



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar

Tudományos Diákköri Konferencia (2017)

Módszer a földszerkezetű völgyzárógátak alatti árvízi veszély elemzésére

Készítette:

Kopitkó Tünde

Konzulensek:

Krámer Tamás, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Takács Attila, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Módszertan.....	4
3. Terület bemutatása.....	6
4. Eredmények.....	9
4.1. Lefolyás.....	9
4.2. Tározó telítődése.....	15
4.3. Tározó átszakadása.....	20
4.4. Geotechnikai tönkremenetel.....	25
4.4.1. Lehetséges tönkremeneteli módok	25
4.4.2. Szükséges adatok.....	29
4.5. A szakadás valószínűsége.....	31
4.6. Terepi lefolyás.....	34
5. Összefoglalás.....	37
6. Köszönetnyilvánítás.....	38
7. Ábra- és táblázatjegyzék.....	39
8. Irodalomjegyzék.....	41

1. Bevezetés

Hazánkban több hegy- és dombvidéki kisvízfolyáson építettek völgyzárógátas tározókat, és továbbiakra (pl. szivattyús energiatározókra) is készültek tervek. A tározókhöz fűződő árvízi kockázatra a kolontári vörösiszap-tározó 2010-es katasztrófája hívta fel a figyelmet. Míg külföldön komoly szakirodalom és eszköztár áll rendelkezésre a völgyzárógátak kockázatának értékelésére, hazánkban nem alkottak erre speciális jogszabályokat és egységes gyakorlat sem alakult ki.

Az árvízi kockázat feltérképezéséhez meg kell becsülni a két tényezőjét: a tönkremenetel bekövetkezésének valószínűségét és a következményeit (a várható károkat). Egy adott valószínűséghez tartozó következményeket igen nehéz számszerűen meghatározni. Kevés a történelmi adatunk a gátszakadásokról ahhoz, hogy ezekből statisztikai módszerekkel vezessük le a következmények várható értékeit. Ha pedig fizikai modellezéssel kívánjuk leírni a gátszakadáshoz vezető feltételeket és az árvíz hatásait, az meg azért bonyolult, mert ezek a folyamatok maguk is sok valószínűségi változótól függenek, amelyeket nehéz mérni.

Munkám során Magyarország legmagasabb hegyvidéki víztározója, a Hasznosi-tározó duzzasztógátja tönkremenetelének valószínűségét vizsgáltam. Céлом egy olyan gyors és egyszerű módszer kifejlesztése volt, mellyel az ország összes tározójára meghatározható egy előzetes átszakadási valószínűség. Így nem kell költséges és sokáig tartó, részletes felmérést végezni minden tározóra, csak azokra, amelyeknek az előzetes értéke ezt megindokolja.

2. Módszertan

A tározók és gátak tönkremenetele komoly kockázatot jelent az alvízi völgyben tartózkodók életére és az ottani épületekre, létesítményekre. A kockázat értékelése általában három részből áll. Az első a kockázat azonosítása, ami a szakadáshoz vezető tönkremeneteli módok és a potenciális következmények meghatározását jelenti. A következő a kockázatelemzés, ahol a tönkremenetel valószínűségének számítására, a következmények (hatások) és a kockázat számítására kerül sor. Az utolsó rész a kockázatértékelés, melynek során a kockázatot összevetik a társadalom tűréshatárával, illetve besorolást végeznek. (Völgyzárógátak tönkremenetele)

A brit Környezeti Hivatal és az amerikai Katasztrófavédelmi Hivatal három részletességi szintet definiál ezen célok és a rendelkezésre álló adatok függvényében: kvalitatív elemzés, egyszerű számszerű (kvantitatív) elemzés és részletes számszerű elemzés. (Völgyzárógátak tönkremenetele) Kutatásom során a részletes számszerű elemzés volt a cél. Az elemzés a lehulló csapadékból indul ki, majd egy árvízi veszélytérképeknél lyukad ki. Ehhez szükség van hidrológiai, geotechnikai és hidrodinamikai elemzésre, mégpedig ebben a sorrendben.

A részletes számszerű elemzés több forgatókönyvet és tönkremeneteli módot vizsgál. Végül a rendelkezésre álló rövid idő és egyes adatok hiányában kénytelen voltam egyszerűsítéseket végezni, így különböző bonyolultságú módszereket kombináltam. Egyes részeket azért hanyagoltam el, mert az ebből adódó hiba kisebb, mint a bizonytalanság, amivel a számolásokat végeztem. Dolgozatom írása során nagyobb hangsúlyt fektettem arra, hogy minél szélesebb körben, minél több hatást vizsgáljak, és másodlagos volt, hogy az egyes részeket teljes mélységben vizsgáljam.

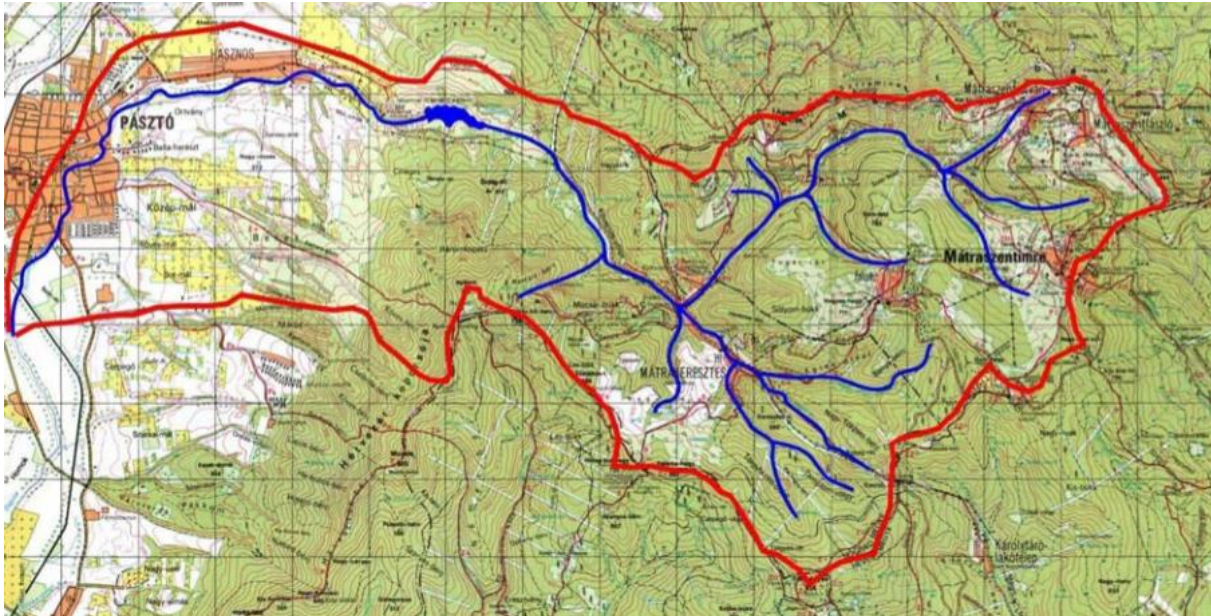
Először a vízgyűjtő terület csapadék- és lefolyásviszonyaival foglalkoztam. Meghatároztam a teljes vízgyűjtő és a részvízgyűjtők összegyülekezési időit. Számoltam különböző visszatérési idejű csapadékok intenzitását, majd a vízgyűjtőkarakterisztika és a racionális módszer segítségével ezen különböző visszatérési idejű csapadékokra határoztam meg árhullámképet és maximális vízhozamot. Ezek alapján nyolc forgatókönyvvel dolgoztam a továbbiakban.

Meghatároztam a tározó jelleggörbáját, majd vizsgáltam azt, hogy hogyan alakul a tározó vízszintje a különböző csapadékok esetén aszerint, hogy mennyi a beérkező és a kifolyó víz mennyisége a nyolc forgatókönyvben. Az átszakadás több időpillanatban is bekövetkezhet. Munkám során úgy tekintettem, hogy a gátszakadás a tározóban lévő víz maximális mennyiségének elérése előtt, egy rögzített pillanatban következik be. Így nem kellett a nyolc forgatókönyvet több alváltozatra kibővítenem. Ezek után a szakadási szelvényt számoltam a különböző esetekre, több karakterisztikus eróziós sebesség figyelembe vételével.

Az áramló víz okozta stabilitásvesztés mellett foglalkozhatunk a víznyomásból származó teher okozta geotechnikai stabilitásvesztéssel is. Ez azt jelenti, hogy mekkora a valószínűsége, hogy adott vízállás mellett tényleg átszakad a gát. A gátszakadás végleges valószínűsége tehát e két valószínűség szorzata (lesz ekkora vízmennyiség a tározóban és átszakad a gát). Geotechnikai adatok és az ismereteim hiányában ezen a területen nem tudtam számszerű eredményeket számítani. Ehelyett a lehetséges tönkremeneteli módokat, illetve azon adatokat soroltam fel, amelyekre szükség lenne a számoláshoz, és a valószínűségeket csak a meghágás okozta tönkremenetekhez rendeltem.

Legvégül a HEC-RAS program segítségével számítógépen modelleztem, hogy az alvízi völgyben mely területeket mekkora valószínűséggel önti el a víz.

3. Terület bemutatása



1. ábra. A Kövices-patak vízgyűjtő területe. Forrás: Kovács - Varga, 2012

A Hasznosi-tározó a Mátra észak-nyugati lejtőjén, a Zagyva bal parti vízgyűjtőjébe tartozó Kövices-patak völgyében létesült, annak 8+200 km szelvényében, Hasznos község felett 1,5 kilométerrel. A tározó vízgyűjtője 36,0 km² területű, hegyvidéki jellegű, magassága a tengerszint felett 255 m és 944 m között, szélessége 3-5 km között változik. (Szitka - Bagyinszki - Szalay, 2007) A vízgyűjtő völgyoldal- és völgyfenék esései egyaránt igen nagyok, hegyvidékeinken kevés nagyobb esésű terület van. A völgy esése 44%, az egyik legnagyobb, ha nem a legnagyobb értékű az országban. A terület relief energiája is ugyancsak a legnagyobbak egyike az országban. Ezek a tényezők a lefolyási viszonyok jellegét döntően meghatározzák. Szélsőséges meteorológiai paraméterekkel társítva a vízgyűjtő igen heves vízjárásúnak minősíthető. (Koris, 2010) A vízgyűjtő átlagos lefolyási tényezője Sitka - Bagyinszki – Szalay (2007) szerint 18,5%-ra adódik. A lefolyási tényező értéke nagyon bizonytalan, függ a felszín fedettségétől. Számításaim során 15%-os értékkel dolgoztam.

A vízgyűjtőt főként a vulkáni tevékenységekhez kapcsolódó kőzetek építik fel. A vulkáni hegységre jellemzően az erózióképesség nagy. (Szitka - Bagyinszki - Szalay, 2007) Az altalaj völgyfenéki andezit és agyag. Földrengések tekintetében a terület EMS-skála szerint a VI-os osztályba tartozik. (475 évente egyszer 0,87 m/s² földrengésből származó vízszintes gyorsulás lép fel.) A tározó az építéskori szabványoknak megfelelően volt méretezve földrengés hatására. (Rosza, 2006)

A terület csapadékeloszlása szélsőséges, míg az alacsonyabban fekvő területek meglehetősen szárazak, addig a tetők a nyugat felől érkező frontok alkalmával – különösen nyáron – jelentős csapadékot kaphatnak. A tározó vízgyűjtőjének területi átlagcsapadéka 682 mm/év, azonban a magasabban fekvő területek hosszú idejű átlagcsapadéka meghaladja a 770 mm-t. (Szitka - Bagyinszki - Szalay, 2007)

A tározó 1985-ben létesült, elsődleges hasznosítási célja ivóvízellátás. A tározó vízkészlete a térségben elengedhetetlenül fontos, pótlása rövid időre is igen nagy nehézségeket jelent. A Közép-Nógrád Mátravidéki Regionális Vízellátó Rendszer egyik kulcsfontosságú létesítménye, amely 37 település, mintegy 80 ezer lakos vízellátását szolgálja részben vagy teljes egészében, köztük olyan jelentős városokét is, mint Bányaterenyé, Pásztó és Salgótarján. (Szitka - Bagyinszki - Szalay, 2007) A tározó másodlagos hasznosítási módja horgászat. (Rosza, 2006) A tározó üzemeltetője az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt. (ÉRV Zrt.) Észak-nógrádi Szolgáltatási Divíziója. (Kovács - Varga, 2012)

A víztározó főbb jellemzői a következők: a tározótérfogat 2,1 millió m³, ebből az üzemi térfogat 1,91 millió m³ és 190 000 m³ az árvízi térfogat, a vízfelület pedig 23 ha. A maximális üzemi vízmélység 25 m, az átlagos vízmélység 17 m a tározótér legmélyebb pontja fölött. A vízmérete 0-szintje 265,63 mBf magasságban van, a minimális üzemvízszint 266,83 mBf, a normál üzemvízszint 280,13 mBf, míg a maximális üzemvízszint 282,13 mBf. (Rosza, 2006; Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János, 2011)

A duzzasztógát vegyes összetételű földgát, melyet 6 egymáshoz kapcsolódó külön funkciót ellátó elem alkot:

- szárazoldali támasztótest (agyag)
- középső vízzáró test (agyagmag)
- a kettő közötti függőleges szivárgó (homokos kavics)
- vízoldali támasztótest (kő)
- a gát alatti görgeteges kőréteget lezáró vízzáró test (agyag)
- valamint különböző magasságokban épített vízszintes szivárgó rendszer (homokos kavics).

A vízoldali részü beton idomlappal burkolt. (Rosza, 2006; Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János, 2011)

A gáttest maximális magassága 27,5 m, amivel jelenleg hazánk völgyzárógátjainak magassági rangsorában az első helyet foglalja el. A koronaszint 284,6 mBf magasságban található, a koronahosszúság 243,5 m, a koronaszélesség 10 m (6 m-t terveztek) a talpszélesség pedig 220 m. A rézsúhajlás a száraz oldalon 275,6 mBf szint fölött 1:2,5, az alatt 1:3, a vízoldalon 1:3,5. (Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János, 2011; Kovács - Varga, 2012; Sitka - Bagyinszki - Szalay, 2007)

A Hasznosi-tározónál a 0,5%-os valószínűségű, azaz a 200 évenként egyszer előforduló vízhozamot vették figyelembe a tervezésnél. Az extrém, rendkívüli vízhozamok esetére a műtárgy csak csekély tartalékokkal rendelkezik. (Rosza, 2006)

A Kövicses-patak eredeti medrének közelében, a völgyzárógát testében helyezkedik el a többfeladatú vasbeton műtárgy, az 1. képen látható vízkivételi torony. Ez az árapasztó, egy egyesített, bukóaknás műtárgy zsiliptáblás fenékleürítővel. Külön vészarápasztó nincsen. (Rosza, 2006) Ez biztosítja a nyersvíz kivételt a víztisztító telep felé, a tározóba érkező árvizek beavatkozás nélküli levezetését, illetve a tározó vízszintszabályozását és leüríthetőségét. A függőleges tengelyű torony tetején helyezkedik el a kör alakú, 10,8 m átmérőjű árapasztó bukó, amely a beépített ejtőcsövön és az alvíz-csatornán keresztül juttatja az árvízi vízmennyiséget a Kövicses-patak medrébe. (Kovács - Varga, 2012) Az árapasztó túlfolyó szintje 281,13 mBf. (Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János, 2011)

A tározó fenékürítőjének kapacitása $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$, az árapasztó műtárgy vízlevezető képessége $37 \text{ m}^3/\text{s}$. Ennek megfelelő vízszállító képességre lett kiépítve a $476,1 \text{ m}$ hosszú alvízcsatorna is. A teljes hosszában betonlapokkal burkolt csatorna fenékszélessége $2,5 \text{ m}$, esése $2,5 \text{ ‰}$. A megfelelő esés biztosítása érdekében 3 db , $1,5 \text{ m}$ lépcsőjű bukó került kialakításra a csatorna 130 , 210 és 290 m -es szelvényeiben. (Kovács - Varga, 2012)

2005-ben és 2010-ben nagy mennyiségű csapadék hatására árvíz következett be. 2005 áprilisában a vízszint maximuma $283,00 \text{ mBf}$ volt, 2010 májusában $281,97 \text{ mBf}$ magassággal tetőzött a víz. (Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János, 2011) 2010-ben az átmedvesedés hatására suvadás is bekövetkezett, melyet még abban az évben helyreállítottak. Az események hatására új előürítő zsilipet építettek be. Az egyesített műtárgy körbukóját uszadékfogó ráccsal szerelték fel, a műtárgyon a tározó hatékony árvízcsúcs-csökkentő hatásának elérése céljából egy szabályozható zsiliptáblával felszerelt, $1,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ méretű árvízlevezető nyílást alakítottak ki, hogy rendkívüli árvíz esetén a tározó előüríthető legyen, vagy minimum a nyílás kapacitása erejéig a vízszinttartás biztosítható legyen. (Kovács - Varga, 2012) Kutatásom során nem számoltam az előürítő zsilippel, a beépítését megelőző állapotra végeztem a számításokat.



