valós méretek

Az árvízi oldalon a már szokásosnak nevezhető, kis talajszemcsék kimosódása látható, melyet továbbra sem tekintek számottevőnek. A töltés belsejében egy ponton történt nagyobb elváltozás, mely a 11. Képen jól látszik. Ez annak lehet a következménye, hogy ezen a ponton halad a szivárgási görbe, és tömörítési problémák miatt egy kimosódott üreg keletkezett. A mentett oldali rézsű stabilizálására tett kísérletem azonban a visszájára fordult, ugyanis a kavicsrétegben a vízáteresztő képesség sokkal nagyobb, mint a másik beépített anyagban. Emiatt a megnövekedett sebességtől a mentett oldali megtámasztáson még nagyobb

megcsúszás figyelhető meg. Érdekeség viszont, hogy a kavicsrétegben jól látható a szivárgási vízszint, melyet a 12. Képen kinagyítva is megtekinthető.



10. Kép: Töltés megtámasztással, közbenső kavicsréteggel

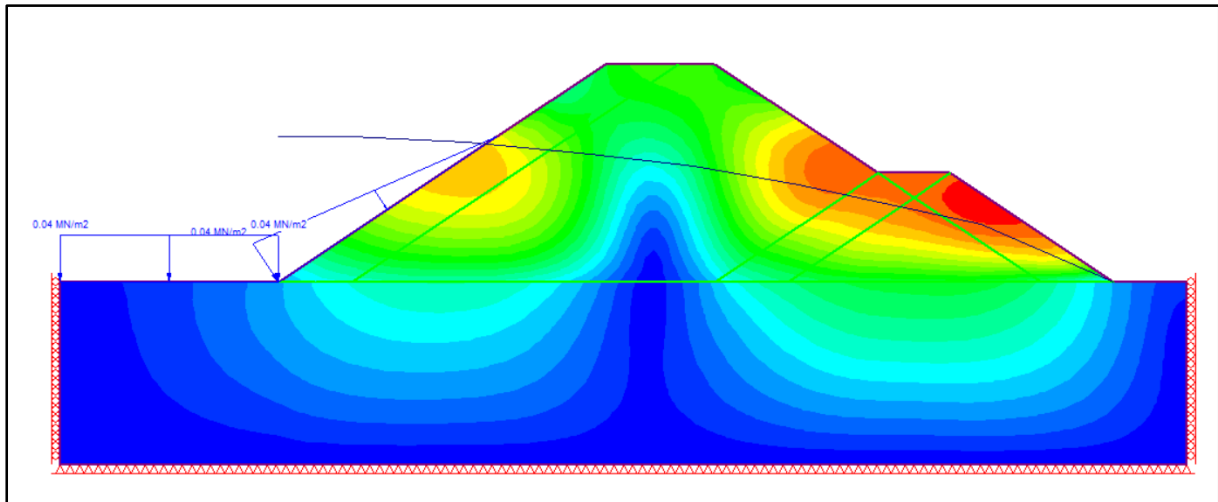


Ismét elvégeztem a vízszintmagasságra és vízhozamra vonatkozó méréseket, mely a következő táblázatban láthatóak.

Szivárgási szint és vízhozam				
Szivárgási szintek			Vízhozam	
#	1. mérés [mm]	2. mérés [mm]	1. mérés [ml]	2. mérés [ml]
1	725	736	400	410
2	725	736	400	410
3	710	726	400	410
4	666	703	▼	▼
5	625	680	Átlag 400	Átlag 410
6	598	644		
7	487	569		
10	443	449		

6. Táblázat: Töltés megtámasztással, közbenső kavicsréteggel, mérési adatok

Az előző mérésekből kiindulva ennél a modellnél két mérést végeztem, egyet a víz ráeresztése után 1 órával, egyet pedig 24 óra elteltével.



12. Ábra: Homokos kavics töltés megtámasztással, belső kavicsréteggel, szivárgási görbe

A negyedik modell megépítése után arra a konklúzióra jutottam, hogy egy kavicsréteg ilyen módon történő beépítése nagyobb kárt okoz, mint amekkora hasznot esetleg jelenthetne, ezért ezt az ötletet elvettem.

