



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA 2011

Pálfi Gergely

Műtárgyak tönkremeneteléből fakadó bizonytalanság árvízi elöntések modellezésénél



Konzulensek:

Dr. Krámer Tamás, egyetemi docens

Dr. Maren Niemeyer, önálló építőmérnök szakértő

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	2
A Markazi-tározó és a Bene-patak völgye	2
A duzzasztógát tönkremenetele és ennek modellezési módszerei.....	6
Árvízi veszélytérképezés, elöntésmodellezés.....	8
Az elöntés 3D, 2D és 1D modellezése	11
A Markazi-tározó völgyének modellje.....	12
Modellezési megoldások	14
Töltések, átereszek tönkremenetelére vonatkozó változatok	19
(7)-es változat.....	20
(3)-as változat	25
(4)-es változat	27
(5)-ös változat.....	28
(6)-os változat.....	28
Konklúzió	34
Köszönetnyilvánítás	35
Képjegyzék.....	36
Ábrajegyzék	36
Táblázatjegyzék	37
Hivatkozások.....	37

Bevezetés

TDK munkám témája a műtárgyak tönkremeneteléből fakadó bizonytalanság az árvízi elöntésmodellezéseknél. Hazánk remélhetőleg egyik kiemelt feladata lesz a közeljövőben árvízi veszélytérképek készítése, melyek elengedhetetlen kelléke az elöntésmodellezés. Az ehhez használatos számítógépes numerikus modellek olyan eszközök, amik segítik a mérnökök munkáját, ha jól és megfontoltan használják őket. Azonban a nem megfelelő beállításokkal is adnak eredményt. Ezen helytelen beállításokat utólag felismerni és kijavítani sokkal nehezebb, mint megfontoltan, gondosan kidolgozva, elsőre jól felépíteni a modellt.

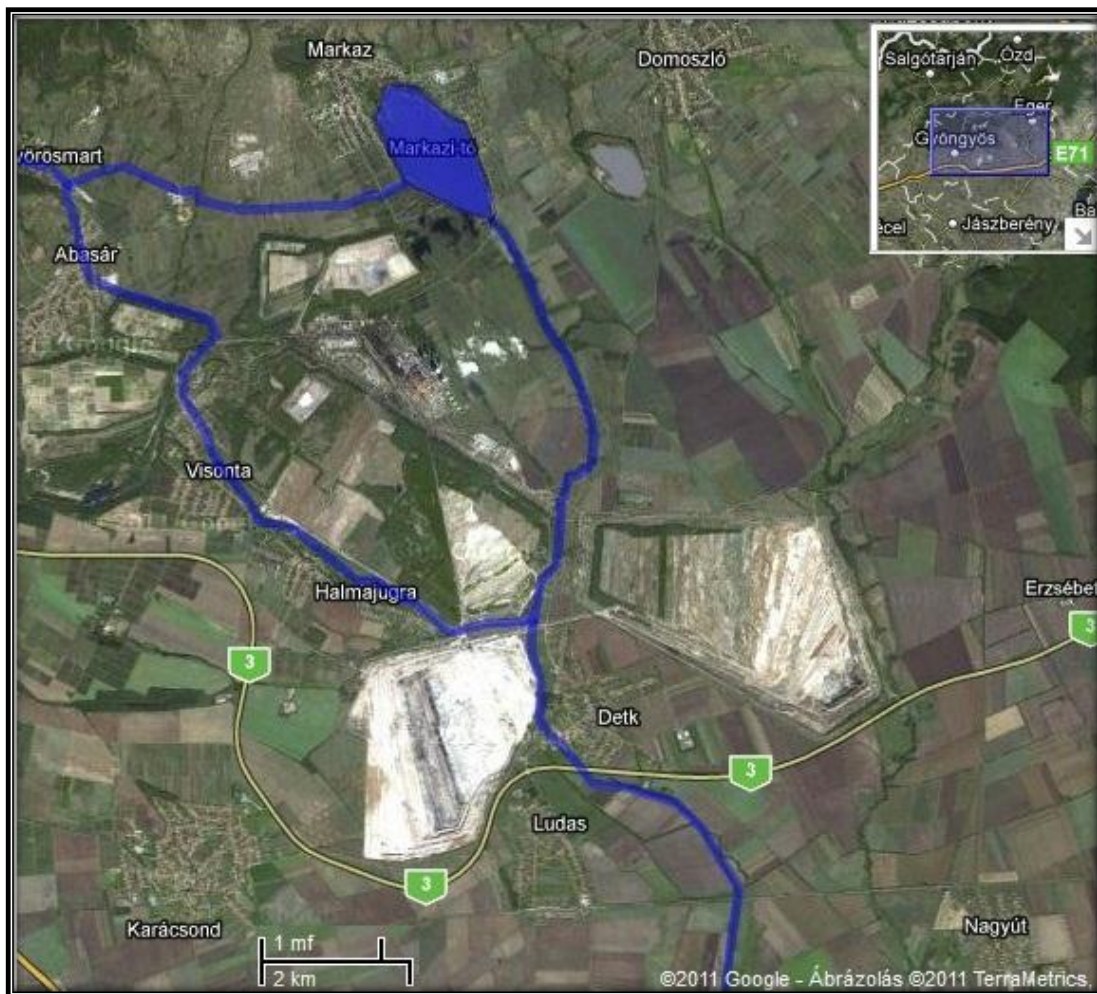
A numerikus modellek matematikai képletekkel írják le, közelítik a valóságot. A gyakorlati szempontból jó modell a futási idejéhez, felhasznált erőforrásához, bemenő adatigényéhez mérten pontosan írja le a valóságot. Eközben sok egyszerűsítést tesz, amik esetleg úgy hatnak a modell végeredményére, hogy az nem lesz belül egy megengedhető hibahatáron. A modellezés komplex folyamatában számos olyan tényező is van, ami a modellező döntésére van bízva, hogy figyelembe veszi-e vagy sem. Ezen döntésekre szintén nagyon érzékeny lehet a végeredmény. A jó modell megválasztása a modell építőjének első feladata. Napjaink számítástechnikai színvonalán már elérhetőek olyan számítógépek, amelyekkel nem kell kompromisszumot kötnünk a számítási igényben, azonban sok más tényező is meghatározza a leghasznosabban alkalmazható modellt.

A Markazi-tározó példáján szeretném megmutatni a műtárgyakhoz (töltésekhez, átereszekhez, hídnyílásokhoz) kapcsolódó különböző feltevések hatását a végeredményekre, megállapítom ezen feltevések helyességét vagy helytelenségét, valamint általános következtetéseket vonok le a tapasztalatok alapján. Remélhetőleg a terep összetettsége valamint a műtárgyak rendszere hozzájárul e következtetések felhasználhatóságához más elöntéseknél. A modellezés általános bemutatása után kitérek a műtárgyak bizonytalanságának okaira és javaslatot teszek ezen okok megszüntetésének lehetőségéről is.

A Markazi-tározó és a Bene-patak völgye

A Heves megyében található, a Mátra hegyvonulataitól délre lévő tározót a Mátrai Erőmű Zrt. (volt Gagarin Hőerőmű) létesítette abból a célból, hogy mindig rendelkezésre álljon viszonylag nagy víztömeg, hűtési célokra. Ezt a Bene-patak elterelésével érték el. Pálosvörösmart településnél keleti irányba, egy oldalbukós osztómű segítségével terelték övcsatornába a patak vizét, a régi mederben csak az ökológiai vízigénynek tervezett minimum 20 l/s vízmennyiség maradt. Az övcsatorna a Bene-patak, Vár-patak és néhány

kisebb vízfolyás vizét vezeti a tározóba maximálisan $8 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal. Az ennél nagyobb mennyiségű vizeket az oldalbukón való átbukással a régi mederben vezetik le.



1. kép: A Google Maps által készített műholdkép a területről. Késsel a Markazi-tározó, a Bene-patak, az övcsatorna és a Nyiget-patak.

A csatorna több vízfolyást is keresztez. A Vár-patakkal való keresztezésnél a fent említett osztóműhöz hasonló műtárggyal biztosították a csatorna maximális vízz szállító képességét. Vízzintes vonalvezetése nagyjából párhuzamos a Mátra vonulataival, ezért keresztez sok, olvadási időszakban vizet szállító ideiglenes vízfolyást. Ezek vize is a tápcsatornában kerül levezetésre. Az övcsatornában folyó vízzel, valamint a Nyiget-patak vízgyűjtőjére (10 km^2) hulló csapadékkal töltötték föl a tározóteret 1968-tól, s ez majdnem két évig tartott. Tekintve hogy a tározó $8,7$ millió m^3 vizet tároz, valamint figyelembe véve az elszivárgásnak a csökkenését (kolmatálódás, a szerves anyagok szépen lassan eltömítették a meder pórusait), ez reális töltődési időnek számít, valamint előzetes kalkulációk alapján a tervezők is erre számítottak. A tározó vízutánpótlásán kívül az is a létesítésének célja, hogy a környező bányaterületeket mentesítse a nagyobb árvizektől. A tápcsatorna hossza 5610 fm . A magassági különbségek miatt ($\Delta Z=46 \text{ m}$) bukók sorozatát építették be a betorkolláshoz. Ez 8 bukót jelent, az átlagos szintkülönbségük 4 m .

A Nyiget-patak a tározótól északra ered, völgyét egy 16,5 méter magas gát rekeszti el, ezzel létrehozva a Markazi tározót. A gát földből épült. Vízutánpótlását a Nyiget-patak 10 km²-es vízgyűjtőterülete, valamint a Bene patakból kiágazó övcsatorna 40 km²-es vízgyűjtőterülete



2. kép: A Markazi tározó és az övcsatorna torkolata

biztosítja. A tározó altalaja agyagos, néhol fellelhetők benne finomhomok erek. A 170 ha-os tározótérhez tartozó vízszint 169,0 m.A.f. Legnagyobb hossza 2,3 km, szélessége 1,1 km. Mélysége a gátnál 14,9 m. Itt található a leürítője, amely 10%-os valószínűségű nagyvízre van méretezve és 104 m hosszú. Ez azt jelenti, hogy a 190 cm átmérőjű betoncső 14 m³/s-os vízhozamot tud elvezetni. Ezt egy 11,5 m magas vezérlő

toronyból tudják irányítani, amit egy vasbeton híd köt össze a földgáttal. A tornyon épült a kezelőszemélyzet számára egy hivatalos helység, ahol a munkaeszközöket és a gátra vonatkozó feljegyzéseket valamint adatokat nyilvántarthatják. A Nyiget-patak bal partján, a gát tengelyére merőlegesen került kialakításra a tározó túlfolyója, ami egy oldalbukó. Az építés idejében hatályos előírások szerint ennek tervezése a 0,5-2%-os nagyvízre kellett hogy történjen. Azonban a visontai külfejtés vízlevezetése 1%-os valószínűsége lett megtervezve, ezért a tározó túlfolyóját is 1%-os valószínűségekre tervezték, ami 30,2 m³/s-os vízemésztést jelent. A mértékadó árhullám levonulása azonban a tározó késleltető hatása miatt elhúzódik, így az 1%-os nagyvíz is mérséklődik. A tervezők előzetes számításai alapján csupán 16,9 m³/s fog átbukni az oldalbukón 0,69 m-es magassággal. Ez megakadályozza, hogy a tározó túltöltődjön és a 171,00 m.A.f. koronaszintű földgátat meghágja a víz. A túlfolyó felső részén kialakítottak egy 8 nyílásból álló egyenként 2,0 m széles bukót, ami egy függőleges falú gyűjtőcsatornába vezeti a vizet. A bukószinten mindegyik nyílásnál beépítésre került egy kb. 80 cm magas, hossztengetyében elforgatható vasrács, ami az uszadékot hivatott felfogni. A víz átbukva és továbbhaladva belefolyik a Nyiget-patakba. A magasságkülönbség legyőzésére surrantók egymásutánját tervezték a túlfolyó csatornájába.

A gát mentett oldali részsűje 1:2,5 a vízoldali pedig 1:3 hajlású. Mindkét oldalon, különböző magasságban egy 4 m széles padka van kialakítva. A vízoldali részsű alját betonlapokkal burkolták. A többi felületen 15-20 cm-es humusréteg található. A gáttest vízzáróságát agyagmaggal biztosították, amit a kiszáradástól valamint a túlzott átnedvesedéstől egy görgeteges kavicsból készült védőtest véd meg. Az agyagmag a hasonló anyagú altalajba a

terepszint alatt 1,5 m-rel fogazással van bekötve. Ez fontos hiszen az agyagmag biztosítja, hogy az állandó vízborítottság ellenére a töltés nem ázik teljesen át.

A tározót horgásztóként is hasznosítják a helyiek (az erőmű egyesületén keresztül), mivel igen gazdag halpopuláció él benne (ponty, amur, süllő, csuka, harcsa, balin, dévérkeszeg) valamint távolabbról is járnak ide a szabadidejüket eltölteni az emberek. Tehát a tározó beépült az itt élők mindennapjaiba.



3. kép: A gát mentett oldali részűje és a Nyiget-patak burkolt medre

A völgyben tovább haladva keresztezi azt, majd párhuzamosan halad vele az erőműhöz vezető ipari vasúti pálya. Ez egy viszonylag magas töltésen halad, jól kiemelkedve a terepből. Ez az első olyan terepakadály, amivel egy esetleges elöntésnél a hullámfront először találkozna. A töltés anyaga az általános vasúti töltésanyag, tehát földmű és zúzottkő ágyazat. Itt a patak jobb oldalán találjuk az erőmű ipari területét. Ettől délre vannak az erőműhöz tartozó külszíni fejtések. Műholdfelvételeken és régebbi térképeken jól látszik, hogy a nyugatabbra levő külszíni fejtést felhagyták és új bányát nyitottak ettől délre. Ez az ún. déli bánya. A két bányaterület között fekszik Detk. A település északi részén torkollik a Nyiget-patak a Bene-patakba. A déli bánya nyitása előtt ez a torkolat délebbre volt csakúgy, mint Halmajugra település déli része. A bányanyitás miatt a településrészt felszámolták a patakmedret pedig északabbra terelték. A torkolat alatt egy szállítószalag pálya keresztezi a patak nyomvonalát, és a pályával párhuzamosan fut egy földút is. Ezen kapcsolatokat egy 6 m átmérőjű körszelvényű áteresszel oldották meg. Van egy átereszt a földút alatt, valamint egy a szállítószalag alatt is. Ezután a patak Detk és a déli bánya között folyik el, majd keresztezi a 3-as számú főutat. A bánya és település között egy nagyon szűk, mélyebb rész található, tehát a vízszint emelkedése itt egészen biztosan veszélyezteti a detki lakosságot. A terület már síknak tekinthető, itt a várakozások szerint szétterül az áramlás és sekélyen, nagy



4. kép: A déli bánya északi részén lévő töltés alatti 6 m átmérőjű átereszt

kiterjedéssel halad tovább, az M3-as autópálya felé. Itt legelők, rétek, valamint mezőgazdasági területek vannak, tehát egy esetleges elöntés kisebb károkat okozna.

