

Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Intézeti Tanszék

Árvízvédelmi töltések és gátak szivárgáshidraulikai modellezése SEEP2D modul alkalmazásával



Nyiri Gábor
Geokörnyezetmérnöki szakirány
Konzulens: Zákányi Balázs, egyetemi tanársegéd
2011. november 3.

Miskolc, 2011.

Eredetiségi nyilatkozat

Alulírott Nyiri Gábor, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2011. november 4.

.....

a hallgató aláírása

Konzulensi nyilatkozat

Alulírott Zákányi Balázs, a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének egyetemi tanársegédje a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2011. november 4.

.....

a konzulens aláírása

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	- 1 -
2. A HAZAI ÁRVÍZVÉDELEM RÖVID TÖRTÉNETE	- 2 -
3. MAGYARORSZÁG ÁRVÍZVÉDELME	- 4 -
3.1. <i>A HELYI VÍZKÁR KIALAKULÁSA</i>	<i>- 5 -</i>
3.2. <i>AZ ÁRVÍZVÉDELMI TÖLTÉSEK SZERKEZETE</i>	<i>- 7 -</i>
3.3. <i>SZIVÁRGÁS A GÁTTESTEN KERESZTÜL</i>	<i>- 7 -</i>
4. A GÁTTESTEN ÁTSZIVÁRGÓ VÍZHOZAM SZÁMÍTÁSA MODELLEZÉSSSEL.....	- 9 -
4.1. <i>NUMERIKUS MEGOLDÁSOK</i>	<i>- 9 -</i>
4.1.1. <i>Véges differencia módszer.....</i>	<i>- 10 -</i>
4.1.2. <i>Végeselem módszer</i>	<i>- 10 -</i>
4.1.3. <i>A hálókiosztás elvei</i>	<i>- 11 -</i>
4.2. <i>A GROUNDWATER MODELLING SYSTEM 7.1-ES PROGRAM.....</i>	<i>- 11 -</i>
5. GÁTAK ÉS ALTALAJAINAK PARAMÉTEREI	- 14 -
6. A MODELLEZÉS EREDMÉNYEI.....	- 15 -
6.1. <i>TÖLTÉS VIZSGÁLATA CIGÁND TÉRSÉGÉBEN.....</i>	<i>- 16 -</i>
6.2. <i>TÖLTÉS VIZSGÁLATA RÉVLEÁNYVÁR TÉRSÉGÉBEN</i>	<i>- 19 -</i>
6.3. <i>TÖLTÉS VIZSGÁLATA HALÁSZHOMOK TÉRSÉGÉBEN</i>	<i>- 22 -</i>
6.4. <i>A LÁZBÉRCI VÖLGYZÁRÓGÁT VIZSGÁLATA</i>	<i>- 25 -</i>
7. A MODELLEZÉSI EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	- 28 -
7.1. <i>FAJLAGOS HOZAM ÉRTÉKEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA</i>	<i>- 28 -</i>
7.2. <i>A KILÉPÉSI HOSSZAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA</i>	<i>- 29 -</i>
8. A MODELLEZÉSI EREDMÉNYEK ÖSSZEGZÉSE	- 30 -
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	- 31 -
IRODALOMJEGYZÉK	- 32 -

1. Bevezetés

Hazánkban az egyre szélsőséesebb időjárási, és vízjárási adottságok miatt évszázadok óta küzdelem folyik a különböző vízkárok ellen. Évszázadok alatt lassan elhódítottuk a víztől a saját területét, ezzel az itt élő embereknek lakóhelyet, mezőgazdasági területet biztosítva. Magyarországon ezért a vízkárok elleni küzdelem létfontosságú. Az ország veszélyeztetettségét nagyban befolyásolja, hogy Magyarország egy medencefenék-állam. Ebből az okból kifolyólag a Kárpátokból meginduló árvizek az alföldi területeken torlódhatnak fel, vízkárokat okozva.

Sajóládi lakos lévén a 2010 nyarán bekövetkezett árvíz nagymértékben hozzájárult ahhoz, hogy tanulmányom során árvízvédelemmel foglalkozzak **(1. ábra)**. Azért tartom fontosnak a töltések folyamatos vizsgálatát, mert így, sokkal könnyebben elkerülhetőek a 2010-es árvízhez hasonló károk.



1. ábra: Árvíz Sajóládon (saját fotó).

Dolgozatomban az árvízvédelmi töltések, és azok altalajának hidraulikai modellezésével foglalkozom, egy véges elemes módszert alkalmazó program segítségével. A mai számítástechnikai eszközökkel könnyebben, és pontosabban meghatározhatjuk a víz viselkedését a gáttesten belül. Ehhez természetesen ismerni kell a gáttest geometriai paramétereit, valamint a gáttesten átáramló víz hidraulikai tulajdonságait.

2. A hazai árvízvédelem rövid története

A középkorban az árvíz nem volt nagymértékű vízkár-tényező. A folyók környezete még a természetes állapotot mutatta, széles, nagy árterek, nagy erdős területek, melyek az árvízi vízszintet nagymértékben csökkentették. A mezőgazdaság fejlődése magával vonta a folyók szabályozásának, az árterek lecsapolásának szükségességét. A XIX. században Európa szerte-így Magyarországon is- útjára indult az árvízi védekezés, ezzel a mai árvédelmi vonalak alapjait lerakva. A mezőgazdaság fejlődésével együtt haladt az infrastruktúra fejlődése is, mely a kárérzékenységet erőteljesen növelte. Ezt felismerve, szükségessé vált, nem csak a helyi jelentőségű árvízvédelem, hanem egyre nagyobb kiterjedésben, egész folyószakaszokra kiterjedő védvonal-kialakítás (*Vágási, 2007.*).

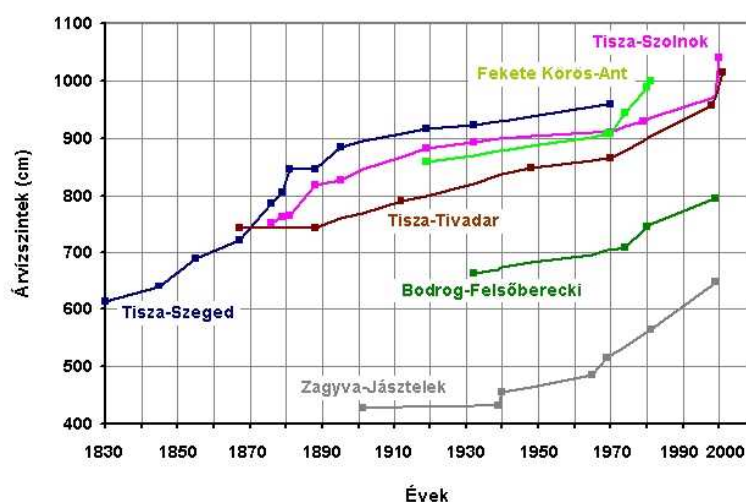
Hazánk egyik legnagyobb folyója a Tisza, melynek kicsiny eséséhez, rendkívül lassú folyásához Európa szerte, de még világszerte is ritkán találunk hasonlót. Eme nagy folyó tekintetében zajlottak a fő munkálatok, hisz a legnagyobb gondok itt voltak. Szabályozására, már évszázadokkal ezelőtt indultak kezdeményezések, azonban a Tisza-völgy problémáit, csak egy egész Tisza-völgyre kiterjedő vízrendezéssel lehet megoldani. Széchenyi és Vásárhelyi munkássága alapozta meg a Tisza védvonalának létrehozását, aminek köszönhetően az árvízzel elöntött területek a régebbiek töredékeire csökkentek. A Tisza szabályozását követően az árterek méretei és az erdős területek nagysága is lecsökkent. Ennek következménye, hogy a csapadék talajba való beszivárgásának gyorsasága megnő, illetve az erdős területek vízraktározó képessége nem érvényesül ezzel növelve az árvizek kialakulásának veszélyét. Mindezek által jelentős vízszintemelkedés jelentkezett a Tiszán és mellékfolyóin (**2. ábra**).

Magyarország az ezredforduló éveiben ismétlődő és nagy intenzitású árhullámok levonulásának volt szenvedő alanya. 1998-2001 között, négy rendkívüli árhullám vonult le a Tiszán, amelyek esetenként egy méterrel is meghaladták az addig mért legmagasabb

vízszintet. Az árvizek hatalmas károkat okoztak, a helyreállítás óriási pénzüsszegeket emésztett fel. A megoldást a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése nevű programban találták meg. Az elgondolás szerint kétfajta műszaki beavatkozás ad megoldást az árhullámok levezetésére.

Az egyik, hogy a lehető legrövidebb idő alatt vezessük le az árhullámot, a másik, hogy a káros víztöbbletet szabályozott körülmények között a folyó mentén újonnan épített árapasztó tározókba vezetik és az árhullám levonulása után engedik vissza a folyóba. Az árvízvédelem megoldása mellett a Tisza-völgy térségfejlesztését (infrastruktúra, környezet- és természetvédelem, ökoturizmus stb.) is magában foglalja a program, melynek céljai tehát:

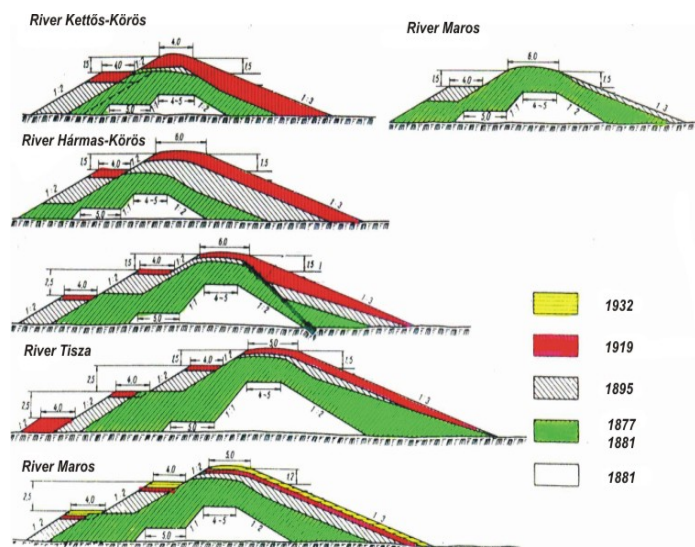
- Az árvízi biztonság növelése (Azaz hogy a mértékadó árvízszinteknél magasabb vízszintek a Tiszán ne alakuljanak ki.)
- A társadalmat és a gazdálkodást illetően a változások által a jelenleginél jobb és biztonságosabb létfeltételek és hosszú távú gazdálkodási lehetőségek megteremtése a Tisza mentén. Ezáltal növelni lehet a program által érintett terület népességmegtartó erejét.
- A természetvédelem érdekei miatt az érintett területen, amennyire lehetséges a természetes ártérre jellemző, a folyó medre s ártere közti állandó, kétirányú víz-mozgások helyreállítása (Kertész-Káldosi, 2008).



2. ábra: Árvízszintek növekedése (Zákányi, 2004.).

Természetesen az árvízszint emelkedések szükségessé tették az árvédelmi töltések magasságának és szélességének újabb és újabb növelését is, nemcsak a Tiszán, de hazánk

többi folyóján is **(3.ábra)**. Magyarországon az emberi beavatkozás, és a globális környezetváltozás hatására, továbbra is szembe kell néznünk az árvízszintek növekedésével.



3. ábra: A töltés geometriájának alakulása a Kőrösökön (Szlávik, 2000.).

3. Magyarország árvízvédelme

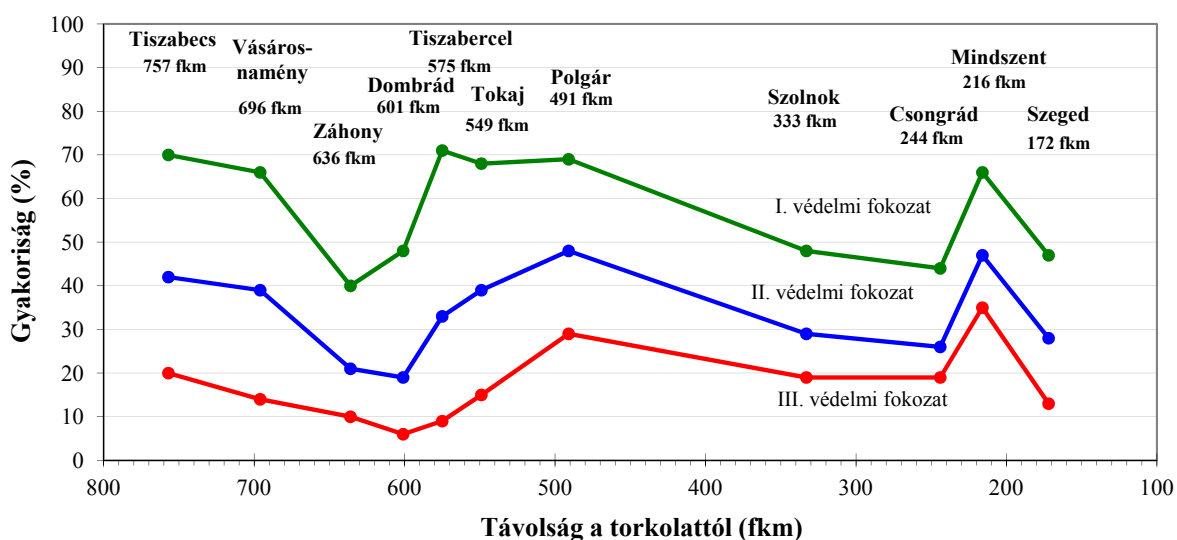
Magyarország területének 23%-a árvíz által veszélyeztetett terület, ezzel Európa legveszélyeztetettebb országa vagyunk. Az árvízről fenyegetett nemzeti gazdasági érték (út, vasút, ipar, mezőgazdaság) eléri (2003. évi árszinten) hatezer milliárd Ft-ot - amelyből a lakások értéke kb. 2,9 milliárd Ft - vagyis közel annyi, mint a központi költségvetés éves főösszege. A veszélyeztetett települések száma 646, ahol 2,5 millió ember él, a lakosság egynegyede. Ebből a töltések által védett terület, a mentesített ártér 20468 km², míg hozzávetőleg 800 km² a töltések által nem védett, rendszeresen elöntött nyílt ártér (Vágási, 2007.).