1. kép. A Hasznosi-tározó vízkivételi tornya 2011-ben. Forrás: Kovács - Varga, 2012

4. Eredmények

4.1. Lefolyás

A vízgyűjtő terület csapadék- és lefolyási viszonyainak vizsgálata során az összegyülekezési időt, különböző visszatérési idejű csapadékok intenzitását, végül az árhullámképet számítottam.

Az összegyülekezési idő számítását a Vízügyi Műszaki Segédlet - 1977 (VMS-77) segítségével tettem meg, a $\tau = \frac{L^2}{\sqrt{F \times J}}$ képlet használatával, ahol:

- τ [perc] az összegyülekezési idő,
- L [km] a leghosszabb lefolyási út hossza,
- F [km²] vízgyűjtő terület nagysága és
- J [-] a leghosszabb lefolyási út átlagos esése.

Ez utóbbi értéket a vízvázlat és a tározó terepszintjének szintkülönbsége és a leghosszabb lefolyási út hosszának hányadosaként értelmeztem. Így az összegyülekezési idő 88 percnak adódott. Az értékeket az 1. táblázat tartalmazza.

L [km]	F [km ²]	Z _{max} [m]	Z _{min} [m]	τ [perc]
11,371	36,0	920	241	88

1. táblázat. A vízgyűjtő terület adatai.



2. ábra. A részvízgyűjtők AutoCAD-ben.

Ezután a vízgyűjtő területet részvízgyűjtőkre bontottam. Jelentős egyszerűsítéssel, csak a főbb ágak figyelembe vételével három részvízgyűjtőre osztottam fel a területet. AutoCAD programban lemértem az egyes területek nagyságát és a lefolyási utak hosszát, majd a meghatározott adatok alapján ugyanazzal a módszerrel, mint amit a teljes vízgyűjtőre alkalmaztam, kiszámoltam a részvízgyűjtők összegyűlekezési időit. A vízgyűjtő terület részvízgyűjtőkre való felosztása a 2. ábrán látható. A részvízgyűjtők adatai és a számolt összegyűlekezési idők a 2. táblázatban találhatóak.

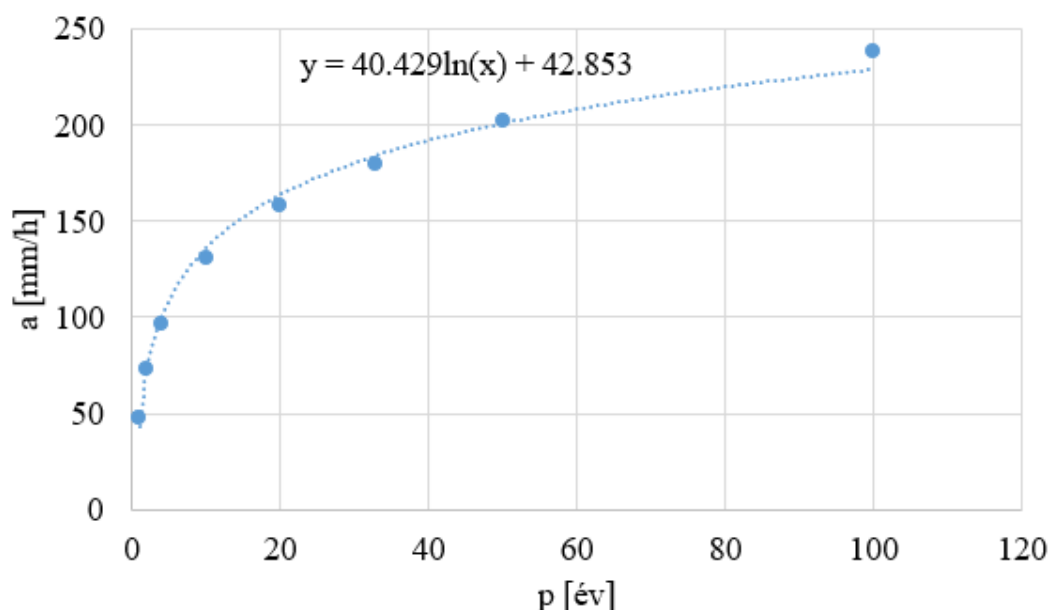
i	L [km]	Z _{max} [m]	Z _{min} [m]	F [km ²]	τ [perc]
1	7,725	810	390	16,2	64
2	4,485	750	390	9,3	23
3	6,106	660	280	10,5	46
Σ				36,0	

2. táblázat. A részvízgyűjtők adatai.

Következőnek különböző visszatérési idejű csapadékok intenzitását határoztam meg, szintén a VMS-77 segédlet alapján. Az $i_p = a \cdot \tau^m$ képletet használtam, ahol

- i_p [mm/h] a p visszatérési idejű csapadék intenzitása,
- a [mm/h] a 10 perces időtartamú, p visszatérési idejű zápor intenzitása,
- τ [10 perc] az összegyűlekezési idő 10 perces időegységben kifejezve, és
- m hatványkitevő,

melynek értékeit 1, 2, 4, 10, 20, 33, 50 és 100 éves visszatérési idejű csapadékokra a segédlet 3. táblázata tartalmazza. A 200, 330, 500 és 1000 éves visszatérési idejű csapadékokra az intenzitást extrapolálással határoztam meg. 'm' értékeiben csak kismértékű eltérés van, ezért azt a 100 éves csapadékhoz tartozóval egyelőnek, 0,75-nak tekintettem, 'a' értékét pedig úgy határoztam meg, hogy az ismert 'a' mennyiségekre egy függvényt illesztettem. A



3. ábra. A csapadékintenzitás meghatározásához szükséges érték extrapolálása.

hatványfüggvény és a logaritmusfüggvény is jó közelítést adott, ám a hatványfüggvénnyel való számolásakor olyan nagy csapadékintenzitások adódtak az 100 évnél nagyobb visszatérési idejű csapadékokra, melyek a valóságban nem fordulnak elő, emiatt a logaritmusfüggvényt használtam. A függvény képe és egyenlete a 3. ábrán látható. A különböző visszatérési idejű csapadékok adatait a 3. táblázat tartalmazza. 'τ' értéke 8,8.

p [év]	m	a [mm/h]	i _p [mm/h]
1	0,69	47,8	10,66
2	0,71	73	15,59
4	0,72	97	20,26
10	0,72	131	27,37
20	0,73	158	32,30
33	0,74	180	36,00
50	0,74	202	40,40
100	0,75	238	46,58
200*	0,75	257,06	50,31
330*	0,75	277,30	54,27
500*	0,75	294,10	57,56
1000*	0,75	322,13	63,05

3. táblázat. A különböző visszatérési idejű csapadékok adatai. A *-gal jelölt visszatérési időkhöz tartozó értékeket határoztam meg én, a többi a segédletben megtalálható.

A továbbiakban a 20, 33, 50, 100, 200, 330, 500 és 1000 éves visszatérési idejű csapadékokkal, azaz nyolc különböző forgatókönyvvel dolgoztam. Az 1, 2, 4, illetve 10 évente bekövetkező csapadékok nem számottevők ahhoz, hogy mértékadók legyenek a gát tönkremenetelének számítása során, hiszen ennél bőven nagyobb biztonsági szintre, nagyobb visszatérési időre lett tervezve a gát.

Ezek után árhullámképet és maximális vízhozamot határoztam meg a vízgyűjtőkarakterisztika és a racionális módszer használatával mind a nyolc esetre. A racionális módszer 10 km²-nél kisebb területű vízgyűjtőkre alkalmazható, azonban a tározó vízgyűjtőjén hidrológiai észlelés nem folyik, azaz hidrológiai szempontból feltáratlanok minősíthető. (Koris, 2011) Így adatok szűkében kényszerből kellett a racionális módszert használnom, hiszen kalibráláson alapuló módszerekhez nem álltak rendelkezésre idősorok, csak geometriai adatok. A racionális módszer szerint a csapadék időtartama az összegyülekezési idővel egyenlő, ami esetünkben 88 perc. Az árhullámképet az összegyülekezési idő kétszeresére határoztam meg, tehát amíg a teljes csapadék lefolyik a vízgyűjtő területéről a tározóba. A vízhozamot a $Q = A \cdot \alpha \cdot i$ képlettel számoltam, ahol

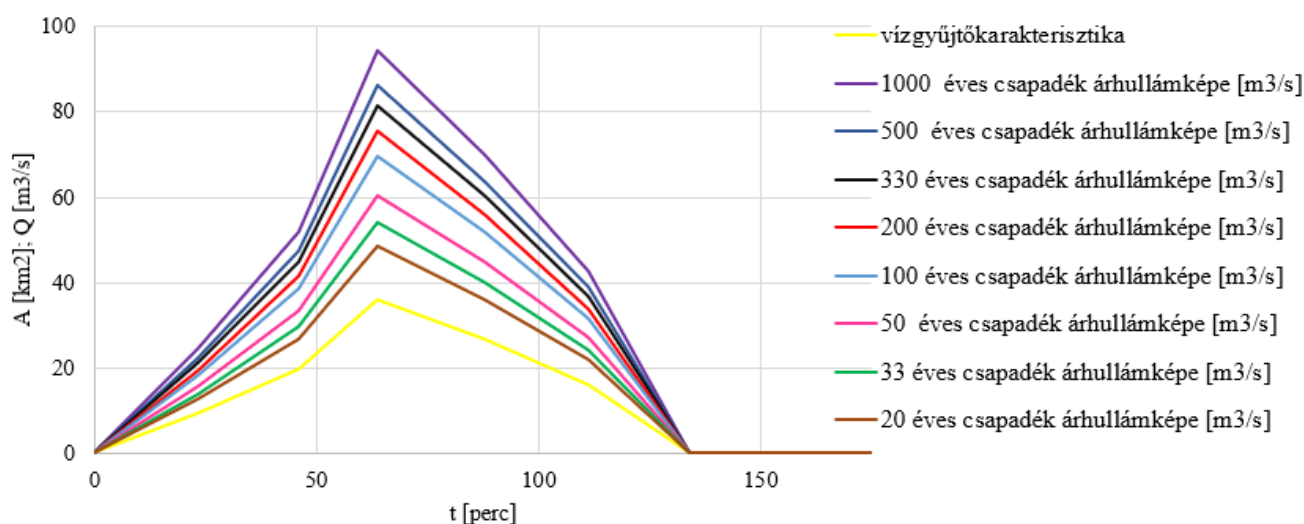
- Q [m³/s] a szállított vízhozam,
- A [m²] a hatékony terület,
- α [-] a lefolyási tényező és
- i [m/s] az intenzitás.

A lefolyási tényező értéke nagyon bizonytalan, függ a felszín fedettségétől. Számításaim során, kalibrációs adat híján egy jellemző, α = 0,15 értékkel dolgoztam.

A vízgyűjtőkarakterisztika számítását és példaként a 20, 100 és 1000 éves visszatérési idejű csapadékok árhullámképeinek számítását a 4. táblázat tartalmazza. A 4. ábrán látható a vízgyűjtőkarakterisztika és mindegyik csapadék árhullámképe diagramon ábrázolva. Az 5. táblázat tartalmazza mindegyik csapadék maximális vízhozamát.

t [perc]	ΔA_i [km ²]	ΣA_i [km ²]	Q [m ³ /s] 20 év	Q [m ³ /s] 100 év	Q [m ³ /s] 1000 év
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	9,31	9,31	12,53	18,07	24,46
46	10,47	19,78	26,62	38,40	51,97
64	16,17	35,95	48,38	69,77	94,44
$\tau = 88$	-9,31	26,64	35,85	51,70	69,98
111	-10,47	16,17	21,76	31,38	42,47
134	-16,17	0,00	0,00	0,00	0,00
152	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$2\tau = 176$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4. táblázat. Vízgyűjtőkarakterisztika és árhullámképek a 20, 100 és 1000 éves visszatérési idejű csapadékokra.



4. ábra. A vízgyűjtőkarakterisztika és árhullámképek diagramon.

A csapadék teljes vízhozama a $V_L = \alpha \cdot i \cdot T \cdot A$ képlettel számolható, ahol

- V_L [m³] a vízhozam,
- α [-] a lefolyási tényező, 0,15,
- i [m/h] a csapadék intenzitása,
- T [h] a csapadék időtartama, 88 perc,
- A [m²] a vízgyűjtő területe, 36,0 km².

Az ez alapján számolt vízhozamok értékét az 5. táblázat tartalmazza.

p [év]	20	33	50	100	200	330	500	1000
NQ_p [m ³ /s]	48,38	53,93	60,52	69,77	75,36	81,30	86,22	94,44
V_L [1000 m ³]	260	290	320	370	400	430	460	500

5. táblázat. A maximális vízhozamok és a teljes vízhozamok minden csapadékra.

A kapott eredmények mindössze közelítések, ezért a bizonytalanság csökkentése érdekében más módszerekkel is összehasonlítottam őket.

- Az Országos Vízügyi Főigazgatóság „Árvízszámítási segédlet a hazai hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők árvízhozamainak meghatározásához” alapján számolt $p = 1, 3$ és 5% -os meghaladási valószínűségű, azaz a 100, 33 és 20 évenként átlagosan egyszer meghaladott árvízhozamok:
 - $NQ_{1\%} = 30,6 \text{ m}^3/\text{s}$. A $69,77 \text{ m}^3/\text{s}$ 2,3-szerese ennek az értéknek. Ez nagyon nagy eltérés.
 - $NQ_{3\%} = 21,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Az $59,93 \text{ m}^3/\text{s}$ 2,5-szerese ennek az értéknek. Ez nagyon nagy eltérés.
 - $NQ_{5\%} = 18,0 \text{ m}^3/\text{s}$. A $48,38 \text{ m}^3/\text{s}$ 2,7-szerese ennek az értéknek. Ez nagyon nagy eltérés.

(Itt megjegyzem, hogy korábban a p -vel a visszatérési időt jelöltem, itt pedig a valószínűséget. Minden előfordulásánál igyekszem a jelölést tisztázni.)