A duzzasztógát tönkremenetele és ennek modellezési módszerei

A duzzasztógát tönkremenetele többféleképpen bekövetkezhet. Nem feltétlenül van szó a teljes szerkezet megsemmisüléséről, az is elképzelhető hogy a túlfolyó meghibásodása miatt, a tározó egyszerűen túltöltődik és valami oknál fogva elmarad az emberi beavatkozás. Ekkor a vízszint lassan meghágja a völgyzáró gát töltéskoronáját, és azon átbukik a víz. Már ekkor a gát tönkremeneteléről beszélhetünk, hiszen a magassági elvárásoknak nem felelt meg. A gát tönkremenetelének egyik lehetséges módja, hogy rendkívüli meteorológiai viszonyok miatt nem vártan sok csapadék esik a vízgyűjtőre és a túlfolyó valamint a leürítő műtárgy nem képes elvezetni a megnövekedett vízmennyiséget, ami átbukik a gátkoronán. A tönkremenetel bekövetkezhet földrengésből is, ahol az egész völgyzárógát struktúrája sérül meg. Az is elképzelhető hogy a fenntartási munkák hiánya okozza a tönkremenetelt. A markazi tározónál, ha a fenntartó elhanyagolja a túlfolyón levő gerebrács folyamatos tisztítását és az uszadék eltömedékeli azt, akkor a tározó túltöltődhet. Ha a gáttest nem homogén, akkor kontúrszivárgás következik be, ami szintén egy lehetséges ok lehet a tönkremenetelre. Ha a vízdali rézsű elhabolás következtében megsérül és a keresztmetszet lecsökken, akkor a szivárgási úthossz lerövidül, megnövekszik a hidraulikus gradiens és könnyebben jöhet létre talajtörés, esetleg a mentett oldalon rézsűcsúszás.

A tönkremenetel modellezése nem könnyű feladat, mivel nagyon sok bizonytalanságot tartalmaz. Egyik módja hogy analógiát keresünk más, hasonló méretű, anyagú, tározóterületű és tározótérfogató gátakkal. Ezután feltételezzük, hogy a sok hasonló paraméter miatt, a gát tönkremenetele is hasonlóságot mutat, ezért átvehetjük a másik gát tönkremenetelének adatait. Egyértelmű hogy a főbb paraméterek még nem garantálják, hogy a tönkremenetel metodikája is hasonló lesz, de közelítésnek elfogadható, ha nincs jobb ötletünk. Azonban ennél a módszernél is szükséges néhány kritérium. Kell, hogy legyen statisztikailag elég értékelhető adat, amely szoros kapcsolatban van egymással. Ha ugyanis nincs benne szoros kapcsolat, akkor semmi sem utal rá, hogy az aktuális esetben meg tudjuk becsülni a gát tönkremenetelének részleteit.

Van tapasztalati képlet is, amivel közelítjük a gátszakadást. Ilyen például az ún. Macchione-féle modell (Macchione 2008). Ez a modell a Chézy képletet veszi alapul, egyik fő paramétere a "k" simasági együttható. Egy háromszög szelvényű szakadást feltételez, amely fő paramétere a koronától számított mélység (h), valamint a háromszög csúcsának bezárt szöge (α). A szög történelmi gátszakadások alapján földgátaknál éles, kőgátaknál kevésbé. A szelvény bővülése folyamán ezt a szöget a modell konstansnak tekinti egészen addig, amíg a szelvény bele nem ütközik a küszöbszintbe és onnantól trapéz alakot nem vesz fel. Ez földgátaknál a teljes magasság 80%-nál következik be statisztikai adatok alapján. A kőgátak

teljes mélységig berágódnak. Amikor a szelvény mélysége elérte a teljes magasság 80%-át, akkor az alsó éle (ami eddig egy pont volt) szélesedni kezd ezen a magasságon egy vízszintes vonal mentén. A gáttest alakjából tudjuk a koronaszélességet valamint a különböző szintű berágódásoknál a folyásszint szélességét. A Chézy képletben használt sebességképletet átrendezve kifejezhetjük az energiavonal esését, ami esetünkben a felszíngörbe esésének felel meg.

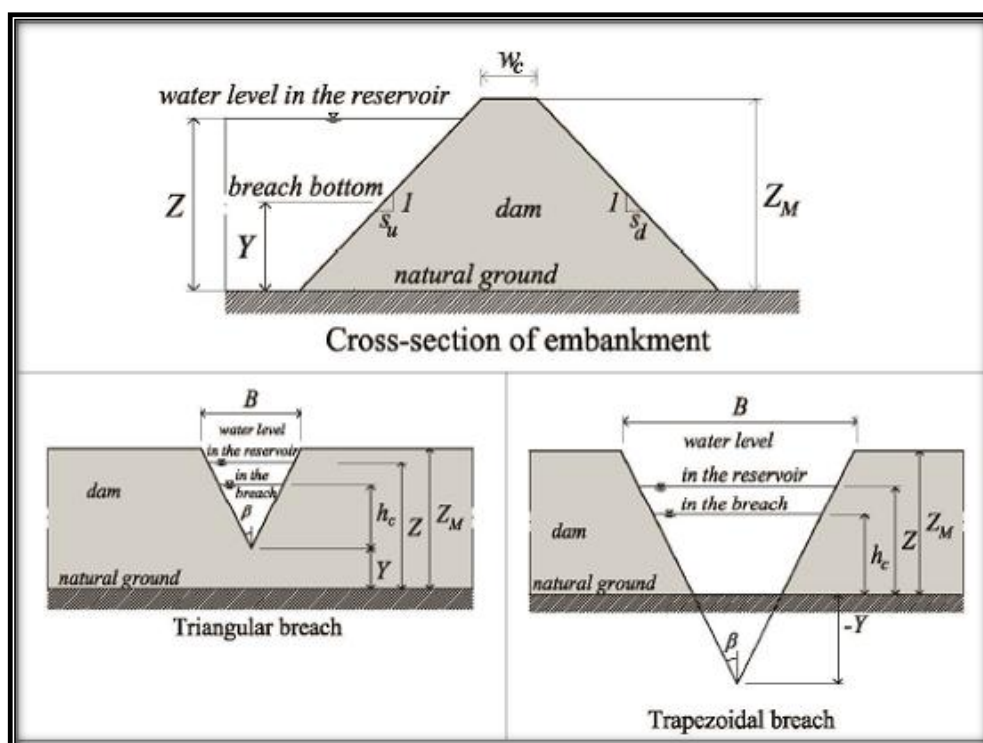
$$S = \frac{v^2}{k^2 * R^{4/3}}$$

Ahol S az energiavonal esése, v a víz középsebessége, k a Manning féle simasági tényező, R a hidraulikus sugár.

Így a Chézy képlet segítségével megkaphatjuk a csúsztatófeszültség értékét. További feltételezés hogy a τ csúsztató feszültség megegyezik a nehézségi gyorsulás erejével. Ezt kifejtve kapjuk, hogy a csúsztatófeszültség értéke nem más, mint a fajsúlynak, a hidraulikus sugárnak, valamint az energiavonal esésének a szorzata. Ebbe visszahelyettesítve a Chézy sebességképletből kapott energiavonal esését azt kapjuk, hogy:

$$\tau = \gamma \frac{v^2}{k^2 * R^{1/3}}$$

Ahol τ a csúsztatófeszültség, γ a víz fajsúlya, v a víz középsebessége, k a Manning féle simasági tényező, R a hidraulikus sugár.



1. ábra: Macchione (2008) szakadási modellje. Felső ábra: A gát keresztmetszete. Alsó ábrák: A szakadási szelvény a szakadás kezdetén háromszög alakban, majd később trapéz alakban.

Így egy adott pillanatban a szelvényterület ismeretében a Chézy képlettel számíthatjuk a vízhozamot, melyből megkapjuk a csúsztatófeszültség értékét is. A következő feltételezés, hogy a csúsztatófeszültség értéke lineárisan arányos az erodáló erővel. Ez az erózió növeli a szelvényterületet, amely alapján azt prognosztizálhatnánk, hogy nő a vízhozam. Egy bizonyos ideig ez igaz is lesz, azonban ne feledjük, hogy a kifolyás jóval nagyobb volumenű, mint a tározóhoz való hozzáfolyás, ezért a vízszint csökkenni kezd. A csökkenő vízszint csökkenti a kifolyás nedvesített területét, ezáltal a vízhozamot. Ha ezt különböző időlépésekben kiszámoljuk és az időlépések kellően rövidek, akkor egy sima felületű vízhozam idősort kapunk a szakadásról.

Sok közelítéssel élünk ebben a modellben, ezért kétséges a megbízhatósága és sok tényezőre nagy az érzékenysége. A Chézy képlet permanens vízmozgások leírására ad lehetőséget, azonban itt közel sem biztos, hogy az áramlás permanens. Nagy bizonytalansága van a felvett "k" simasági tényezőnek, nem tudjuk, hogy a háromszög szakadási szelvény megfelelően közelíti-e a tényleges szakadást. A csúsztató feszültség lineáris összefüggése az eróziós erővel is nagyfokú egyszerűsítésre enged következtetni, amely nem biztos hogy megengedhető.

Egy másik lehetőség hogy a DHI által készített MIKE szoftver ún. DB (Dam Break – Gát szakadás) modulja képes a gát teljes geometriáját kezelni valamint leírni a tönkremenetel módját és a szakadás helyét térben és időben.

Vannak 2D és 3D modellek, amelyek képesek együtt, integráltan kezelni az elöntést valamint a gátszakadást. Ezekbe a modellekbe be van építve a gát morfológiájának és a hordalékmozgásnak a kezelése is, valamint ezek egymásra hatása. Ilyen lehetőségei is vannak a Norvégiában, Trondheim egyetemén kifejlesztett SSIIM modellnek. A program jó referenciákkal rendelkezik és népszerű, mivel megjelenése óta szabadon hozzáférhető és futtatható.

A különböző folyamatleírásokkal kapott vízhozam idősor, egyik kulcstényezője az elöntésmoделlnek. Az egész modellezésbe egy nagy bizonytalanságot viszünk, hiszen a bemeneti adatsornál kétséges hogy a valóságot mennyire pontosan írja le. Nem remélhetünk pontos leírást a valós folyamatokról, ha a bemeneti adatokat is nagyfokú hiba terheli. Erre a paraméterre nagy érzékenységet mutat a modell.

Árvízi veszélytérképezés, elöntésmoделlezés

Az Európai Parlament és Tanács 2007. október 23-án léptette életbe „Az árvízkockázatok értékeléséről és kezeléséről” szóló irányelvét (2007/60/EK irányelve). Ennek értelmében a tagországoknak vagy azoknak az országoknak, akik meg szeretnék valósítani az irányelv szempontjait, végre kell hajtaniuk az előzetes árvízkockázati értékelésnek, árvízi veszélytérképeknek, árvízkockázati térképeknek, valamint árvízkockázat-kezelési terveknek az elkészítését. Az árvízi veszélytérkép lényege az árvíz hidraulikai jellemzőinek helyszínrajzi

ábrázolása. Ilyen jellemzők a területi kiterjedés, a vízmélység, a tartósság, a sebesség, az elöntés ideje és a vízszintemelkedés sebessége.

Leggyakrabban ezek közül a területi kiterjedés szerepel, ugyanis ezt a legkönnyebb utólag rekonstruálni. Sokáig látszik a házak oldalán, a fű kiégésén, az uszadék-lerakódásokon. Azonban a kár értéke nem azonos azokon a helyeken ahol elöntés volt. Biztosak lehetünk, hogy az elöntött területen keletkezett kár, azonban a területi eloszlása már nem egyértelmű. A kérdés az, hogy a kár ami keletkezett az a társadalom vagy egyén számára elviselhető-e avagy sem, és ha igen akkor milyen mértékben. A területhasználatok jól jelzik a terület érzékenységet. Egy rét és egy kisváros központja között hatalmas különbségek vannak a bekövetkező károk mennyiségében.

A vízmélység egy fontos paraméter, ugyanis ha például az elöntés magassága egy területen fél méter körüli, akkor az homokszákolható, van reális esély a javak megóvására. Azonban egy négy méteres vízborítottságnál már csakis az emberélet mentése jöhet szóba. Az emberek tájékoztatásánál is az egyik legfőbb információ szokott lenni a tetőzési szint, valamint ennek a szintnek a helyszínrajzi ábrázolása a társadalom felé megfelelő tájékoztatást ad és megelőzi az esetleges pánikot. Szociológiaiilag fontos hogy a társadalom megfelelően legyen a megfelelő információkkal ellátva.

A tartósság például megadhatja, hogy a művelési ágban a kukorica túléli az árvizet vagy esetleg tönkremegy. Ezt a víztűrőképességgel tudjuk jellemezni, amely azt fejezi ki, hogy egyes növényfajok mennyi ideig képesek elviselni a vízborítottságot a termés csökkenése nélkül. Ez a terménykiesési statisztikáknak is az egyik pillére lehet. Megvizsgálhatjuk a különböző építőanyagok tűrését is a vízborítottságra. Tudjuk, hogy a vályog szinte azonnal elveszíti szilárdságát, ha vizet kap. Ezzel szemben teljesen máshogy viselkedik a fa, a beton, stb. Ezek a jelenségek részben függetlenek a vízmélységtől. Árvíznél nem mindegy a tartósság a védekezés szempontjából sem. A homokzsáktöltés a 4-5 napos terhelést bírja azonban a 10 naposat már esetleg nem.

A víz sebessége a markazi tározó gátszakadásának példájában igen nagy. Olyannyira hogy a terep morfológiáját teljesen átformálja a víz munkája, az árhullám után szinte rá sem lehet ismerni a területre. Ez is olyan paraméter, ami fontos döntések oka lehet. Ha a vízsebességet megszorozzuk a vízmélységgel, akkor megkapjuk az impulzust, ami a víz elragadó képességével arányos. A gyors és mély víz könnyen ledönthet embereket a lábukról, és nagyobb, több tonnás járműveket is könnyedén arrébb mozdíthat, nem beszélve az elemi romboló erejéről. Ezzel szemben a gyors áramlású víz kis magassággal nem jelent ilyen fajta veszélyt, mivel jóval kisebb az impulzusa. A lassú víz például nem mossa ki a földműveknek az anyagát, a gyorsfolyású víz – mivel nagy az elragadó képessége – igen, ami járulékos veszélyhelyzetet idézhet elő.

Hasonlóképpen fontos az elöntés ideje. Ahova az elöntés néhány perc alatt elér ott nincs mód felkészülni a védekezésre. Azonban ha több óránk van, esetleg fél napunk, akkor ez az

időelőny biztosíthatja, hogy sikerrel meg tudjuk szervezni a védekezést netán a javak biztonságba helyezését, az emberek evakuálását. Mindezt persze megfelelően elő kell készíteni riasztórendszerek telepítésével és azok folyamatos monitoringozásával. A vízszint emelkedés sebessége döntő szerepű a veszélyhelyzetek megoldásánál. Gyorsan emelkedő vízszintnél lecsökken a kárelhárítás hatékonysága. A kolontári lúgömlés óta a köztudatban van, hogy nagyon fontos az ilyen veszélyhelyzetek időzítése. Egy esetleges éjjeli elöntés az emberélet megóvása és kármentés szempontjából akár végzetes is lehet. Míg mindez nappal, a déli órákban teljesen más helyzetet teremt.

Ha ismerjük egy elemi terület elöntésének a különböző hidraulikai paramétereit, az elöntés valószínűségét, valamint a hidraulikai paraméterekhez tartozó kár értékét, akkor a valószínűség és a kár összeszorításával megkaphatunk az elöntés okozta várható kár értékét, amely végül megfelel az ottani árvízi kockázatnak. Ennek segítségével különböző elöntési forgatókönyvekre és különböző előfordulási valószínűségekre készíthetünk olyan tematikus térképeket, amelyek megmutatják, hogy melyek azok a területek ahol egy elöntés következtében a károk értéke nagyon magas vagy éppen elhanyagolható. Így rajzolódhatnak ki olyan területek, amelyek „rovására” lokalizációval megmenthetünk értékesebb területeket. Azonban ezeket a térképeket folyamatosan frissen kell tartani, hiszen a terep, a beépítettség és annak értéke is nagyon gyorsan tud változni. Véges azon helyek száma, ahol biztonságban vagyunk a nem túl alacsony valószínűséggel előforduló elöntések ellen. Ezért kénytelenek vagyunk olyan területeket is hasznosítani, amelynek kockázata van. A hasznosítás jellege is meghatározza, hogy jogos a területet mindenképpen megvédeni vagy célszerűbb más helyekre koncentrálni, mert máshol ugyanannyi befektetett munkával esetleg nagyobb kárenyhítést tudunk elérni.