Árvízvédelmi töltések nélkül tehát hazánkban állandó veszélyeztetettség állna fenn, mely nagyban nehezítené az ország életét. A védvonalakat tehát ma már mintegy „természeti adottságként” kell kezelni, az azokon történő minden változtatás, illetve a művek fenntartásának felhagyása egyszersmind a terület jelenlegi használatban is (mezőgazdasági, településszerkezet, ipar, közlekedés stb.) változásokat fog okozni.

Hazánkban az év bármely szakaszában, bármely folyón előfordulhat árvíz. A statisztikai adatok alapján azt mondhatjuk, hogy:

- 2-3 évenként kis,
- 5-6 évente jelentős,
- 10-12 évente rendkívüli

árvízre számíthatunk.



4.ábra: Árvízszintek növekedése a Tiszán (Zákányi, 2006.).

A töltések árvíz elleni megbízhatóságát befolyásoló tényezők:

- a töltés altalajának állapota,
- a töltéstart magassága, szerkezete, és keresztmetszeti mérete, valamint
- a töltést keresztező műtárgyak helyzete.

3.1. A helyi vízkár kialakulása

Magyarország területének 55 %-a hegy- és dombvidéki, 45 %-a síkvidéki jellegű. A helyi vízkárok kialakulásának okait mindkét területen elsődlegesen a természeti adottságokban - domborzat, éghajlat, időjárás - kell keresni, másodlagosan az emberi beavatkozásokban vagy azok hiányában.

A téli-tavaszi helyi vízkárt kiváltó jelenségek:

- a téli időszak alatt felhalmozódott hó mennyiség gyors olvadása,
- tartós esőzés a gyors hóolvadás idején,

-
- a felszíni lefolyást gyorsító és a beszivárgást gátló talajfagy.

Súlyosbítja a helyzetet a különböző jelenségek egybeesése.

A nyári helyi vízkárt kiváltó jelenségek:

- a vízgyűjtő területre hulló átlagosnál nagyobb mennyiségű csapadék,
- a vízgyűjtő területre hulló rövid idejű, nagy intenzitású csapadék.

Mind a téli-tavaszi, mind a nyári évszakokban igen veszélyes a magas talajvízállás. A tartósan magas talajvízállás következtében a talajok vízbefogadó képessége jelentősen csökken, és így a felszínen lefolyó, kárt okozó víz mennyisége megnő.

A helyi vízkár kialakulását növelő tényezők:

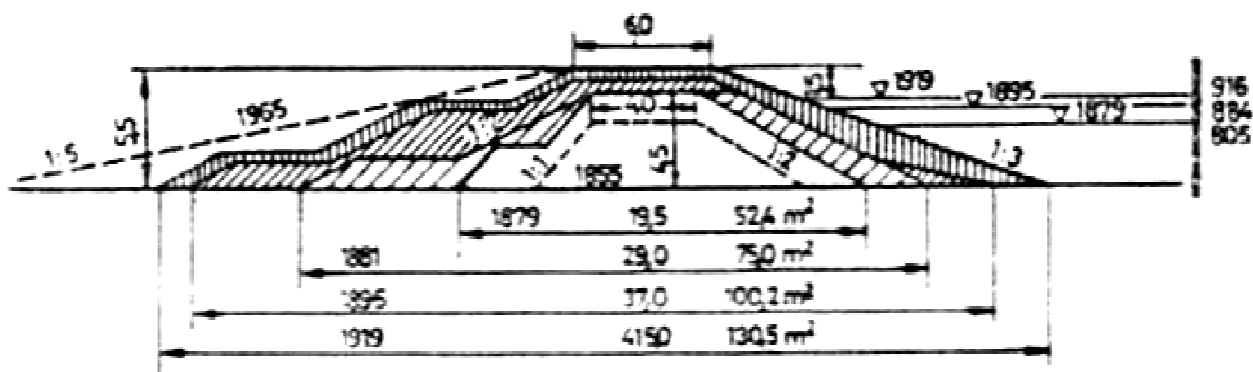
- a vízfolyásmedrek, belvízcsatornák kiépítésének elmaradása,
- a belterületi vízelvezető hálózat kiépítetlensége,
- nem megfelelő nyílású hidak, átereszek,
- a megfelelő nyílású műtárgyak feliszapolódása,
- a víz lefolyását gátló akadályok a mederben (hulladék, szabálytalan mederelzárások stb.),
- a mély fekvésű területek beépítése,
- a külvizek belterületről való kizárásának hiánya,
- külterületen helytelen mező-, és erdőgazdasági művelés, a megfelelő növényi fedettség hiánya,
- a szennyvízcsatornázás elmaradása a vezetékes ivóvízhálózat elmaradása mellett, szikkasztás miatti kedvezőtlen talajvízszint-emelkedés,
- a burkolt, beépített területek növekedése a városiasodással.

A helyi vízkár kialakulását csökkentő tényezők:

- a befogadó vízfolyások, belvízcsatornák mederrendezése,
- belterületi vízelvezető rendszer(ek) kiépítése,
- vízelvezető képesség biztosítása, rendszeres karbantartás,
- külvizek kizárása a belterületekről, a belterületi befogadók tehermentesítése,
- felszíni erózió csökkentése,
- szennyvízcsatorna hálózat, vagy zárt szennyvízgyűjtők kiépítése (*Szunyog és Zalányi, 1998*).

3.2. Az árvízvédelmi töltések szerkezete

A hazai árvízvédelmi töltések főként földtöltések. Az árvízszintek emelkedésével a töltések fejlesztési szakaszokon mentek keresztül, így inhomogén gáttestek keletkeztek, melyeknek belső szerkezete igen változatos (5. ábra). Ezeket a töltéseket szerkezetes töltéseknek nevezzük. Homogén gátokról egy kevés kivételtől eltekintve nem beszélhetünk.



5. ábra: Többször erősített Tisza-völgyi gát keresztmetszete (Vízügyi Hivatal, 2004).

3.3. Szivárgás a gáttesten keresztül

Szivárgáshidraulikai szempontból az árvíz akkor kezdődik, amikor a folyó szintje meghaladja a mentett oldali töltéslábat. A töltés folyóvíz felőli oldalán az árvíz, nyomás alatt tartja a töltést. Mivel teljesen vízzáró talaj nincs, ezért a nyomás hatására a víz a töltés belseje felé igyekszik, és szivárgás indul meg a mentett oldal felé. A szerkezetes gátak nagy problémája, hogy eltérő tulajdonságú anyagokból épül fel, és a töltés az átázás veszélyének könnyen ki van téve. Sajnálatos, de végül is árvédelmi vonalaink talajainak szivárgási paramétereit nem ismerjük (Zákányi, Szűcs, 2010.).

A szivárgás természetes folyamat. Jól vízzáró töltés esetén a talaj ellenállása elegendően nagy a vízmozgást előidéző nyomás ellen (pl.: betonból épített töltések, vízzáró résfalakkal). Beton védvonalak azonban csak egy-két helyen fordulnak elő. Rövid lefolyási idejű árvíz esetén pedig a szivárgásnak nincs jelentősége, mivel rövid árhullám időtartama alatt nem tudnak kifejlődni veszélyes szivárgási folyamatok. A nagy veszély

akkor áll fenn, ha a töltés teljes keresztmetszetében átnedvesedik, és a víz megjelenik a töltés lábánál ugyanis ekkor kerül veszélybe a töltés állékonysága.

Mivel a Tisza töltésvonalának kialakításánál nem vették figyelembe az altalajt, ezért előfordul, hogy a töltés alatt egy jól vízvezető réteg, például homokréteg található. Másik nagy veszély, amikor a nagy hidrosztatikus nyomás hatására a víz beszivárog az altalajba, és a vízvezető rétegben mintegy megkerülve a töltést a mentett oldalon a felszínre jut **(6. ábra)**.



6. ábra: Átszivárgott víz a mentett oldali töltéslábnál.

Buzgárnak nevezzük azt az árvízi jelenséget, amikor a mentett oldalon víz tör fel, és a vízfeltörés szemcsés anyag kimosódásával jár. A hidraulikus talajtörés elméletét a hidraulika és a talajmechanika pontosan leírja, azonban a törvényszerűségek ellenére olyan helyeken is kialakul buzgár, ahol az elmélet azt nem támasztja alá. A buzgárképződés és a buzgáros talajtörés az árvízvédelmi gátak tönkremenetelének műszakilag talán a legérdekesebb és egyben a “leglátványosabb” módja. A modellezési vizsgálatoknál bizonyos esetekben a buzgárképződés felismerhető, és előre jelezhető (Nagy L., 2010.).

4. A gáttesten átszivárgó vízhozam számítása modellezéssel

A gáttesten átszivárgó vízhozamot kétféleképpen határozhatjuk meg: analitikus, illetve numerikus módon.

Analitikus számítással csak úgy oldhatjuk meg az egyenletrendszert, hogy valamely paramétert a teljes rendszerben állandónak veszünk, és kihasználjuk valamely speciális tulajdonságát. Az analitikai megoldások jellemzője, hogy egy egzakt képlettel, formulával meghatározható az eredmény. Az analitikus megoldások hátránya az, hogy egy homogén gáttestre pontos megoldást adnak, viszont kismértékű inhomogenitás esetén az eredmény vagy pontatlan, vagy pedig megoldása nagyon nehézkes, hosszadalmas.

A numerikus módszerek ezzel szemben közelítő megoldások. Lehetővé teszik, hogy a képződményjellemzők tér és időbeli változásait figyelembe vegyük a megoldásoknál. A numerikus megoldások általában egy egyenlet-rendszer vagy mátrix-egyenlet iteratív megoldására vezetik vissza a vizsgált problémát. A megoldás nemcsak közelítő, hanem numerikus hibákkal is terhelt. A szivárgás alapegyenletének legismertebb numerikus megoldásai a véges differencia módszerrel és a véges elem módszerrel való megoldás.

4.1. Numerikus megoldások

A numerikus megoldások közelítő megoldások, ami azt jelenti, hogy nem egzaktak matematikai értelemben. Mint közelítő megoldások, hibákkal terhelték, melyeket numerikus hibának nevezünk. A numerikus megoldások úgy közelítik a valós folyamatokat, hogy mind időben, mind térben szakaszolják a lezajló folyamatokat. Az egyes szakaszokon belül a számításhoz szükséges peremfeltételeket állandónak tekintik, ezzel válik lehetővé a megoldás (Imre, 2009). A térbeli szakaszolás alatt a numerikus módszerek alkalmazásánál az elemekre bontást értjük. A vizsgált térrészt olyan elemekre bontjuk melyeken belül az egyes közegjellemzők (pl. szivárgási tényező, szabad hézagterfogat, tárolási tényező stb.) állandónak tekinthetők. Az elemek száma korlátlan így a szakaszolás tetszőleges. Minél sűrűbb egy szakaszolás annál pontosabb eredményt kapunk. Viszont a térbeli szakaszolás növelésével a numerikus hibák száma is nő. A térbeli

szakaszolásnak így van egy optimuma, melynél még közelítőleg pontos eredményt kapunk, viszont numerikus hibával is kevésbé terhelt.

A víz porózus közegbeli szivárgásának jellemzői a következő numerikus módszerekkel vizsgálhatók:

- véges differencia módszer,
- végeelem módszer,
- peremelem módszer,
- analitikus elemek módszere (*Kovács . 2004*).

Ezek közül leginkább használt módszer a végeelem, és a véges differencia módszer, mely utóbbit a GMS 7.1. program SEEP2D modulja is használja.

4.1.1. Véges differencia módszer

Napjainkban – a számítástechnika elterjedésével – terjedőben van a matematikai modellezés, ami nem más, mint a szivárgó vízmozgás differenciálegyenleteinek megoldásának úgynevezett numerikus módszere. A „numerikus” szó ebben az esetben az alkalmazott közelítő megoldás jelzője. A vizsgált teret itt is egy rácshálóval helyettesítjük, viszont ezek a rácshálók csak négyzetek, vagy téglalapok lehetnek. Ebből következik, hogy a vizsgált teret ez a módszer nem tudja teljesen lefedni, mivel akármilyen kicsire választom is a rácshálót, lesznek olyan helyek ahol a rácsháló vagy kilóg, vagy nem tudja kitölteni a teret (*Völgyesi, 2008.*).

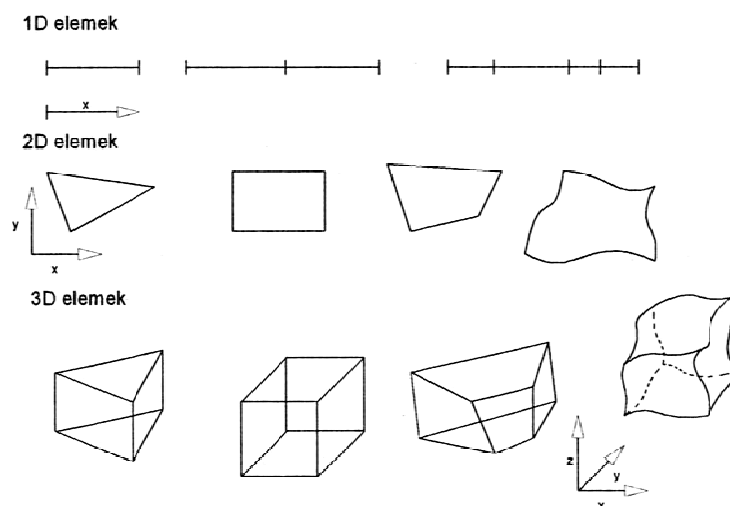
4.1.2. Végeelem módszer

A végeelem módszer alkalmazása megköveteli az áramlási közeg csomópontok és az azokat összekötő szakaszok által határolt elemekre való bontását. A végeelem módszer a véges differencia módszerrel ellentétben nem követel rácshálót, hanem tetszőleges alakú elemekkel lefedhető a tartomány. Így sokkal jobban igazodnak az elemek a valós tartományhoz, mint a rácsháló alkalmazásánál. A véges differencia módszernél a rácsháló geometriája nem követi pontosan a töltés geometriáját, a rácsháló elemek a töltés részsíjének szélénél kilógnak, ezért a számítások sem pontosak. A véges differencia

módszernél is a teret ritkább illetve sűrűbb rácshálóval helyettesítjük, de a számított értékek függenek a rácsháló méreteitől (Kovács, 2004.).