- Koris, 2010: A Kövicses-patak évi maximális vízhozamainak különböző valószínűségű értékei statisztikai számítások alapján.
 - $NQ_{5\%} = 42 \text{ m}^3/\text{s}$. A $48,38 \text{ m}^3/\text{s}$ 1,15-szerese ennek az értéknek. Ez megengedhető eltérés.
 - $NQ_{3\%} = 49 \text{ m}^3/\text{s}$. Az $53,93 \text{ m}^3/\text{s}$ 1,1-szerese ennek az értéknek. Ez megengedhető eltérés.
 - $NQ_{2\%} = 54 \text{ m}^3/\text{s}$. A $60,52 \text{ m}^3/\text{s}$ 1,1-szerese ennek az értéknek. Ez megengedhető eltérés.
 - $NQ_{1\%} = 63 \text{ m}^3/\text{s}$. A $69,77 \text{ m}^3/\text{s}$ 1,1-szerese ennek az értéknek. Ez megengedhető eltérés.
 - $NQ_{0,5\%} = 72 \text{ m}^3/\text{s}$. Ez az érték szinte egyezik a $75,36 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal.
 - $NQ_{0,1\%} = 92 \text{ m}^3/\text{s}$. Ez az érték szinte egyezik a $94,44 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal.
- „A 2010-ben elkészült árvíz-hidrológiai elemzés alapján a 200 éves visszatérési idejű vízhozam $55 \text{ m}^3/\text{s}$.” (Kovács - Varga, 2012) A $75,36 \text{ m}^3/\text{s}$ 140%-a az $55 \text{ m}^3/\text{s}$ -nak, azaz majdnem másfélszerese. Ez nagy eltérés. A módszerük részleteit sajnos a cikk nem fedi fel.
- „2005. április 18-án rendkívüli árvíz következett be. Néhány óra alatt több mint 100 mm csapadék hullott a Csörgő-patak vízgyűjtőjére. A területre lehullott vízmennyiséget 950.000 m^3 -re becsülték. Ebből egy villámárvíz, ún. „flash-flood” esemény alakult ki, melynek során a Csörgő-patak maximális torkolati vízhozama mintegy $50\text{-}60 \text{ m}^3/\text{s}$ volt. A Kövicses-patak másik forráságán, a Nagy-völgyi-patakon ugyanekkor körülbelül $25\text{-}30 \text{ m}^3/\text{s}$ vízmennyiség érkezett. A két vízfolyás egyesülése után a tározóba lépő árhullám tetőző vízhozama a legújabb számítások szerint $130 \text{ m}^3/\text{s}$ lehetett.” (Kovács - Varga, 2012) Az általam számolt 1000 éves vízhozam $94,44 \text{ m}^3/\text{s}$, mely alatta marad a $130 \text{ m}^3/\text{s}$ értéknek. Ez azt is jelentheti, hogy a 2005-ös lefolyás szélsőségesen nagy volt, de azt is, hogy az 1000 éves vízhozamértékem alábecsül.

- „2010. május közepén egy a Kárpát-medence felett tartózkodó ciklonból országos szinten nagy mennyiségű csapadék hullott, amelyből a Kövicses-patak vízgyűjtőjére május 15-16-án kétnapos területi átlagban 65,1 mm csapadék érkezett. A korábbi csapadékok következtében már telített talajról a beérkező vízmennyiség szinte teljes egészében lefolyt. A tározóba beérkező tetőző vízhozam közel 19 m³/s volt.” (Kovács - Varga, 2012) A 19 m³/s alatta marad az általam számolt NQ₂₀ vízhozamnak, a 48,38 m³/s-nak.
- „2010. május utolsó és június első napján a Kövicses-patak vízgyűjtőjére érkező kétnapos csapadékösszeg területi átlagban 80,1 mm volt. A nagy vízmennyiségek lefolyását ebben az esetben is a korábbi időszak csapadékossága segítette elő. A tározó kb. május 31-én reggel 7 órától kezdett töltődni, és közel 15 óra alatt 928 000 m³ víz folyt a tározóba. Ez azt jelenti, hogy ezen időszak alatt 17,6 m³/s átlagos vízhozam érkezett be a tározóba a vízgyűjtőről. A tározóba jutó árhullám maximális vízhozamát 25,4 m³/s-ra becsülték. A vízhozam nagyságának értékeléséhez hozzátartozik, hogy az árhullám levonulása alatti helyszíni szemle szakértőinek becslése 16 óra körül ~ 25-30 m³/s közé tette a vízhozam értékét, egy reggel 7 órai, ugyancsak becsült ~ 48 m³/s kiugró érték mellett.” (Kovács - Varga, 2012) A 25-30 m³/s alatta marad az általam számolt NQ₂₀ vízhozamnak, a 48,38 m³/s-nak, a 48 m³/s azonban megegyezik vele.

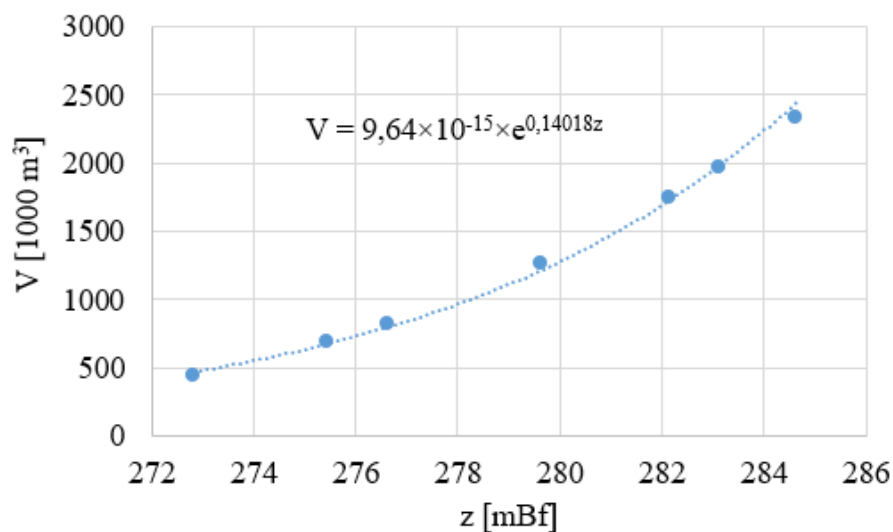
Látható a becslések nagyfokú bizonytalansága, és az, hogy az OVF segédlete alapján számított eredmények jóval a hibahatárnál nagyobb eltérést mutatnak az eredményeimtől, a Koris-féle vízhozamok azonban nagy pontossággal egyeznek. Az első esetben az eltérés oka lehet az, hogy a racionális módszer csak 10 km² kisebb méretű vízgyűjtő területre ad pontos eredményt. Azonban az eredmények nagyobbak, mint a vélhetően helyes értékek, így ha mégis ezen eredmények alapján kellene méretezni, az nem menne a biztonság javára. Az elmúlt évek árvizeinek vízhozamával összehasonlítva az eredményeimet azt tapasztaljuk, hogy akad olyan eset, amikor a megtörtént események is igazolják a számított értékeim nagyságrendjét.

Látom, hogy az eredményeimet az egyik módszerrel összehasonlítva nagy hiba terheli, a többi adatsorral pedig nagyfokú egyezést mutat. Úgy gondolom, hogy nem követek el nagy hibát, ha az itt kapott eredményeimmel számolok a továbbiakban. Kényszerből is szükséges ez, mert a többi módszerrel való számolás során nem kaptam meg az árhullámképet, mindössze a maximális vízhozamot. Emiatt csak összehasonlítani tudom módszerek eredményét, de a további munkához a vízgyűjtőkarakterisztika és racionális módszer eredményeit vagyok kénytelen használni. Valamint azt gondolom, hogy jobb, ha a valósánál nagyobb eredményekkel számolnék, mint ha kisebbekkel, különösen egy ilyen adottságú területen, ahol a közelmúltban is következett be árvíz.

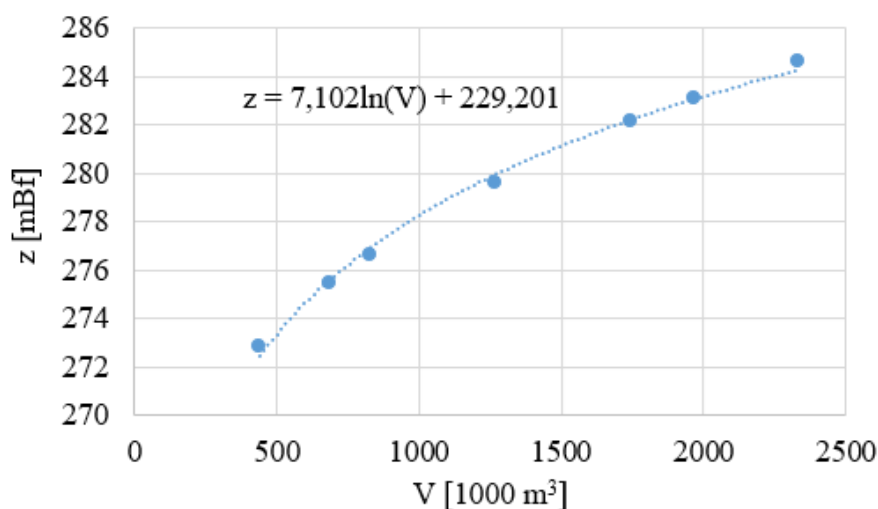
4.2. Tározó telítődése

Térfogatmérleg alapján oldottam meg a tározó telítődésének feladatát, a be- és kifolyó vízhozamokat, illetve a vízszintváltozás okozta térfogatnövekményt tettem egyenlővé. Véges időközzel számítottam az időbeli alakulást.

Rendelkezésemre álltak a tározó térfogatának és felszínének alapadatai. A 2010. évi tározó térfogat adataihoz és az ezekhez tartozó Balti-tenger feletti magasságokhoz függvényt illesztettem. Ezáltal megkaptam a tározó jelleggörbáját, azaz a térfogatot a vízszint függvényében, és fordítva. A függvények képei és egyenletei az 5. és 6. ábrán láthatók.



5. ábra. A tározó térfogata a vízszint függvényében.



6. ábra. A tározó vízszintje a térfogat függvényében.

Természetesen az 5. ábrán látható regressziós egyenlet invertálásával analitikusan is kifejezhető V-ből z, de a tükrözött adatsorra is történetesen a pontos inverzet adja a legkisebb négyzetek módszere.

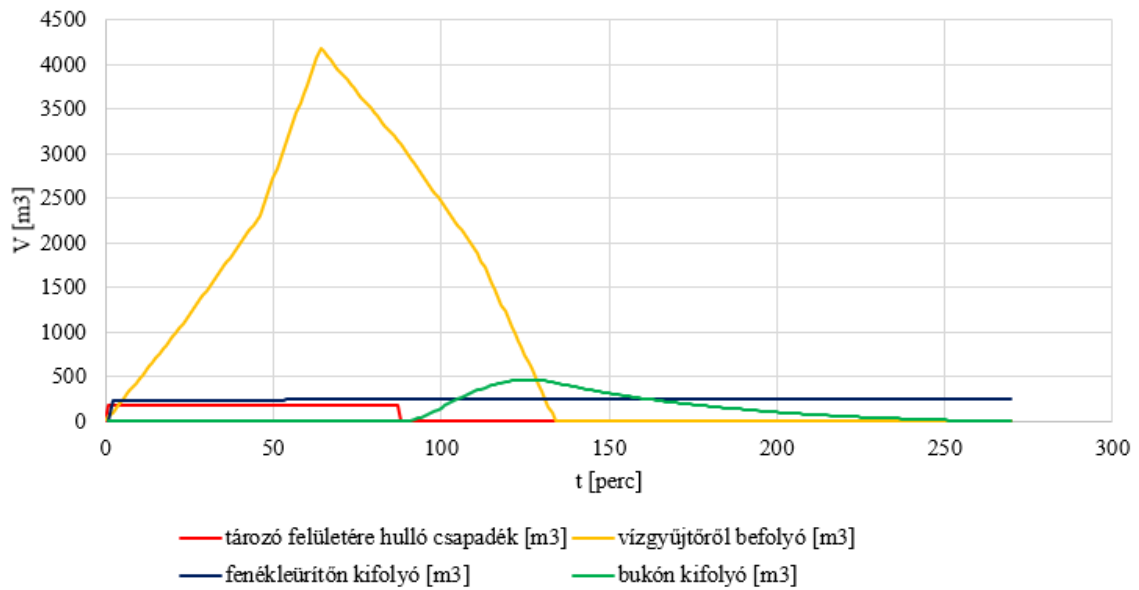
Ezek után azt vizsgáltam, hogy hogyan alakul a tározó vízszintje a különböző csapadékok esetén. Percenként számoltam a beérkező és a kifolyó víz mennyiségét a nyolc forgatókönyvben. Kiindulási állapotnak a normál üzemvízszintet, 280,13 mBf vettem. Ez 14,5 m vízállást jelent, ami Kovács – Varga (2012) 3. ábrája alapján 1-2 méterrel nagyobb, mint a 2011-es év vízállásai.

A tározóban lévő vízmennyiséghez hozzáadódik a tározó 23 ha-nyi felületére hulló csapadék és a vízgyűjtő területéről érkező lefolyó csapadék. A vízmennyiséget csökkenti a fenékleürítő, ami egy 0,3 m² területű nyílás, tehát kis nyíláson való kifolyásként értelmezhető, illetve az árapasztó, ami egy kör alakú, 10,8 m átmérőjű aknás bukó (Kovács - Varga, 2012). Az átbukás 15,5 m-es vízállásnál kezdődik meg. Az előürítő zsilippel nem számoltam, a beépítését megelőző állapotra végeztem a számításokat. A tározó vízháztartási mérlegén a kiadási oldalon szerepel még a nyersvíz kivétel, az elszivárgás és a tározó felületének párolgása. (Szitka - Bagyinszki - Szalay, 2007) Ezeket azonban a vizsgált összegyülekezési idő rövidege miatt elhanyagolhatjuk. Az árapasztó vízkivezetése kisebb vízhozamoknál bukóként számítható, de nagyobb vízhozamoknál a kör alakú koronán szabadon átbukó vízugarak kitöltik a teljes körszelvényt és a vízhozamot alulról befolyásolt, kis nyíláson való kifolyásként kell közelíteni. Bukóképlettel és kis nyíláson való kifolyásként is számítottam a vízemésztést, és a kettő közül a kisebbet választottam, mint a hidraulikailag érvényes megoldást. A kisebb eredményt az összes esetben a bukóképlettel való számítás eredményezte.

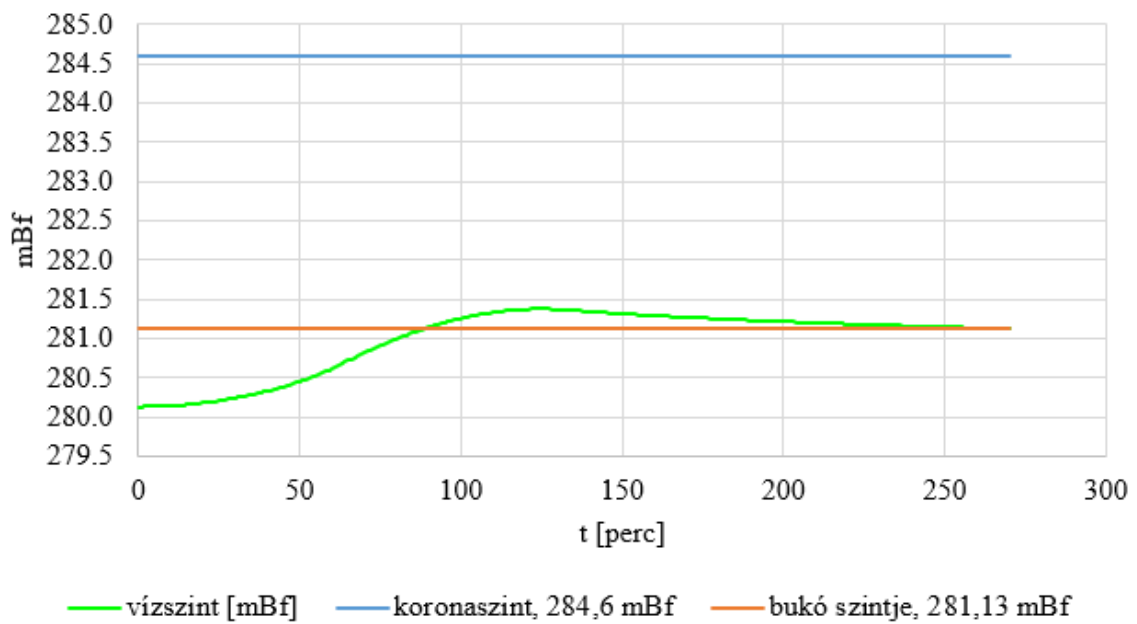
270 percig követtem a tározóban lévő vízmennyiség alakulását. A kezdeti időpillanatban kezd el esni az eső, és 88 percig állandó intenzitással hullik. A csapadék elállása után még háromnegyed óráig érkezik be víz a vízgyűjtőről, utána megszűnik a befolyó víz. Az eső elállása után még három óráig figyeltem, hogy hogyan alakul a tározóban a víz.