Lényeges tehát az összes paramétert vizsgálunk és különböző forgatókönyveket készíteni ezek változása alapján. Nagyon sok változatot kell megvizsgálni, azonban megéri, hiszen a bajban is hideg fejjel tudunk döntéseket hozni a megfelelő információk birtokában.

Többféle módon fel lehet dolgozni a bemenő adatokat. A legegyszerűbb eljárás a tetőző vízszinteket a domborzatra vetítve megkapni az elöntés kontúrvonalát. Ebből tudjuk, hogy mely területek kerülnek víz alá. Ez a terület digitális terepmodellje és a tetőző vízszint ismeretével különböző térinformatikai szoftverekkel megkapható. Azonban ilyen formában nem veszi figyelembe a terepi súrlódási veszteséget, valamint nehezen alkalmazható akkor, ha a terep összetett és lokalizációs vonalak szabdalják. Dombvidéki vízfolyások nyílt árterén azonban gyors eredményeket kaphatunk ezzel a módszerrel. További pontosítások miatt fizikai alapú modellekkel kell leírni az elöntést. Ezeknek három fajtáját különböztetjük meg: a tározási cellán alapuló modellt, az 1D-s illetve a 2D-s modellt. Ezeket kitűnően összefoglalja Krámer és társai (2009) cikke:

„A tározási cellán alapuló modelleket tekinthetjük a legegyszerűbbeknek. Ezekkel a modellekkel az öblözetet kisebb-nagyobb cellákra bontjuk fel. A cellán belül a vízszintet konstansnak tekintjük, a cellák közötti vízforgalmat a vízszintjeik különbsége alapján

súrlódási összefüggésekkel vagy bukóképlettel számítjuk. Ezek a modellek tehát kielégítik a térfogatmérleget, de az impulzusmérleget erőteljesen leegyszerűsítik. A modellek mérete a terepmodell felbontásától és a számítási kapacitástól függ. [...] A terepi előntés számítására számos egydimenziós (1D) hidrodinamikai modell kínálkozik, a legismertebbek ezek közül a HEC-RAS, Mike 11, Isis, Sobek. Ezek az impulzusegyenlet teljes alakját megoldva a vízhozam és a közepes vízszint hosszmenti eloszlásával írják le a vízmozgást. Leginkább hosszúvás, egy irányba lejtő öblözetekben javasolható az alkalmazásuk. Ebben az esetben az öblözet domborzatát a hossz tengelyére közel merőleges, egyenes vagy tört tengelyű keresztmetszelvényekkel írjuk le. [...] Az 1D modellek legfontosabb előnye a másik két modellosztályhoz képest, hogy gyorsabbak és az adatigényük sokszor könnyebben kielégíthető. [...] Alkalmazhatóságuk a hazai töltésezett ártéri öblözetekben azonban erősen korlátozott, mivel az előntés terjedése általában kétdimenziós jellegű, vagyis nem jellemezhető egyetlen hossz tengellyel. Sőt, a terjedési útvonal sokszor közelítően sem jósolható meg, ez pedig az 1D modell felállításának előfeltétele. ”

A 2D-s modellek szemben a tározási cellán alapuló és 1D-s modellel vízszintes síkban a teljes impulzusegyenletet megoldják így részletesebben írják le a vízmozgást. Lehetőségünk van területi érzésségek beállítására valamint a terep pontosabb leképezésére. Érzékeny területe a száraz cellák kérdése, azaz hogy milyen vízmélységnél tekintsen egy cellát száraznak (ebben az esetben a program nem oldja meg a cellára az egyenleteket). Nagyon alacsony beállított értéknél a modell instabillá válhat. A pontosabb eredmények megkövetelik, hogy részletesebb bemenő adatot adjunk meg. Ilyen például a részletes rácsfelbontás, amely részletesség a modell futási idejét többszöröseire növeli. Néhány szoftverben lehetőség van a speciálisan 1D modellel kellő pontosságú részek integrálására a 2D modellbe.

Az előntés 3D, 2D és 1D modellezése

Tehát sok tényezőtől függ, hogy a vízmozgás leírásához milyen dimenziószámú modellt használunk. Gátat szab neki a rendelkezésre álló idő, szoftver, bemeneti adatállomány, kimeneti adatigény, a vízmozgás jellege, előzetes ismeretek a vízmozgásról, stb. Magasabb dimenziószámú modellezéshez nagyobb számítási kapacitás (memória, processzor sebesség) kell. A 3D-s modell nagyságrendekkel lassabban fut le adott vízmozgásnál, mint a 2D-s vagy 1D-s modellek, mivel sokszorosára nő az ismeretlenek száma a megoldandó egyenletekben.

3D-s modellt ott használunk ahol lényeges a térbeli eloszlás vizsgálata. Ez a leírásmód adja a legáltalánosabb, azonban a legköltségesebb leírást. A számítási igény valamint a bemenő adatigény is ennél a legnagyobb. Leírja a vízszintes síkú valamint függőleges változásokat így a szakadási szelvényénél részletes képet kaphatunk a függőleges gyorsulásokról valamint a különböző hidrodinamikai jelenségekről.

A 2D-s leírás már nem tartalmazza a függőleges mozgások leképezését, azonban képet kapunk vele a keresztirányú áramlásokról, a keresztirányú felszínesésről, valamint az előtött terület kiterjedéséről. Ez fontos, mivel terepi előttnél előre nem ismert az áramlás tengelye, a terep morfológiája összetett, és nem egyértelműek a peremfeltételek sem (mederben, terepen, stb). Általános feltételezés ilyen esetben a hidrosztatikus nyomásváltozás és a mélység menti egyenletes átkeveredés.

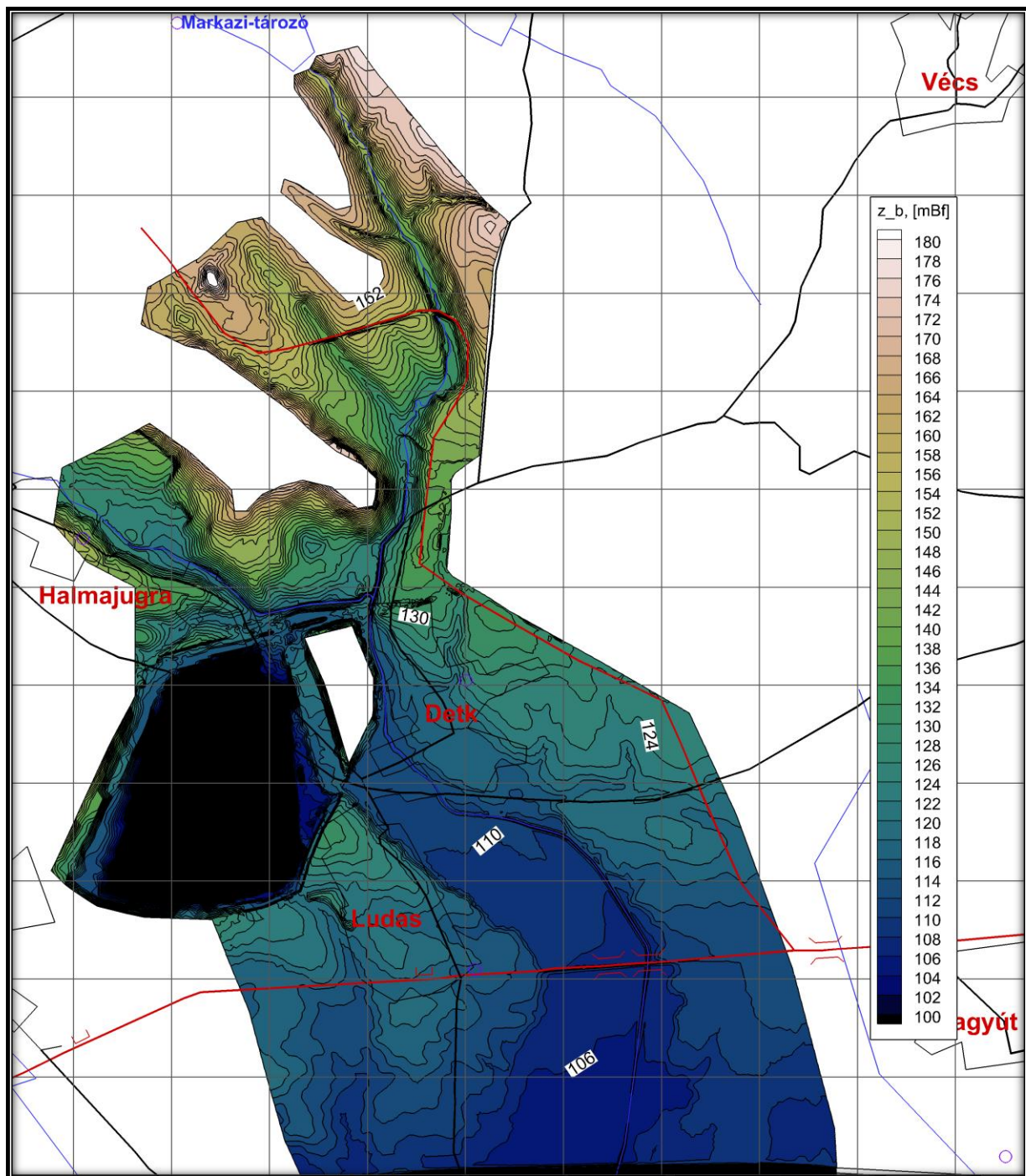
Az 1D-s modelleknél rendszerint ismerjük a vízmozgás tengelyvonalát és nem foglalkozunk az erre a főirányra merőleges változásokkal (vagy hatásuk jól becsülhető a főirányú mozgásra). Alkalmazásakor gyakori feltételezés a közel egyenletes sebességeloszlás a keresztiszelvényben, valamint a tengelyirányú áramlás.

A Markazi tározó völgyének modellje

A dolgozat esettanulmányának, a Markazi-tározó völgyének az előttnsmodellje igényli a domborzat megadását, tehát szükség volt egy domborzati modellre. A domborzati modell egy digitális terepmodell, amely megadja a vizsgált terület morfológiáját. A hidrodinamikai modell ezek alapján az adatok alapján is számítja az előttns hidraulikai paramétereit, ezért a modell bizonyos részeinek kidolgozása nagyon fontos. Azonban ennek részletességét mi döntjük el, így fontos a megfelelő tapasztalat a jó terepmodell elkészítéséhez. Sok egyszerűsítést tehetünk, ami nem befolyásolja döntően a modell végeredményeit, azonban a terep feldolgozásának munkáját nagymértékben gyorsítja, segíti. Vannak helyek és objektumok, amiknek a méreteit és/vagy elhelyezkedését pontosan kell ismernünk a megfelelő pontosságú leíráshoz, máshol nagy elnagyolásokat, elhanyagolásokat is tehetünk. Azonban ha ezen egyszerűsítéseket nem szakszerűen végezzük vagy helytelenül mérjük fel az egyszerűsítés lehetőségét, akkor az a modell használhatóságát döntően befolyásolja.

A terület legtöbb adatát jpeg képek digitalizálásával kaptam. Az M=1:10 000-es topográfiai képeket a FÖMI (Földmérési és Távérzékelési Intézet) biztosította. A bányatevékenység miatt a terület folyamatosan változik, ezért a bányák környezetéről a Márta Erőmű Zrt. geodétái által rendszeresen mért pontokat használtam. Ezek alapján sok lényeges változást tudtam fölvezetni a terepmodellre. Például a Halmajugra mellett lévő bánya létesítése miatt a 3-as sz. főutat el kellett terelni ezért ezen a szakaszon teljesen új vonalvezetést kapott, valamint a település déli részét át kellett adni a bányaterületnek, ezzel új mederbe kényszeríteni a Bene-patakot. Így a patak torkolata is új helyre került (kissé északabbra), ezért itt megváltoztak az esésviszonyok. Ugyanis hogy szintben találkozhasson a Bene és a Nyiget-patak, a Nyiget-patak mederszintjét is le kellett süllyeszteni a torkolati részen. A digitalizálást AutoCAD-ben végeztem.

A domborzat megfelelő leírása érdekében terepi mérésekre is szükség volt, mivel nem volt információ a völgyet elrekesztő töltések magasságáról, azokon lévő átereszek méreteiről.



2. ábra: A lehatárolt terület domborzati viszonyai

A 2011. szeptemberi méréssel együtt bejárás is volt és élőben is megnéztem a területet. A terepi mérésen nagy pontosságú RTK (Real Time Kinematic) GPS segítségével gyorsan felmértük a töltések koronaszintjét, valamint mérőszalaggal és lézeres távolságmérővel az átereszek főbb méreteit. Ezen felmérés jóval nagyobb pontosságot biztosított, mint amire szükségem lett volna. Terepi előltnél elegendő lett volna a 10 centiméteres pontosság, ezzel szemben az RTK GPS-szel egy nagyságrenddel pontosabb adatokat kaptam. A felmérés

során bejártuk a tározó környékét, valamint az ipari vasúti vágány töltésén végigmértünk egészen Detk település északi részéig. A Google Earth orthofotói alapján azonosítottam a keresztműtárgyakat és így sikerült felmérni minden olyan töltést, átereszt, hídnyílást, ami a modell szempontjából releváns volt. Voltak olyan műtárgyak, amelyek a helyszíni bejárás tapasztalt alapján nem kerültek bele a modellbe. Ilyen például a tározó túlfolyójának csatornája és a Nyiget-patak összefolyása alatt néhány méterre levő híd. A tározóból kizúduló víz hatalmas energiája elmosza a kis hidat és elenyésző energiát használ fel erre, tehát a modell szempontjából nem volt fontos ennek adatainak rögzítése. Tovább haladva felmértük a Detk irányából az erőműhöz vezető út töltését valamint az áteresztét. Innen végigmértünk a patak mentén, ami a régi, rekultivált bányaterület mellett húzódik. Itt értük el a Bene-patak és Nyiget-patak találkozását, ahol a meder szépen le van burkolva és karban van tartva. Ezután már célzottan mentünk a keresztező műtárgyakhoz, hiszen nem volt későbbi lehetőségünk a szükséges mérések elvégzésére. Felmértük a 3-as számú főút töltését Detktől kiindulva keleti irányban, valamint a közforgalmú vasútvonal töltését a Bene-patak szélesebb környezetében. Az M3-as autópálya töltésére nem volt lehetőségünk elmenni ezért az ehhez szükséges adatokat a Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ által fenntartott www.hidadatok.hu weboldal adatbázisából vettem.