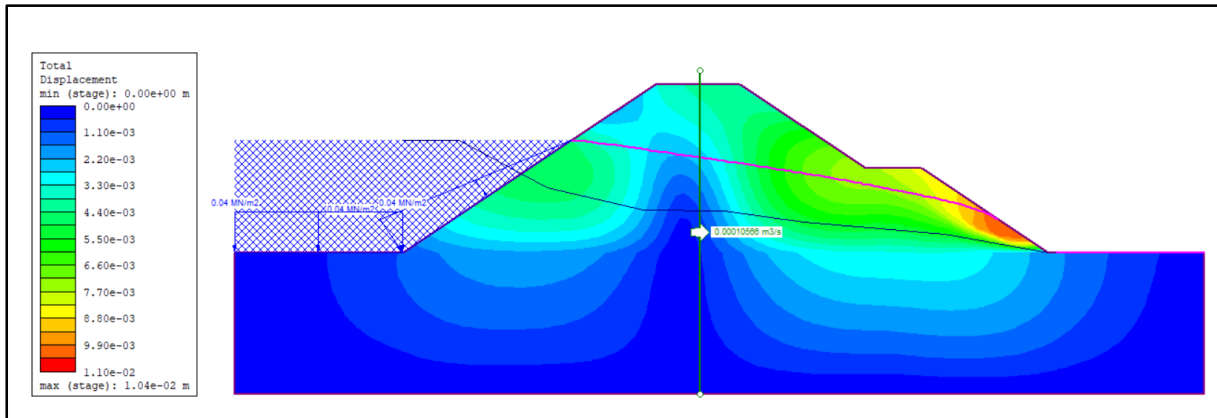
6. Numerikus vizsgálatok

Ezeket a modelleket megszerkesztettem valós méretben. Minden esetben megtartottam a 4 méteres vízszintet, hogy konzisztensen össze tudjam hasonlítani a töltések elváltozásait a vízteherre, illetve a víznyomásra. Az Interpret eredményablakokból készült mintán lila színnel vastagon látható a szoftver által számolt szivárgási görbe, míg a fekete vékony vonal a laboratóriumi mérésekből rajzolt görbe. Jelen esetben kizárólag a szoftver által számolt görbével foglalkozom, a két görbe összehasonlítására majd a 7. pont alatt fogok részletesen kitérni. Ezeken kívül a program segítségével meghatároztam a vízhozamot, illetve futtattam egy-egy szimulációt biztonsági tényezőre is.

6.1. Homokos iszap töltéshez készült numerikus modell

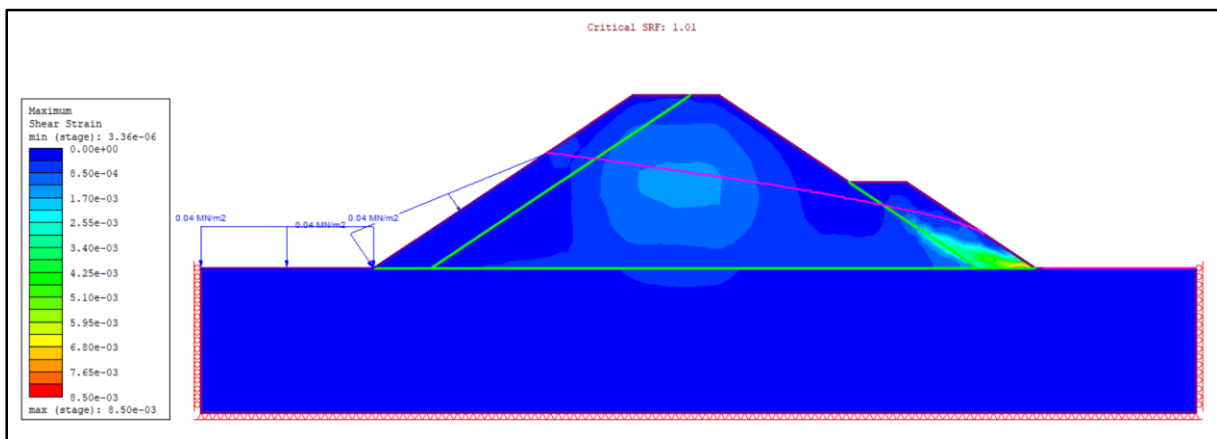
Ennél a numerikus modellnél az első kismintánál leírt méreteket és anyagtulajdonságokat használtam fel. Mint már korábban említettem, mind a valós, mind a kicsinyített méretekkel megépítettem a modellt. Beállítottam az első mintánál használt iszapos homok tulajdonságait (Tamás E. hivatkozás), illetve egyidejűleg ráhelyeztem a 4 méteres vízoszlop vízterhét, illetve

a vizet, mint peremfeltételt. Ezt követően a programmal lefuttattam a szimulációt, ami a következő eredményt adta.



13. Ábra: Homokos iszap töltés elmozdulásai, szivárgási görbéje és vízhozama

Az eredményábra azt mutatja, hogy alapvetően egy kismértékű, önsúlyból adódó tömörödés figyelhető meg. Az árvízi oldalon egy kisebb, 5 milliméteres elcsúszás látható, míg a mentett oldalon, a megtámasztáson látható a legnagyobb, 1 centiméteres megcsúszás figyelhető meg. A szivárgási görbe is jól látható, feltételezhetően a megtámasztáson látható megcsúszás annak köszönhető, hogy a szivárgási görbe nem éri el a 0 szintet, vagyis a töltés lábát, hanem a mentett oldali rézsűbe fut bele.