Mind a nyolc csapadékra elvégeztem a tározó telítődésének számítását. A 20 és a 33 éves csapadékok vízhozama nem érte el az átbukási szintet, utóbbi mindössze 8 cm-rel marad alatta. Példaként a 100 éves csapadék be- és kifolyó vízmennyiségei láthatók a 7. ábrán, és a vízszint és térfogat időbeli alakulása a 8. és 9. ábrán. Ekkor a szakadásból eredő víz kifolyását még nem vettem figyelembe.

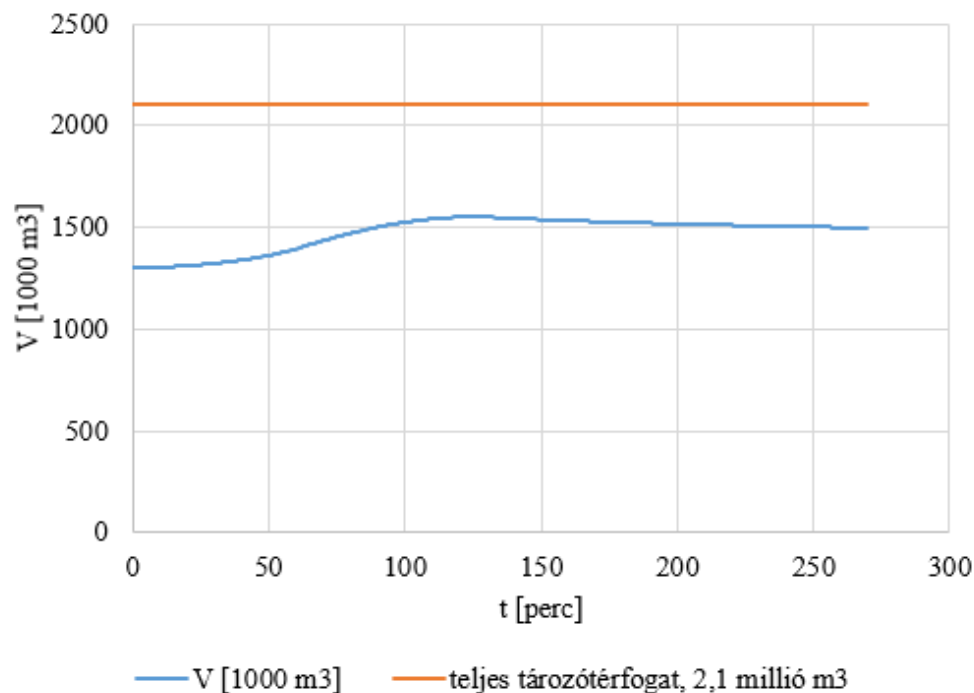
Látható, hogy a két befolyó vízmennyiség közül a vízgyűjtőről érkező hozam sokkal nagyobb, mint a közvetlenül a tározóra hulló, állandó intenzitású, emiatt állandó fajlagos lefolyású csapadék, amely 88 perc után eláll. A vízgyűjtőről két-két és fél óra után nem érkezik több víz. A fenékleürítőn közel állandó hozamú víz távozik, mert olyan nagy mélységben csapolja meg a tározót, ahol a relatív nyomásmagasság-változások nem túl jelentősek. Másfél óra után kezd el kifolyni a víz a bukón is. Később, mint amikor a vízgyűjtőről befolyó vízmennyiség maximuma van. Ebből következik, hogy a maximális vízmennyiség önmagában nem elég ahhoz, hogy meginduljon az átbukás, de fontos szerepe van a tározó feltöltésében. Tehát a maximális vízhozam levonulása után nem lélegezhetünk fel, mert a később érkező, kisebb vízhozamok is ugyanúgy veszélyesek.



7. ábra. A 100 éves csapadék hatására a tározóba be- és kifolyó vízmennyiségek a számítás egyperces időközére vonatkoztatva, szakadás nélkül.



8. ábra. A tározó vízszintjének alakulása 100 éves csapadék hatására, szakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva.

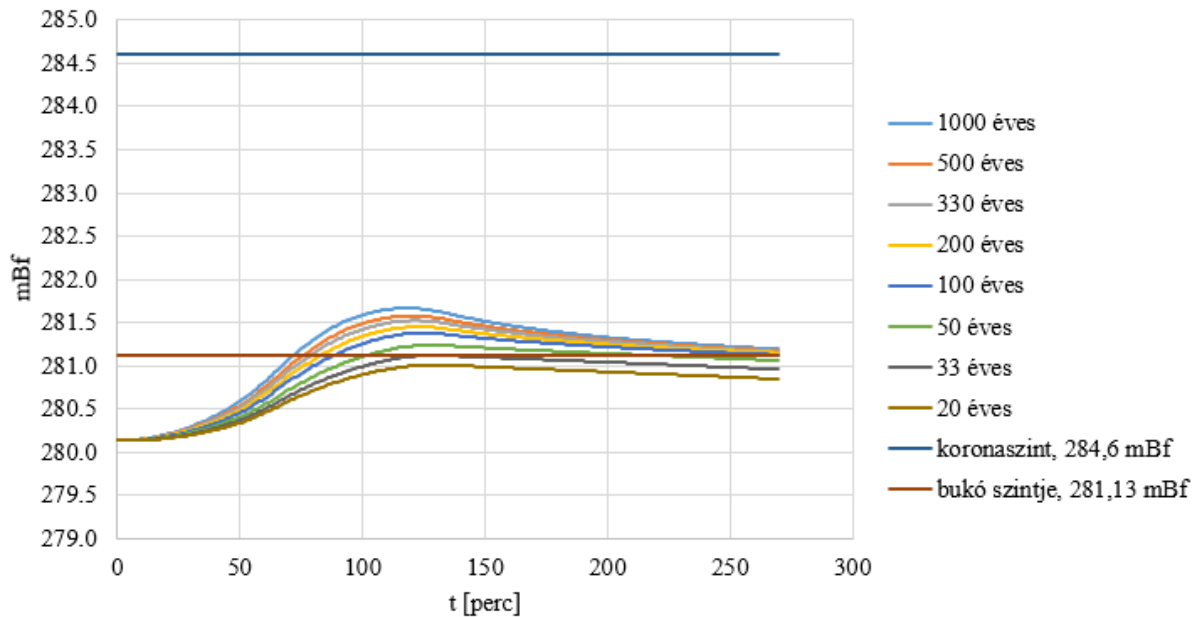


9. ábra. A tározóban lévő víz térfogatának alakulása 100 éves csapadék hatására, szakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva.

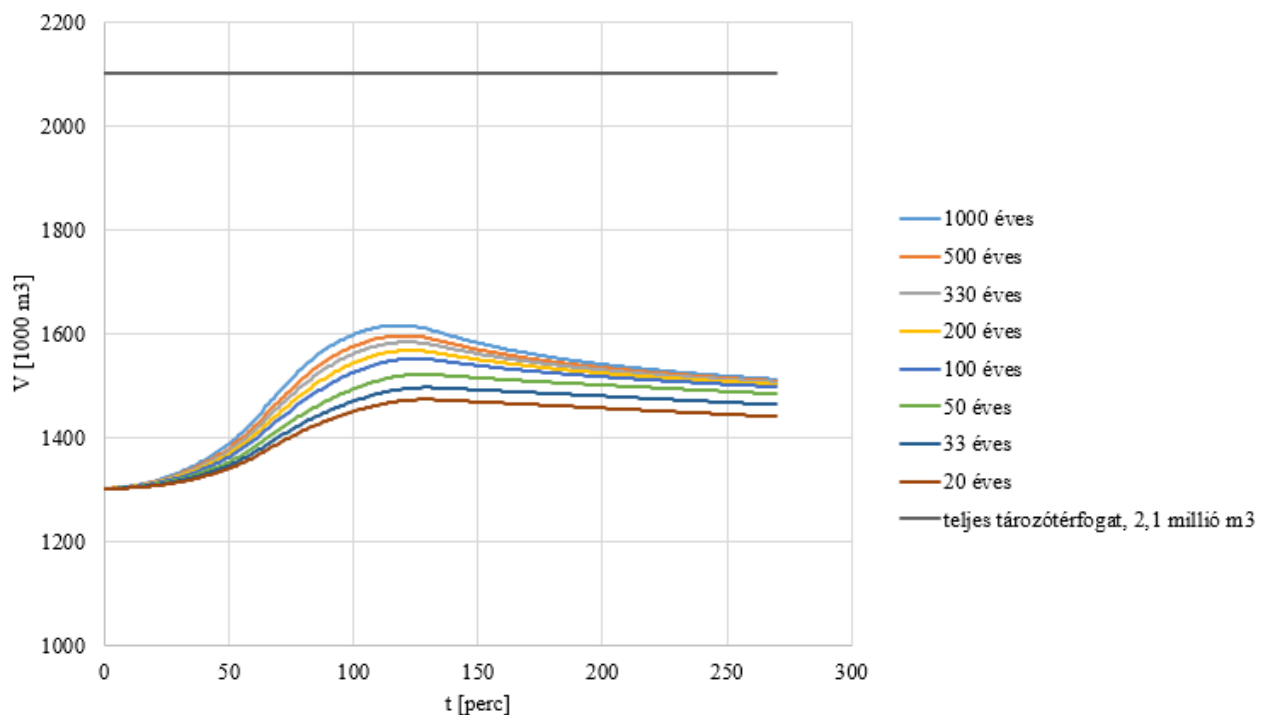
Látható, ahogy a csapadék hatására elkezd növekedni a vízszint és a víztérfogat is. Másfél óra után a vízszint eléri az árapasztó bukó szintjét, megkezdődik az átbukás. Egy ideig még árad a tározó, aztán apadásnak indul, hiszen az átbukással megnő a kifolyó víz mennyisége, a csapadék már nem hullik és a lefolyás is csökkenésnek indult. A vizsgált idő utolsó perceiben pedig újra a bukó szintje alá csökken a vízszint, de a fenékleürítő nyíláson végig távozik a víz.

A vízszintek messze elmaradnak a duzzasztó koronaszintjétől, a tározóban lévő víz térfogata pedig jóval a teljes térfogat alatt marad. Ez igaz az általam vizsgált legextrémebb esetre, az 1000 éves csapadéokra is, ahol az átbukás a csapadék kezdete utáni 73. percben következik be, és két óra után tetőzik a vízszint 281,7 mBf magasságban, amikor 1,6 millió m³ víz van a tározóban.

Általánosan elmondható, hogy minél nagyobb a csapadék intenzitása, annál hamarabb kezdődik meg az átbukás. A különböző visszatérési idejű csapadékok hatására kialakuló vízszinteket a 10. ábra mutatja, a térfogatokat a 11. ábra. A 200 éves és nagyobb visszatérési idejű csapadékok esetén a vizsgált idő végén még mindig nagyobb a vízszint, mint a bukómagasság.



10. ábra. A különböző visszatérési idejű csapadékok hatására kialakuló vízszintek, átszakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva.



11. ábra. A tározott víztérfogatok alakulása a különböző visszatérési idejű csapadékok hatására, átszakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva.

Megállapíthatjuk, hogy a Hasznosi-tározó nagyon nagy biztonsági tartalékokkal rendelkezik. Még az ezeréves visszatérési idejű csapadék vízhozama is jelentősen elmaradt a tározó teljes térfogatától. Ha ehhez hozzávesszük, hogy ma már van előürítő zsilip, amelynek méretei $2,0 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}$, tehát 3 m^2 -en tud távozni a víz, összehasonlítva a $0,3 \text{ m}^2$ területű fenékleürítővel, akkor kijelenthetjük, hogy aligha fordulhat elő olyan eset, amikor a víz meghágja a gátkoronát. Végző következtetésként azt vonhatjuk le, hogy a különböző valószínűségű csapadékok nem okoznak lényegesen nagy eltérést a gátszakadás bekövetkezésének valószínűségében.

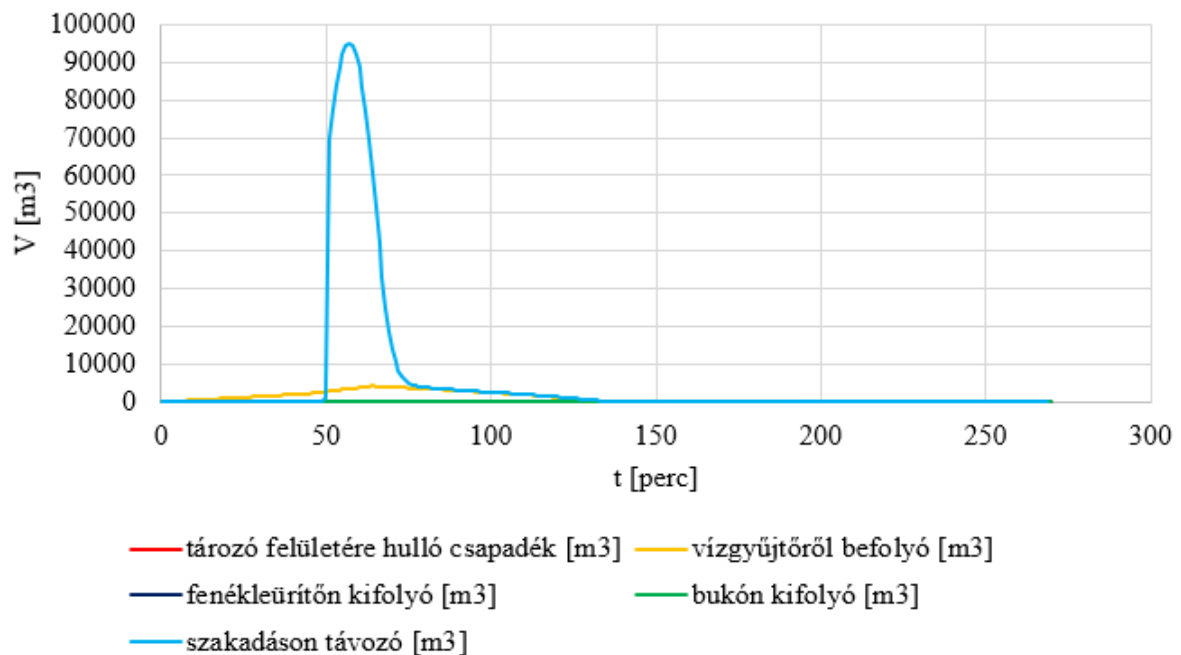
4.3. Tározó átszakadása

A tározó telítődésének meghatározása után a szakadással foglalkoztam. Az átszakadás több időpillanatban is bekövetkezhet. Ha a tározó annyira megtelik, hogy a víz átbukik a gátkoronán, akkor az nagy valószínűséggel szakadássá bővül. Számításaim azt mutatták, hogy ez még az 1000 éves csapadéknál sem történt meg. Munkám során ezért úgy tekintettem, hogy a gát a terhelés hatására megy tönkre, és a szakadásnak az időpontját előre lerögzítettem (a csapadék kezdete utáni 50. percre). Több szakadási időpontot nem vizsgáltam, ezért nem kellett a nyolc forgatókönyvet több alváltozatra kibővítenem. Ezek után a szakadási szelvény bővülését számoltam a különböző esetekre.

