

BME Építőmérnöki Kar

TDK Konferencia 2011.

A Bükkös-patak vízgyűjtőjének átfogó hidrológiai vizsgálata



Készítette: Széles Borbála

Konzulensek:

Dr. Hajnal Géza

Póth Zoltán

Torma Péter

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	1
2.	A terület bemutatása.....	2
2.1.	Általánosan.....	2
2.2.	A Bükkös-patak a történelem folyamán.....	3
2.3.	Domborzat.....	4
2.4.	Éghajlat.....	4
2.5.	Talaj és növénytakaró.....	4
2.6.	Vízrajz.....	5
2.7.	Földtan.....	7
3.	Helyszíni mérések.....	10
3.1.	Hidrológiai mérések.....	10
3.1.1.	A mérések rövid bemutatása.....	10
3.1.2.	A mérési eredmények feldolgozása.....	12
3.1.3.	Összegzés.....	18
3.2.	Vízkémiai mérések.....	19
3.2.1.	A mérések rövid bemutatása.....	19
3.2.2.	A mérési eredmények kiértékelése.....	19
4.	Hidrológiai számítások.....	26
4.1.	Hidrológiai adatok.....	26
4.2.	Csapadékadatok.....	29
4.3.	Q-H görbék szerkesztése.....	31
4.4.	Szeparálás és egységárhullámkép előállítás.....	35
5.	Vízgyűjtő modellezés HEC-HMS szoftverrel.....	38
5.1.	A modell hidrológiai elemeinek ismertetése.....	39
5.2.	Vizsgált időszakok kiválasztása.....	41
5.3.	A modell kalibrálása.....	43
5.4.	A modell validálása.....	45
5.5.	A modell alkalmazása, vizsgálatok.....	47
5.6.	Összegzés, tapasztalatok.....	50
6.	Összefoglalás.....	51
7.	Irodalomjegyzék.....	52
8.	Mellékletek.....	53

8.1. 2005-2009-es időszak vízhozamgörbéinek pontjai	54
8.2. Egységárhullámkép számítása.....	55
8.3. Összetartozó csapadék és vízhozam adatsorok az árhullámokra	57
8.4. Korrelációs számítás	65

1. Bevezetés

A szentendrei Bükkös-patak az elmúlt évek során többször is a figyelem középpontjába került. A közelmúltban bekövetkező intenzív esőzéseknek köszönhetően jelentős árhullámok vonultak le a patakon; a heves kiöntések miatt sok helyen a lakosságot is ki kellett költöztetni otthonukból. Azonban a térség nemcsak a médiából ismert: az Európai Unió új vízpolitikájának, a Víz Keretirányelvnek a hazai megvalósításáért a helyi lakosság sokat tesz (patakisztító napok, Bükkös tanösvény kiépítése, Pilisi Parkerdő Zrt. erdőgazdálkodási munkálatai).

A globális klímaváltozás egyik következménye lehet, hogy napjainkban a szélsőséges állapotok egyre gyakoribbá válnak. Ilyenek a rövid esőzések, amelyek intenzitása egyre fokozódik. Köztudott, hogy a hirtelen lezúduló heves zivatarok gyakran okoznak mértékadó állapotokat kis- és közepes vízgyűjtőkön, mint például a Bükkös-patak vízgyűjtője.

TDK munkám célja egy kisvízgyűjtő területnek, nevezetesen a Visegrádi-hegységben található Bükkös-patak vízgyűjtőjének az átfogó hidrológiai elemzése volt.

A vízgyűjtő-terület jellemzésekor a következő tematikát követtem: először a helyszín bejárásával és a patak különböző pontjain végzett vízhozam és vízkémiai mérésekkel, továbbá mederfelvétel segítségével ismertem meg a terület és a patak hidrológiai viszonyait. Ebben nagy segítséget nyújtott számos forrás: földtani leírások, korábbi diplomamunkák és könyvtári kutatómunka során talált történeti és kataszteri leírások. A vízgyűjtő terület általános leírása, a mérési eredmények, illetve az ezekből levont következtetések az első és második fejezetben olvashatók. A hidrológiai mérésekkel a vízhozamok és levonuló árhullámok nagyságrendjéről, a vízkémiai méréseknek köszönhetően pedig a patak vízminőségi állapotáról, illetve a vízgyűjtőt jellemző terhelésekről kaptunk átfogó képet.