4.1.3. A hálókiosztás elvei

A numerikus módszereknél egy-, két-, illetve háromdimenziós elemet használhatunk. Leggyakrabban az egydimenziós vonalat, a kétdimenziós háromszöget, illetve négyszöget alkalmazzuk (7. ábra).



7.ábra: Végeselem elemtípusok (Kovács,2004).

A GMS program SEEP2D modulja kétdimenziós háromszög elemeket használ. Térbeli feladatok megoldása esetén tetraéder, háromszög alapú oszlop vagy téglatest alakú elemek kialakítása jellemző. Az egyes elemek alakja, nagysága még azonos rendszeren belül is tetszőleges lehet, egyazon modellen belül többfajta elemet is alkalmazhatunk. Természetesen az elemek számának a növelése az egyenletrendszert alkotó egyenletek, és ennek megfelelően az ismeretlenek számának növekedésével jár együtt, ami könnyen meghaladhatja a számítógép erőforrásai által alkotott határt.

4.2. A Groundwater Modelling System 7.1-es program

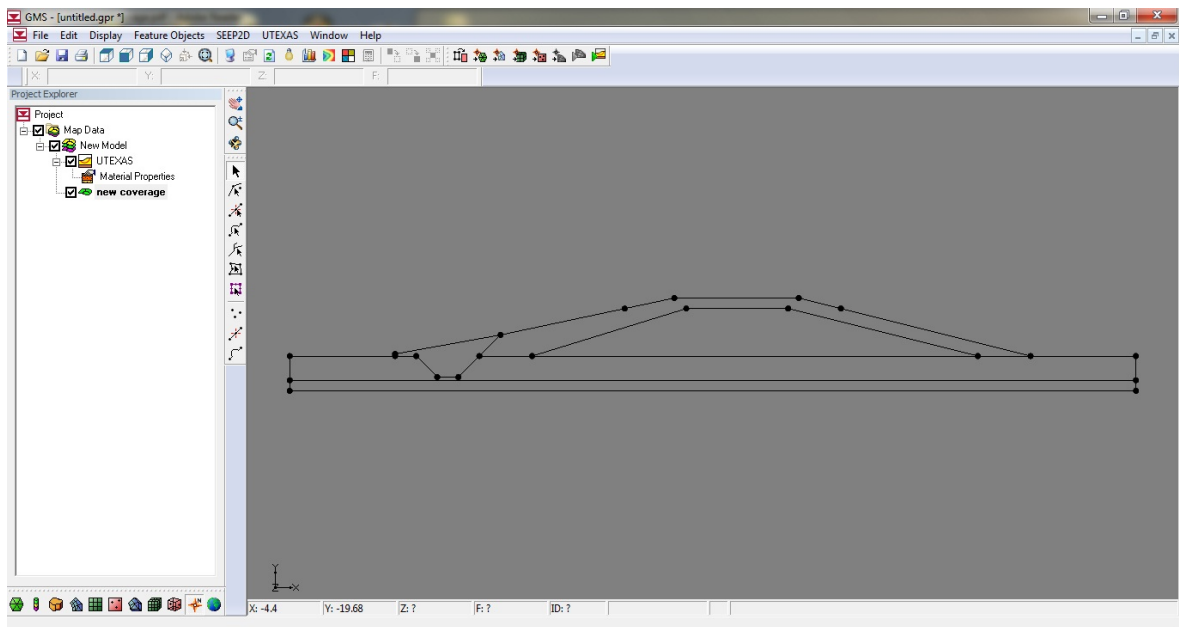
A modellezés során a Groundwater Modelling System 7.1-es program SEEP2D modulját használtam. Rézsűk esetében fontos szerepet játszanak a különböző víznyomás szintek a

rézsük - jelen esetben árvízvédelmi töltések - állékonyságában. Ez a modul alkalmas arra, hogy ezeket a nyomásszinteket, áramlási vonalakat modellezze a gáttest belsejében, illetve az altalajban is.

Az alábbiakban ismertetem a modellezés fő lépéseit:

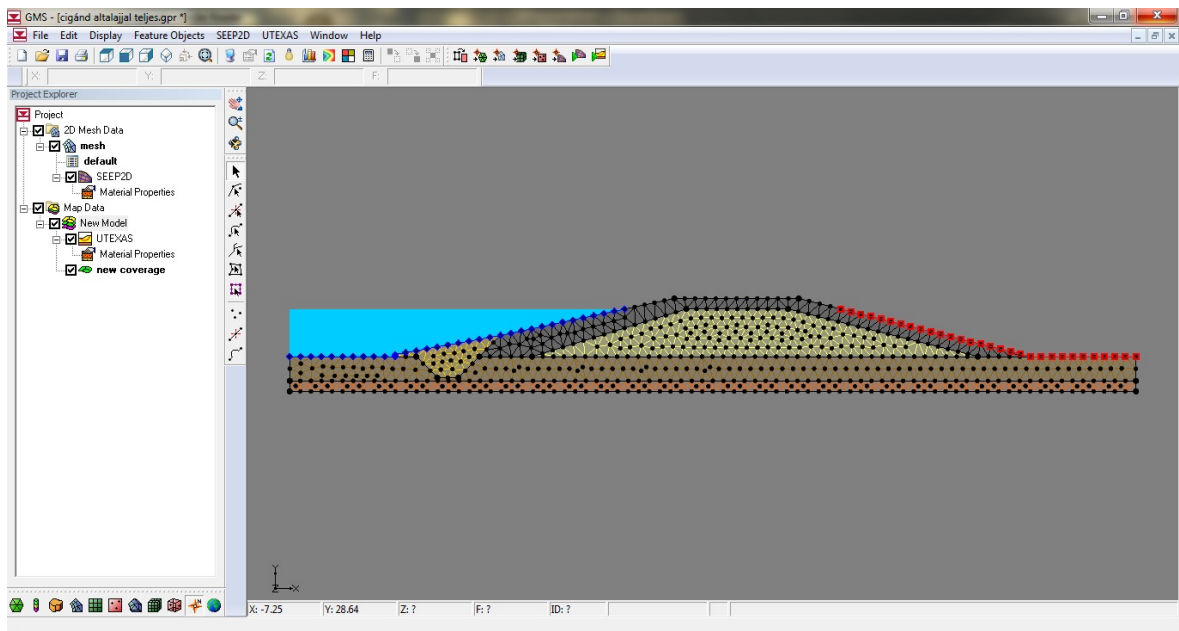
A program megnyitása után első dolgunk beállítani a megfelelő mértékegységeket. Ezt az *Edit | Units* alpont alatt tehetjük meg. Ezután a geometria felvétele a következő lépés **(8.ábra)**.

A geometria felvétele során először pontokat viszünk fel a „Create point” gomb segítségével, és ezen pontok x, y koordinátáit adjuk meg. Majd a „Create arcs” gomb segítségével összekötjük ezeket a pontokat.



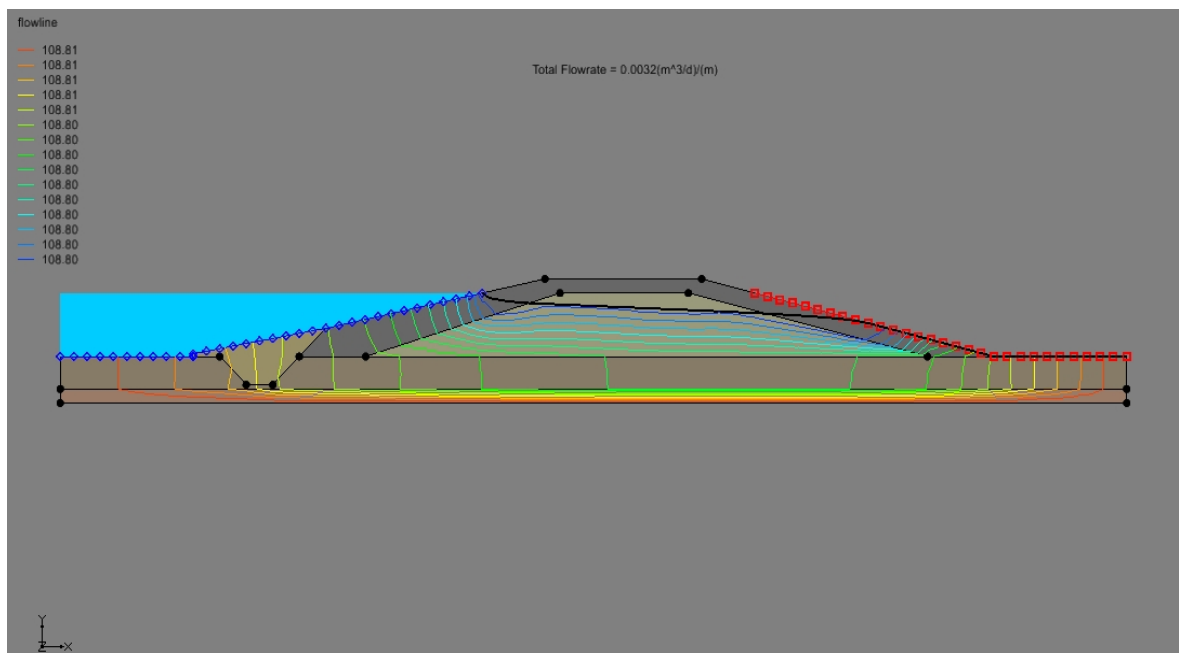
8.ábra: A geometria felvétele.

Ezt követően beállítjuk a gát osztásait a rácsháló elkészítéséhez, majd a különböző anyagtípusokat felvesszük. Az osztások finomsága, durvasága adja meg a rácsháló elemeinek a számát és méreteit. Az elemek száma egy-egy anyagtípuson belül más és más lehet. A rácshálót ezek után a program elkészíti. A rácsháló után következő lépés a belépési, és a kilépési oldal megadása, ahol megadhatjuk az árvízszintet a töltéslábhoz viszonyítva **(9. ábra)**.



9. ábra: A rácsháló, az árvízszint, és az anyagtípusok megadása.

Ezután a számítási opciókat állítjuk be, majd az anyagtípusok jellemző értékeit, végül következhet a számítás. A program kiszámítja a fajlagos hozamot, a vízszint alakulását és az áramvonalakat a gáttesten és az altalajon belül, a síkszivárgás potenciál vonalait, valamint a sebesség vektorokat (**10. ábra**).



10. ábra: Szivárgási vonalak a gáttesten, és az altalajon belül.

5. Gátak és altalajainak paramétereit

A modellezéshez az alapadatokat Zákányi Balázs: Az árvízvédelmi gátak, és töltések szivárgásának meghatározási módszerei (2006) című diplomamunkájából vettem át a gáttestre, és az altalajra vonatkozóan. Az első két táblázat az árvízvédelmi töltések paramétereit mutatja, míg a harmadik táblázatban a lázbérci víztározó gátjának műszaki adatait láthatjuk.

1. táblázat: Gátak paramétereit.

Gátak paramétereit					
Megnevezés	Betűjel	Mértékegység	Érték az alábbi szelvényekben (tkm)		
			Tisza jobb part 48+400 (Cigánd)	Tisza jobb part 27+351 (Révleányvár)	Bodrog bal part 28+750 (Halászhomok)
Árvízi terhelés magassága a mentett oldali töltésláb felett	H	m	5,5	4,9	4,5
A töltés magasság a mentett oldali terep felett	m_t	m	5,5	4,9	4,5
Töltés talpszélessége	B	m	50,3	39,1	30,4
Töltés korona szélessége	b_k	m	6,5	4	4
Vízoldali rézsűhajlás	ρ_v		1\3	1\3	1\3,5
Mentett oldali rézsűhajlás	ρ_m		1\4	1\3	1\3,7

2. táblázat: Töltések altalajadottságait.

Altalajadottságok					
Megnevezés	Betűjel	Mértékegység	Érték az alábbi szelvényekben (tkm)		
			Tisza jobb part 48+400 (Cigánd)	Tisza jobb part 27+351 (Révleányvár)	Bodrog bal part 28+750 (Halászhomok)
Vízvezető réteg vastagsága	d_0	m	1	2	2
Vízvezetőréteg k-ja	k_0	m/d	0,43	0,034	0,086
Fedőréteg vastagság	d_f	m	2,3	—	3,8
Fedőréteg k-ja	k_f	m/d	0,000086	—	0,000086
Altalaj anyagának kohéziója	c_a	kN/m ²	8	10	40
Töltéstest anyagának belső súrlódási szöge	φ_t	°	20	16	16
Töltés anyagának kohéziója	c_t	kN/m ²	20	40	40

3. táblázat: A lázbérci tározó adatai.