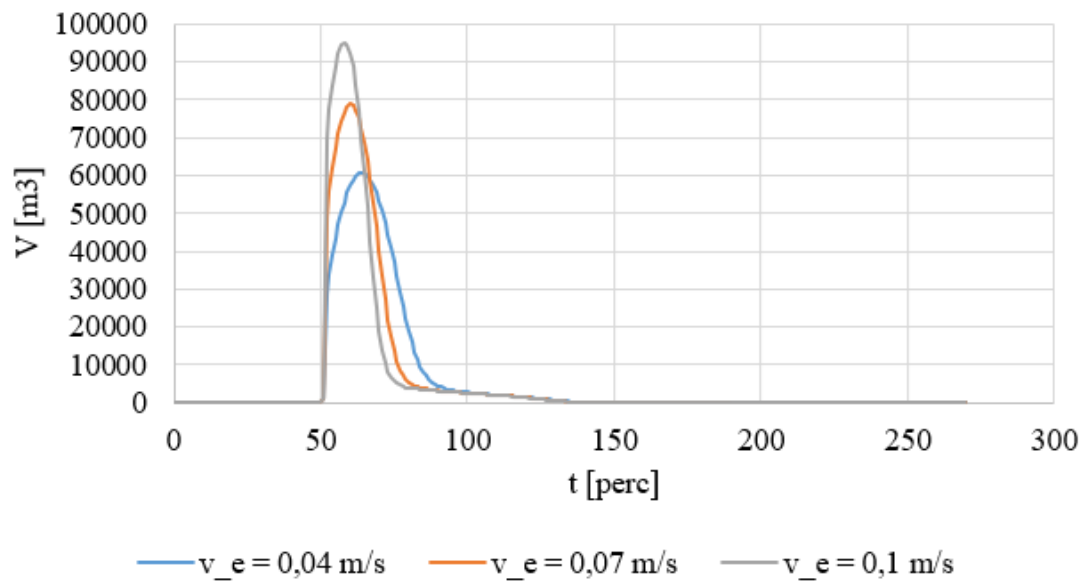
Macchione (2008) földgátakra kidolgozott gátszakadási modelljét alkalmaztam egyszerűsítésekkel. Macchione modelljében a szakadási szelvény kezdetben háromszög alakú, majd amint a gátest teljes magasságban átszakadt, azaz a szakadási szelvény egészen a terepszintig visszarágódott, trapéz alakú lesz. Földgátaknál a szakadási szelvény rézsűje világszerte gyűjtött tapasztalatok alapján hozzávetőlegesen 30 fokot zár be a függőlegessel (Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János, 2011). A sok bizonytalanság mellett megengedtem magamnak azt a közelítést, hogy a szelvény téglalap alakú, mert ez a képleteket nagyban egyszerűsítette. A szakadás pillanatában a szakadási szelvény azonnal (nagyon gyorsan) lerágódik a terepszintig, majd szélesedik.

A szakadáson kifolyó vízhozam sokkal nagyobb, mint a tározó vízmérlegében bármelyik másik vízhozam. Még az eddig tárgyalt legjelentősebb hozamnál, a vízgyűjtő területről befolyó hozamnál is nagyobb. A szakadás fejlődésének gyorsasága a v_e eróziós sebességtől függ. Ha az eróziós sebesség értéke nagy, akkor a szakadás rövid idő alatt nagy méretű lesz, és a tározó képes rövid idő alatt kiürülni. A Hasznosi-gátra a közepes karakterisztikus eróziós sebességet 0,07 m/s-ra vettem fel, további egy alacsony, 0,04 m/s, és egy magas, 0,1 m/s értékkel vizsgáltam, hasonlóan, mint ahogy Krámer Tamás - Maren Niemeyer - Józsa János (2011) tették. Ez viszonylag szűk tartomány, de Macchione elemzése ezt a nagyságrendet mutatta érvényesnek a világ földgátjainak szakadásaira. A karakterisztikus eróziós sebesség nem egy valóságban is megfigyelhető kinematikai mennyiség, hanem egy sebesség dimenziójú összevont paraméter.

A 12. ábrán láthatók a 100 éves csapadék hatására a tározóba be- és kifolyó vízmennyiségek, 0,1 m/s-os karakterisztikus eróziós sebességű szakadással. Látszik a diagramon is, hogy a szakadáson kifolyó vízmennyiség sokkal nagyobb, mint bármely más vízmennyiség. A 13. ábra mutatja a szakadáson kifolyó vízmennyiségeket 100 éves csapadéokra, a különböző karakterisztikus eróziós sebességekkel. A 12. ábrán meglévő többi vízmérleg-összetevő változása elhanyagolható a szakadáson távozó víz mennyiségének változásához képest a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett.



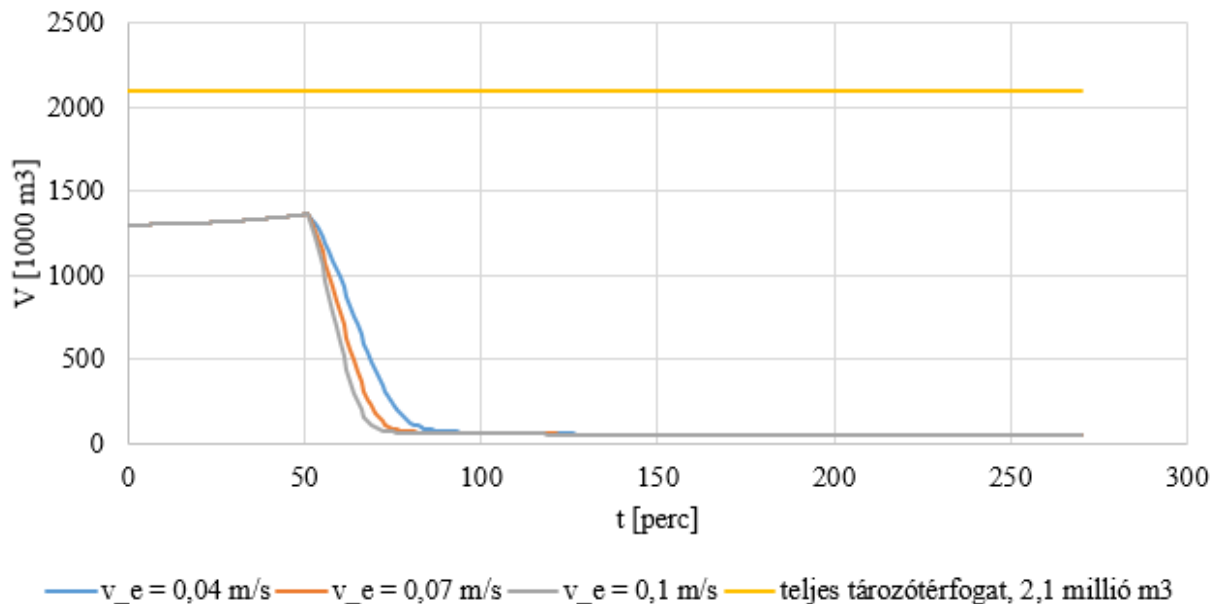
12. ábra. A 100 éves csapadék hatására a tározóba be- és kifolyó vízmennyiségek az 1 perces számítási időközre vonatkoztatva, 0,1 m/s-os karakterisztikus eróziós sebességű szakadással.



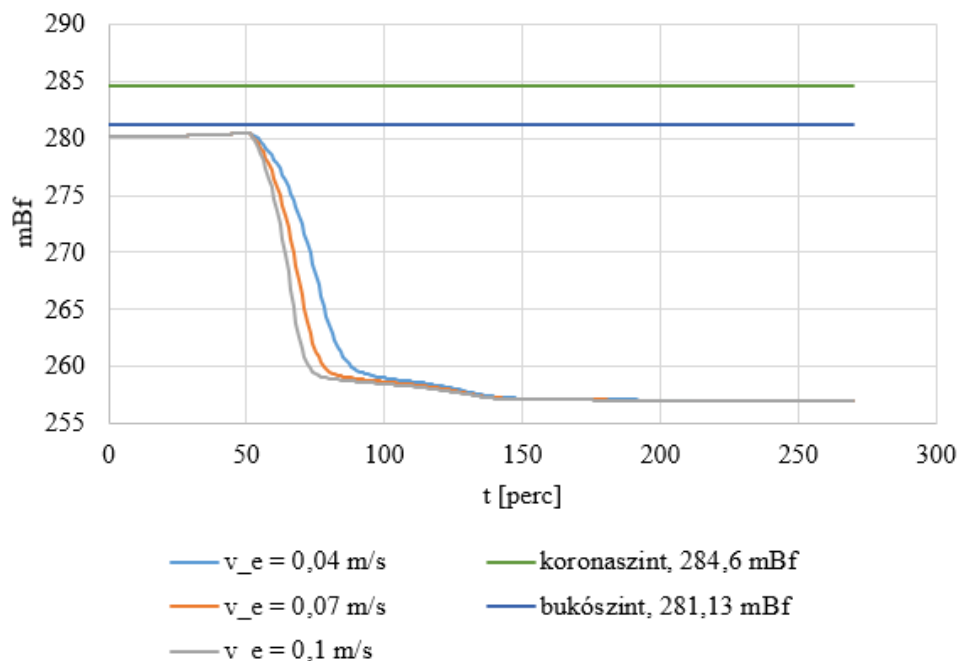
13. ábra. A szakadáson 1 perc alatt kifolyó vízmennyiségek 100 éves csapadéokra, a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett.

A szakadáson kifolyó víz mennyisége azonos, a tározóban lévő összes víz térfogatával egyezik meg, a görbék alatti területek nagysága egyenlő. A görbék alakjának különbségét az okozza, hogy milyen gyors a szakadás terjedése, tehát milyen hamar, mekkora hozammal ürül ki a tározó. Nagyobb eróziós sebesség esetén gyorsabban, nagyobb hozammal történik ez meg, ezért kapunk vékonyabb, de magasabb görbét.

A 14. ábrán a tározóban lévő víz térfogatának alakulása látható, a 15. ábrán a vízszinté, 100 éves csapadékra, a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett. A 14. ábrán látszik, hogy nagyobb eróziós sebesség mellett gyorsabban ürül ki a tározó, kisebb sebesség mellett ez a folyamat egyenletesebben következik be. A 15. ábra alapján hasonló megállapításokat tehetünk. A gátat az 50. percben szakítottam át, tehát még az előtt, hogy a víz elérte volna az árapasztó bukót. Még nagyobb csúcsvízhozamok jöttek volna ki, ha a szakadás később következik be.

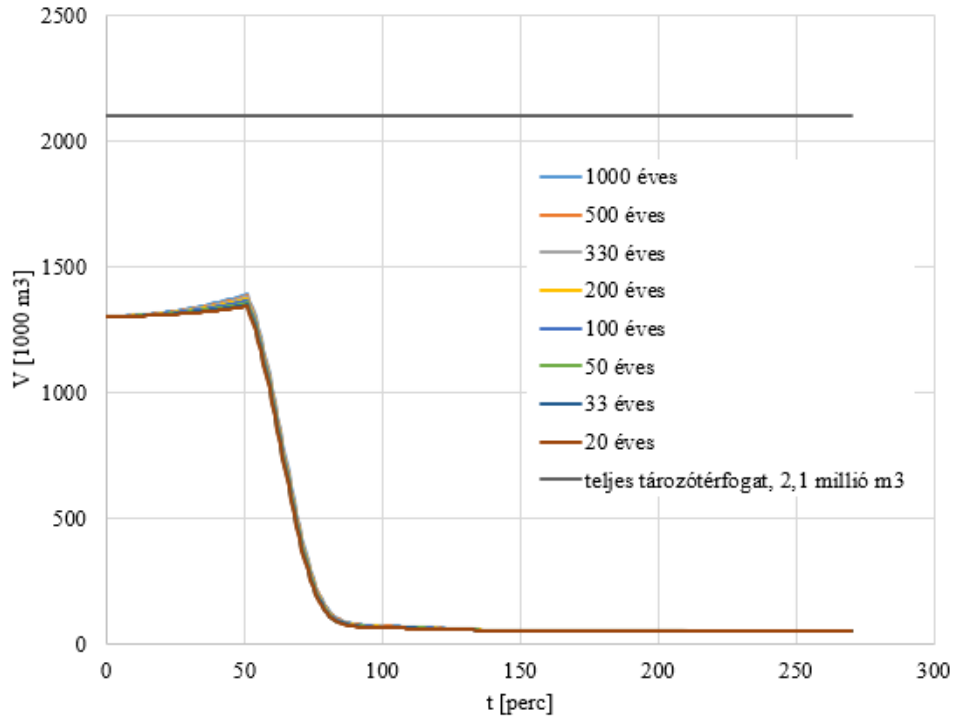


14. ábra. A tározóban lévő víz térfogatának alakulása 100 éves csapadékra (1 perces időközre vetítve), a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett

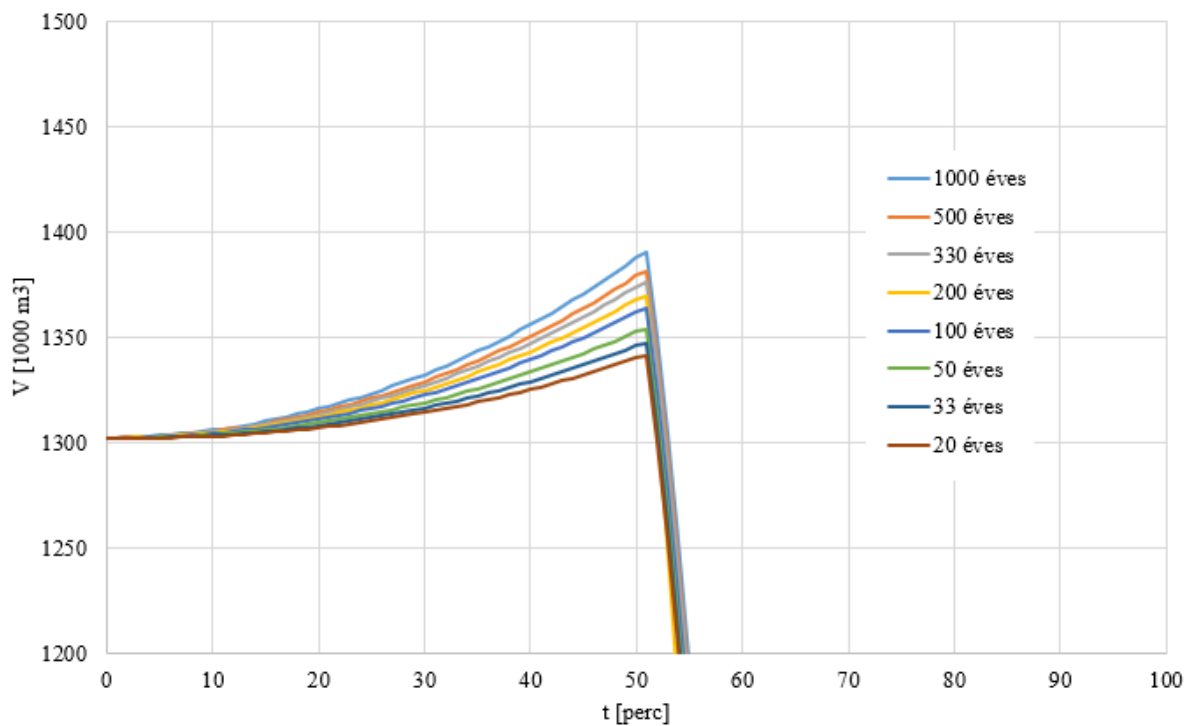


15. ábra. A vízszint alakulása 100 éves csapadékra, a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett, egyperces időközre vonatkoztatva.

A 16. ábra a tározóban lévő víz térfogatának alakulását mutatja mind a nyolc csapadékra, 0,04 m/s eróziós sebesség mellett. Megállapíthatjuk, hogy a víz térfogata most is messze elmarad a tározó teljes térfogatától. A 17. ábra ugyanennek a diagramnak egy részletét mutatja kinagyítva. A görbék közötti eltérés oka a ritkább csapadékok nagyobb vízhozama, a maximális vízhozam abban az időintervallumban érkezik be a tározóba.