5. kép: A nagy pontosságú RTK GPS mérés gyakorlati egyszerűsége



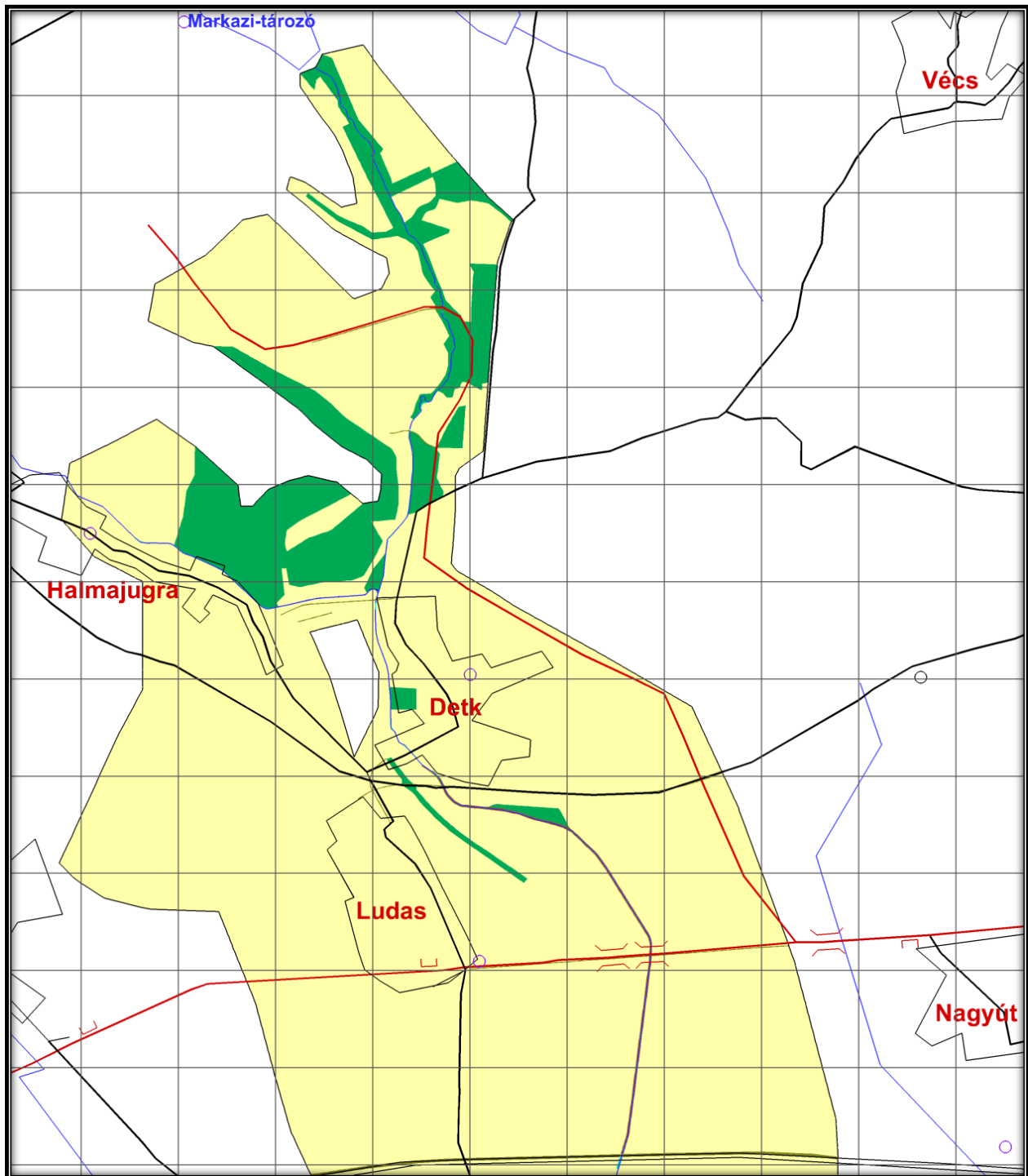
6. kép: A bejárás tapasztalt mederviszonyai a Nyiget-pataknak

Modellezési megoldások

Miután a felmért pontok is belekerültek a terepmodellbe, elkezdtem a terület számítási rácsból készíteni a struktúráját. Erre az SMS 10.1 programot használtam, ami felszíni vízmozgást modellező rendszer egy-, két és háromdimenziós hidrodinamikai modellekhez. Ennél a fázisnál lehatároltam a területen a vonalas objektumokat úgy mint a patakmeder és a töltések. Ezen kívül még területeket is határoltam el egymástól aszerint, hogy jellemzően milyen a felszíne. Elkülönítettem erdős területet és szántót. A modellben egységesen $k=30$

$m^{1/3}/s$ a simasági tényező, azonban ezen változtathatunk. A modellben lehetőség van cellánként beállítani a simasági együtthatókat, azonban célszerű területi osztályokat felállítani, amiknek hasonló lehet a simasága és ezeket a területeket azonos "k" tényezővel ellátni.

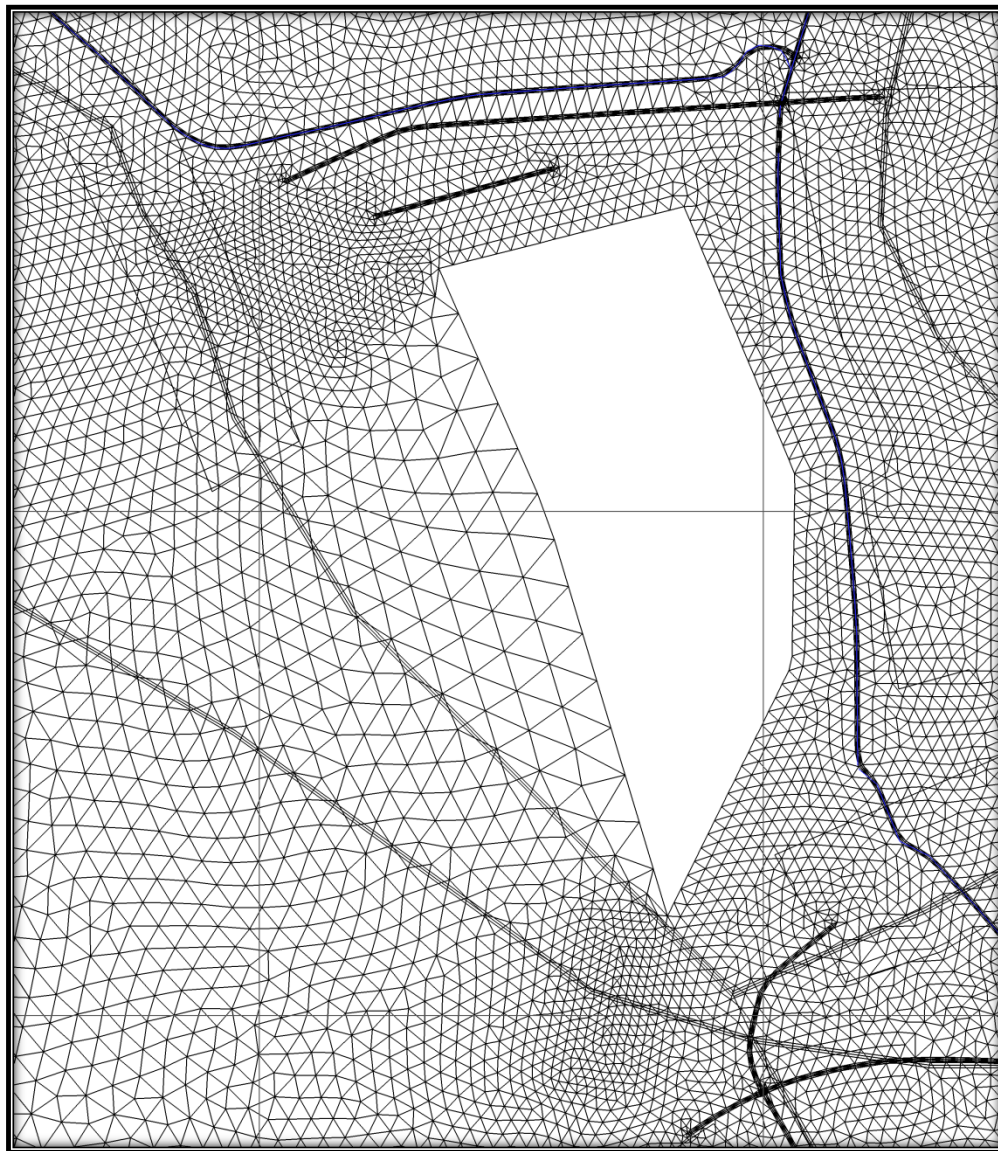
A 3. ábrán látható a terület lehatárolása valamint a területhasználat. Világosbarna a szántó típusú terület és zöld az erdő típusú. Kék vonal a patak, fekete vonallal van ábrázolva a közút és piros vonallal a vasút nyomvonala.



3. ábra: A területi lehatárolás és a területjellegek

A terület lehatárolása sem egyszerű művelet. Árvízi elöntéseknél csak sejteni tudjuk a víz útját a domborzat alapján, ezért nagyon nehéz megtalálni a modellterület határait. Ha túl szűkre vesszük fel a határokat, akkor előfordulhat, hogy a modellfuttatás után egészen eddig a lépésig vissza kell nyúlnunk és változtatni a rácshálón. Hogy erre ne legyen szükség, elegendő biztonsági ráhagyással rajzoltam meg a határoló vonalakat. Ez különösen fontos a sík területeken, mert egy dombvidéki patak völgyben szinte magától értetődik a víz útja, ám a sík területen nagyon nehéz előre megjósolni, hogy merre terül el.

Vannak azonban olyan területek, amelyek egészen biztos nem vesznek részt a vízzsárlásban. Ha ebben biztosak vagyunk, akkor nyugodtan kivehetjük a rácshálóból, azonban emlékezzünk rá az eredmények értékelésénél és igazoljuk vissza hogy helyesen cselekedtük-e. A területek ahol különösen fontos, hogy kellően részletes képet kapjunk az áramlásokról, különösen érdekesek, ezért ide sűrűbb rácsháló kiosztást is kérhetünk a határoló vonalak töréspont sűrűségének az állításával. Ezekre mutat példát a 4. ábra.



4. ábra: A déli bánya számítási rácshálókiosztása

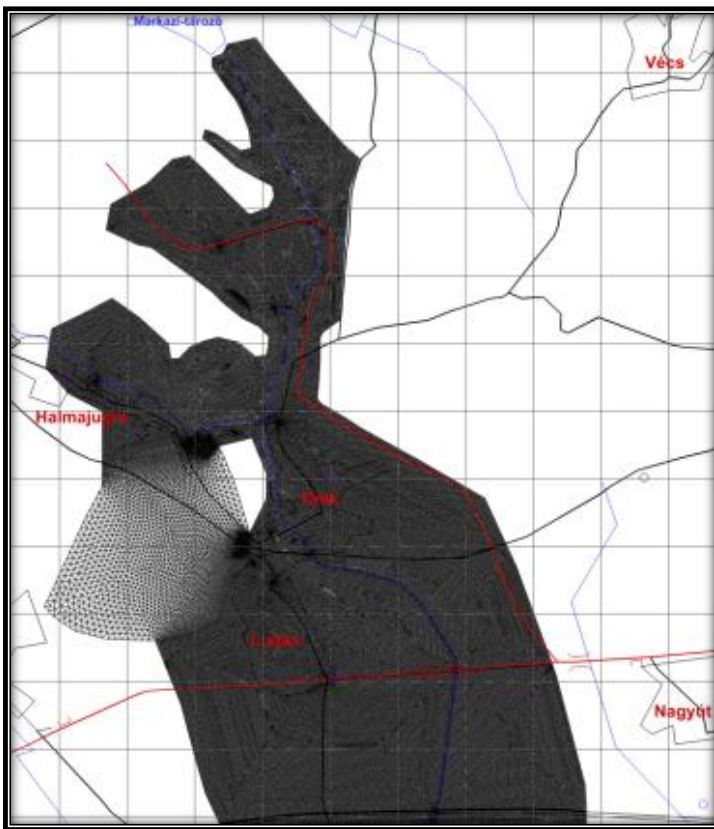
A modell rácshálójának felbontásával egyenes arányban nő a numerikus pontosság (DHI 2011). Ilyen hely például a déli bánya északi részén levő lankás terület ahol valószínűsítem, hogy elönti a bányát a víz. Itt nagy sebességek alakulnak ki mivel a külszíni fejtés szintje jóval alacsonyabban van, mint a környező területek magassága. A bánya lefolyástalan terület óriási tárolókapacitással, ezért itt nem fontos az áramlás pontos ismerete. Főleges lenne a déli bánya területe miatt lassítani a számítást, ezért itt durvább rácsfelbontást alkalmaztam, ahogy az a 4. ábrán is látszik.

A vonalas objektumokat 30 m-es hosszmenti rácskiosztással hoztam létre. A keresztmetszetüket trapéz szelvénnnyel közelítettem melynek fenékszélessége illetve koronaszélessége 3,0 m, a rézsűk vízszintes vetülete szintén 3,0 m. A töltések és medrek (vonalas létesítmények) anizotróp háromszögrács kiosztást kaptak 30 m-es oldalhosszúsággal. Így a rácsháló illeszkedett a műtárgyak kívánt alakjához, valamint az izotróp területek illeszkedtek az anizotrópokhoz. A maradék területet izotróp háromszögrács kiosztással láttam el. A rácsháló kiosztása igen fontos a modell szempontjából.

A hidrodinamikai modell a Dán Hidraulikai Intézet (DHI) által fejlesztett MIKE 21FM 2011. A vízszinteket valamint a vízszintes sebességkomponensek síkbeli és időbeli eloszlásukkal írja le. Rugalmas háromszöghálón diskretizálja a tartományt, képes kezelni a rohanó és áramló vízmozgást valamint az elöntést és szárazra kerülést (DHI 2009a). A modell az ún. Reynolds-

átlagolt sekélyvízi egyenleteken alapszik, amelyek a víz térfogatáramának és impulzusáramának az állandóságát fejezik ki (Krámer et al. 2010). A terep magasságait a rácspontokban (a háromszögek csúcaiban) tartja nyilván, a vízmélységet pedig a háromszög középpontjában. Ha egy fontos területen ezt nem tartjuk szem előtt, akkor ez nagyban befolyásolja a modell helyességét.

A külső peremfeltételeket a következőképpen vettem fel: A modell felső pereme a tározó gátjának a lábvonala. Innen kezdődően zúdul rá a völgyre az a vízhozam, amit a Macchione-féle modellel számítva kaptunk. Tehát a felső perem helye közvetlenül a szakadás alatt van. A modell megadta a vízhozam értékeket



5. ábra: A teljes lehatárolás végleges rácshálója

30 másodperces időlépésenként. Az így kapott árhullámképet mutatja a következő ábra:



6. ábra: A gátszakadás vízhozam idősora

A modell alsó pereme pedig az M3-as autópályától délre van. Itt mesterségesen kialakítottam egy hatalmas gödröt, amibe belefolyhat a víz. Ez elég nagy ahhoz, hogy a tározó teljes víztérfogatát elnyelje.

Belső peremfeltételek is vannak, amelyeket a műtárgyknál alakítottam ki. Két típusát különböztetem meg, a töltés illetve az áteresz típusú. Mindkettő esetében a műtárgynál levő szomszédos cellák között van a belső perem. A töltésnél a modell egy bukóképletet old meg, melynek alakja a következő:

$$Q = \sigma \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} * B * H^{3/2}$$

Ahol Q a vízhozam, σ a korrekciós tényező az alsó befolyásoltság miatt, μ a vízhozam-tényező, g a gravitációs gyorsulás, B a bukóél szélessége, H az átbukás magassága a perem felett.

Az áteresz típusnál hidraulikailag rövid csővezetéként tekintünk a műtárgyra. Többféle módon áramolhat benne a víz: Lehet folyamatosan szabad felszínű áramlású, pulzáló folyás légzsákokkal, végig rohanó állapotú víz a műtárgyban, nyomás alatti átfolyású, stb. Ezek alapján veszteségeket számít a modell (helyi veszteséget a műtárgy elején és végén, valamint hosszmenti veszteséget a kettő között). A kapott eredményekkel folytatódik a szállítás a perem alatti cellában.