Vízgyűjtőterület		
2004 évi felmérés	km ²	211,7
Elzárási szelvény	km	bán-patak 10+300
Vízmérce "0" pont	m Bf	191,77
Min üzemvízszint	mBf (cm)	189,33 (-244)
Max üzemvízszint	mBf (cm)	200,83 (906)
Árapasztó küszöbszintje	mBf (cm)	200,83 (906)
Árvízi duzzasztási szint	mBf (cm)	201,63 (986)
Gát legnagyobb magassága	m	19,3
Gát hossza	m	250
Gát legnagyobb talpszélessége	m	126
Építéskori jellemzők		
Tározó térfogat		
min üzemvízszintnél	100m ³	417
max üzemvízszintnél	100m ³	6204
árvízi duzzasztási szintnél	100m ³	6853
Hasznos térfogat	100m ³	5880
Árvízi tározótérfogat	100m ³	649
Vízfelület min üzemvízszintnél	ha	18,6
Vízfelület max üzemvízszintnél	ha	87,3
Vízfelület árvízi duzzasztási szintnél	ha	92,2

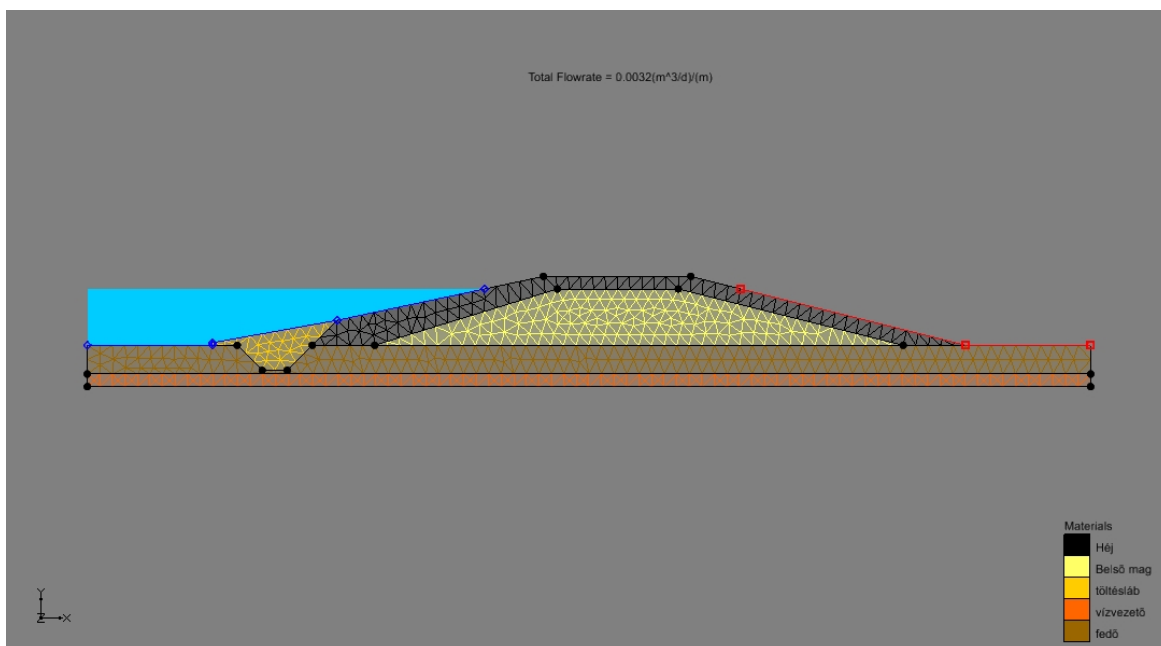
6. A modellezés eredményei

A GMS 7.1-es program segítségével a gátak, és azok általajának modellezése könnyen kivitelezhető. A program nem csak ábrák elkészítésére alkalmas, hanem számításokat is végez, melyre munkám során kisebb hangsúlyt fektettem, a szemléltetést tartva szem előtt. A fajlagos vízhozam megállapításánál a program egy méter hosszú töltésszakaszra vonatkozó hozamot számít.

Vizsgálataimat három árvízvédelmi töltésre, és a lázbérci víztározó gátjára végeztem el. Mindegyik töltésnél a mértékadó árvízszintet vettem alapul, mely a töltéskoronától lefele számított egy méternél van, a víztározó gátjánál pedig a maximális üzemvízszintet vettem figyelembe. A vizsgálatok mindegyike, egy időben állandó (steady state) állapotot vizsgál.

6.1. Töltés vizsgálata Cigánd térségében

A **11. ábrán** látható a töltés jellemző keresztmetszelvénye. A vízoldali töltéslábnál egy záró réteg került kialakításra. Az altalajt tekintve elkülöníthetünk egy vízvezető, és egy fedő réteget. Erre a két jellemző rétegre épült maga a töltés.



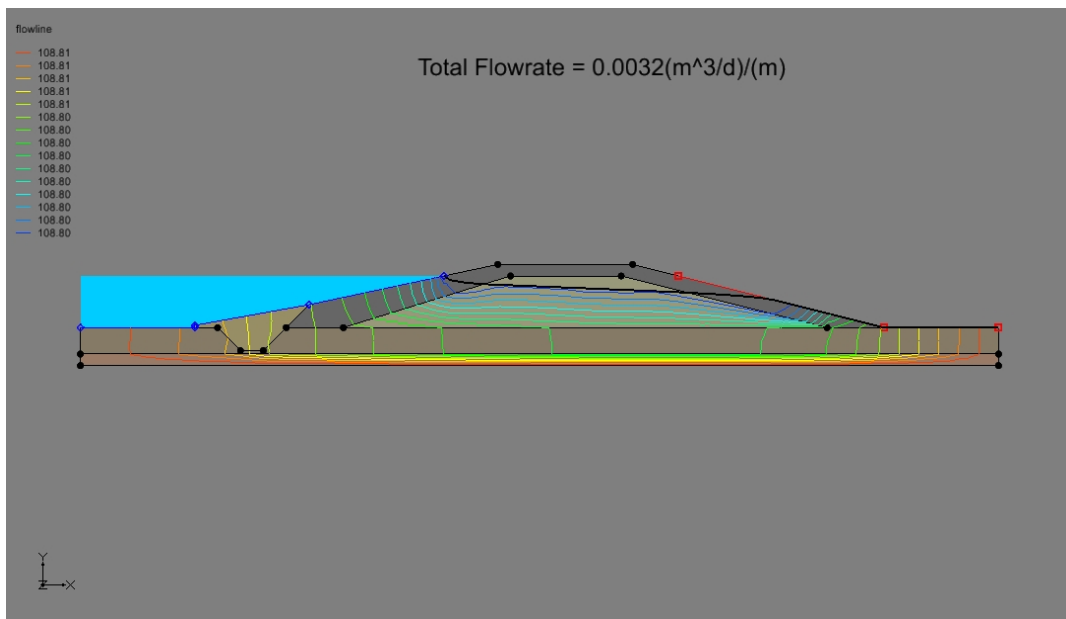
11.ábra: Cigánd-környéki jellemző töltésszelvény.

A 4. táblázatban láthatjuk a töltés szerkezetének jellemző szivárgási tényezőit.

4. táblázat: A Cigánd környéki töltés jellemző szivárgási tényező értékei.

	Belső mag	Héj	Töltésláb	Fedőréteg	Vízvezető réteg
k_h (horizontális) [m/d]	0,00864	0,00086	0,00043	0,00086	0,43
k_v (vertikális) [m/d]	0,06	0,00086	0,00043	0,00086	0,43

A modellezést a mértékadó árvízszint esetére végeztem el. A programot lefuttatva az áramlási vonalakat a **12. ábra** szemlélteti. Az ábrán jól látható, hogy az altalajnak nagy szerepe van a töltések áteresztőképességében, hiszen ebben az esetben az áramlási vonalak egy része a vízvezető rétegen keresztül halad át.

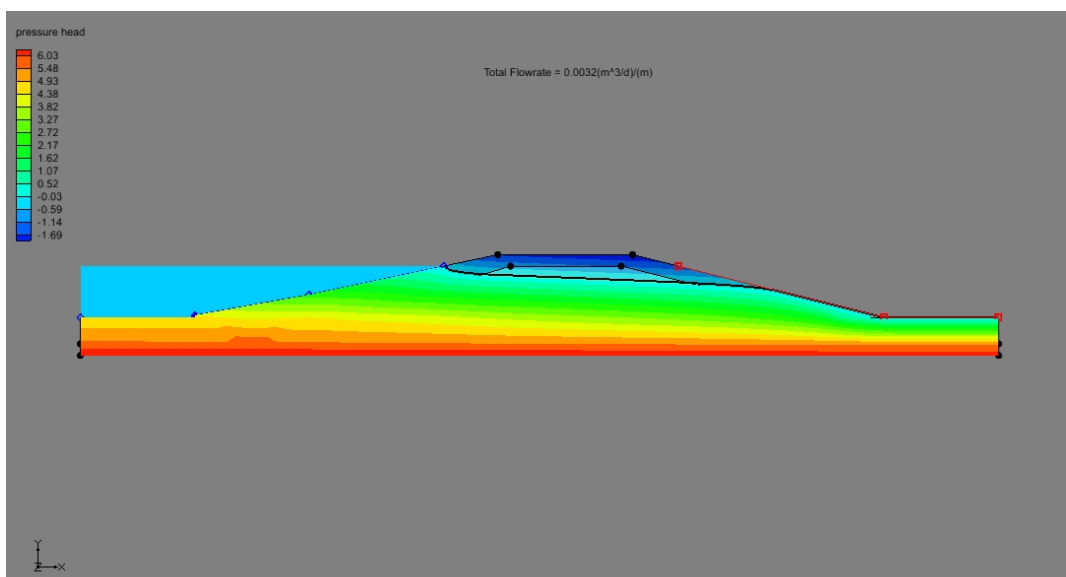


12. ábra: Áramlási vonalak a gáttesten, és az altalajon belül.

A program meghatározza az áramlási, és ekvipotenciális vonalakat, valamint kiszámítja a mentett oldali a fajlagos vízhozamot, mely ez esetben:

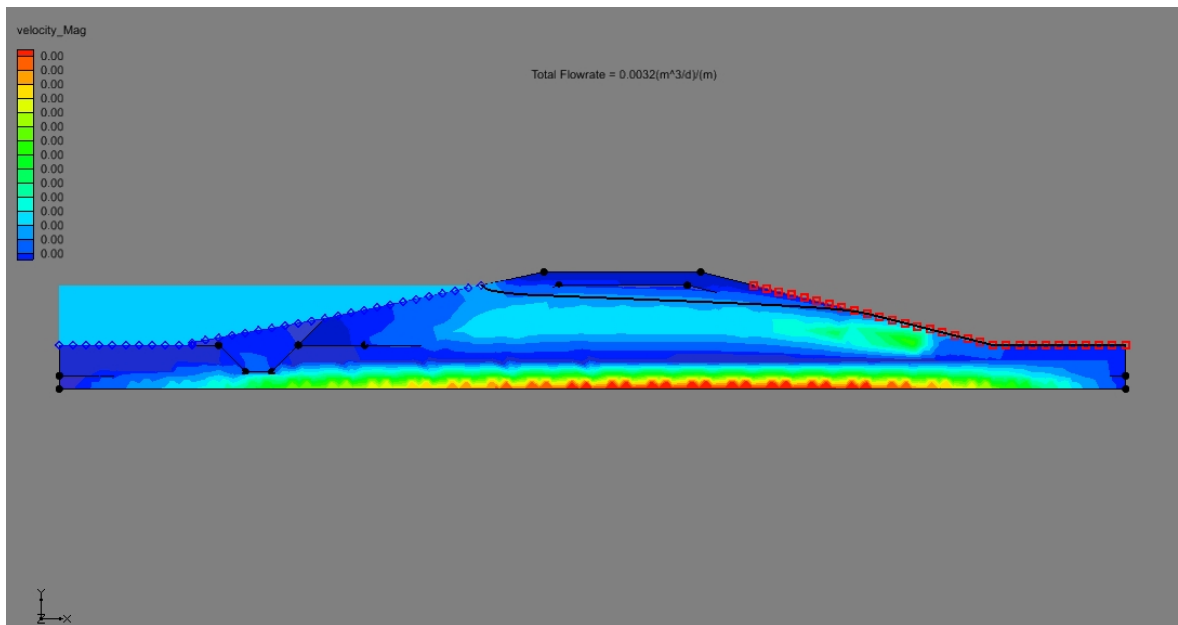
$$q \text{ (fajlagos hozam)} = 0.0032 \frac{m^3}{m}.$$

A program kiszámítja a nyomás, és sebességviszonyokat is, melyeket a **13. és 14. ábra** szemléltet.



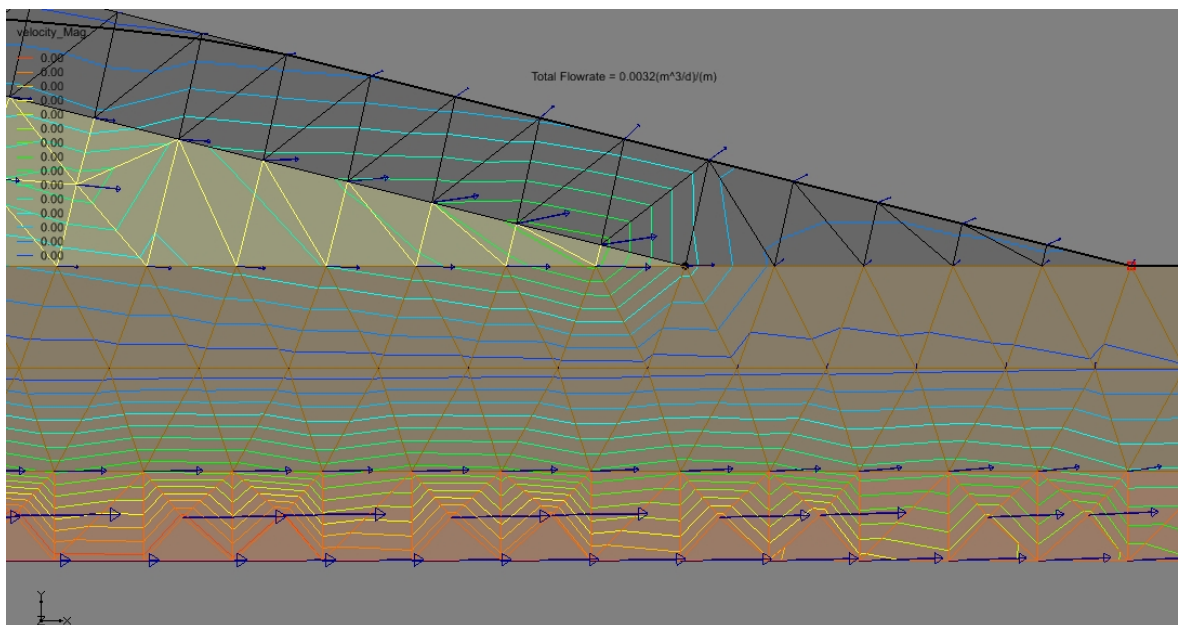
13. ábra: Nyomásviszonyok a gáttesten, és az altalajon belül.