14. Ábra: Homokos iszap töltés biztonsági tényezős szimulációja

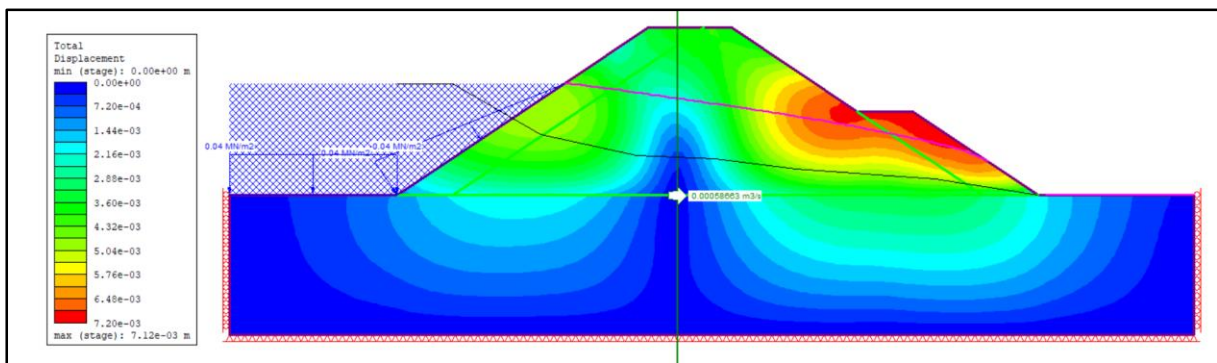
A biztonsági tényező ennél a modellenél 1,01 lett. A tönkremenetel helye a megtámasztás alsó szakasza, ahol a legnagyobb nyíróerő alakult ki, ahogy az 14. ábrán látható.

A numerikus modellek azt mutatták, hogy a töltés állékonynak bizonyult. A kisebb elmozdulások a tömörödés hatásának tudhatók be, illetve olyan mértékűek, hogy különösebb hatásuk nincs a töltés stabilitására. A továbbiakban egy másik anyagot is megvizsgálók, annak

reményében, hogy még nagyobb állékonyságot, vagyis kisebb elmozdulásokat kapok majd eredményül.

6.2. Homokos kavics töltéshez készült numerikus modell megtámasztással

A második modellnél, ahogy már említettem, egy új anyagot, homokos kavicsot használtam a töltés megépítéséhez, mivel a nagyobb szemcsék esetlegesen stabilizálhatják a modellt, így kisebb elmozdulások léphetnek fel. Bár a numerikus modell jó eredményeket mutatott, a laboratóriumi minta rosszul viselkedett a terhelés alatt, ezért volt szükség egy másik anyag használatára.



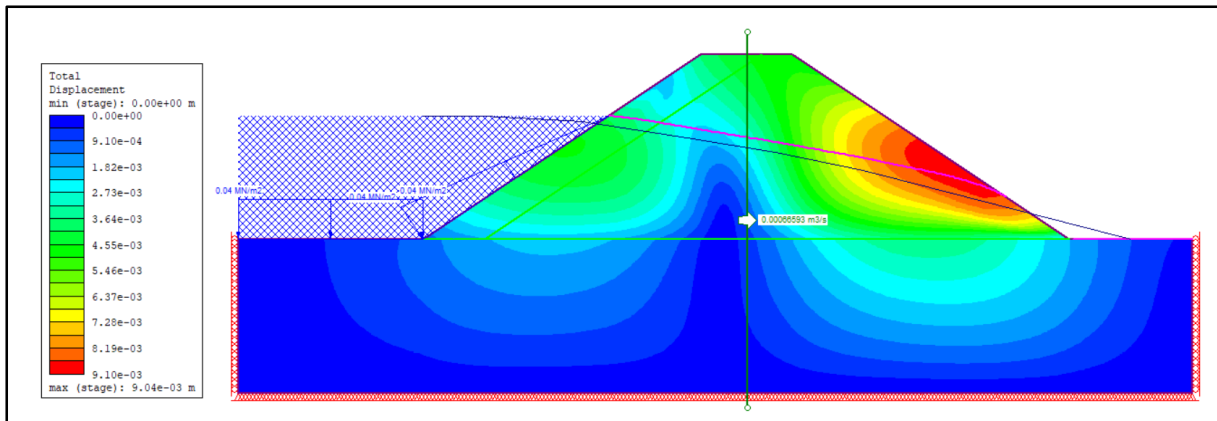
15. Ábra: Homokos kavics töltés megtámasztással, elmozdulások, szivárgási görbe és vízhozam

Ez a modell esetében már kedvezőbbek voltak a deformitások. Az árvízi oldalon a legnagyobb elmozdulás 5 milliméter volt, illetve a megtámasztásnál, ahol a legnagyobb elváltozás következett be, ott is csak alig haladta meg a 7 millimétert. Ezenkívül a szivárgási görbe is alacsonyabb szinten éri el a töltés mentett oldali részsűjét, mint az előző modell esetében.