Töltések, átereszek tönkremenetelére vonatkozó változatok

Az elöntés hatására különböző forgatókönyveket dolgoztam ki. Ezeknek három változója van, ami megítélésem szerint döntően befolyásolja az elöntést és annak következményeit. Az első változó a töltések állékonysága. Ez nagyban befolyásolja az elöntést, hiszen különböző esetekben akár tíz-tizenöt méteres töltésekről van szó. Ezeket ilyen erősségű elöntésnél nem tekinthetjük sérthetetlennek. A kizúduló víz energiája biztosan kikezdi a töltés anyagát és elmosza azt. Tehát az első változó hogy az ár elmossa-e a töltéseket avagy sem. A modellben a töltés elmosását a patak mederszélességében hajtottam végre. Ez csupán egy közelítés, további vizsgálatok tárgyát képezheti, hogy az elöntés hidraulikai paraméterei alapján a töltés milyen szélességben mosódik el. Egy kiegészítő modell megmutathatná azt a sejtést is, hogy az alsó szakaszon (pl. az M3-as autópályánál) a töltését már nem veszélyezteti az elmosás. Én ezt nem vizsgáltam külön, azoknál a változatoknál ahol a töltést elmossa a víz, ott mindegyik töltésben a patakmeder szélességű vágatot hoztam létre. Természetesen itt találhatóak az átereszek is. Ilyen esetekben feltételeztem, hogy az áterest is elmossa a víz. Azonban a valóság jobb közelítése érdekében szabad forráskódú numerikus modellekbe „beépíthető” lenne a Macchione-féle gátszakadási modell. Ezzel úgy vélem nagyban növekedne a modell valósághoz való közelsége.

A második változó a töltésekben levő műtárgyakra vonatkozik. Az árhullám roppant erejével fákat dönt ki és visz magával, sok egyéb mással egyetemben. Így a sok hordalék és uszadék miatt elképzelhető hogy az átereszek eltömődnek és nem képesek a vízzsállításra. Ennek a valószínűsége egyre csökken az átszakadástól való távolodással, azonban számolnunk kell vele.

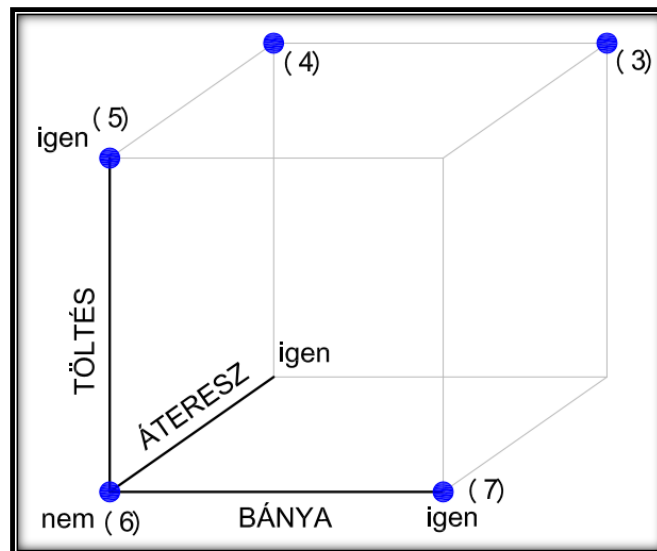
A harmadik változó a déli bánya előnthatósága. Előzetes modellfuttatásokból kiderült, hogy azon a területen ahol számítottam rá, hogy a bánya elöntésre kerülhet, valóban van lehetősége a víznek áramlani. Ennek megakadályozására a bánya tulajdonosa építhet oda egy depóniát vagy védtöltést, hiszen a bányában több milliárd forintos bányászati gépek és infrastruktúra van, amit az elöntés tönkretenne. Érthető, ha ezeket védeni akarja. A harmadik változó tehát ezt vizsgálja, hogy a bányába van-e lehetősége bejutni a víznek. A bánya kizárását az elöntésből egy fal segítségével oldottam meg a modellben.

Tehát a három változó részletei:

	(3)-as változat	(4)-es változat	(5)-ös változat	(6)-os változat	(7)-es változat
BÁNYA	előntható	nem öntható el	nem öntható el	nem öntható el	előntható
TÖLTÉS	nem szakad át	nem szakad át	nem szakad át	átszakad	átszakad
ÁTERESZ	átjárható	átjárható	eltömődött	eltömődött	eltömődött

1. táblázat: A változatok változóinak összefoglaló táblázata

A három változót ábrázolhatjuk térben is. Ha egy térbeli derékszögű koordináta-rendszerben helyezzük el a változókat, mindegyiket külön tengelyen, a két értékük pedig az origóban és attól egység hosszúságra van, akkor ez egy kockát eredményez, ami az előntésnek az eseménytere.



7. ábra: Az állapottér ábrázolása

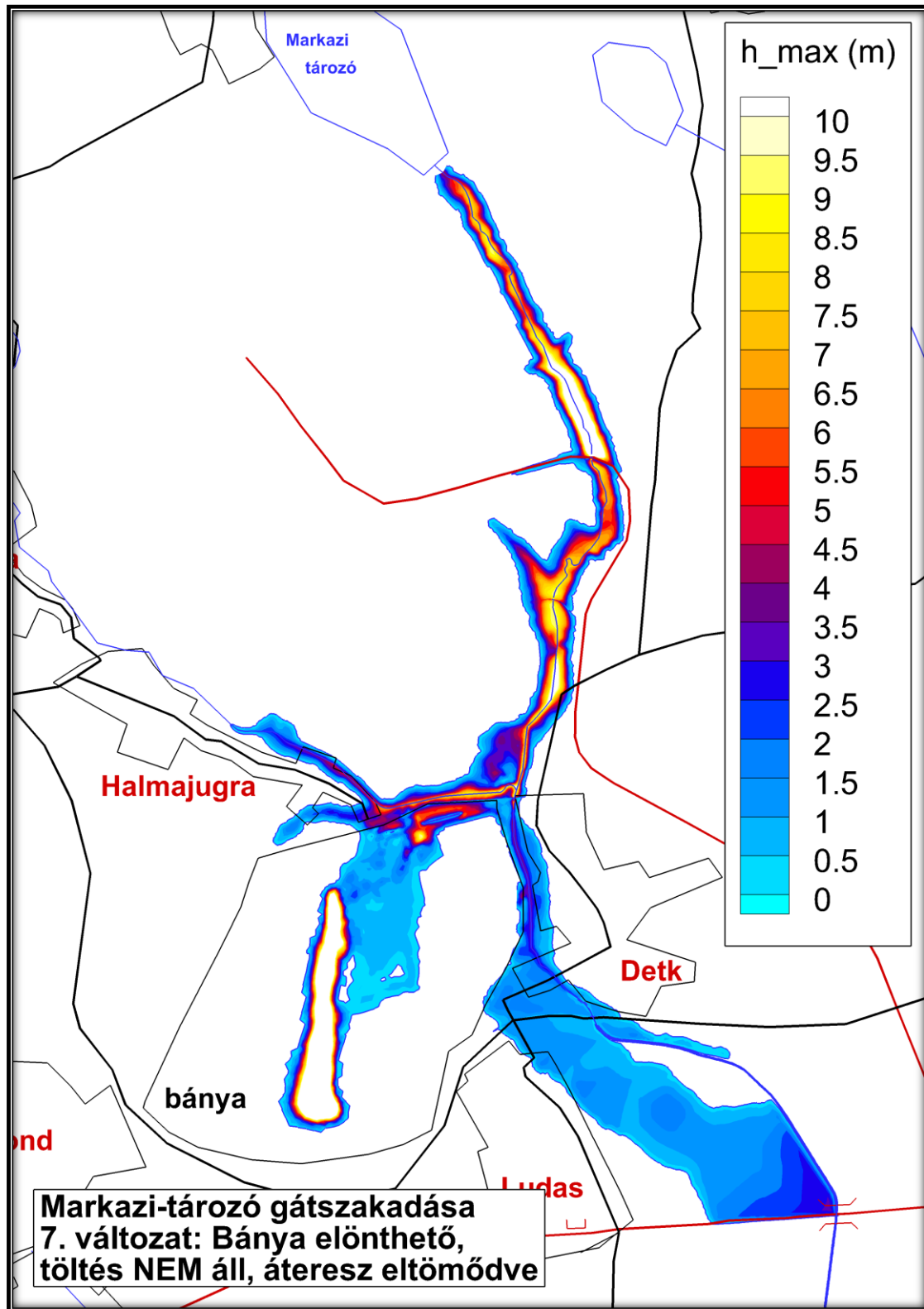
A kocka csúcsai közelítik a valóságot, a lehetséges valós változatok ezen kocka határoló lapjain belül vannak. A vizsgálataim a kocka 5 csúcspontjára tejednek ki. Összesen 8 változatot lehetne ezek alapján feldolgozni, azonban azt a két esetet, amikor a töltéseket elmossa az ár, de az átereszek nincsenek eltömődve nem tartottam szükségesnek elemezni, mivel messze elrugaszkodnak a valóságtól. Nem elemeztem továbbá azt a változatot, amikor a bánya előntésre kerül, a töltéseket nem mossa el a víz, azonban az átereszek eltömődnek. A többi változat tetőző szint eredményeit elemezve arra a következtetésre jutottam, hogy a modell a patak felső szakaszán nem érzékeny az átereszekre valamint a töltésekre. Az alsó szakaszon már árnyaltabban igaz ez az állítás. Az elérési idő adatsorokat megtekintve pedig számít az átereszt átjárhatósága, mivel a meghágáshoz először fel kell töltenie a töltés fölötti teret és csak miután elérte a koronaszintet, akkor folyhat tovább, szemben az áteresszel, ami rögtön átvezeti a víz egy részét.

Tehát a keresztművek hatása megmutatkozik az előntés különböző adataiban. Ezek alapján az adatok alapján hasonlítom össze a különböző változatokat és vonom le az általános következtetéseket. A referenciaváltozat a (7)-es számú volt. Ehhez a változathoz hasonlítottam a többit, kivéve ha egy másik változathoz való hasonlítás látványosabb differenciát mutatott.

(7)-es számú változat:

Ez a referencia állapot, és talán ezt tartanám a valósághoz legközelebbinek. Itt a bányát elöntheti a víz, a töltéseket elmossa. Megfigyelhetjük, hogy a bánya véstározóként működik. A legmélyebb pontján akár 35 m-es vízmélység is kialakulhat. A bánya fölötti

dombvidéki szakaszon 10-12 m-es vízmélységek adódtak. Ezeket a patak völgye vezette le, majd nagy része beleömlött a tározóba. A víztömeg nagy részét elnyelte, csak kevés százaléka folyt tovább a Bene-patakban. Azonban itt a várakozásoknak megfelelően szétterül, tehát a területi elöntés jelentősebb, azonban nem alakulnak ki a dombvidéki szakaszhoz hasonló vízmélységek.



8. ábra: A referenciaállapot elöntésének maximális vízmélységei

Detk és Halmajugra a két település, amit veszélyeztet az elöntés. Detk nyugati településhatárában folyik a Bene-patak, valamint Halmajugrán is a belterület peremén helyezkedik el a meder. Az elöntés csupán néhány házat és szőlőskertet érint. Ám ezeken a helyeken a vízmélység jelentős. Halmajugrán a házak vonalában 1,8-2,0 m-es a vízszint. Detken 1,6-1,8 m-es. A lehetséges menekülési útvonal a település magasabban fekvő része, amely nincs messze mivel Halmajugra déli része és Detk keleti része a patak völgy oldalába épült. Ekkora magasságnál lehetőség van még a házak felsőbb emeletein, esetleg a padláson átvészelni az elöntést. Erre Halmajugrán kínálkozik lehetőség ott ugyanis a vízsebesség 0,5 m/s-os maximummal vehető figyelembe. Ez a 2,0 m-es elöntési szinttel (nem pontosan esik egybe a két érték időbeli eloszlása, de közel esnek egymáshoz) 1,0 m²/s-os impulzust eredményez. Ez tapasztalatok szerint az a határ, amely alatt az ember még nem veszíti el az egyensúlyát. Természetesen ez sok mindentől függ: egészségi állapot, életkor, stb. Detken a maximális vízmélység és a maximális sebesség (3,0-3,3 m/s) szorzata jóval nagyobb impulzust eredményez. Ez az embereknek már biztos egyensúlyvesztést jelent, és a házakban is könnyen kárt tehet. A víz nyomóereje általánosan a következőképpen számítható:

$$F = \rho * Q * v * (1 - \cos\alpha)$$

Ahol F az erő, ρ a víz sűrűsége, Q a vízhozam, v a vízsebesség, α az eltérítés szöge (esetünkben 90°). Az egyenletben elvégezve a lehetséges egyszerűsítéseket:

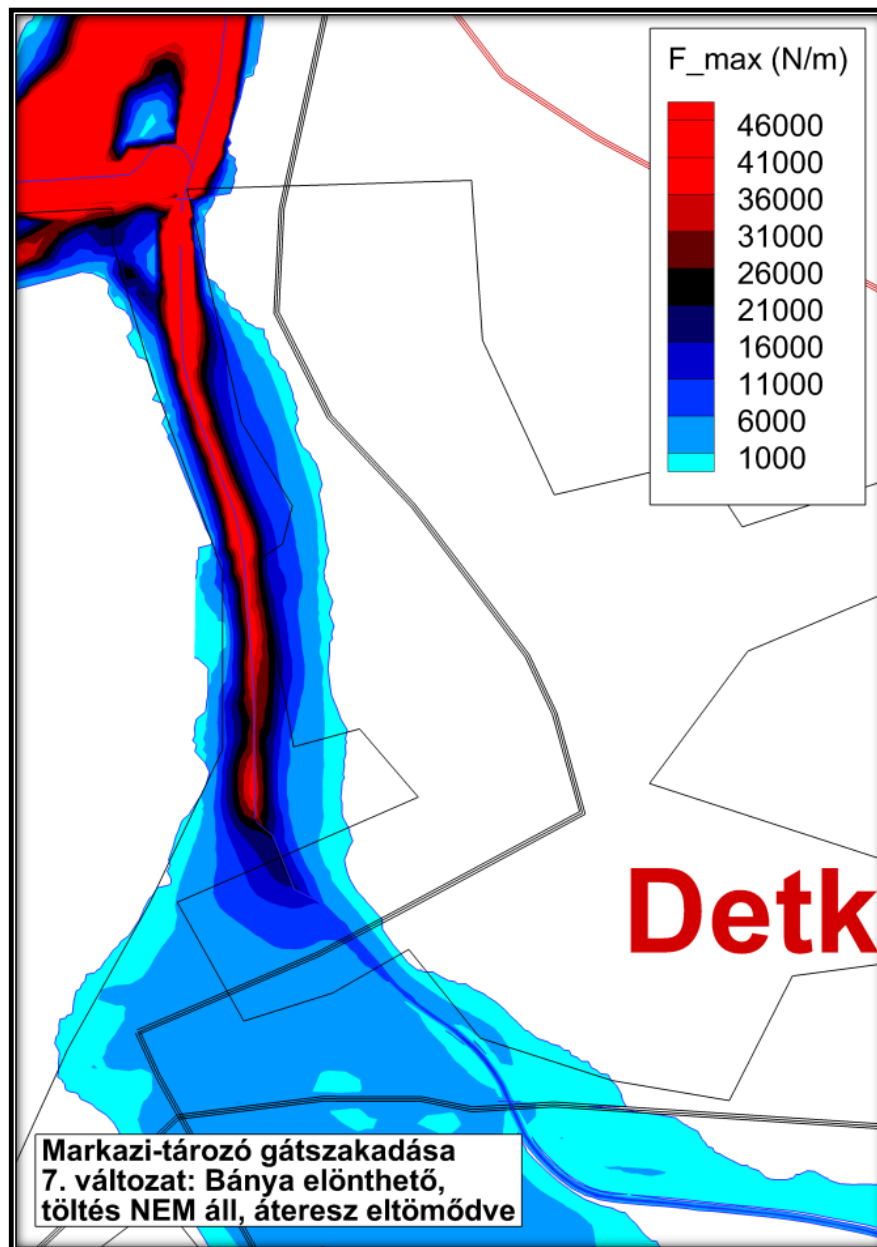
$$F = \rho * v^2 * h * B$$

Ahol F az erő, ρ a víz sűrűsége, v a vízsebesség, h a vízmélység, B a szélesség.

A következő oldalon lévő 9. ábrán az egységnyi szélességre jutó nyomóerők eloszlását láthatjuk Detk elöntött területén.