Az ábrán megfigyelhetjük, hogy az alsó rétegben lesz a legnagyobb a nyomásérték (piros szín), itt pórusvíznyomással is számolnunk kell, mely a töltés állékonysága szempontjából lehet fontos.



14. ábra: *Sebességek alakulása a töltésen, és az altalajon belül.*

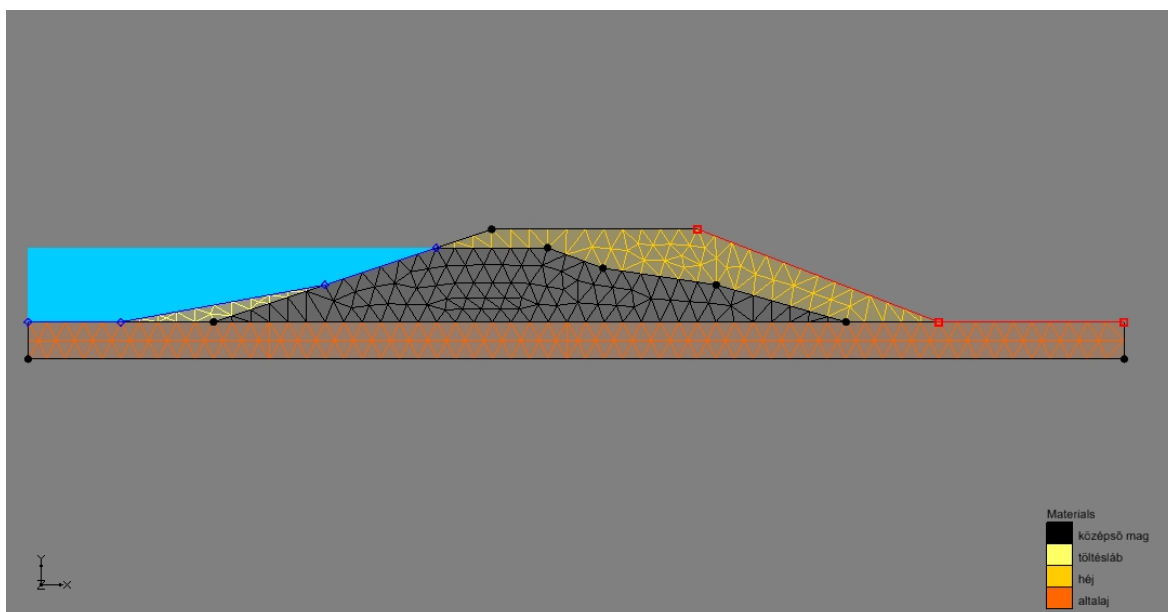
A sebességviszonyokat vizsgálva láthatjuk, hogy az alsó vízvezető rétegben, illetve a kilépési oldalon lesz nagyobb sebesség (piros illetve zöld szín).



15. ábra: *Sebességvektorok alakulása a kilépési oldal közelében.*

6.2. Töltés vizsgálata Révleányvár térségében

A **16. ábra** szemlélteti a Révleányvár térségében lévő árvízvédelmi töltés jellemző keresztmetszetét. Megfigyelhető, hogy itt is kialakításra került egy, a vízoldali töltéslábnál elhelyezkedő vízzáró szőnyeg. Az általajt tekintve, itt csak egy réteg figyelhető meg.



16. ábra: Jellemző töltéskeresztmetszet Révleányvár térségében.

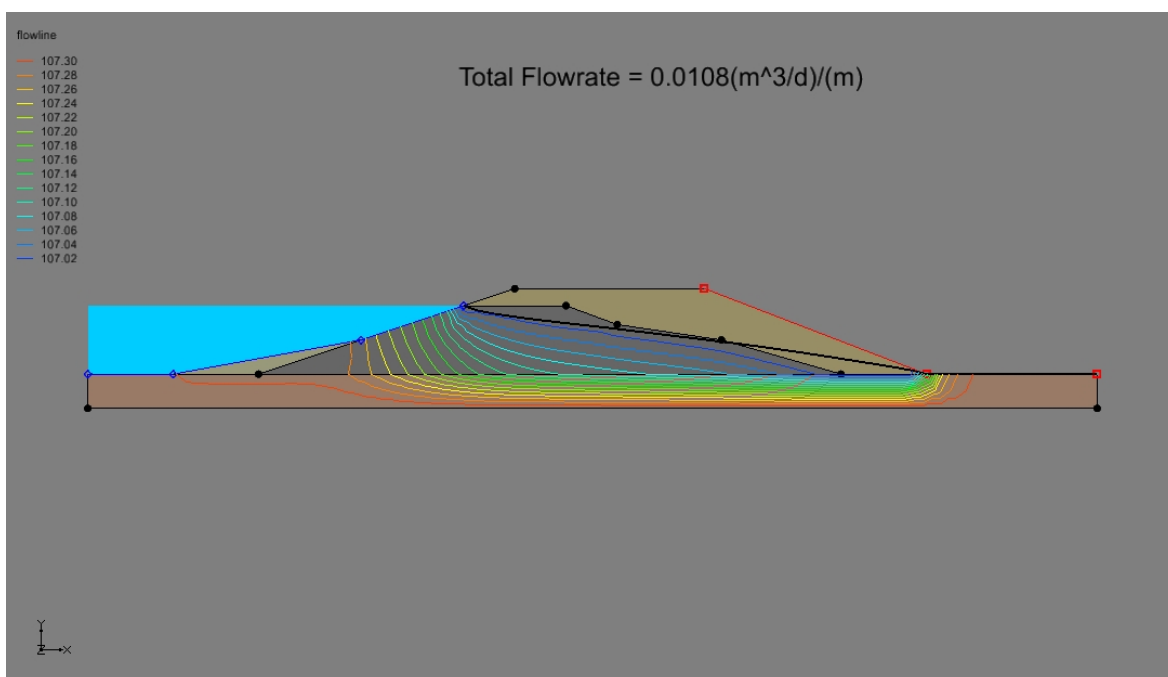
A jellemző szivárgási tényezőket a következő táblázat mutatja:

5. táblázat: A Révleányvár környéki töltés jellemző szivárgási tényezői.

	Héz	Belső mag	Láb	Altalaj
k_h (horizontális) [m/d]	0,00086	0,00864	0,0000864	0,034
k_v (vertikális) [m/d]	0,00086	0,009	0,0000864	0,034

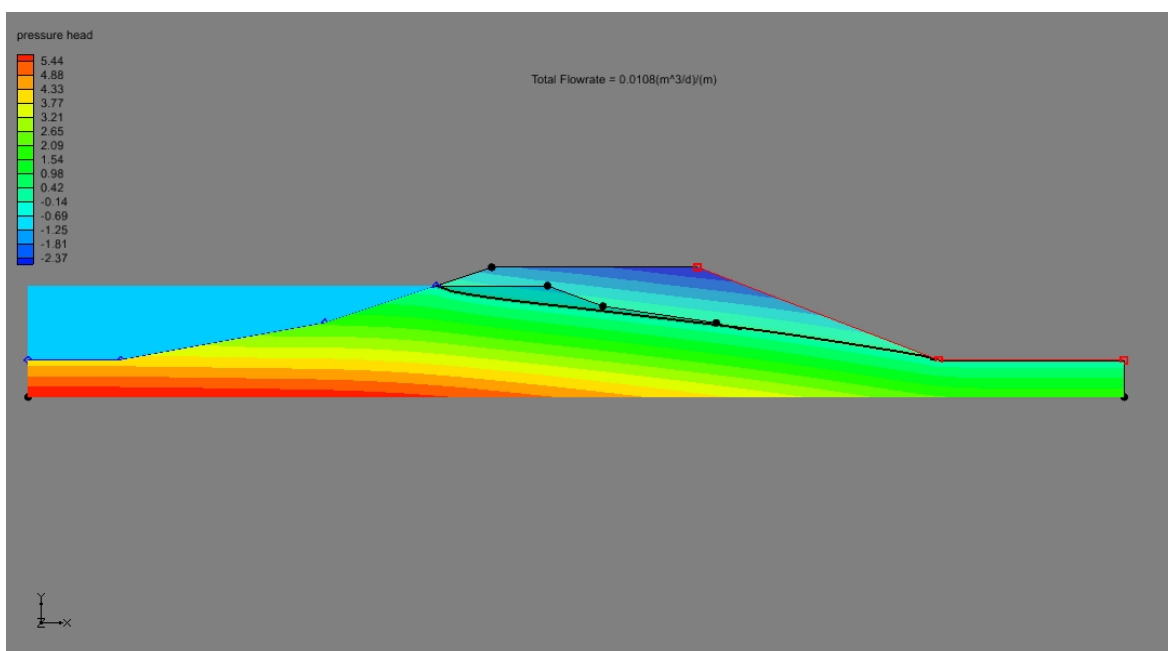
Megfigyelhető az árvízi oldalon, hogy az áramlási vonalak közel merőlegesen lépnek be a gáttestbe (**17. ábra**). Az altalaj szerepe ebben az esetben is nagy, mert az áramlási vonalak itt a legsűrűbbek. Ilyen esetben a víz a töltést alulról kerüli meg. Ekkor figyelembe kell venni az esetleges hidraulikus talajtörést, és a buzgárok esetleges kialakulását. A fajlagos vízhozamot ebben az esetben is meghatározta a program:

$$q=0.0108 \frac{m^3}{m}.$$

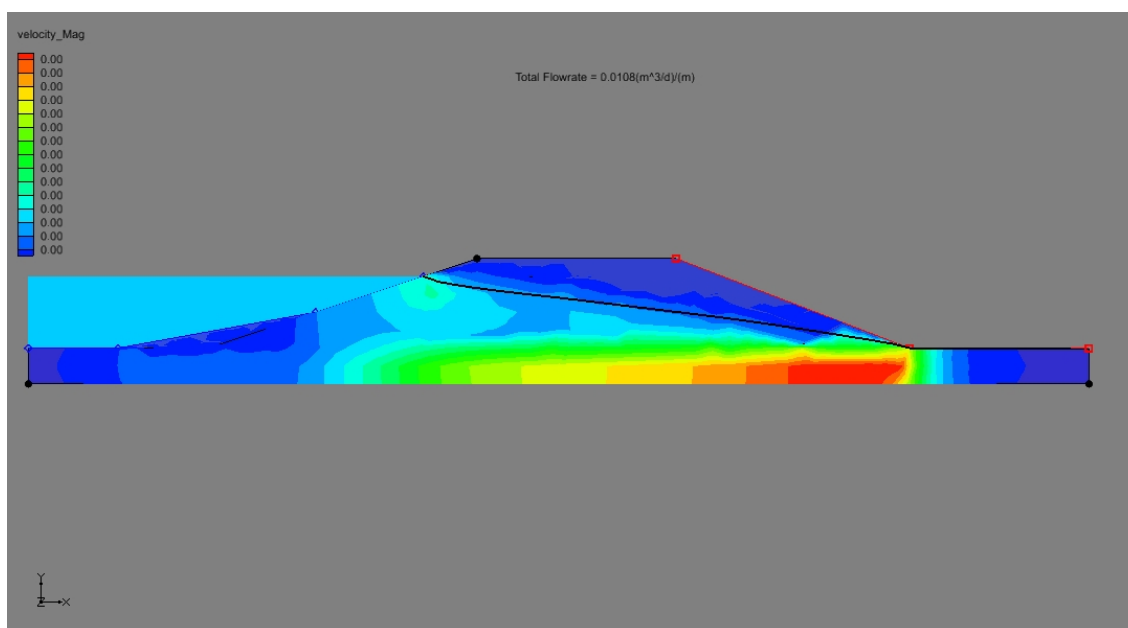


17. ábra: Az áramlási vonalak alakulása a gáttestben, és az altalajban.

A nyomásviszonyokat megfigyelve látható, hogy a legnagyobb nyomásértékek a keresztmetszet vízoldali felében vannak (piros szín). Az árvízszintet ebben az esetben is a töltéskoronától egy méterrel lejjebb vettem fel (**18. ábra**).

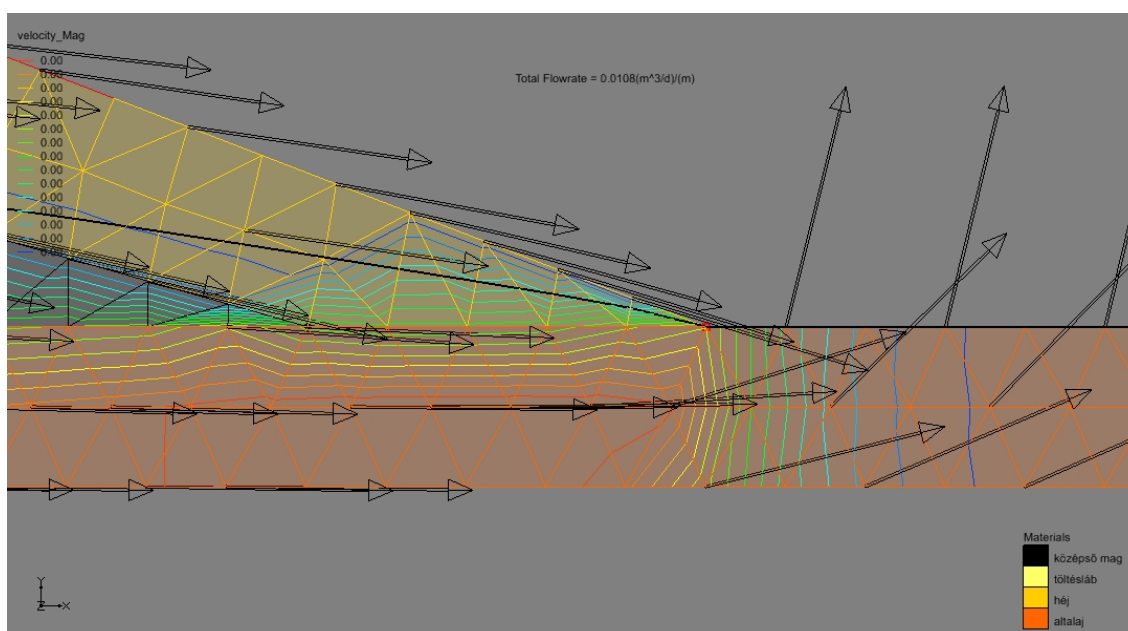


18. ábra: Nyomásviszonyok alakulása a töltésben, és az altalajban.