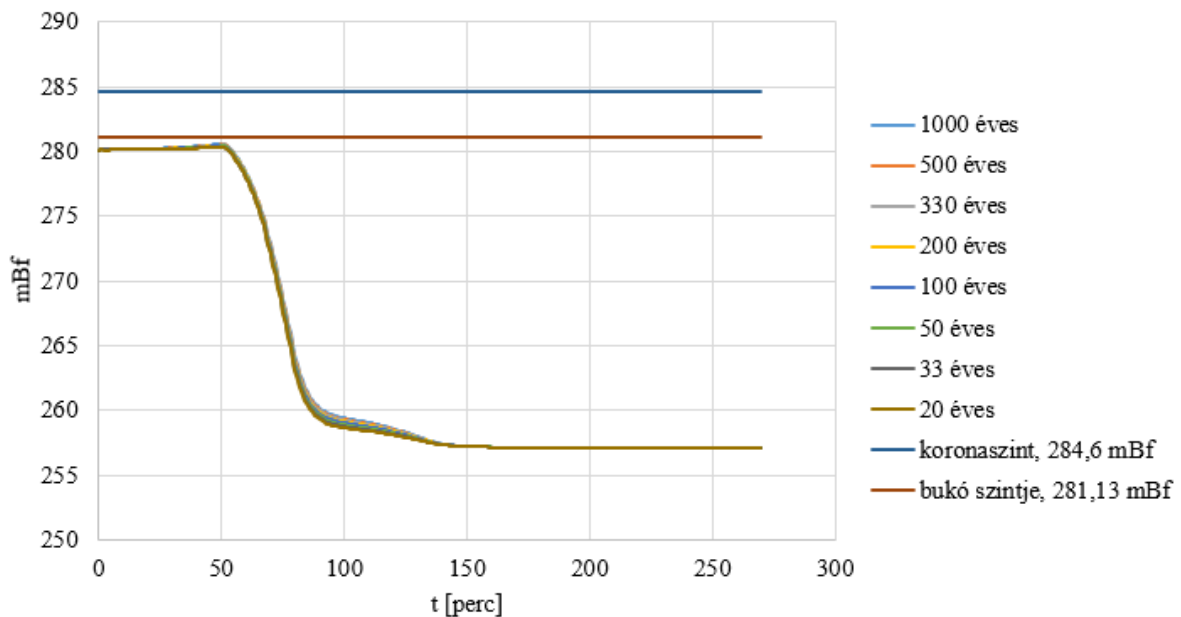


16. ábra. A tározóban lévő víz térfogatának alakulása a nyolc csapadékra (1 perces időközre vetítve), 0,04 m/s eróziós sebesség mellett.

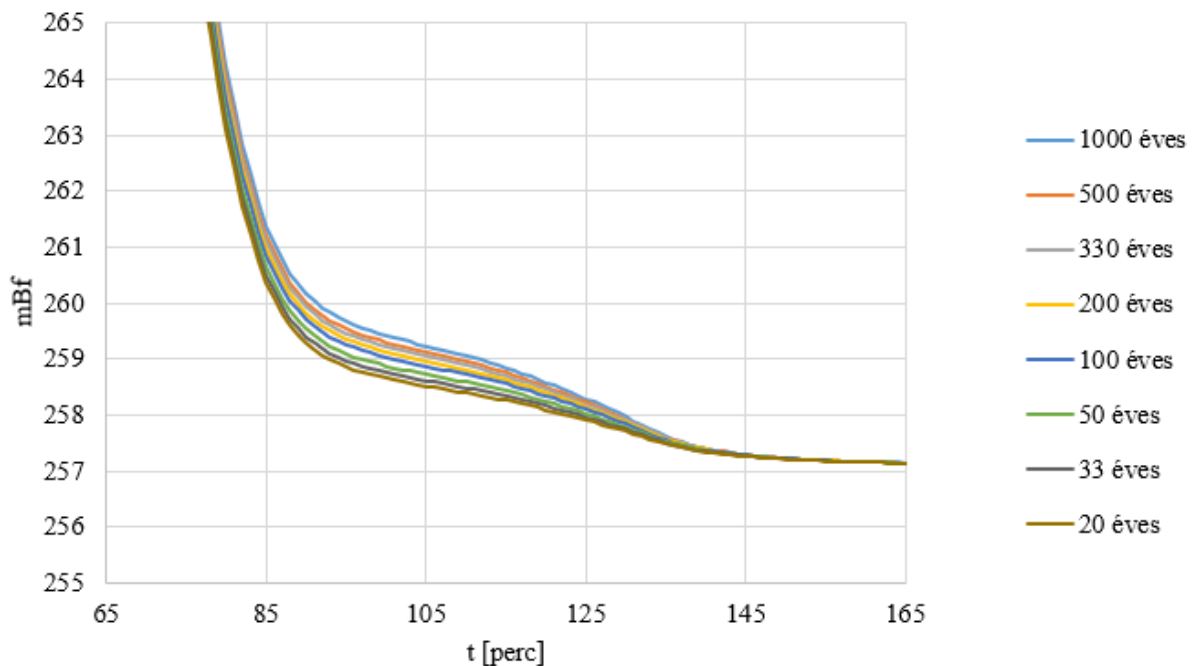


17. ábra. A 16. ábra egy részlete.

A 0,04 m/s eróziós sebesség hatására a vízszint változását a tározóban a 18. ábra mutatja mind a nyolc csapadékra. Látszik, hogy egyik esetben sem történik átbukás. A 19. ábra ugyanennek a diagramnak egy részletét mutatja kinagyítva. A görbék közötti eltérés oka a ritkább csapadékok nagyobb vízhozama.



18. ábra. A vízszint változása a tározóban mind a nyolc csapadékra, 0,04 m/s eróziós sebesség hatására.



19. ábra. A 18. ábra részlete.

Kijelenthető az, hogy az alvízi völgyben az esetleges gátszakadással bekövetkező árhullám levonulási módja jobban függ a karakterisztikus eróziós sebességtől, mint a lehulló csapadék mennyiségétől, visszatérési idejétől. Emiatt módosítom az eredeti elképzelésemet, és az átszakadás valószínűségének számításánál nem a különböző intenzitású csapadékok valószínűségét veszem alapul, hanem a karakterisztikus eróziós sebességek különböző értékeinek előfordulási valószínűségét.

4.4. Geotechnikai tönkremenetel

Nem csak az átbukó víz, hanem a gát alatt nagy sebességgel átszivárgó vagy a nagy statikus teherrel ránehezedő víz is okozhatja a gátak stabilitásvesztését. Ebben a fejezetben a gátak lehetséges tönkremeneteli módjait gyűjtöm össze, majd azokat az adatokat, amelyek ismeretére szükség volna ahhoz, hogy számításokat is végezhessünk.

4.4.1. Lehetséges tönkremeneteli módok

Eero Slunga 2001-es tanulmányában a tönkremeneteleket két csoportba osztotta: normál körülmények és rendkívüli körülmények között bekövetkező tönkremenetel. A rendkívüli körülmények közé sorolható az árvíz, földrengés, hegyomlás, háború, és terrortámadás bomba felrobbantásával. (Eero Slunga, 2001; Völgyzárógátak tönkremenetele) Az alábbiakban felsorolt tönkremeneteli módok normál körülmények között és rendkívüli események hatására is bekövetkezhetnek.

Repedés

A töltésrepedések kialakulásának három leggyakoribb oka a következő: zsugorodási repedés (árvízen kívüli időben), kezdődő suvadás húzási repedése, duzzadási repedés (árvíz alatt). A repedések azért veszélyesek, mert a földmű a másodlagos pórusokon keresztül részlegesen vízáteresztő lesz és a későbbi árvizek alkalmával a repedések koncentrált vízmozgás kialakulását okozhatják. A repedések nyomán megszűnik a töltésanyag folytonossága, ami pedig a suvadás kialakulását könnyíti meg. A repedésekben mozgó víz a vízóldali nyomást a mentett oldalra nyomásvesztés nélkül adja át. Vagyis olyan, mintha csak egy csökkentett méretű töltés állna ellent a vízóldali víznyomásnak. A töltésrepedés olyan jelenség, mely árvíz nélkül is kialakulhat. (Nagy, 2009) A Hasznosi-tározó esetében a gát koronán található aszfaltozott úttestben repedések láthatók, de ezek a repedések már hosszú ideje jelen vannak. (Rosza, 2006)

Szivárgás

A szivárgás, azaz a talajban történő vízmozgás egy természetes folyamat, melyet a Darcy-törvény ír le. A törvény értelmében a szivárgás sebessége egyenlő az áteresztőképességi együttható és a hidraulikus gradiens szorzatával. A töltéstest anyagának pórusaiba benyomuló víz hatására a vízzel telített részben megváltozik, csökken a talaj nyírószilárdsága, kötött talajok esetében elsősorban a kohézió. Általában ez önmagában még nem jelenti gátszakadás kialakulásának közvetlen veszélyét, de megkönnyíti a gát állékonyságvesztését. A szivárgás tehát mindig létrejön, de rövid időtartamú árvíz vagy jó vízzáró, homogén töltésanyag esetén a szivárgó víz a mentett oldalon megjelenik, azaz a töltés átázik. Ekkor a kialakuló szivárgási, áramlási erők már veszélyeztetik a rézsík állékonyságát, azokat suvadásra hajlamosá tehetik, aminek következményeként gátszakadás is kialakulhat. A szivárgás fajtái: rétegszivárgás, talpszivárgás, kontúrszivárgás, altalajszivárgás. Szivárgás elleni védekezés

biztosítani kell a víz szabad kifolyását a töltésből. A védekezési módok közé tartozik a fóliaterítés készítése, a szűrő padkák építése, illetve régebben fa, majd acél pallók verése (Larssen lemezek). (Nagy, 2009) A Hasznosi-tározó töltéstestében lévő szivárgás mennyiségét elfogadhatónak találták a 2010-es suvadás előtt (Rosza, 2006).

Csurgás

A csurgás árvízi terhelés hatására, az árvízvédelmi gát mentett oldalán megjelenő koncentrált, tiszta vizű és nem nyomás alatti kifolyás. A kialakulás oka lehet egy felszín közeli vakondjárat a laza töltésekben, egyenlőtlen süllyedés, új és régi töltésrész hibás egymáshoz építése, kötött anyagú töltésekben kialakult zsugorodási repedés vagy fa gyökérzetének korhadása a gátban. A csurgást állandóan figyelni kell, védekezni azonban csak akkor kell, ha a kifolyónyílásban a víz zavarossá válik. A mentett oldali kifolyónyílást tilos elzárni, a csurgáson kifolyó vizet a töltés lábától el kell vezetni. (Nagy, 2009)

Suvadás

Suvadásnak nevezzük általában azt a felszínmozgást, amikor a rézsús felszínű talajtömeg egy része önsúlyának és a víz áramlásának hatására görbe felület mentén lefelé és kifelé mozog. A mozgás viszonylag gyors, az elmozduló tömegnek határozott kerülete van. Az eredeti térszín jellegzetes „S” alakot vesz fel, az alsó részen a suvadás kitüremkedik az eredeti felületből. Számos oka lehet, minden esetben egyedi vizsgálatra van szükség. Általában több kedvezőtlen körülmény egyidejű hatására vezethető vissza: ezek egy része meglévő adottság, másik része a károsodást közvetlenül kiváltó tényező. Meglévő adottságra példák a következők. Talajmechanikai adottságok, nem kellően lapos mentett oldali rézsűhajlás, a mentett oldalon tározódó víznek az áztató hatása a mentett oldali töltéslábnál, helyenként a később épített erősítés és az eredeti töltés nem megfelelő, laza összeépítése következtében kialakuló alacsony nyírószilárdságú kontakt réteg, a töltés inhomogenitása miatti helyi anomáliák. Kiváltó tényezők közül is több van, közvetlenül előidéző tényező egyértelműen a hosszan tartó és magas vízállás, és annak következtében meginduló szivárgás. (Nagy, 2007) Védekezési módok közé tartozik a terhelés csökkentése, az ellenállások növelése (földes zsákok alkalmazása a vízoldalon, vízoldali szádfal, bordás megtámasztás), a csúszólap leterhelése, ballonok alkalmazása. (Nagy, 2009) A Hasznosi-tározónál 2010-ben az átnedvesedés hatására suvadás is bekövetkezett, ez látható a 2. képen. A 3. kép pedig a védekezést mutatja.



2. kép. Suvadás a Hasznosi-tározónál 2010-ben. Forrás: Takács Attila



3. kép. Védekezés a suvadás ellen. Forrás: Takács Attila

Hidraulikus talajtörés, buzgár

Buzgárnak nevezzük azt az árvízi jelenséget, amikor a mentett oldalon víz tör fel, és a vízfeltörés szemcsés anyag kimosódásával jár. A buzgár kialakulásának oka az, hogy a vízoldalról átadódó hidrosztatikus nyomás nagyobb, mint amekkora mellett még a mentett oldal állékony. A mentett oldali fedőréteg szemcséinek súlya és összetartó ereje (kohéziója) elégtelenné válik a felfelé irányuló víznyomás ellensúlyozásához. Védekezésnél nagyon fontos, hogy a buzgárt nem szabad elfojtani, a víz kivezetésének helyét eltömni, bedugaszolni. Ha a buzgárt elfojtjuk, új helyen tör elő. Ehelyett ellennyomó medencét, leterhelést kell készíteni. (Nagy, 2009) Itt a Hasznosi-tározónál a talajmechanikai adottságok kizárják a buzgár kialakulását.

Hullámozás hatása

Nagyobb vízfelületen már gyenge szél hatására is hullámozás kezdődik. A hullámozó víz elmosó, eróziós hatását elhabolásnak nevezzük. A hullámok romboló hatása a víz periodikus mozgása miatt alakul ki. Minden hullámnál víznyomás, majd szívás keletkezik a vízzel érintkező talaj felületén és közvetlenül a vízfelszín alatt. Ugyanakkor a felfutó-lefutó víz áztatja, erodálja a rézsűt. Az elhabolás annál nagyobb, minél magasabb hullámok alakulnak ki. A hullám magasságát a következő tényezők befolyásolják: a szél sebessége, a széliránynak az árvízvédelmi gáthoz viszonyított iránya, a vízmélység nagysága, aktív véderdő jelenléte és az árvízvédelmi töltés vízoldali rézsűjének lejtése, anyaga, állapota. (Nagy, 2009)

Egyedi helyek

A falaknál, partfalaknál, parapet falaknál, műtárgyaknál, hidaknál, egyéb keresztezéseknél, koronán lévő burkolt útnál is kell védekezni árvíz esetén. (Nagy, 2009) A Hasznosi-tározó vízkivételi tornya nem a töltésbe van beépítve, vészárasztó nincs, így ezzel nem kell különösebben foglalkozni.