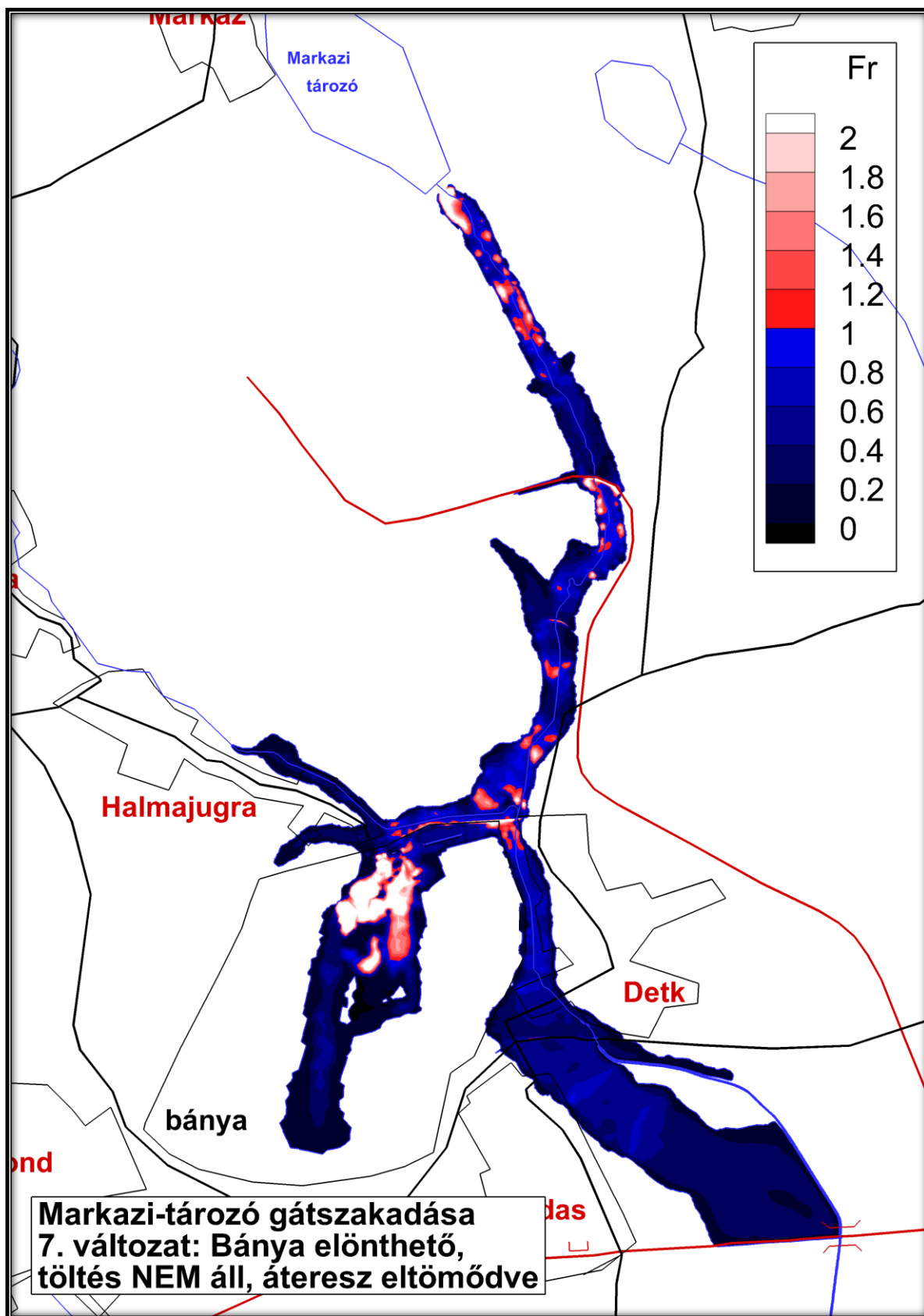
Nem feltétlenül csupán a víz hatásáról kell említést tenni, hanem a járulékos veszélyekről. Előfordulhat, hogy egy teherautó nagy felületére jutó erő elmozdítja a járművet és nekilöki a házfalnak. Szerencsétlen esetben a jármű kisebb felületen érintkezik a fallal, mint amekkora felületen a víz hatott rá. A nyomás így nagyságrendekkel lesz nagyobb és szinte biztosra vehető a házfal tönkremenetel. Ez annak a hatásnak a fordítottja, amit a vasútépítésben kihasználunk. Ott ugyanis a vasúti kocsik kerekke nagyon kis felületen érintkezik a sínszállal, egységnyi területre nagy erő jut. Ezt az erőt továbbítja a sínszál a keresztaljakra, amelyek már nagyobb felületen érintkeznek egymással. Így hatol le végül a zúzottkő ágyazaton keresztül a terhelés a talajig, ahol már kellően eloszlott ahhoz, hogy ne okozzon problémát.

Detken az árhullám elérési ideje kb. 38 perc, ami a tetőzést 18-20 perccel előzi meg. Egy esetleges riasztórendszer tereztése esetére ez kellő időelőny arra, hogy a település nyugati részén a házakat kiürítsék és a fontosabb, mozdítható javaikat az emberek biztonságba helyezték. Természetesen itt is fontos tényező, hogy a nap melyik szakában történik az elöntés. Éjjel ez az időelőny csupán az emberi élet mentésére elegendő, a vagyonára semmiképp.



9. ábra: Az egységnyi szélességre jutó
maximális erő területi eloszlása

A hidraulikai változókból számíthatunk újabbakat. Ilyen például a Froude-szám, amely megmutatja hogy a vízmozgás áramló avagy rohanó állapotban van. Hogyha a Fr-szám nagyobb mint egy, akkor rohanó az állapot, ha kisebb akkor áramló. Váramozásom szerint a felső szakaszon a nagy sebességek miatt sok helyen számítottam rohanó állapotra. Azonban a nagy vízmélységek folytán a váramozással szemben kevesebb helyen alakult ki rohanó állapot. Ez azt is megmutatja, hogy mely helyeken van alvízi befolyásoltság az áramlásban.

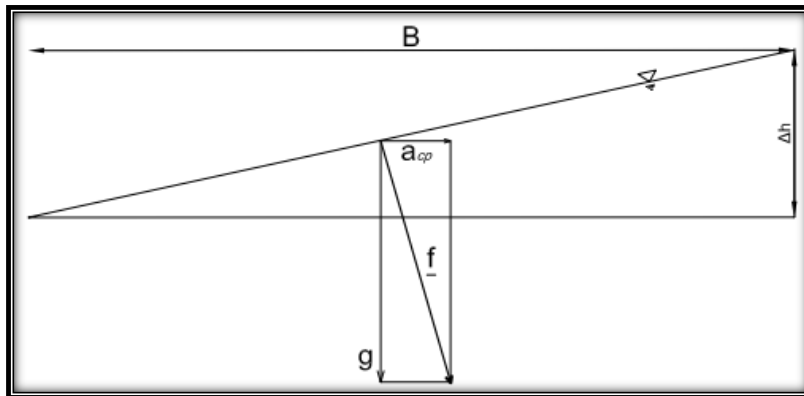


10. ábra: A maximális Froude-szám területi eloszlása

(3)-as számú változat:

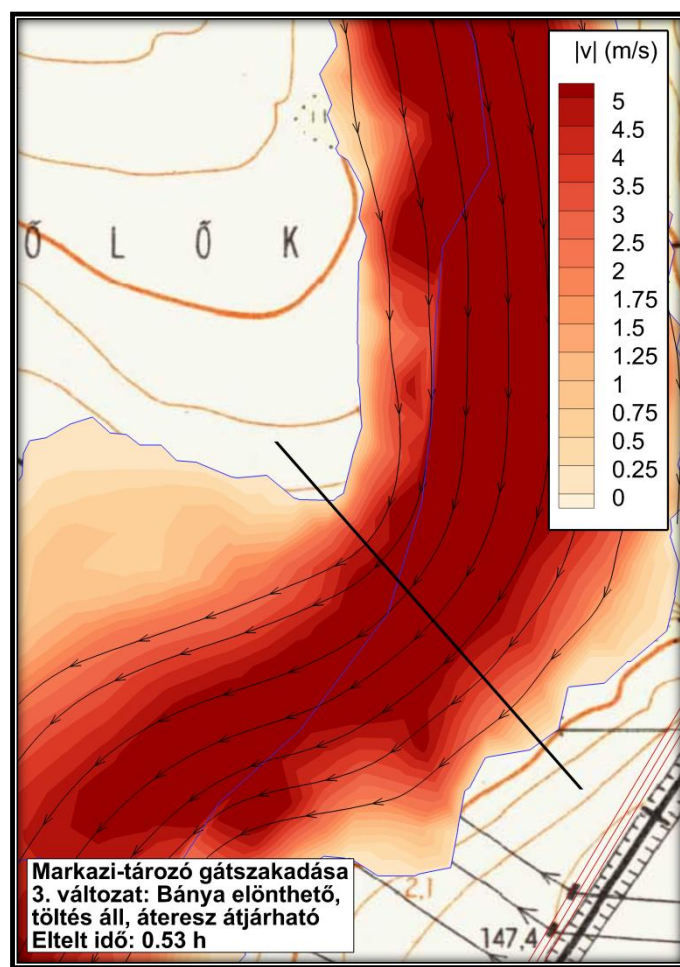
Ennél a változatnál a bányát szintén elöntheti a víz, azonban a töltéseket nem mossa el és az átereszeket sem tömíti el. A tetőzési szintek a dombvidéki részen 10-12 m mélységgel alakultak ki. A településeken megállapítható, hogy 15-20 cm-rel magasabban volt a tetőzési szint, mint a (7)-es változatban, amikor a töltést elmosta a víz. Az elérési idők alapján azt lehet mondani, hogy a belterületeken és a patak alsóbb szakaszán említésre méltó különbségek nem adódtak. A (7)-es változathoz képest az árhullám lassabban érte el a patakmedernek ugyanazon pontját. Ez magyarázható azzal, hogy a felső szakaszon az áteresz ugyan szállított vizet, azonban a töltés annyira lefojtotta az áramlást hogy a vasúti töltésnél 8-10 perc különbség volt a két árhullám között. Ez nem jelentős, tehát kijelenthetjük, hogy a bánya elöntése mellett fellépő más tényezők háttérbe szorultak.

Ennél a változatnál vizsgáltam a víztömeg keresztirányú kilendülését. Folyók kanyarulataiban jellemző hogy a homorú parton magasabb a vízállás, mint a domború parton. Ezt a jelenséget a víz tehetetlensége magyarázza. Két erő hat ilyen esetben a vízirészecskére, egyik a gravitációs erő, a másik a centripetális gyorsulásból származó erő. Ezen erők eredője minden elemi pontban merőleges a vízfelszínre. A centripetális gyorsulást felírhatjuk a sebesség négyzetének és az ív görbületi sugarának a hányadosaként. Hasonló háromszögek miatt, a bal és jobb oldali vízszint különbsége úgy aránylik a keresztmetszet szélességéhez, mint a centripetális gyorsulás a gravitációs gyorsuláshoz:

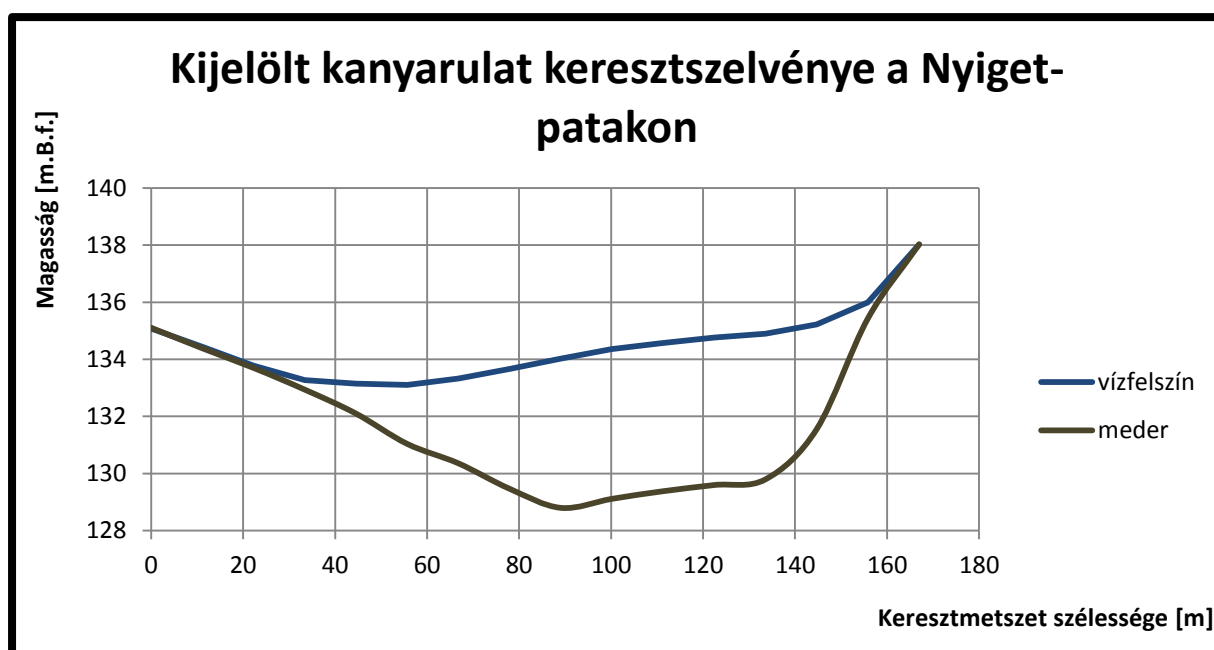


11. ábra: A gravitációs és centripetális gyorsulás eredője merőleges a vízfelszínre egy adott pontban

A helyszínrajzról meghatároztam az ívsugar nagyságát, ami 220 m-re adódott, valamint a víztükör szélességét, ami 163,5 m. Az ívsugar értékével, valamint az átlagos sebességgel kiszámítottam a centripetális gyorsulást, melynek értéke $0,12 \text{ m/s}^2$. Ezek alapján már számítható volt a bal és a jobb oldali vízszint különbsége. Ez 2,0 m-re adódott. A szélső pontok magasságának lekérésével és különbségük képzésével megtudhatjuk, hogy a numerikus számítás eredménye milyen közel van a számításunkhoz. A lekérdezéssel 2,4 m adódott a vízszintek különbségére. Ez egy kiragadott pillanatfelvétel az árhullám levonulásából, mindössze fél órával a szakadás után. Miután csillapodik az ár, a keresztirányú felszínesítés is ezzel együtt lecsökken.