19. ábra: *Sebességviszonyok alakulása a töltésben, és az altalajban.*

Ebben az esetben is megállapíthatjuk, hogy a legnagyobb sebességek a mentett oldali töltéslábnál vannak (piros szín). Itt számíthatunk buzgárok kialakulására is (**19. ábra**).



20. ábra: *A sebességvektorok alakulása a mentett oldali töltéslábnál.*

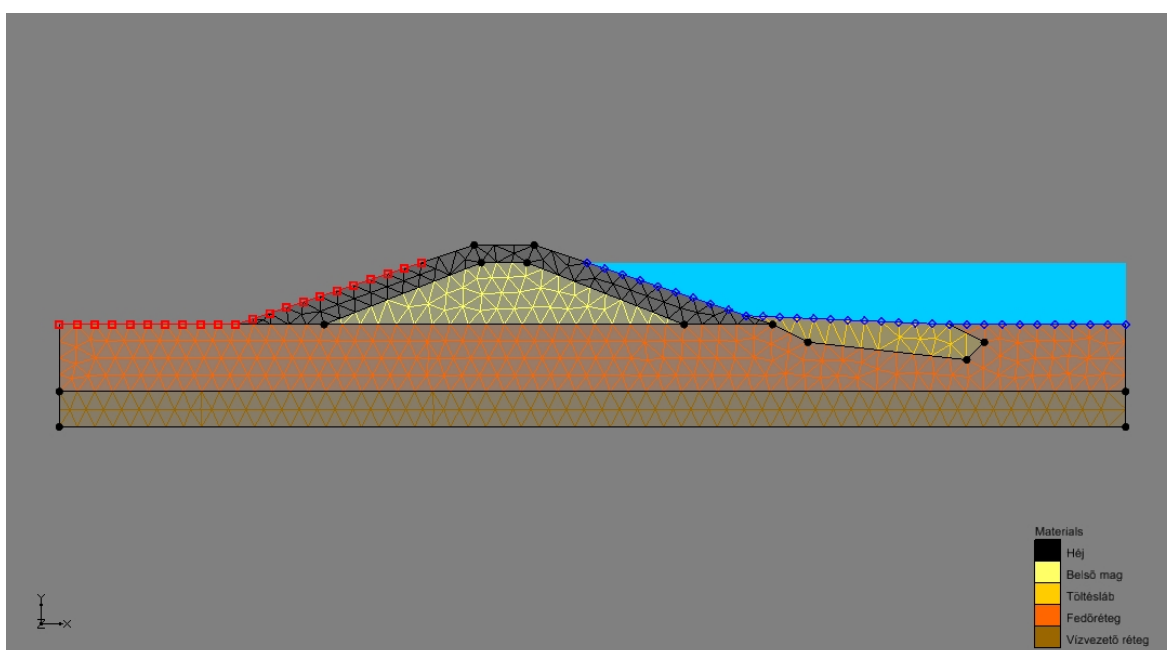
A sebességvektorok ábrázolása is megmutatja, hogy a legnagyobb sebesség a mentett oldali töltéslábnál található (**20. ábra**).

6.3. Töltés vizsgálata Halászhomok térségében

A keresztmetszetet megfigyelve megállapíthatjuk, hogy ismét két altalaj réteggel találkozunk, egy vízvezető, illetve egy fedőréteggel. A fedőréteg vastagsága ebben az esetben sokkal nagyobb, mint az előző esetben. A vízdali töltéslábnál ismét találkozunk egy vízzáró réteggel. A töltés maga, pedig rétegzettséget mutat, belsejében egy maggal (**21. ábra**).

6. táblázat: A Halászhomok környéki töltés jellemző szivárgási tényezői.

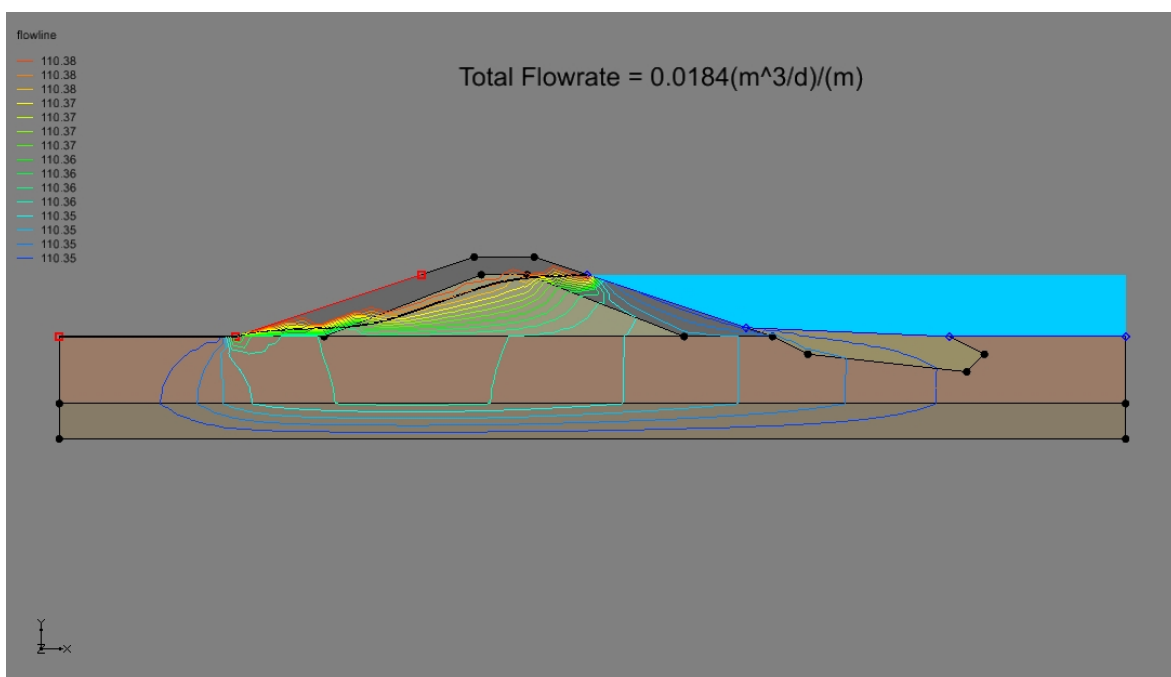
	Héj	Belső mag	Töltésláb	Vízvezető réteg	Fedőréteg
k_h (horizontális) [m/d]	0,432	0,00432	0,000864	0,086	0,000086
k_v (vertikális) [m/d]	0,432	0,00432	0,000864	0,086	0,000086



21. ábra: Jellemző töltéskeresztmetszet Halászhomok térségében.

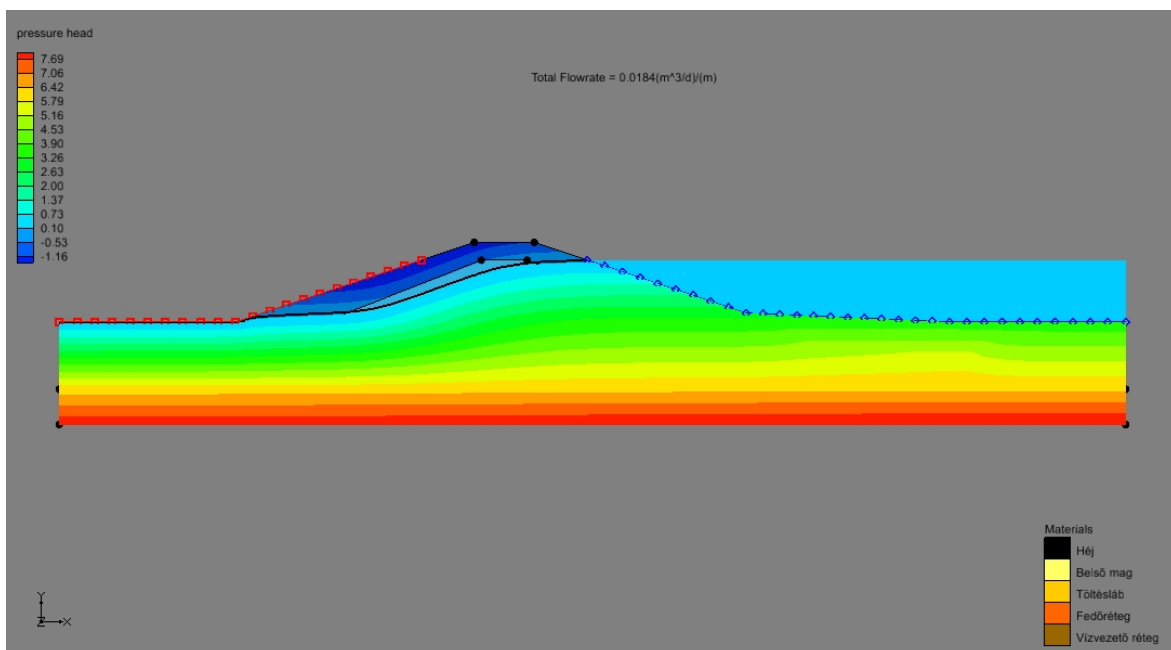
Az áramlási vonalakat megfigyelve megállapíthatjuk, hogy a víz nagy része ezen esetben a töltésen keresztül áramlik. Az altalajban lévő áramlások szinte elhanyagolható a töltéstartékban lévő áramláshoz képest. A víz kilépése itt is a töltés lábánál figyelhető meg (**22. ábra**). Az átszivárgott hozam:

$$q=0.0184 \frac{m^3}{m}.$$

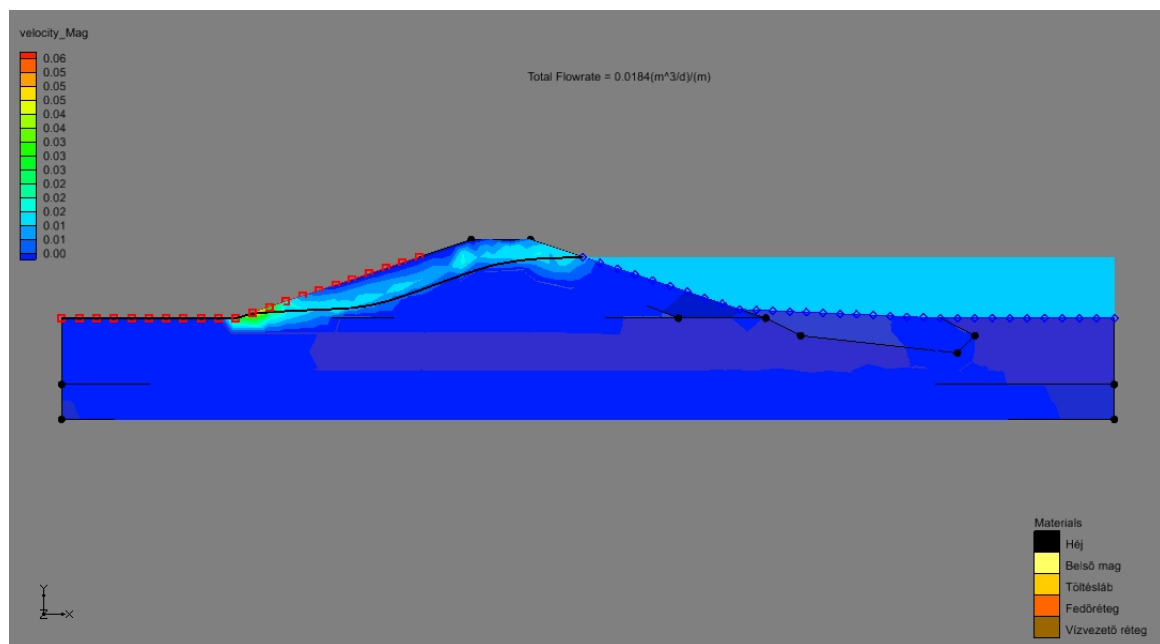


22. ábra: Áramlási vonalak a töltésben és az altalajban.

A nyomásviszonyok ez esetben viszonylag kiegyenlítették. A legnagyobb nyomásérték itt is a vízvezető rétegben található (piros szín). A töltéstartestben a nyomás ekvipotenciális vonalai viszonylag jól követik az áramlási vonalakat (23. ábra).