Az adatok mindenféleképpen bizakodásra adnak okot, ezért a továbbiakban ezt az anyagot fogom használni a vizsgálatokhoz.

6.3. A harmadik kismintához készült numerikus modell

A harmadik modell a megtámasztás nélküli megépített modell volt, aminél a már második modellnél is használt homokos kavics anyagtulajdonságokkal dolgoztam. Az árvíz szintje továbbra is 4 méteres maradt, a konzisztens eredmények megőrzése érdekében.



16. Ábra: Homokos kavics töltés megtámasztás nélkül, elmozdulások, szivárgási görbe és vízhozam

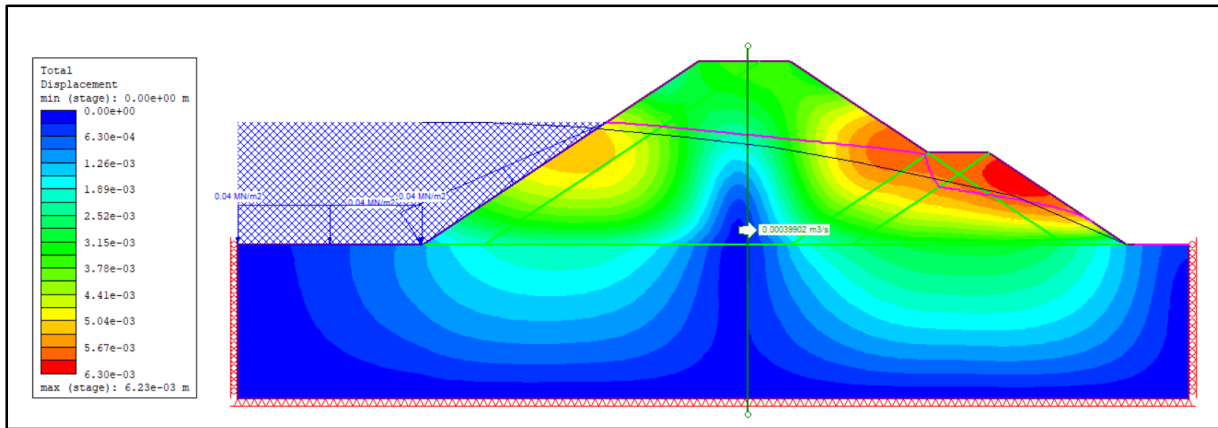
A numerikus modell eredményablakából kiderül, hogy ezt az anyagot használva a megtámasztás nélküli keresztmetszeten nagyobbak az elmozdulások, mint a megtámasztással erősített változaton. Ez nem meglepő, azonban az anyag jobb minőségét alátámasztja, hogy az elmozdulások megtámasztás nélkül is kisebbek, mint az előző anyagot, a homokos iszapot használva, megtámasztással együtt. Az árvízi oldalon történt legnagyobb elmozdulás mindössze 0,5 centiméter, illetve a legnagyobb deformálódás is 9 milliméterértéket vesz fel a mentett oldali részű alsó szakaszán.

A biztonsági tényező jelen esetben 1,19. Az eddigi eredményeket látva nem meglepő, hogy a homokos iszap töltés biztonsági tényezőjénél nagyobb, azonban az azonos anyagú homokos kavics töltésénél, melyet megtámasztás erősít, annál viszont kisebb.

Az elmozdulások mértékére a numerikus modelleket vizsgálva egyértelműen kimondható, hogy a megtámasztás nélküli esetben nagyobb. Elmondható, hogy a tapasztalatok alapján régóta használt megerősítési mód állékonyságnövelő hatását a numerikus modell is igazolta.

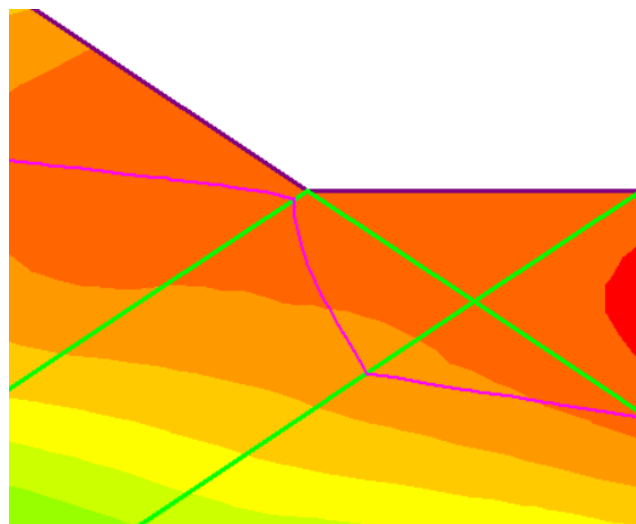
6.4. A negyedik kismintához készült numerikus modell