12. ábra: A kijelölt kanyarulat az oldalirányú kilendülés bemutatására

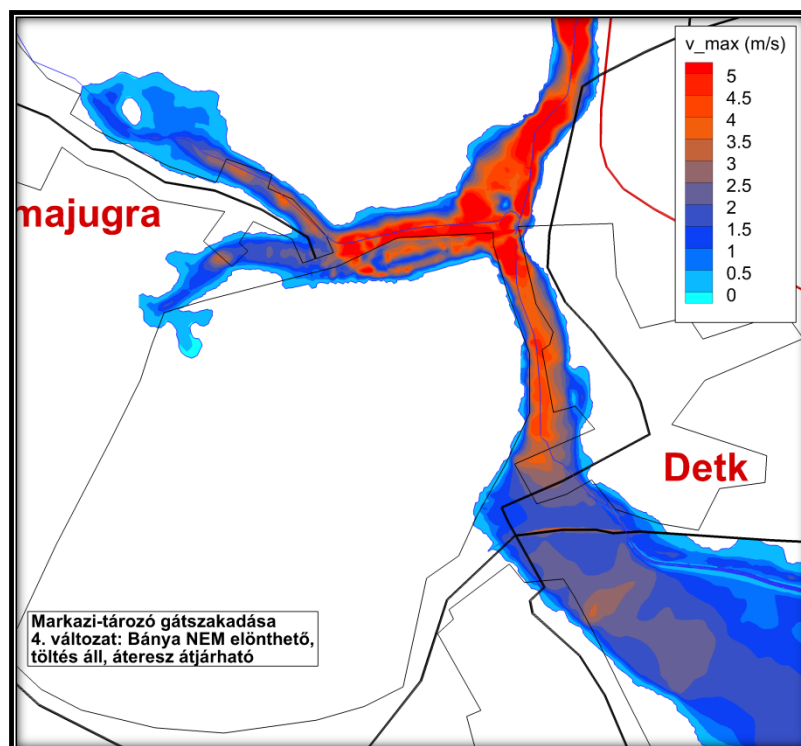


13. ábra: A kijelölt kanyarulat keresztszelvénye

Ez a viselkedés igen fontos az elöntéseknel, hiszen a 2,0 méteres vízszintkülönbség +1 métert jelent a középvonaltól számítva. Az akár azt is jelentheti, hogy egy 1D-s modellfuttatás eredménye azt mutatja, hogy nem önti el a környező területeket egy alkalmas nyeregpontra keresztül az ár. Ez hamis biztonságérzet, amit az elöntésmodellekkel nem fogadhatunk el. A 2D-s modell ezzel szemben közel pontosan kiszámítja a keresztirányú kilendülés mértékét.

(4)-es számú változat:

Ez az első változat, amiben a bányát kizártam az elönthető területek közül. A töltéseket nem mossa el az ár, az átereszek átjárhatók. Arra számítottam, hogy mindenhol nagyobb lesz a tetőzési szint. Ez be is igazolódott. Azzal hogy a bányánál beépítettem egy olyan védtöltést amit nem most el az ár és így távol tartja a vizet a bányagödörtől, Halmajugra település déli része került veszélybe. Ugyanis amikor a bányába befolyhatott a víz, akkora szívóhatása volt, hogy jelentős belterületi részek nem kerültek elöntés alá, csupán néhány szőlőskert és ház. A bánya kizárásával, Halmajugra déli része a Bene-patak visszafolyásán keresztül 2,5-3,0 m-es vízborítottság alá kerül. Valamint az így elöntött területbe beletartozik a település központja, ahol a középületek találhatóak. A 4,0-4,5 m/s-os maximális vízsebesség miatt itt is veszélybe kerülnek a házak. A település megközelíthető marad mentési szempontból. Ennél rosszabb a helyzet Detken, ahol a 3-as számú főutat elmosza az ár. Csak keleti irányból lehet megközelíteni és arról is csak egyetlen bekötőúton. A városban csupán néhány ház kerül elöntésre, de a közlekedés megbénul a környéken mivel a főút járhatatlan lesz. A víz romboló ereje igen nagy, itt is hasonló erejű, mint Halmajugrán. A házakban nem biztonságos maradni ezért az elöntött területen mindenkit biztonságos helyre kell küldeni.



13. ábra: A maximális vízsebességek területi eloszlása a települések környezetében

A déli sík területen a víz szétterül, mivel a bánya nem nyelte el a víztömeg nagy részét, ezért magasabbak a tetőzési szintek. A korábbi 0,8-1,0 m helyett ebben a változatban akár 3,5 m-es vízmélységek is kialakulhatnak. Szerencsére a területen csak művelésből kivont illetve mezőgazdasági hasznosítású területek találhatók, így a kár mértéke nem akkora, mintha belterületen alakulna ki ez a vízmélység. A víz sebessége itt 0,8-1,0 m/s körüli maximálisan.

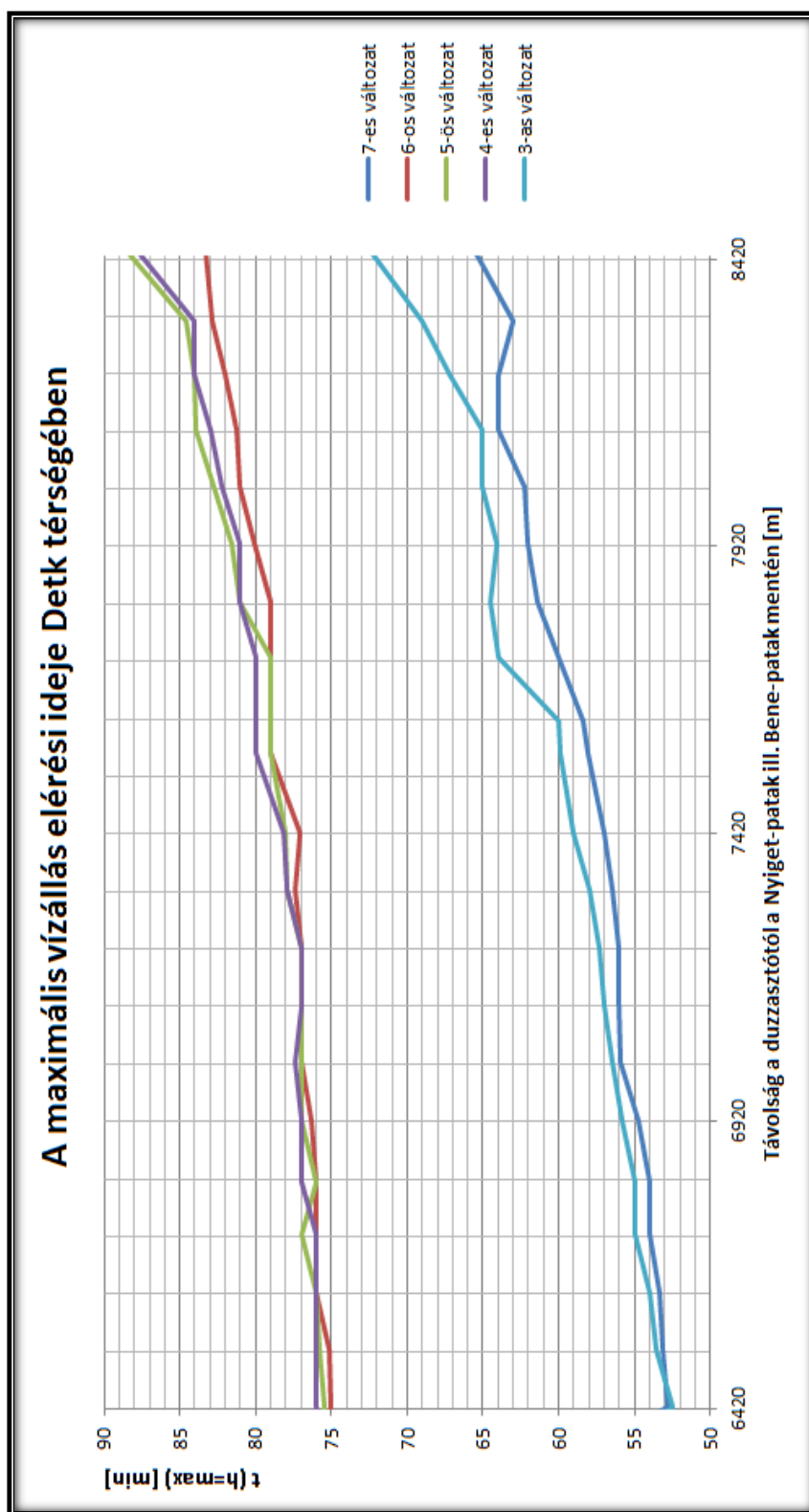
(5)-ös számú változat:

Ebben a változatban szintén nem kerül előntésre a bányaterület, a töltést sem mossa el a víz, azonban szemben a (4)-es változattal, itt az átereszt eltömődik, így a víz csak a töltés meghágásával képes továbbhaladni. Lényeges változás nem tapasztalható a (4)-es változathoz képest. Az déli területen figyelhető meg kis különbség az elérési időben, mivel az átereszt ebben az esetben nem szállított vizet. Az időhátrány abból származik, hogy a víznek először föl kellett töltenie a töltések mögötti területet a koronaszintig és csak utána tudott tovább áramlani. Ez megmutatja, hogy a dombvidéki területen a modell nem érzékeny az átereszekre, a déli területeken pedig csupán a víz megjelenésének az idejében van különbség, egyéb hidraulikai paraméterekben nem. Ezen megállapítások vezettek ahhoz a megfontoláshoz, hogy nem vizsgálom azt a változatot, amikor bánya előntésre kerül, a töltést nem mossa el az ár, de az átereszt eltömődik.

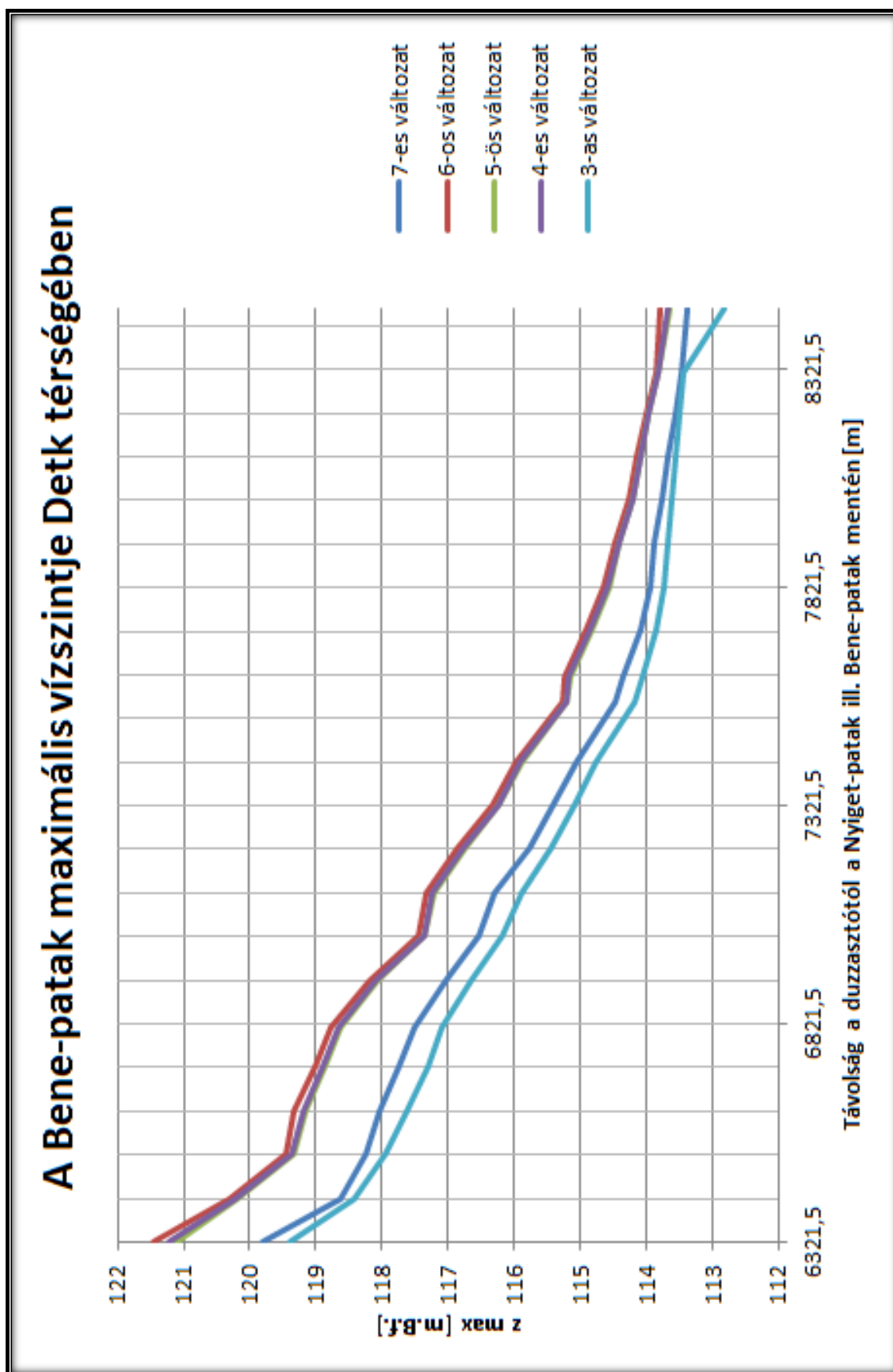
(6)-os számú változat:

Ez az utolsó változat, melyben a bányát nem önti el a víz, a töltést azonban elmossa. A vízállások hasonlóképpen alakultak, mint azokban a változatokban, amikben kizártam a bányát az elönthető területekből. A bánya kizárásával a belterületeken jóval nagyobb vízmélységek alakultak ki. Az elérési időben ez a változat mutatkozott a leggyorsabbnak. Mivel itt az egész víztömeg lefolyik a patak völgyben és nem kell meghágnia a töltést, hogy keresztüljusson rajta, ezért itt halad a leggyorsabban a víz. Nem mértékadó hogy a patakmederben mikor jelenik meg a víz, mivel az a víztömeg, ami az átereszek miatt előre tud szaladni, nem hagyja el a medret. Sokkal fontosabb a mederből kilépő vízállás valamint a maximális vízállások elérési ideje. Ezért megszerkesztettem a tetőző vízállások elérési idejének hossz-szelvényét Detk térségében (14. ábra), amin jól elkülöníthető két csoport. A két csoport közötti különbség a bánya elönthetősége. Jól megfigyelhető hogy a vízállás tetőzésének időpontja a bánya előntése esetén akár 20-25 perccel korábban is bekövetkezhet, mint a bánya kizárása esetén. A hossz-szelvény adatai alapján kiszámítható az átlagos hullámterjedési sebesség. A hossz-szelvényt két szakaszra bontottam, a bánya felettire és a bánya alattira. A bánya felett levő szakasz hullámterjedési sebessége 2,8 m/s, ami 10,2 km/h. Az alsó szakaszon pedig 1,73 m/s, ami 6,24 km/h. Ez egy átlagosan futó ember sebessége. A vízállások tekintetében is megfigyelhető ez az elkülönülés (15. ábra), szintén a bánya elönthetőségével kapcsolatban. Láthatjuk, hogy a bánya előntése esetén a vízállások Detk területén alacsonyabbak lesznek. Így ennél a változatnál adódott a legnagyobb tetőző vízállás. Ez főként a települések belterületén aggasztó. A 17-18 ábrákon