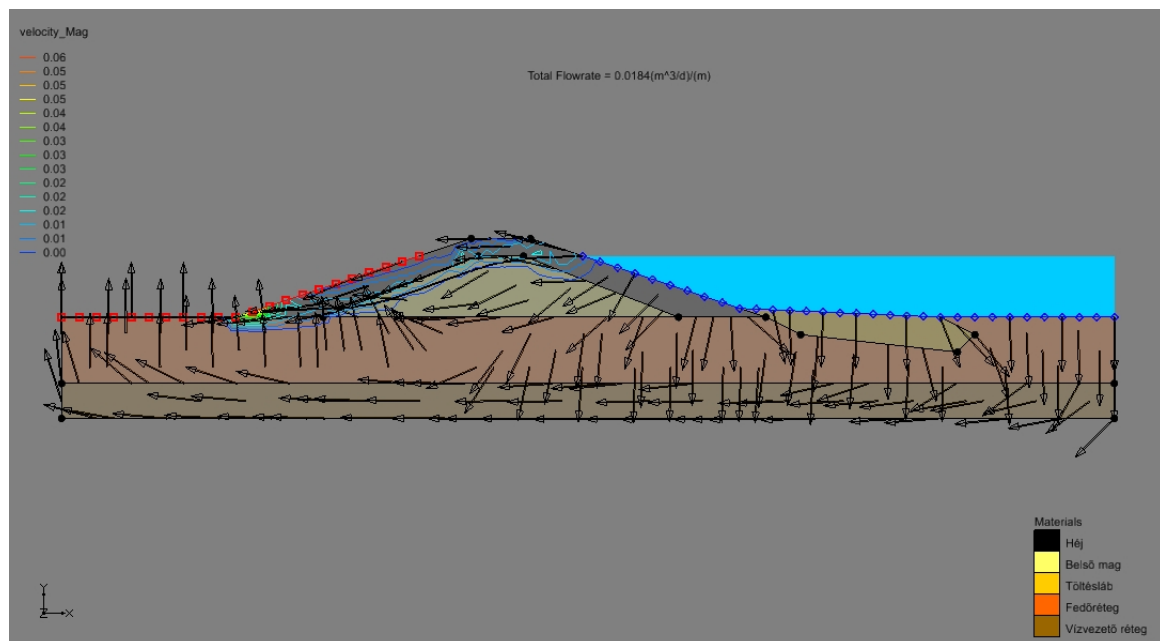


23. ábra: Nyomásviszonyok alakulása a töltéstartestben és az altalajban.



24. ábra: A sebességviszonyok alakulása a vizsgált keresztmetszetben.

A sebesség legnagyobb értéke a mentett oldali töltéslábnál található. A magasabb áramlási sebesség értékek a legfelső áramlási felülettel nagyjából egybe esnek (24. ábra).



25. ábra: Sebességvektorok iránya a vizsgált keresztmetszetben.

A sebességvektorok a beáramlási oldalon sűrűn lefelé irányulnak, a mentett oldalon pedig felfelé irányuló sebességvektorokat láthatunk. A töltéstartományban ezek a vektorok az áramlási iránnyal megegyeznek (25. ábra).

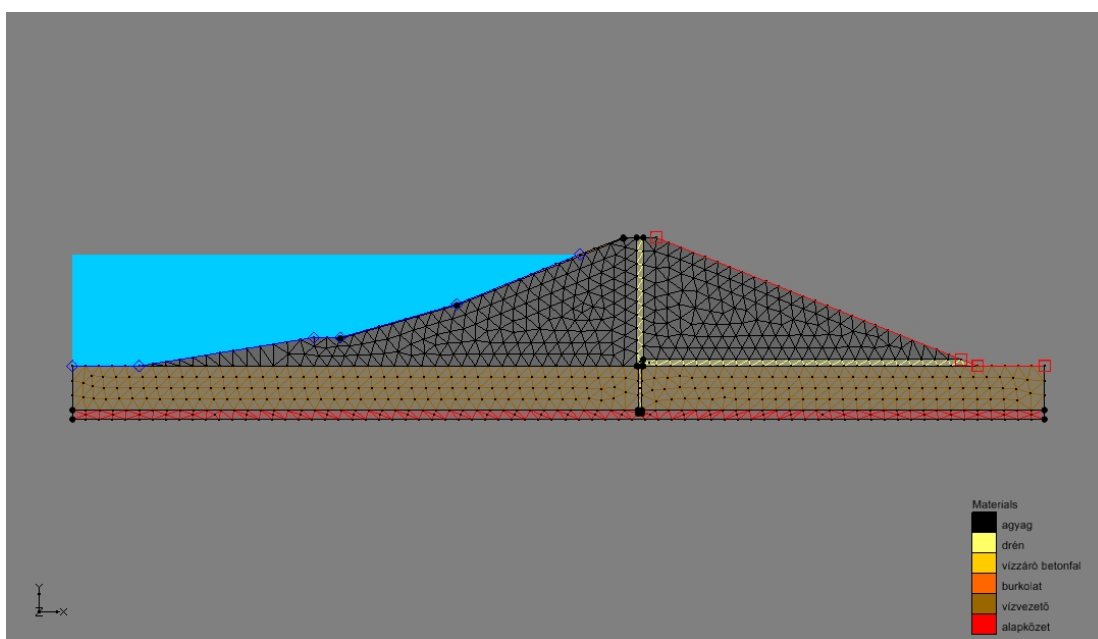
6.4. A lázbérci völgyzárógát vizsgálata

A Lázbérci tározó az Ózdi Regionális Vízmű rendszer alaplétesítménye, melyet a Bán-, és a Csernely-patak táplál. Létesítésének célja ivóvíz biztosítása Ózd és Kazincbarcika városoknak, s a régió településeinek, valamint igény szerint a Hevesi Regionális Vízmű rendszernek. A nyílt felszíni tározó fő létesítményei a völgyzárógát, a vízkivételi műtárgy, az árapasztó műtárgy, valamint az alvíz- és leürítő csatornák. A völgyzárógát egyenes tengelyű földgát, amely a Bán-patak 10+300 szelvényében épült. A 250 m hosszú gát legnagyobb magassága 19,3 m legnagyobb talpszélessége 126 m, a gátkorona szélessége 5m. A gát a vízoldalon 192,88 mBf-ig 1:2,5 rézsűvel, ezután 187,88 mBf-ig 1:3,5 rézsűvel, egy 4 m széles padkával, végül 1:8 rézsűfelülettel éri el az építéskori terepszintet. A szárazoldalon 1:2,5 rézsű vezet a terepszintig.



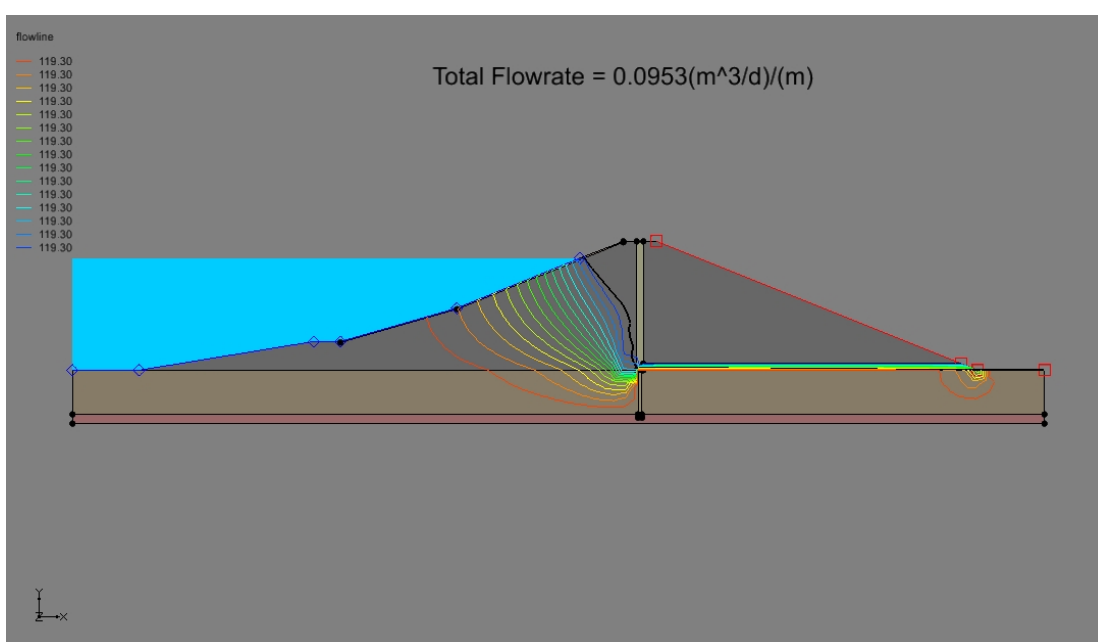
26. ábra: a lázbérci víztározó gátja a vízkivételi műtárggyal (saját fotó).

A völgyzárógát szerkezetét tekintve homogén földgát, melynek építéséhez a gáttól északra létesített bányából származó agyag szolgált. A gátkorona szárazoldali éle alatt 1m szélességű függőleges kavicsszivárgó épült, az alján beton gyűjtőcsővel. A függőleges kavicsszivárgó a gáttestet kettéválasztja, és összegyűjti a gát vízfelőli részén átszivárgó vizet. Ezzel megakadályozza a szárazoldali rész átnedvesedését. A gáttest alatti vízvezető réteg lezárása vízzáró betonfallal történt **(26. ábra)**.



27. ábra: a lázbérci gát szerkezete.

Az átlagosan 7,1 m mély fal vastagsága 0,6 m, és az alapkőzetbe köt be 0,5 m mélyen. A völgyzárógát vízoldali részsűjét a hullámverés okozta elbomlástól és a jégzajlás kártételeitől betonlap burkolat védi. A betonlapokat 0,15m vastag homokos kavics szűrőrétegbe helyezték, a burkolat megtámasztását az 1:3,5 rézsű aljában futó a padkába épített betonborda biztosítja. A burkolat lezárására a gát koronájában 20x40 cm-es betonszegély épült. A szárazoldali részsű füvesítve van (26. és 27. ábra).

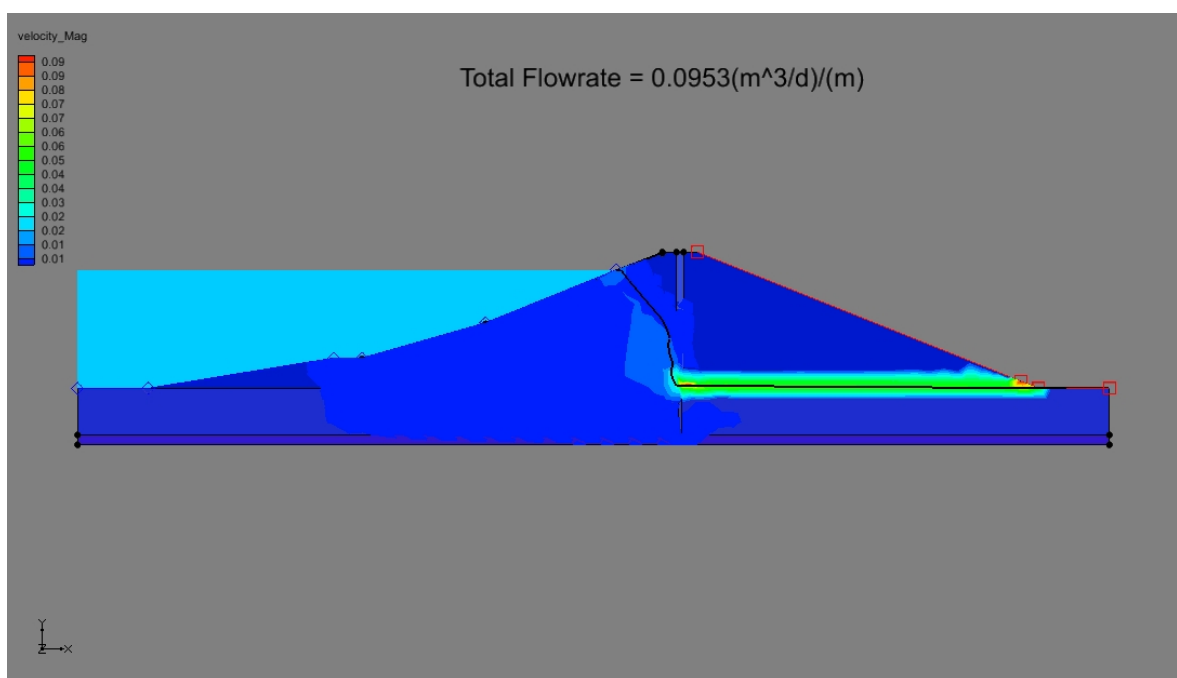


28. ábra: áramlási vonalak alakulása a gátesten belül.

Az áramlási vonalak vizsgálatakor egyértelműen látszik a gáttesten belüli drén szerepe. A vízoldalról a gáttestbe nyomuló víz a függőleges és vízszintes homokrétegben gyűlik össze, és a töltéslábnál távozik a gáttestből. Így a gát nem nedvesedik át teljes keresztmetszetében. A gáttest alatti vízzáró betonfal pedig megakadályozza azt, hogy a víz az altalajon keresztül szivároogjon el. A program által kiszámolt fajlagos hozam:

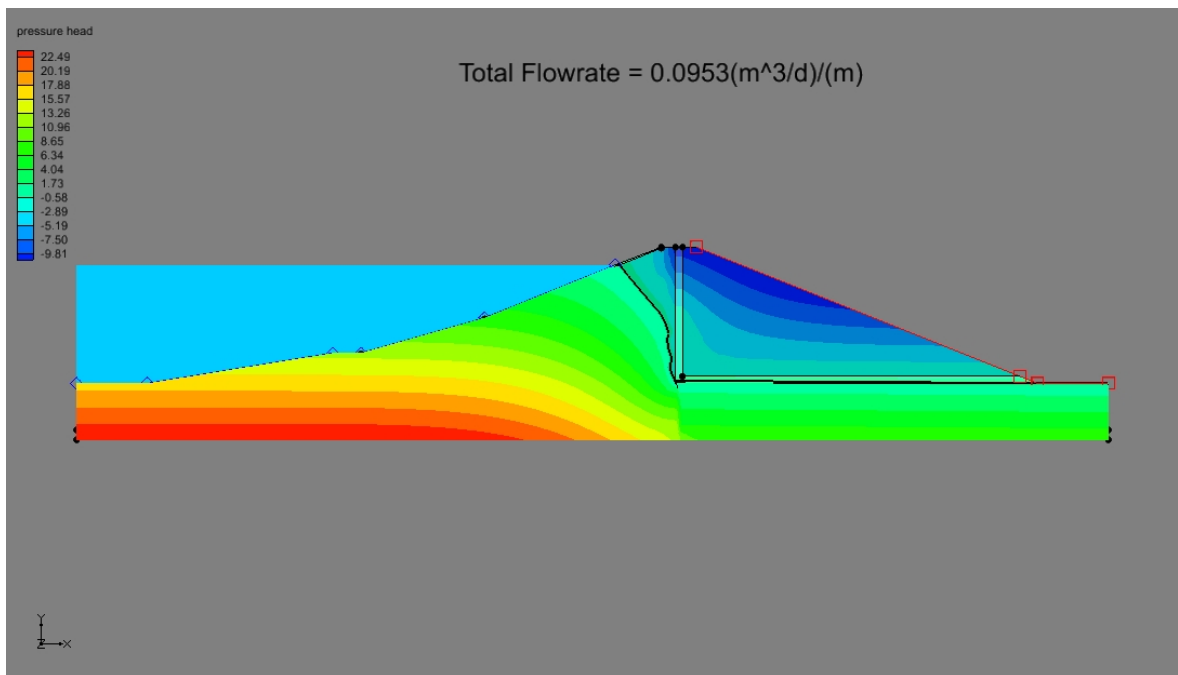
$$q=0.0953 \frac{m^3}{d \cdot m}.$$

Az áramlási sebességet tekintve láthatjuk, hogy a legnagyobb sebességértékek a drénben keletkeznek, ahol a szivárgási tényező elég nagy ahhoz, hogy kivezesse a gát belsejébe jutó vizet a töltésből **(29. ábra)**.