4.4.2. Szükséges adatok

Az ármentesítés legfontosabb eleme az árvízvédelmi gát, ezért a legfontosabb információk a gát anyaga és szerkezete. Az árvízvédelmi gátak szerkezetük alapján a következő csoportokba oszthatók. Homogén a gát, ha a teljes keresztmetszvény ugyanazzal az építési móddal és ugyanabból az anyagból, egyszeri építkezéssel készült el. Zónás gátról beszélünk, ha a teljes keresztmetszvény több ütemben és/vagy több építési módszerrel készült, alapvetően ugyanabból a talajból. Szerkezetesnek nevezzük a gátat, ha a gátba különböző szerkezeti elemeket (szivárgó, őrfal, stb) építettek be. (Nagy, 2009)

A talaj, mint teherviselő és mint építőanyag homogenitását tekintve a legváltozékonyabb anyag. A talajjellemzők mint statisztikai értékek vizsgálatával nagyon sok kutató foglalkozott, úgymint a talajjellemzők eloszlása, variációs tényezője. (Nagy, 2005)

A XX. század közepe előtt épült gátaknál a megfelelő általajnál vagy a töltésépítési anyagnál fontosabb volt a gát vonalazásánál a birtokhatárok helyzete. Így az árvízvédelmi gát sok esetben kedvezőtlen általaj adottságú területeket keresztez, a későbbi töltéserősítések pedig megtartották a korábbi nyomvonalat. Tekintettel arra, hogy a földmű tervezéséhez, illetve építéséhez általaj vizsgálat és talajmechanikai szakvélemény csak kb. 35-40 éve készül, csak az utóbbi időkben derült ki, hogy a földmű eredeti vonalozása több kedvezőtlen adottságú területet keresztez. (Nagy, 2009)

Előfordult, hogy nem megfelelő anyagot építettek be. Itt elsősorban a szikes, diszperz agyagokra és a kötött, magas plaszticitású (zsiros tapintású) agyag talajok beépítésére kell gondolni. A szikes talajok árvízvédelmi gátba építését már a XIX. században is tiltották az erózió veszély miatt, azonban, ha a sziksó nem jelent meg a felszínen, a szikes talajt minősíteni nem tudták. (Nagy, 2009)

Mindezek miatt elengedhetetlen, hogy megtudjuk, milyen talaj alkotja a gátat. Tehát azonosítani kell a talajokat, és meghatározni azon tulajdonságaikat, melyek az állékonyságban és a teherbírásban szerepet játszanak. Talajfeltárást kell végezni, ami történhet közvetlen mintavétellel, fúrással vagy kutatógödörrel, vagy közvetett helyszíni vizsgálattal, például geofizikai mérésekkel és szondázásokkal.

Szemcsés talajok azonosítása szemeloszlás alapján történik, szitalással és hidrometrálással. A folyamat eredménye a szemeloszlási görbe, valamint meghatározhatjuk a mértékadó szemcseátmérőt, a hatékony szemcseátmérőt, az egyenlőtlenségi mutatót és a görbületi mutatót. Kötött talajokat konzisztenciahatáraik, a plasztikus határ és a folyási határ alapján tudunk azonosítani. A plasztikus határ a sodrási vizsgálattal határozható meg, a folyási határ ejtőkúpos vizsgálattal vagy Casagrande vizsgálattal. A konzisztenciahatárok ismeretében számítható a plaszticitási index és a konzisztencia index.

Víztartalom

Gyakori volt az agyagok nem megfelelő víztartalommal történő beépítése. A töltésépítési munkák az aratás befejeztével kezdődtek, az őszi esők gyakran áztatták el az anyagnyerő helyet és az épülő töltést is. A töltésépítési anyagot leggyakrabban a vízőldali töltéslábból vették, ahol rendszerint a legnedvesebb a talaj a gát környékén. Ennek megfelelően sokszor a kívánatosnál

magasabb víztartalommal épült az árvízvédelmi gát. (Nagy, 2009) A víztartalom meghatározásához meg kell mérni a talajminta nedves tömegét, majd ki kell szárítani, és ismét megmérni a tömeget, ami ezúttal a száraz tömeg lesz.

Áteresztőképességi együttható

Az áteresztőképességi együttható meghatározható laboratóriumban, szemcsés talajok esetén állandó, kötött talajok esetén változó víznyomás mellett, helyszínen próbaszivattyúzással vagy nyeletéses vizsgálattal, illetve tapasztalati adatok segítségével, tapasztalati értékek és képletek útján.

A gát tömörítésének módja

A tömörítés nagyban befolyásolja a talajok tulajdonságait. Javítja az alakváltozási tulajdonságokat, növeli a nyírószilárdságot és csökkenti az áteresztőképességet. A földművek tömörítésére vonatkozó szabályozások a XX. század 20-as éveire vezethetők vissza nemzetközi vonatkozásban. Bár már a XIX. században is több helyen előírták a hazai árvízvédelmi gátak építésénél a „furfóval” való tömörítést, ez nem volt általános, és megdrágította az építést. (Nagy, 2009) Ezért elengedhetetlen annak az ismerete, hogy milyen módszerrel és mennyire tömörítették építés során a talajt. A tömörség jellemzésére a tömörségi fok és a tömörségi index szolgálnak.

Fontos jellemző még, hogy a gát rendelkezik-e szűrővel vagy drénnel. Szűrőnek nevezünk minden intézkedést, ami a belső erózió növekedésének megelőzésére irányul. A drén magában foglal minden tervezési részletet, ami az alvízi részen belüli pórus nyomás csökkentésére irányul. (Nagy, 2005)

4.5. A szakadás valószínűsége

Ebben a fejezetben először röviden összefoglalom, hogy a források, melyekből dolgoztam, milyen megállapításokat tesznek a tönkremeneteli valószínűségekre. Utána leírom, hogy az eddigi munkám során miket tapasztaltam, és végül a modellezéshez milyen valószínűségű forgatókönyveket használok.

Rosza Péter a Romániában használt összevont kockázati tényezőt (DAR) alkalmazta magyarországi gátakra, köztük a Hasznosi-tározóra is. A Hasznosi-tározó esetében $DAR = 0,88$, ami a rendkívüli, de még elfogadható kockázat kategóriájában van. Ennek a magas értéknek az oka a figyelő-riasztó rendszer hiánya, hogy a tározó nem rendelkezik nyílt felszínű vészárasztóval, illetve kis mértékben a műtárgy állapota is befolyásolja. Az eredményt mindenképpen figyelemfelkeltőnek gondolja, ugyanis sem az ő szubjektív megítélése, sem az üzemeltetők, sem a térségben lakók nem érzik a kockázatnak ezt a mértékét. (Rosza, 2006)

Nagy (2005) összefoglalja különböző szerzők eredményeit, akik gátszakadások károsodásának megoszlását vizsgálták, illetve tönkremeneteli valószínűségeket határoz meg egy keresztmetszvényben.

Eero Slunga 2001-es tanulmányában több mint 17 200 gát tönkremeneteléből von le statisztikai alapon következtetéseket. A tönkremeneteleket két csoportba osztotta: normál körülmények és rendkívüli körülmények között bekövetkező tönkremenetel. Normál körülmények között a biztonság alapvetően az emberi viselkedésen múlik, rendkívüli események hatására bekövetkező tönkremenetel valószínűsége pedig a rendkívüli körülmények bekövetkezésének valószínűségén alapszik. A tanulmányban leírja, hogy az egyes tönkremeneteli módok a gátak hány százalékának okozták a tönkremenetelét, illetve valószínűségeket is megfogalmaz. Azoknál a gátaknál, ahol van a vízfolyás felső részén is gát, 10^{-4} vagy több az éves valószínűsége annak, hogy a felső gát tönkremenetele esetén érkező árhullám miatt tönkremegy a gát. Földrengés hatására bekövetkező tönkremenetel valószínűsége a legtöbb helyen 10^{-6} , szeizmikus területen azonban 10^{-3} . A háborúból származó éves tönkremenetel valószínűsége 10^{-2} és 10^{-3} között alakul, azaz 100 - 1000 évente következik be. Normál körülmények között bekövetkező tönkremenetelek közül az öregedéshez fogalmaz meg valószínűséget. 1950 előtt $2 \cdot 10^{-4}$ valószínűsége volt, hogy emiatt megy tönkre a gát, ma ez az érték $2 \cdot 10^{-5}$.

Eddleston és Carter (2015) négy kockázatelemzési módszert hasonlítanak össze, a DEFRA-t, a Stanford-i Egyetem módszerét, az Utah-i Egyetem módszerét és az Új Dél-Wales-i Egyetem módszerét. 0-tól 10-ig pontozzák a gátakat aszerint, hogy milyen állapotban vannak, 0 a legjobb állapot, 10 a legrosszabb, majd meghatározzák a tönkremenetel valószínűségét. A dokumentum 1. ábráján ábrázolják az éves tönkremeneteli valószínűséget a jelenlegi állapot pontszáma függvényében. A Hasznosi-tározó 2010-ben megcsúszott, emiatt már nem tekinthető 0 pontosnak, azaz nem a legjobb állapotban van, különösen nagy problémák azonban nincsenek vele. Ennek következtében a gát állapotát a 2011-es felújítást követően 3-5 pont körülire feltételeztem. A dokumentum ábrája alapján ehhez a tartományhoz tartozó éves tönkremenetel valószínűsége 10^{-6} és $5 \cdot 10^{-3}$ közé esik, figyelembe véve az összes módszerrel adódó valószínűségeket. Ha a gát állapota egy egységet romlik, akkor az éves tönkremenetel valószínűsége a Stanford-i Egyetem módszerével, a legoptimistább módszerrel kétszeresére nő,

az Új Dél-Wales-i Egyetem módszerével, ami a skála másik végletén helyezkedik el, tízszeresére változik.

Eddigi munkám tapasztalata az, hogy a különböző valószínűségű csapadékok nem okoznak lényegesen nagy eltérést a gátszakadás bekövetkezésének valószínűségében. Az alvízi völgyben az esetleges gátszakadással bekövetkező árhullám levonulási módja jobban függ a karakterisztikus eróziós sebességtől, mint a lehulló csapadék mennyiségétől, visszatérési idejétől. Emiatt a nyolc forgatókönyv helyett, melyekkel eddig dolgoztam, és amelyek a csapadékok visszatérési idején alapultak, más alapokon nyugvó két új forgatókönyvet vezetek be.

Az első forgatókönyvnél feltételezem, hogy a gát átszakadása a csapadék valószínűségétől függetlenül létrejön, 10^{-4} valószínűséggel. Ez egy önkényes választás, mert ezt a valószínűséget a talajmechanikai jellemzők alapján kellene meghatározni. Erre azonban még nincsenek eszközeim, és nem tudom elvégezni ezt a feladatot. Emiatt az előző fejezetben csak összegyűjtöttem a lehetséges tönkremeneteli módokat, és a jellemzőket, amiket meg kellene határozni a számoláshoz, most pedig tetszőlegesen felveszem ezt a valószínűséget 10^{-4} értéknek. A csapadék és az átszakadás valószínűsége között ebben a forgatókönyvben nincs kapcsolat. Az első forgatókönyv bekövetkezésének valószínűsége tehát a következő:

$$p_1 = p_{\text{szakadás}} = 10^{-4}.$$

A második forgatókönyv során azt feltételezem, hogy egy tízezer évente bekövetkező, tehát 10^{-4} valószínűségű csapadék hatására a tározóban lévő víz 100%-os valószínűséggel meghágja és átszakítja a gátat. Azért van szükség a tízezer éves csapadéokra, mert a korábbi számítások során bebizonyosodott, hogy az ezeréves csapadék hatására sem szakad át a gát. A második forgatókönyv bekövetkezésének valószínűsége tehát a következő:

$$p_2 = p_{\text{csapadék}} \cdot p_{\text{szakadás}} = 10^{-4} \cdot 1 = 10^{-4}.$$

A tízezer éves csapadék számításához extrapolálom az intenzitáshoz szükséges tényezőt és számolom a tározó telítődését, ugyanúgy, ahogy korábban, a gyakoribb csapadékok esetében. Az intenzitászámoláshoz szükséges 'a' tényező értéke 415 mm/h-nak adódott, az intenzitás 81 mm/h-nak. A maximális vízhozam $121 \text{ m}^3/\text{s}$ nagyságú.

Így a két forgatókönyv valószínűsége azonosra adódott. Mindkét forgatókönyvet 3-3 alváltozatra osztom a karakterisztikus eróziós sebesség szerint. Korábban a Hasznosi-gátra a közepes karakterisztikus eróziós sebességet $0,07 \text{ m/s}$ -ra vettem fel, további egy alacsony, $0,04 \text{ m/s}$, és egy magas, $0,1 \text{ m/s}$ értéket vizsgáltam. Most Macchione 2008-as tanulmányának 4. táblázatában szereplő eróziós sebességekkel dolgozom. 15 darab gáthoz rendel karakterisztikus eróziós sebességeket, ezek közül a legkisebb a $0,0084 \text{ m/s}$, a hetedik, középső a $0,0600 \text{ m/s}$, a legnagyobb a $0,1022 \text{ m/s}$. Mindkét forgatókönyvnek három-három alváltozata van ezen eróziós sebességek alapján:

- a) alváltozat: a karakterisztikus eróziós sebesség maximum $0,0084 \text{ m/s}$;
- b) alváltozat: a karakterisztikus eróziós sebesség maximum $0,0600 \text{ m/s}$;
- c) alváltozat: a karakterisztikus eróziós sebesség maximum $0,1022 \text{ m/s}$.

Annak a valószínűsége, hogy a 15 eróziós sebesség közül egyet kiválasztva, a kiválasztott érték kisebb vagy egyenlő lesz, mint a $0,0084 \text{ m/s}$, a $0,0600 \text{ m/s}$ és a $0,1022 \text{ m/s}$, azaz az egyes alváltozatok feltételes valószínűsége sorrendben a következő: $0,067$, $0,533$ és $1,000$.

A forgatókönyvek alváltozatainak teljes valószínűségét a 6. táblázat tartalmazza.

		csapadék valószínűsége	szakadás valószínűsége	alváltozat valószínűsége	teljes valószínűség
1. forgatókönyv	a) alváltozat	-	10^{-4}	0,067	$6,7 \cdot 10^{-6}$
	b) alváltozat	-	10^{-4}	0,533	$5,33 \cdot 10^{-5}$
	c) alváltozat	-	10^{-4}	1	10^{-4}
2. forgatókönyv	a) alváltozat	10^{-4}	1	0,067	$6,7 \cdot 10^{-6}$
	b) alváltozat	10^{-4}	1	0,533	$5,33 \cdot 10^{-5}$
	c) alváltozat	10^{-4}	1	1	10^{-4}

6. táblázat. A forgatókönyvek és alváltozataik valószínűsége.

A legnagyobb valószínűsége a c) változatoknak van, a legkisebb pedig az a) változatoknak. A csapadék és a szakadás együttes valószínűsége a két forgatókönyvben egyenlő, a teljes valószínűségek tehát az alváltozatok valószínűségeitől, azaz a karakterisztikus eróziós sebességtől függenek.

Végül ez az a hat alváltozat, amit a HEC-RAS programban lefuttatok, és modellezem, hogy az alvízi völgyet hogyan önti el a víz.

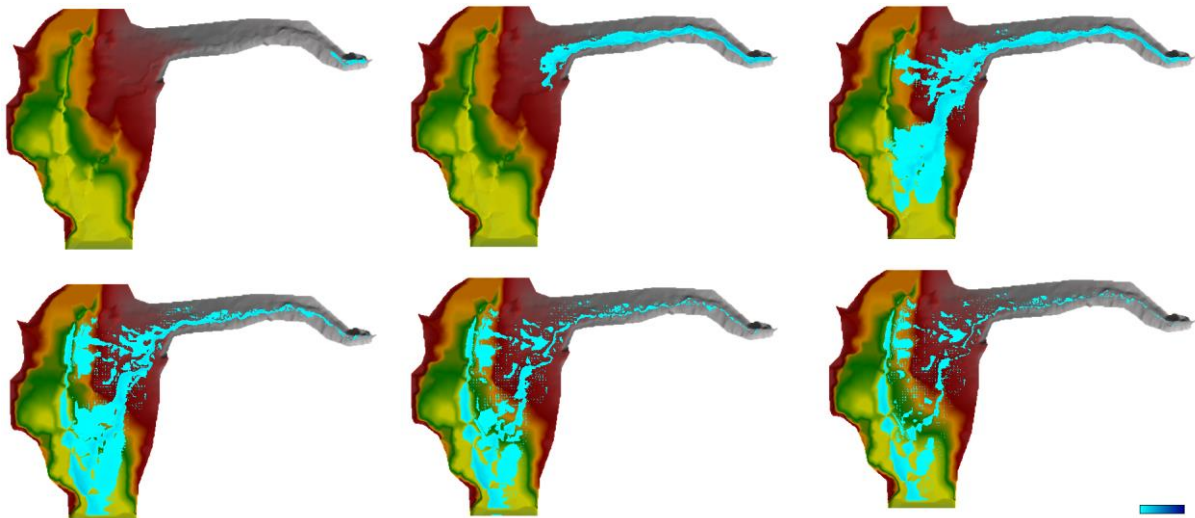
4.6. Terepi lefolyás

Az előző fejezetben leírt két forgatókönyv három-három alváltozatát modelleztem a HEC-RAS program segítségével. A HEC-RAS egy egydimenziós hidrodinamikai modellező szoftver, amely a St-Venant egyenleteket oldja meg a véges differencia módszerrel.