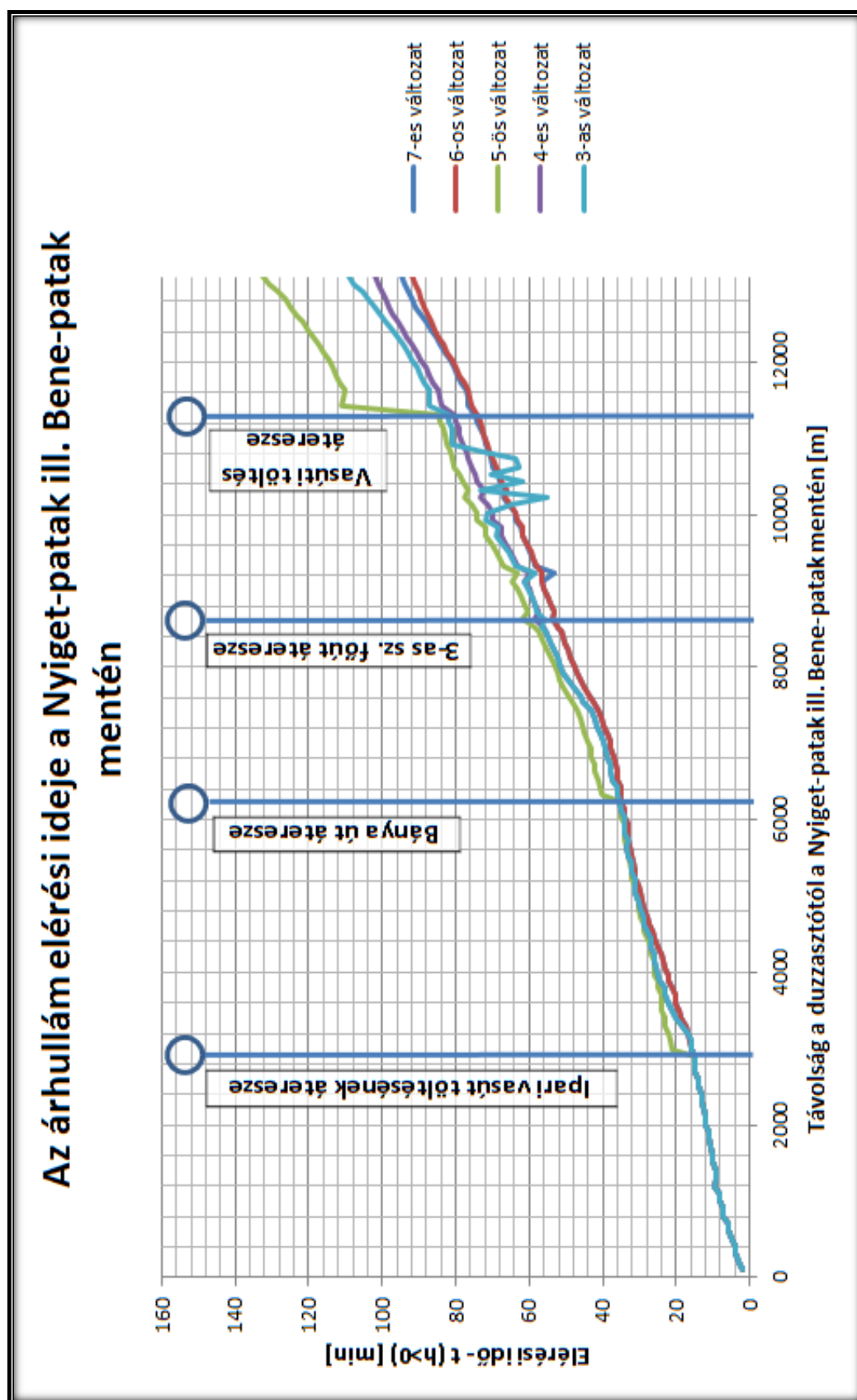
látszik a (6)-os legnagyobb kiterjedésű elöntés és (3)-as legkisebb kiterjedésű elöntés. A 19. ábrán látható hogy a településen milyen beépítettségű területeket önt el a két változat.



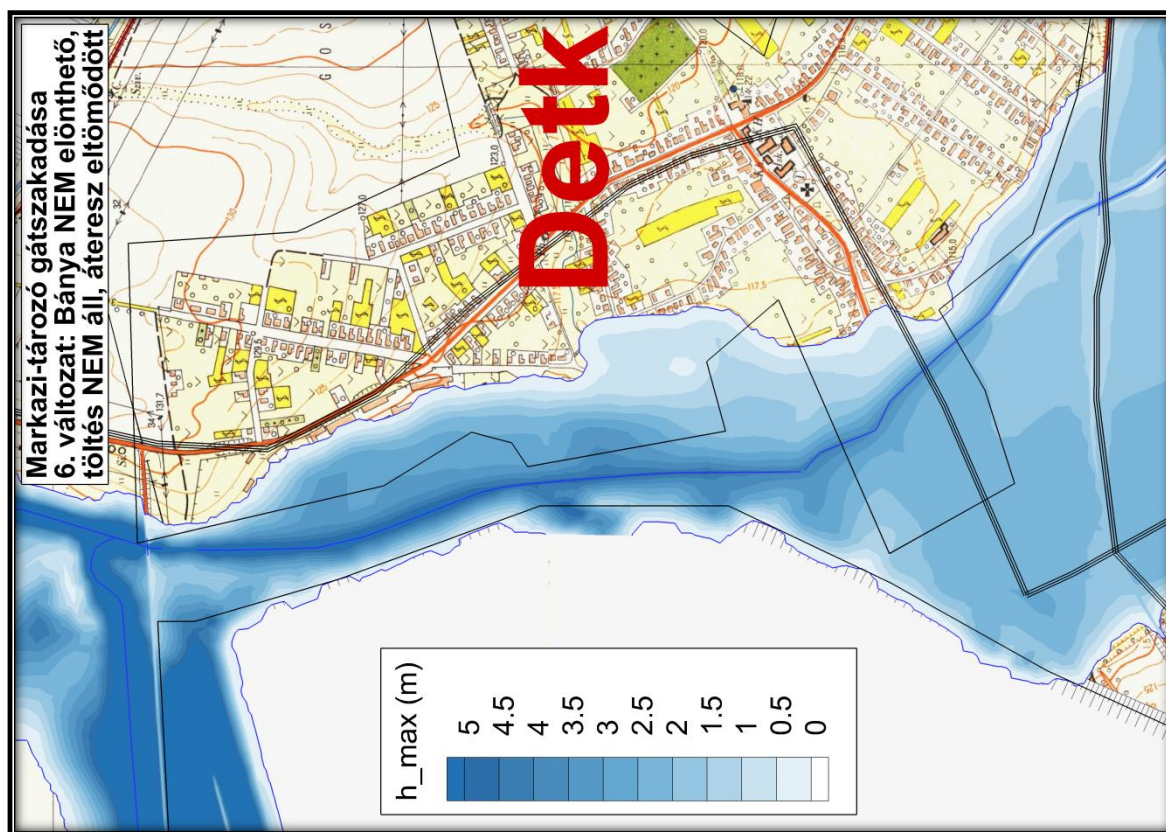
14. ábra: A maximális vízállások elérési idejének hossz-szelvénye Detk belterületén



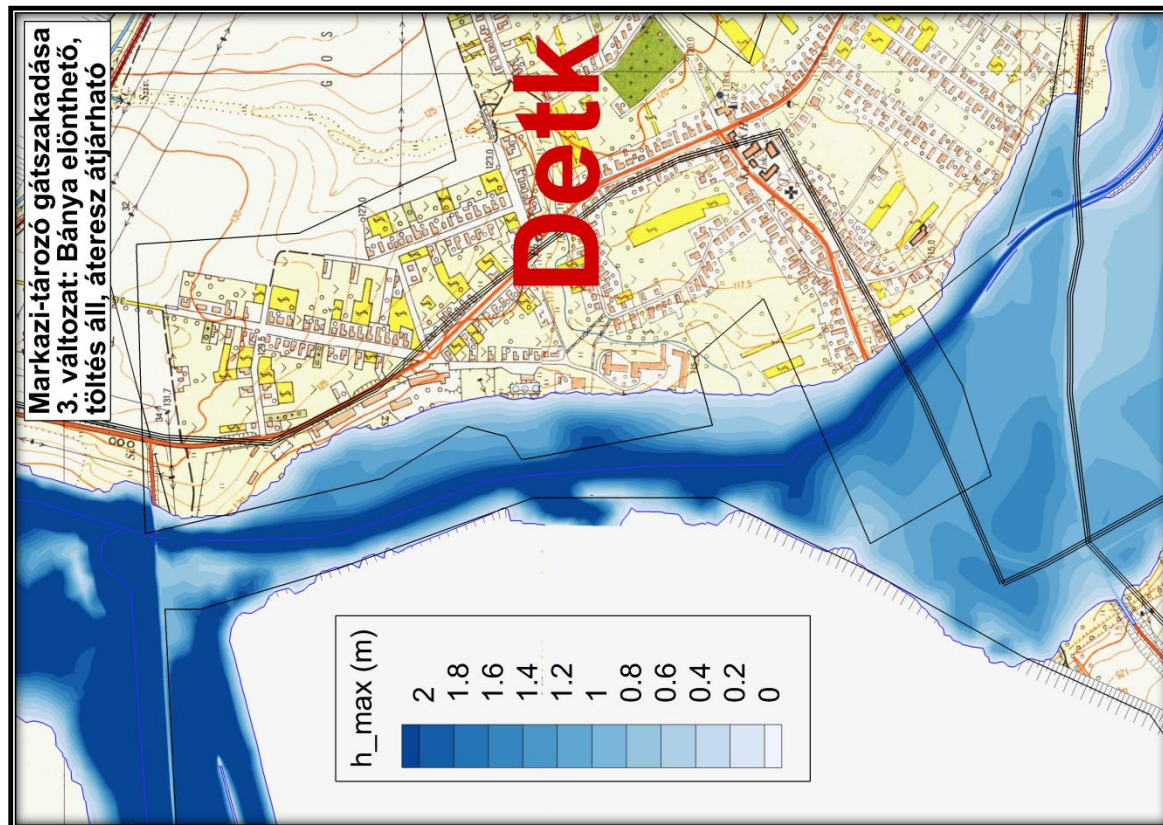
15. ábra: A Bene-patak hossz-szelvénye Detk belterületén



16. ábra: Hossz-szelvény az árhullám elérési idejére a Nyiget-patak ill. a Bene-patak mentén



17. ábra: A legnagyobb elöntés kiterjedése Detk belterületén



19. ábra: A legkisebb elöntés kiterjedése Detk belterületén



20. ábra: A legnagyobb és a legkisebb elöntés területi kiterjedése Detk belterületén

Konklúzió

A modell kitűnően visszaadta a különböző változatok hatásának jellegzetességeit. Nagy érzékenységet mutatott a bánya előlonthatóságára, aminek vésztározóként való hasznosítása védekezési szempontból megfontolandó. A bányaterületen értékes bányászati infrastruktúra és géppark van, azonban nem lehet összehasonlítani a településeken élők életével a bánya anyagi természetű kárát. Az árhullám térfogatának nagy részét elnyelte, ezáltal csökkentve a tetőzési szintet a többi területen. Ez igen fontos a lakott területek szempontjából. A terület dombvidéki részén nem mutatkozott érzékenynek a modell a műtárgyakra. Az alsóbb szakaszokon sem volt érzékeny a modell, nem adódtak markáns különbségek az egyes változatok között a töltés illetve az átereszek változóinak szempontjából. Valószínűleg a töltés változó jobban befolyásolta volna az eredményeket, ha integráltan a modellbe be van építve egy töltésszakadás modell is és a valóságot jobban közelítő szakadási alakokkal számolhatunk a töltések szakadásánál. Így csupán a kialakuló maximális sebességekben mutatkozott meg hogy a töltés mögötti területet először fel kellett töltenie a víznek és nagy tömegben csak ez után áramolhatott tovább szinte minden esetben. Ezt árnyalta az áteresz kérdése. Ha átjárható volt, akkor alig észrevehetően lassabban töltötte a töltés mögötti területet a víz. Ám ezek csupán a síkvidéki területeken mutatkoztak meg. Tehát a jelentős kérdés az volt, hogy a bányába be tud-e hatolni a víz.

Az elérési időből kitűnik, hogy még a bánya előlöntése nélkül is egy jól működő riasztórendszerrel értesíteni lehet a településeken lakókat a veszélyre. Szerencsére a gát közvetlen környezetében nincs lakott terület így kellő előrelátással csak anyagi kárra kell számítani. A mentési munkálatokat nehezíti a területek megközelítése. Feltételezve hogy az első segítség a térség központjából, Gyöngyösről jön, Halmajugra megközelítésével nincs probléma. Azonban a 3-as számú főút megrongálódása miatt Detket nyugati irányból csak az előlöntés megkerülésével lehet megközelíteni. Ehhez vagy Markaz fele kell kerülni vagy déli irányban egészen az M3-as autópálya vonaláig. Keleti irányból a város elérhető, azonban csupán egy bekötőút valamint dűlőutak biztosítják a belterület elérését.

Az esettanulmány helyszíne jó választásnak minősült mivel beváltotta abbéli hozzá fűzött reményeimet, hogy látványosan be lehet mutatni a dombvidéki valamint a síkvidéki előlöntés jellegzetességeit. Úgy gondolom, hogy a változatok eredményei alapján tett megállapítások általános érvényűek, a következtetésekben nem szerepel semmi specifikus tényező.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni **Tuchband Tamásnak**, a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék doktoranduszának, **Tóth Károlynak**, a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék technikusának a sikeres terepi felmérésben való segítségüket, valamint **Dr. Józsa Jánosnak**, a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék tanszékvezetőjének, egyetemi tanárának, hogy rendelkezésünkre bocsájtotta a tanszéki kisbuszt, amivel elutazhattunk a helyszíni bejárásra. Külön köszönöm konzulensemnek **Dr. Krámer Tamásnak**, a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék egyetemi docensének és **Dr. Maren Niemeyer** építőmérnöknek a dolgozat elkészítésében való lelkiismeretes segítségét. Valamint köszönöm mindenkinek, aki bármilyen formában hozzájárult jelen dolgozat elkészüléséhez.

Képjegyzék

1.kép: A Google Maps által készített műholdkép a területről (forrás: www.maps.google.com).	3
2.kép: A Markazi-tározó és az övcsatorna torkolata (forrás: Krámer Tamás).....	4
3.kép: A gát mentett oldali részűje és a Nyiget-patak burkolt medre (forrás: Krámer Tamás)	5
4.kép: A déli bányá északi részén lévő töltés alatti 6 m átmérőjű átereszt (forrás: Krámer Tamás)	5
5.kép: A nagy pontosságú RTK GPS mérés gyakorlati egyszerűsége.....	11
6.kép: A bejárás tapasztalt mederviszonyai a Nyiget-patakban.....	12

Ábrajegyzék

1.ábra: Macchione (2008) szakadási modellje.	7
2.ábra: A lehatárolt terület domborzati viszonyai	13
3.ábra: A területi lehatárolás és a területjellegek.....	15
4.ábra: A déli bányá számítási rácshálókiosztása.....	16
5.ábra: A teljes lehatárolás végleges rácshálója.....	11
6.ábra: A gátszakadás vízhozam időszora	12
7.ábra: Az állapot tér ábrázolása.....	20
8.ábra: A referenciaállapot elöntésnek maximális vízmélységei	21
9.ábra: Az egységnyi szélességre jutó maximális erő területi eloszlása.....	23
10.ábra: A maximális Froude-szám területi eloszlása	24
11.ábra: A gravitációs és centripetális gyorsulás eredője	25
12.ábra: A kijelölt kanyarulat az oldalirányú kilendülés bemutatására	26
13.ábra: A kijelölt kanyarulat keresztmetszvénye	26
14.ábra: A maximális vízsebességek területi eloszlása a települések környezetében	27
15.ábra: A maximális vízállások elérési idejének hossz-szelvénye Detk belterületén	29
16.ábra: A Bene-patak hossz-szelvénye Detk belterületén.....	30
17.ábra: Hossz-szelvény az árhullám elérési idejére a Nyiget-patak ill. a Bene-patak mentén.....	31
18.ábra: A legnagyobb elöntés kiterjedése Detk belterületén	32
19.ábra: A legkisebb elöntés kiterjedése Detk belterületén.....	32
20.ábra: A legnagyobb és a legkisebb elöntés területi kiterjedése Detk belterületén	33

Táblázatjegyzék

1.táblázat: A változatok változóinak összefoglaló táblázata	19
---	----

Hivatkozások

DHI (2009a): MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, User Guide. 2009. DHI, Horsholm, Denmark.

Krámer és társai (2009): Krámer Tamás, Józsa János, dr. Bakonyi Péter: Árvízi veszélytérképezés töltésezett öblözetekben. 2009. MHT XXVII. Országos Vándorgyűlés, Baja.

Krámer et al. (2010): Krámer Tamás, Józsa János: Folyók árvízi elöntési veszélytérképezése: Mintaöblözetek 2D vizsgálata és értékelése. 2010. MHT XXVIII. Országos Vándorgyűlés, Sopron.

Macchione (2008): Macchione F.: Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I: Formulation and evaluation, J. Hydraul. Eng., 134(12), 1688–1696.