29. ábra: Sebességviszonyok a gáttestben.

Nyomásviszonyok tekintetében is megfigyelhetjük a homokréteg szerepét. A homokrétegnél a sebességviszonyok a legnagyobbak, így a nyomásértékek alacsonyak lesznek. A legmagasabb nyomás a vízoldali töltésláb alatt figyelhető meg **(30. ábra)**.



30. ábra: nyomásviszonyok a gátesten belül

7. A modellezési eredmények összehasonlítása

A modellezési eredményeimet Zákányi Balázs: Az árvízvédelmi gátak és töltések szivárgásának meghatározási módszerei című diplomamunkájában elért eredményekkel összehasonlítottam. A szerző a modellezéseket csak a gátestre vonatkoztatva végezte el, az altalajadottságoktól eltekintve.

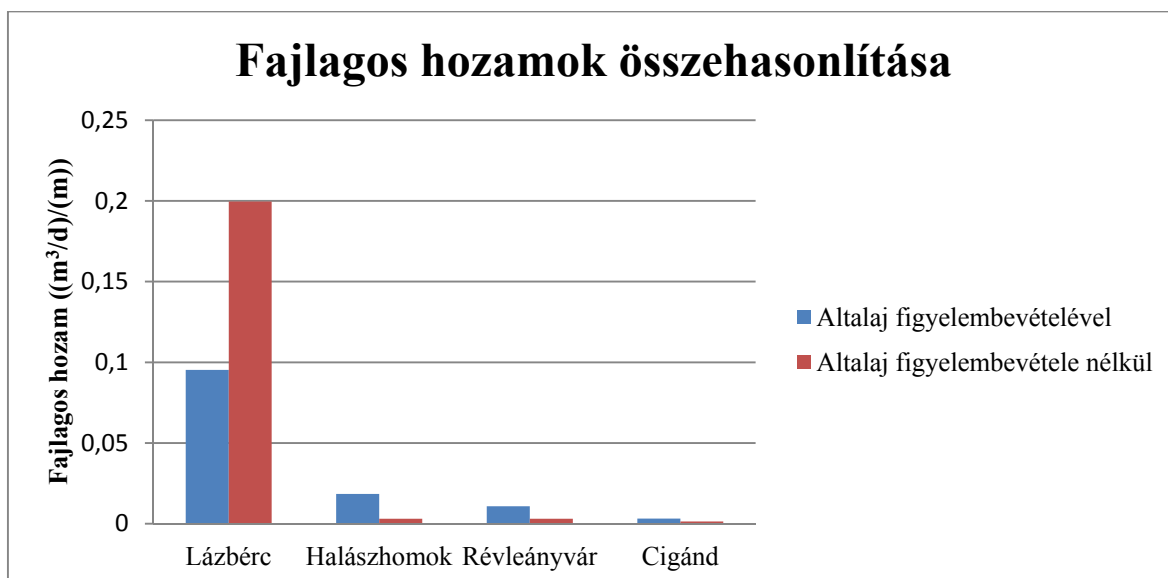
7.1. Fajlagos hozam értékek összehasonlítása

A fajlagos hozamok összehasonlításánál (7. táblázat) megállapíthatjuk, hogy az altalaj figyelembevételével az árvízvédelmi töltések esetében nagyobb hozamokat kaptunk. Ennek oka, hogy az altalaj vízvezető rétegének nagy szivárgási tényezője miatt az altalajon nagy vízmennyiség áramlik át, magával vonva a buzgárok kialakulásának esélyét. Mivel az altalajban nagy nyomásértékek is vannak, a pórusvíznyomás növekedésével is számolnunk kell, mely a töltés állékonyságára negatív hatást gyakorol, mivel ekkor csökken a víznyomás elleni támasztóerő.

7. táblázat: Az átszivárgó hozam alakulása.

Az átszivárgó hozam alakulása az altalaj figyelembevételének függvényében (m³/d)/(m)		
	Altalaj figyelembevételével	Altalaj figyelembevétele nélkül
Lázbérc	0,0953	0,1996
Halászhomok	0,0184	0,003081
Révleányvár	0,0108	0,003049
Cigánd	0,0032	0,00142

Lázbérc esetében megfigyelhetjük, hogy az altalaj figyelembevételekor kisebb fajlagos hozam értékeket kapunk. Ezt a gát alatti vízzáró betonfal beépítésével magyarázhatjuk. A betonfal megakadályozza, hogy a víz az altalajon keresztül szivárogon át a mentett oldalra, illetve a vízvezető homokréteg felé tereli a vizet, így megvédve a gáttestet, és az altalajt a teljes átnedvesedéstől (**31. ábra**).



31. ábra: Fajlagos hozamok összehasonlítása.

7.2. A kilépési hosszak összehasonlítása

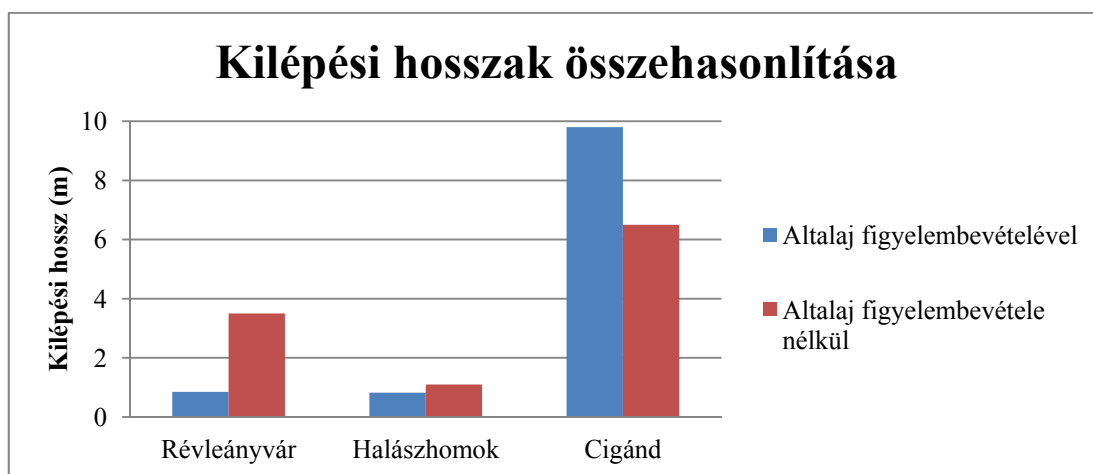
A kilépési hosszak esetében vizsgálataimat csak az árvízvédelmi töltések esetében végeztem el, hiszen a víztározó gátjánál a szivárgó rétegen keresztül történik a víz

kilépése, így a kilépési hossz állandó. A kilépési hosszt a program által kiírt koordinátákból, és az ez által létrejött háromszög azonosságából számoltam ki.

8. táblázat: Kilépési hosszak összehasonlítása.

Kilépési hosszak (m)		
	Altalaj figyelembevételével	Altalaj figyelembevétele nélkül
Révleányvár	0,85	3,5
Halászhomok	0,82	1,1
Cigánd	9,8	6,5

Az összehasonlítás során megfigyelhetjük, hogy a révleányvári, illetve a halászhomoki töltésnél kisebb, míg a cigándi töltésnél nagyobb kilépési hossz értékek jelentkeztek. A révleányvári és a halászhomoki töltés esetében az altalajadottságok megfelelőek voltak ahhoz, hogy a víz ne csak a töltésen keresztül, hanem az altalajban is áramlani tudjon. Cigánd esetében, közvetlenül a töltés alatt egy viszonylag jól vízzáró réteg található, mely nem engedte az altalajba való nagymértékű beszivárgást, így a víz nagyobbik része a töltésen keresztül, kisebb része pedig a vízzáró réteg alatti nagy szivárgási tényezővel rendelkező rétegen jut át (**32. ábra**).



32. ábra: Kilépési hosszak összehasonlítása

8. A modellezési eredmények összegzése

A modellezés során három Tisza menti töltés, és a lázbérci víztározó völgyzárógátjának szivárgási viszonyait vizsgáltam, figyelembe véve az altalaj adottságait is. Vizsgálatom során a töltések esetében a mértékadó árvízhez, a lázbérci tározó esetében a maximális

üzemvízszinthez viszonyítottam. Modellezésem során egy időben állandó folyamatot feltételeztem, mely azt jelenti, hogy a vízállás az viszonylag tartós, és nincs vízszintingadozás.

Az árvízvédelmi töltések esetében megfigyelhető volt, hogy az áramlási vonalak helyzete nagymértékben függ az altalaj adottságaitól: a vastagságtól, és a szivárgási tényezőtől. Az ország nagy részén a folyószabályozások miatt, a gyors áramlást biztosító kavics, illetve homok teraszok, gyakran a töltés altalajainak részei, ezzel gyengítve a vízzáró képességet.

A nyomásviszonyok vizsgálatánál megállapíthatjuk, hogy két esetben is a töltés altalajának vízvezető rétegében találhatók a legnagyobb nyomásértékek. Ez a tény a töltés állékonyságának szempontjából érdekes, mivel ebben a zónában magas pórusvíznyomás alakulhat ki, ezzel nagymértékben rontva a töltés árvíz elleni támasztóerejét, és növelve a buzgárok kialakulásának esélyeit. A sebességviszonyokra jellemző, hogy a mentett oldali töltéslábnál a legnagyobbak a sebességértékek, illetve jelentős az áramlási sebesség növekedése az altalaj vízvezető rétegében.

Összegzésként megállapítható, hogy a töltések hidraulikai, és hidrodinamikai modellezése nagymértékben segítséget nyújthat a vízügyi szakembereknek. A modellezések által előre láthatóak az esetleges meghibásodások, rézsúcsúszások, gátszakadások. Városok, települések tekintetében elmondható, hogy egy esetleges töltésszakadás nagymértékű katasztrófához vezethet, mely a modellezés eszközével könnyebben elkerülhető. A jövőbeli tervem más víztározó gátjának a vizsgálata is, illetve már megtörtént gátszakadások, rézsúcsúszások esettanulmánya. A modellezési eljárás sokkal egyszerűbb és szemléletesebb számítási mód, mint az analitikus megoldások. Ezáltal időt megtakarítva elkerülhetőek a 2010-es árvízhez hasonló károk.

9. Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Új-Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Végül köszönetet szeretnék mondani **Zákányi Baláznak** egyetemi tanársegédnek, a dolgozatomban való segítségnyújtásért, illetve az **ÉRV ZRt. Környezetvédelmi, és Technológiai Osztályának**, hogy a szükséges adatokat a rendelkezésemre bocsátották.

Irodalomjegyzék

- Az ÉRV ZRt. kezelésében álló Lázberci víztározó védőterületének felülvizsgálata (Felülvizsálati dokumentáció)
- Imre E.: Az árvízvédelmi gátakban lejátszódó vízáramlás modellezése, Hidrológiai közlöny, 89. évf. 2. szám (2009. március-április)
- Kertész-Káldosi Zs.: Fenntartható fejlődés a Tisza-völgy térségében, a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése program, VIII. Környezettudományi Tanácskozás, Győr 2008.
- Kovács B.: Hidrodinamikai és transzportmodellezés I. Miskolc (2004)
- Környezetvédelmi- és Vízügyi Minisztérium, Vízügyi Hivatala: Árvízvédekezés a gyakorlatban, 105-111. oldal, Budapest (2004)
- Nagy L.: Buzgárok, Magyar Hidrológiai Társaság, XXVIII. Országos Vándorgyűlés, Sopron, 2010.
- Országos Vízügyi Hivatal: Árvízvédelem, Vízügyi Dokumentációs Szolgáltató Leányvállalat Nyomdája (1987.)
- P. Szucs, F. Civan, M. Virag: Applicability of the most frequent value method in groundwater modeling, Hydrogeology Journal 2006
- Szlávik L.: Magyarország árvízvédelmének fejlesztési politikája, VITUKI Rt. (2000)
- Szunyog Z., Zalányi T.: Települések helyi vízkárelhárítási feladatai Budapest (1998)
- Vágás I.: Második honfoglalásunk: A Tisza-völgy szabályozása, Hidrológiai közlöny, 87. évf. 3. szám, 30-38. oldal (2007. május-június)
- Völgyesi I.: Árvédelmi töltések szivárgáshidraulikai modellezése. Hidrológiai Közölny, 88. évf. 1. szám (2008. január-február)
- Völgyesi I.: Árvédelmi töltések szivárgáshidraulikai modellezése, Budapest (2004)
- www.ekovizig.hu
- www.vizugy.hu
- Zákányi B.: Gáttesten átszivárgó vízhozam számítási módszereinek összehasonlítása, Miskolc (2004.)
- Zákányi Balázs: Az árvízvédelmi gátak és töltések szivárgásának meghatározási módszerei (Diplomamunka 2006.)
- Zákányi B., Sücs P. : Völgyzáró gát és árvízvédelmi töltések hidraulikai vizsgálata SEEP2D modullal. Hidrológiai közlöny, 90. évf. 4. szám (2010. július-augusztus)