Talán a negyedik numerikus modell a legérdekesebb, mivel itt egy rendhagyó változtatást eszközöltem a modellen. Ahogy a negyedik kismintánál már leírtam, egy az árvíz oldali részével párhuzamos kavicsréteget iktattam be a megtámasztás koronájától kiindulva. Ettől a kavicsrétegtől megnövekedett stabilitást vártam.



17. Ábra: Homokos kavics töltés megtámasztással, közbenső kavicsréteggel, elmozdulások, szivárgási görbe és vízhozam

A várakozásnak megfelelően ez a modell bizonyult a legállékonyabbnak. Ennél a modellnél is megjelentek a tömörödés jelei, ezenfelül az árvízi oldalon 3 milliméteres, a mentett oldalon a megtámasztáson pedig mindössze 6 milliméteres elcsúszás történt, szintén a szivárgási görbe és a rézsú találkozásánál. Ez viszont elhanyagolható. Érdekes változás az eddigiekhez képest a szivárgási görbében figyelhető meg. A kavicsrétegnél törés jelenik meg a görbében. Erre a jelenségre számítani lehetett, mivel a kavics vízáteresztő képessége sokkal nagyobb, mint a homokos kavicsé, mivel a kavicszemcsék közti teret nem tölti ki a homok, így a víz gyorsabban át tud haladni ezen a rétegen. Ezt a 18. ábrán kinagyítva is bemutatom.



18. Ábra: A kavicsrétegben gyorsabban áramló víz

A numerikus modellek közül ez a modell bizonyult a legállékonyabbnak, mivel ennél jelentkeztek a legkisebb elmozdulások, illetve a kavicsréteg kellőképp leszorítja a szivárgási görbét, így az is kedvezően alakul.

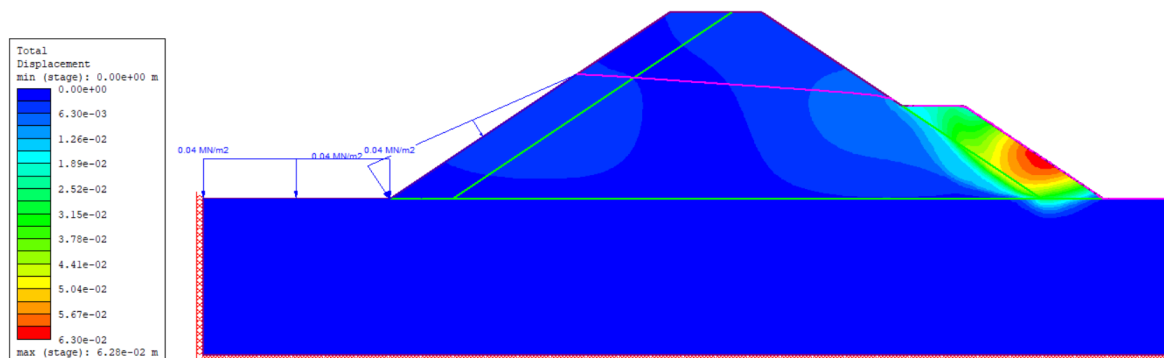
A biztonsági tényező is az előző állítást igazolja, mivel a ennél a töltéskeresztszmetnél ez az érték 1,47, ami jelentősen nagyobb, mint az előző töltésgeometriák esetében.

6.5. Kismintaként meg nem épített numerikus modellek

A következőkben olyan numerikus modellekről lesz szó, melyeket vagy idő hiányában, vagy már a numerikus modellben mutatott, állékonysági szempontból kedvezőtlen viselkedése miatt nem építettem meg. Ezeknél a modelleknél az első alkalommal használt homokos iszapot, illetve agyagot használtam, azonban csak a valós méretű verziók készültek el, mivel megépített kisminta nélkül nem képzett volna összehasonlítási alapot.

6.5.1 Megtámasztás agyagrétegből kialakítva

Ennél a modellnél a megtámasztást egy vízszintes értelemben 2 méter vastag agyagrétegből alakítottam ki, mivel ezen a ponton szokott a legnagyobb elmozdulás történni, így abban bíztam, hogy egy nagyobb kohézióval rendelkező anyag kisebb elmozdulásokat, így stabilabb szerkezetet fog eredményezni.