A szimuláció a szakadás pillanatától a tározó kiürülésének pillanatáig tart, amíg a szakadáson kifolyik a tározóban lévő összes víz. A szakadási szelvényen kifolyó víz mennyiségét a tízezer éves csapadékra ugyanazzal a már leírt módszerrel végeztem, mint amivel a többi csapadék esetén is számoltam. Az első forgatókönyv esetében a csapadék valószínűsége nem számít, a modellben a 200 éves csapadékkal dolgoztam.

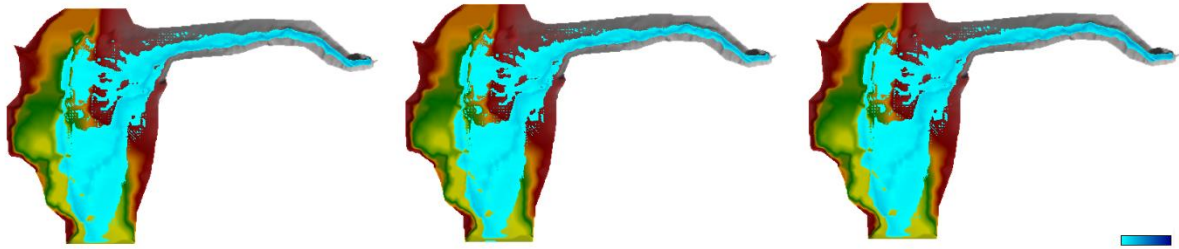
Az alvízi völgy befolyási szelvénye a gát volt, a kifolyási szelvény egy valóságban nem létező „medencébe” vezeti bele a vizet. Egyfajta „csúszda”, amin keresztül a víz a modell által stabilan számítható módon eltávozik a völgyből. Ez a szelvény olyan távol volt a minket érdeklő Pásztó városától, hogy ez a peremkezelés nem befolyásolta érdemben a veszélytérképeket. A kifolyási peremfeltétel normálmélység volt a Zagyva-völgy 1‰-re felvett esésével számítva.

A szimuláció egy önkényesen felvett időpontban, 2017. január 1-jén, 00:00-kor kezdődik és 2 óra 25 percig tart, amíg a tározóban lévő összes víz kifolyik a szakadáson keresztül.

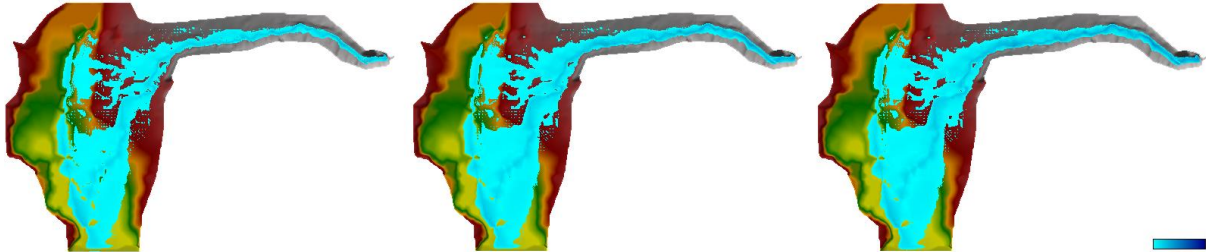


20. ábra. A vízmélység pillanatnyi eloszlása a 2. forgatókönyv a) változata 5, 30, 60, 90, 120, 145 perc eltelte után.

A modell kék színnel ábrázolja a vizet, és minél sötétebb, annál mélyebb. A 20. ábra a 2. forgatókönyv a) változatát mutatja 5, 30, 60, 90, 120 és 145 perc eltelte után. A 21. ábra az 1. forgatókönyv, a 22. ábra a 2. forgatókönyv három alváltozatát mutatja a maximális elöntés pillanatában. Értelemszerűen a minimális elöntés pillanata minden esetben a szimuláció kezdete, amikor még nem szakadt át a gát. Látható az ábrákon, hogy a víz mélysége a Kövicses-patak medrében a legnagyobb.



21. ábra. Az 1. forgatókönyv a), b), c) alváltozatai a maximális elöntés pillanatában.



22. ábra. A 2. forgatókönyv a), b), c) alváltozatai a maximális elöntés pillanatában.

A két forgatókönyv azonos betűjelű alváltozatainak azonos a bekövetkezési valószínűsége, azonban a 2. forgatókönyvben az elöntés mértéke, az okozott károk nagyobbak, hiszen egy ritkább csapadék nagyobb vízhozama zúdul ki a tározóból. A 21. ábrán és a 22. ábrán a vízmélységek közötti eltérésben ez kevésbé mutatkozik meg, inkább azt lehet látni, hogy nagyobb területet borít víz. Tehát hiába azonos a bekövetkezés valószínűsége, a 2. forgatókönyv kockázata nagyobb. A pontosabb számszerűsítéshez az okozott károk mértékének ismeretére lenne szükség.

A 2. forgatókönyv szerint víz alá kerülő területeket olyan térképen is ábrázoltam, melyen láthatók az utcák és az épületek. Ezt mutatja a 23. ábra, a 24. ábra pedig a 23. ábra egy részletét mutatja kinagyítva. Így pontosan megmondható, hogy mely házakat mennyire veszélyezteti az árvíz. Az a) változat, tehát a legkisebb valószínűséggel víz alá kerülő részek fehér színűek, a b) világoskék, sötét kézzel a c) változat, vagyis a legnagyobb valószínűséggel elöntött területek láthatók. Jól látható, hogy vannak olyan területek, amelyeket csak kisebb valószínűséggel önt el víz.

5. Összefoglalás

Munkám során először a vízgyűjtő terület csapadék- és lefolyásviszonyaival foglalkoztam. Számoltam az összegyülekezési időket, különböző visszatérési idejű csapadékok intenzitását, majd árhullámképeket és maximális vízhozamokat határoztam meg a vízgyűjtőkarakterisztika és a racionális módszer segítségével. Meghatároztam a tározó jelleggörbáját, vizsgáltam a vízszint alakulását a tározóban, majd szakadási szelvényeket számoltam. Felsoroltam a lehetséges geotechnikai tönkremeneteli módokat és a szükséges adatigényt. Befejezőként a HEC-RAS program segítségével modelleztem az alvízi völgy elöntését.

Kutatásom egyik legfontosabb tapasztalata, hogy a Hasznosi-tározó esetében a különböző visszatérési idejű csapadékok valószínűsége az átszakadás valószínűségének szempontjából másodlagos. Ennél fontosabb lehet a geotechnikai tönkremenetel valószínűsége, amelyet sajnos nem tudtam meghatározni, mert hiányoztak hozzá az ismereteim. Az is fontos eredmény, hogy átszakadás esetén a levonuló árhullámot nagyban befolyásolja a gátszakadás eróziós sebessége. Lehetőségnek kínálkozik, hogy próbálják meg az eróziós sebesség értékét meghatározni, valamint olyan körülményeket kialakítani, amelyekkel, ha bekövetkezik az átszakadás, azt megakadályozni ugyan nem tudják, de a levonuló árhullámot kedvezően befolyásolni tudják, hogy az okozott károk mértéke a lehető legkisebb legyen. 2010-ben a kolontári katasztrófa kármentése során hasonló megfontolásból védtöltéseket építettek sürgősséggel a zagytározók alatt, hogy egy további gátszakadás súlyosságát mérsékeljék.

Végül kitérek arra, hogy sikerült-e egy olyan gyors és egyszerű módszert kifejleszteni, mellyel az ország összes tározójára meghatározható egy előzetes átszakadási valószínűség. A csapadékszámítás jelentőségét a teljes folyamatban lehet, hogy hasznos lenne redukálni. Nem tudhatom, hogy a csapadék mennyiségétől való vártnál kisebb függés csak a Hasznosi-tározó egy különlegessége, vagy általánosabban is helyt álló tény. Ehhez más gátak és tározók vízgyűjtőjének, csapadék- és lefolyási viszonyainak vizsgálatára lenne szükség. Fontos, hogy a geotechnikai rész is megfelelően ki legyen dolgozva. Szintén lényeges az, hogy előfordulhat olyan helyzet, amikor egy előzetesen kisebb jelentőségűnek feltételezett tényezőről kiderül, hogy valójában nagy mértékben befolyásolja az eredményeket. Erre a kutatás közben is figyelni és reagálni kell, valamint, ha ténylegesen készül egy ilyen módszer, akkor a módszer kidolgozásánál minden részletnek és befolyásoló tényezőnek megfelelő figyelmet kell szentelni.

A végső következtetésem az, hogy az általam használt módszer pontosabb, precízebb és széleskörűbb kidolgozás után alkalmas lehet a feladatra, hogy használatával az ország összes tározójára meghatározható legyen egy előzetes átszakadási valószínűség.

6. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Krámer Tamásnak (egyetemi docens, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék) a rengeteg segítséget és a felmerülő kérdések megválaszolását. Köszönet illeti Dr. Takács Attilát (adjunktus, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék) a geotechnikai részben nyújtott segítségéért és a fényképeiért. Dr. Koris Kálmánnak (címzetes docens, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék) köszönöm, hogy rendelkezésemre bocsájtotta a kutatási jelentéseit. Valamint meg kell említenem Lükő Gabriellát, Wagner Flórát és Szilágyi Mariannt, akik nélkül nem kezdtem volna bele a dolgozatba.

7. Ábra- és táblázatjegyzék

1. ábra. A Kövicses-patak vízgyűjtő területe.....	6
2. ábra. A részvízgyűjtők AutoCAD-ben.....	9
3. ábra. A csapadékintenzitás meghatározásához szükséges érték extrapolálása.....	10
4. ábra. A vízgyűjtőkarakterisztika és árhullámképek diagramon.....	12
5. ábra. A tározó térfogata a vízszint függvényében.....	15
6. ábra. A tározó vízszintje a térfogat függvényében.....	15
7. ábra. A 100 éves csapadék hatására a tározóba be- és kifolyó vízmennyiségek a számítás egyperces időközére vonatkoztatva, szakadás nélkül.....	17
8. ábra. A tározó vízszintjének alakulása 100 éves csapadék hatására, szakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva	17
9. ábra. A tározóban lévő víz térfogatának alakulása 100 éves csapadék hatására, szakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva	18
10. ábra. A különböző visszatérési idejű csapadékok hatására kialakuló vízszintek, átszakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva	19
11. ábra. A tározott víztérfogatok alakulása a különböző visszatérési idejű csapadékok hatására, átszakadás nélkül, egyperces időközre vonatkoztatva.....	19
12. ábra. A 100 éves csapadék hatására a tározóba be- és kifolyó vízmennyiségek az 1 perces számítási időközre vonatkoztatva, 0,1 m/s-os karakterisztikus eróziós sebességű szakadással.....	21
13. ábra. A szakadáson 1 perc alatt kifolyó vízmennyiségek 100 éves csapadéokra, a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett.....	21
14. ábra. A tározóban lévő víz térfogatának alakulása 100 éves csapadékra (1 perces időközre vetítve), a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett.....	22
15. ábra. A vízszint alakulása 100 éves csapadékra, a különböző karakterisztikus eróziós sebességek mellett, egyperces időközre vonatkoztatva.....	22
16. ábra. A tározóban lévő víz térfogatának alakulása a nyolc csapadékra (1 perces időközre vetítve), 0,04 m/s eróziós sebesség mellett.....	23
17. ábra. A 16. ábra egy részlete.....	23
18. ábra. A vízszint változása a tározóban mind a nyolc csapadékra, 0,04 m/s eróziós sebesség hatására.....	24
19. ábra. A 18. ábra részlete.....	24
20. ábra. A vízmélység pillanatnyi eloszlása a 2. forgatókönyv a) változata 5, 30, 60, 90, 120, 145 perc eltelte után	34
21. ábra. Az 1. forgatókönyv a), b), c) alváltozatai a maximális elöntés pillanatában.....	35
22. ábra. A 2. forgatókönyv a), b), c) alváltozatai a maximális elöntés pillanatában.....	35
23. ábra. A 2. forgatókönyv szerint víz alá kerülő utcák, épületek.....	36
24. ábra. A 23. ábra egy részlete kinagyítva.....	36
1. kép. A Hasznosi-tározó vízkivételi tornya 2011-ben.....	8
2. kép. Suvadás a Hasznosi-tározónál 2010-ben.....	27
3. kép. Védekezés a suvadás ellen.....	27

1. táblázat. A vízgyűjtő terület adatai.....	9
2. táblázat. A részvízgyűjtők adatai.....	10
3. táblázat. A különböző visszatérési idejű csapadékok adatai.....	11
4. táblázat. Vízgyűjtőkarakterisztika és árhullámképek a 20, 100 és 1000 éves visszatérési idejű csapadékokra.....	12
5. táblázat. A maximális vízhozamok és a teljes vízhozamok minden csapadékra.....	12
6. táblázat. A forgatókönyvek és alváltozataik valószínűsége.....	33

8. Irodalomjegyzék

Országos Vízügyi Főigazgatóság: Árvízszámítási segédlet a hazai hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők árvízhozamainak meghatározásához. Budapest, 2001

Országos Vízügyi Hivatal: Vízügyi Műszaki Segédlet - rövid idejű (10-180 perces) csapadékok meghatározása (VMS 201/1 – 77). 1978. február

Országos Vízügyi Hivatal: Vízügyi Műszaki Segédlet - a 3-24 óra időtartamú csapadékok meghatározása (VMS 201/2 – 78). 1979. november

Völgyzárógátak tönkremenetele

Rosza P. (Viziterv Consult Kft.): Dombvidéki tározók összevont kockázati tényezője. 2006

Kovács P. - Varga B. (Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság): A Hasznosi-tározó új előürítő zsilipjének próbaüzeme. 2012

Szitka B. (ÉRV), Bagyinszki Gy. (VTK Innosystem), Szalay M. (Szalay és Papp Mérnöki Iroda): A Hasznosi-tározó és védőterületének hidrológiai felülvizsgálata. 2007

Gresz I., Nagy I. M., Karda J. (VITUKI Consult Rt): Átnedvesedés hatására bekövetkezett lejtőcsúszás. 1993

Krámer T., Maren Niemeyer, Józsa J.: A Hasznosi duzzasztógát alatti árvízveszély modellvizsgálata (kutatási jelentés). Budapest, 2011.

Kontur I., Koris K., Winter J.: Hidrológiai számítások. Linograf Kft. 2003.

Koris K.: A Hasznosi tározó árvízhidrológiai vizsgálata (kutatási jelentés). Budapest, 2010

Koris K.: A Kövicses patak árvízi hidrológiai vizsgálata (kutatási jelentés). Budapest, 2011

Dr. Koris Kálmán: A Felső-Zagyva és vízrendszerének hidrológiai tanulmánya (kutatási jelentés). Budapest, 2017

F. Macchione: Model for Predicting Floods due to Earthen Dam Breaching. I: Formulation and Evaluation. 2008

G. De Lorenzo, F. Macchione: Simulation of floods due to rockfill dam breaching

Nagy L.: Árvízi kockázat az árvízvédelmi gát tönkremenetele alapján (PhD. értekezés). Budapest, 2005

Nagy L.: Védekezés az árvízvédelmi gátak suvadása ellen. Budapest, 2007

Nagy L.: Árvízvédekezés a településeken. Budapest, 2009

M. Eddleston, I. C. Carter: Comparison of methods used to determine the probability of failure due to internal erosion in embankment dams. 2015

Eero Slunga: Concept and bases of risk analysis for dams - With an example application on Kyrkösjärvi dam. 2001