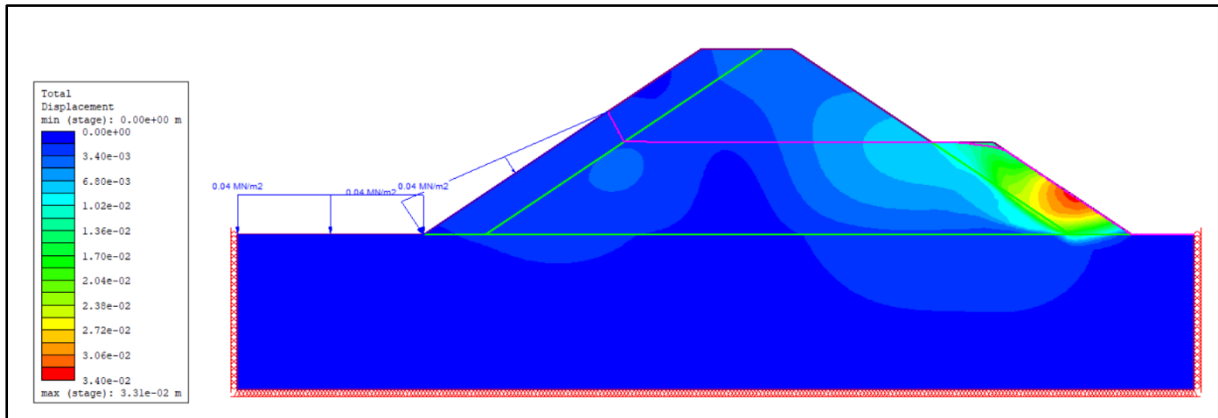
19. Ábra: Elmozdulások mértéke és szivárgási görbe

Ahogy a képen is látszik, az iszapos homok töltésben mindössze 1 centiméter, azonban a várakozással ellentétben ismét a megtámasztás szenvedte a legnagyobb alakváltozást, a töltés többi pontjához képest drasztikusan nagy, 6 centiméteres elmozdulást. Ezenfelül a szivárgásgörbe is érdekes viselkedést mutat. A program számításai szerint a víz az agyagmegtámasztás felett hagyná el a töltést és annak felületén csorogna le.

A programban látott adatok alapján ezt az ötletet elvettem és egy másik megoldáson kezdtem gondolkodni.

6.5.2 Az árvíz oldali rézsú és a megtámasztás agyagrétegből kialakítva

Az előző kísérlet hiányosságainak kiküszöbölése érdekében ennél a modellnél a megtámasztáson kívül az árvíz oldali rézsút is agyagrétegből alakítottam ki, arra gondolva, hogy mivel az agyag közel vízzáró, így a szivárgási görbét lejjebb szorítva, a megtámasztás agyagrétege alatt fog elszivárogni a víz, amely optimális lenne.



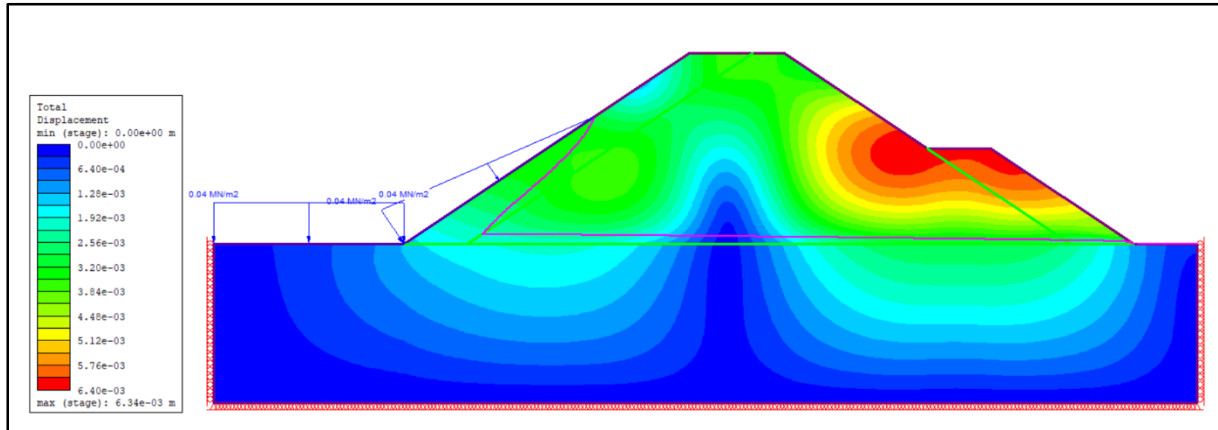
20. Ábra: Elmozdulások mértéke és szivárgási görbe

Az elmozdulásokat tekintve hasonlóan viselkedett, mint az előző minta. A töltésen belül, illetve az árvíz oldali rézsútban az elmozdulás maximum 1 centiméter, míg a megtámasztásban csak 3 centiméter elmozdulás figyelhető meg, mely az előző modellnél tapasztalható elmozdulás fele. Ezek az információk, illetve a szivárgási görbe eleje bizakodásra adhatna okot, a szivárgási görbe meredeken lefelé tart az árvíz oldali agyagrétegben. Ennek ellenére a víz ismét a megtámasztás felett érne el a mentett oldalt, és a megtámasztáson csorogna el a víz.

Az előző modellnél leírt okok miatt ezt a megoldást is elvettem, azonban még eszembe jutott egy megoldás.

6.5.3 Az árvíz oldali részű agyagrétegből kialakítva

Az előző két modellt nézve már csak egy variáció volt lehetséges, ha valamelyik részüben el szeretnék helyezni egy agyagréteget. Ez nem volt más, mint csak az árvíz oldali részűt kialakítani agyagrétegből. El is készítettem a modellt hozzá, mely a következően nézett ki.



21. Ábra: Elmozdulások mértéke és szivárgásgörbe

Az előző mintáknál megszokott felépítéstől eltérően itt a szivárgási görbével kezdenék. Az elvárásoknak megfelelően ismét meredeken lefelé tart a görbe, azonban, ha az előző modelleket nézzük, illetve az előzetes tapasztalatokra hagyatkozunk, ez egy kicsit túlzóan néz ki. Az elmozdulásokat tekintve azonban jobbnak bizonyul, mint az előző modellek. A töltés belsejében mindössze 3 milliméteres elmozdulások láthatóak, melyek minden bizonnyal a tömörödés jelei, illetve a megtámasztásnál is a legnagyobb elmozdulás 6 milliméter, ami egy rendkívül biztató érték.

Sajnos idő hiányában ezt a megoldást már nem tudtam megépíteni laboratóriumi körülmények között, pedig ez egy létező és szakirodalom által nagyon is ajánlott elrendezés

7. Eredmények összehasonlítása, értékelése

A továbbiakban négy szempont alapján hasonlítom össze a numerikus modellezést, illetve a laboratóriumi kísérleteket. Ez a négy szempont az állékonyság, a szivárgási görbe, a vízhozam, valamint a szoftver által számolt biztonsági tényezők.

Állékonysági szempontból komoly eltérések voltak a két eljárás között. Már az első modellen is feltűnt a különbség, ugyanis a szoftverben teljesen állékonynak bizonyult a töltés, kisebb

elmozdulásokkal, azonban a laboratóriumban megépített modell olyan deformitásokat szenvedett, hogy valós méretben nem lehet megépíteni.

A második modell esetében már jobb volt a helyzet, mivel mindkét esetben állékonynak bizonyult a geometria, ettől függetlenül még mindig nagyobbak voltak az elmozdulások a laboratóriumban, mint amekkorák a numerikus modellen jelentkeztek.

Ugyanez mondható el a harmadik modell esetében is, mindkét modell az elvártaknak megfelelően viselkedett, azonban a laboratóriumban itt is nagyobbak voltak az elmozdulások.

A negyedik modell esetében volt a legnagyobb különbség, ugyanis a szoftver ennél a keresztmetszetenél számolt a legkisebb elmozdulásokat, tehát ezt a megoldást ítélte a legállékonyabbnak, azonban a laboratóriumban jelentős elváltozások voltak megfigyelhetőek.

Javaslatom szerint a modellt lehetne olyan irányban fejleszteni, hogy nem az úgynevezett Mohr-Coulomb féle anyagmodellt venné alapul, hanem számolna az esetleges tömörítési hiányosságokkal is, mert feltehetőleg ez lehet az oka a feltűnő eltéréseknek.

A szivárgási görbék esetében nem volt jelentős az eltérés. Ebben az esetben egy korábbi kutatás alapján a numerikus modellezés eredményét veszem mérvadónak (Tamás E., 2019). A harmadik és negyedik modellel kezdenék, mivel ennél a két keresztmetszetenél a két vizsgálat által kiadott görbe kis eltéréssel illeszkedik egymásra. Az első és második modell esetében a 3.-4. piezométer-csőnél, tehát az árvízi oldalon található egy meredek szakasz, amely logikusan gondolkodva nem tehet eleget a valóságnak. Ennek oka mérési hiba lehet, esetlegesen a piezométer-csövek vezetékében maradt levegő okozhat ilyesfajta eltéréseket.

Említést tennék még a negyedik modell kavicsrétegnél található görbék közti ellentmondásra. A numerikus modell sokkal több ponton határozza meg a töltésen belüli víz magasságát, így ez is megerősíti, hogy ez tekinthető mérvadónak. A laboratóriumi vizsgálat során a kavicsréteg előtt, illetve után volt egy-egy piezométer-cső, így pontatlan értéket ad a kavicsrétegen belüli vízszintviszonyokról.

A hozamok összehasonlításához készítettem egy táblázatot (7. Táblázat), mely az alábbiakban látható.

	Kismintában mért hozamok (ml/perc)	Modelltörvénnyel átszámolt hozamok (l/s)	Numerikus modellben kapott hozamok (l/s)	Arány %
Homokos iszap töltés megtámasztással	230	0,784	0,106	13,5%
Homokos kavics töltés megtámasztással	210	0,716	0,587	82,0%
Homokos kavics töltés megtámasztás nélkül	390	1,329	0,666	50,1%
Homokos kavics töltés megtámasztással, közbelső kavicsréteggel	450	1,534	0,399	26,0%

7. Táblázat: Vízhozamok összehasonlítása

A kismintákban minden esetben több volt a hozam, mint amit a numerikus modellező szoftver számolt. Az első és negyedik modell esetében ez jelentős eltérést adott, mivel itt a laboratóriumi érték a numerikus módszerrel számolt érték körülbelül négy-, illetve hatszorosa. A harmadik modell esetében már jobb a helyzet, itt csak kétszerese a numerikusan számolt értéknek. A legjobb közelítést a második modell esetében sikerült elérni, ugyanis jelen töltésnél a numerikus érték több mint 80%-a a modelltörvénnyel átszámolt értéknek. A vízhozam-eltérésekről már Tamás (2019) is említést tesz. Ennek is feltehetőleg az lehet az oka, hogy a szoftver nem számol az esetleges tömörítési hibákkal, illetve a valóságban nem teljesen homogén anyagok kerülnek beépítésre.

A biztonsági tényezőknél az a tendencia figyelhető meg, ami az állékonyságnál. Az első modell melyhez mindent viszonyítunk, a biztonsági tényező majdnem kerek 1 lett. A második modell esetében az érték nőtt, míg a harmadik modell biztonsági tényezője, ahogy azt vártam is tőle, az előző két modell által számolt érték közé esik. A legnagyobb biztonsági tényezőt a negyedik modell produkálta, majdnem 1,5-ös értéket számolt a szoftver. Ellentmondás, hogy a laboratóriumi kísérletekből nem ilyen értékekre következtetnénk.

A kísérletek folytatása esetében mindenképpen megépíteném 6.5.3 pontban említett keresztmetszetet, illetve az első két modellt újra megépíteném laboratóriumi körülmények között, hogy a szivárgási görbékben fellelhető hibákat kijavítsam.

Szinte az összes modell esetében az árvízi oldalon található kis anyagveszteség, véleményem szerint orvosolható lenne, ha a rézsűre valamilyen talajmenti növényzetet telepítenének, mely a gyökérzetével megtartja a talajt.

8. Összegzés

A dolgozatom készítése során készítettem 4 laboratóriumi kismintát, valamint mindegyikhez egy-egy numerikus modellt. A numerikus modellek esetében készítettem egy olyan változatot is, ami csak biztonsági tényezőt számol. Ezeken felül készítettem 3 geometriai megoldást, amiket különböző okok miatt nem építettem meg laboratóriumi körülmények között.

A numerikus modellekből azt az eredményt kaptam, hogy a megtámasztás jótékony hatással van az állékonyságra és vízhozamra, illetve, hogy a homokos kavics jobb minőségű anyagnak minősül. A numerikus modelltől még azt a következtetést is le lehet vonni, hogy a közbenső kavicsréteg egy lehetséges megoldás lenne a stabilitás növelésére. A laboratóriumi vizsgálatok is megerősítik a homokos kavics minőségbeli többletét, valamint a megtámasztás jótékony hatását, azonban a közbenső kavicsréteg ezek a vizsgálatok alapján nem minősül egy jó megoldásnak. A későbbi kutatások érdekében javasolnám a modell továbbfejlesztését a már említett módon.

9. Irodalomjegyzék

Csoma R. (2020) *Vízépítési és Vízgazdálkodási jegyzet*

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

Domenico, P.A. and F.W. Schwartz, 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, 824 p.

Lindeburg M. R. (2018), *Civil Engineering Reference Manual for the PE Exam*, 16th ed. Professional Publications, Belmont, California

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

Ortiz, J.M.R, J Serra, and C. Oteo. 1986. *Curso Aplicado de Cimentaciones*. Third ed. Colegio de Arquitectos de Madrid. Madrid.

Szlávik L. (2013): Szembenézünk az árvizekkel, A 2013. évi árvizek, és belvizek krónikája. Alföldi Nyomda Zrt., Budapest, p 322

Tamás E. (2019) Árvízvédelmi gátak komplex vizsgálata. TDK dolgozat, Budapesti műszaki és gazdaságtudományi Egyetem építőmérnöki Kar

Vágás I. (1982): Tiszai árvizek. Somogy megyei Nyomdaipari Vállalat, Kaposvár, p 286