A negyedik fejezet hidrológiai számításainak alapját vízhozam és vízállás mérések eredményei, illetve egyidejű csapadék adatok képezték. Az itt számított, patakra jellemző vízhozamgörbe és egységárhullámkép segítségével fagymentes időszakokra, ismert csapadékeseményből kiindulva egyértelműen meghatározható a vízgyűjtő válasza. Ez nagy segítséget nyújthat egy esetleges, a jövőben építendő műtárgy méretezéséhez, illetve a patak által leginkább veszélyeztetett részekben, az árvízi kiöntések előrebecsléséhez.

Az ötödik fejezetben található a vízgyűjtő csapadék-lefolyás kapcsolatának HEC-HMS programmal való modellezése. Ebben a részben részletesen ismertetem a hidrológiai lefolyás modellező eszközt és annak használatát. Mivel a modellt téli és tavaszi időszakokra is kalibráltam és validáltam, így valóban elmondható, hogy a hagyományos hidrológiai számításokat a számítógépes modellezés végeredményeivel kiegészítve átfogó képet kaptam a kisvízgyűjtő csapadék-lefolyás kapcsolatáról. Az ilyen modellek számos modellparaméterrel rendelkeznek, illetve jelentős bemeneti adatmennyiséget igényelnek. Ezekkel kapcsolatos tapasztalataimat részletesen bemutatom, rávilágítva a modellben rejlő lehetőségekre és korlátaira. Végül példát adok a modell alkalmazási lehetőségeire és korlátaira. Mértékadó csapadékadatok ismeretében, nem csupán a tetőző vízhozamra tudunk becslést adni akár több keresztmetszvényben, hanem teljes árhullámképre.

2. A terület bemutatása

2.1. Általánosan

A Visegrádi-hegység nagyvízfolyásai közé tartozik a Szentlélek-patak, a pilismaróti Malom-patak, az Apátkúti-patak, a dömösi Malom-patak és a TDK munkám során vizsgált Bükkös-patak.

A Bükkös-patak és vízgyűjtőterülete a Duna vízgyűjtő területéhez, a Közép-Duna alegységhez tartozik. A patak Szentendrénél torkollik a Dunába, a település legjelentősebb állandó vízfolyása.



1. ábra: A Visegrádi-hegység (forrás Magyarország kistájainak katasztere), kék színnel jelölve a vízgyűjtő



2. ábra: Lehatárolt vízgyűjtőterület (turistatérkép részlet)

A patak teljes vízgyűjtőterülete 39,2 km². Hossza 16 km, medrét a városban kiépítették, illetve a belvárosi, torkolathoz közeli részeken a házakat magasított partfalak védik az áradástól. További árvédelmi létesítmények építése nem volt szükséges, mert a nagyesésű patakokon sem a kora tavaszi hóolvadásból eredő, sem a nyári záporok okozta árhullámok nem tartósak.

Mederrendezési munkálatokról, patakon létesítendő vagy rekonstruálandó, esetleg elbontandó műtárgyakról (pl.: hordalékfogó gátak, duzzasztóművek) számos tanulmányterv készült az elmúlt években (pl.: MÉLYÉPTERV, 1985), de ezek nem valósultak meg.

2.2. A Bükkös-patak a történelem folyamán

A vízfolyás partján élt különböző népcsoportok által más-más néven (Aporügy-, Bucsina-, Bükkös-, Király-, Malom-patak) számon tartott patak története a római korig nyúlik vissza.

A dunai limes megszervezésével egyidőben, a II. század első éveiben Szentendrén, a Bükkös-patak déli oldalán húzódó dombháton felépült a rómaiak katonai tábora, mely az *Ulcisia castra* („farkas-tábor”) nevet kapta. Fával erősített földsáncból és az azt körülvevő árokrendszerből álló, úgynevezett palánktábor volt. A patak közelében számos régészeti ásatás folyt (illetve jelenleg is folyik), melyek során különféle római kori emlékek kerültek a felszínre (például: a Szabadság-forrás [Sztara-voda] közelében az 1970-es években feltárt épületmaradványok konzerválása ma is tart). A díszes villaépület központi része teljes feltárássra került (SOPRONI 1987).

Az első írásos emlék, amely megemlíti a patakot, a XI. századból származik. A Bükkös-patakot a sólyi, 1009. évi oklevélben szereplő Apor-üggyel Györffy György azonosította. Szentendre középkori városmagja a római *castrum*mal szemben, a Bükkös-patak és a Szent-András templom dombja közötti részen terült el (WIKIMPEX 2010).

A legenda szerint Nagy Lajos király szívesen vadászott a Bölcső-hegy oldalában eredő Lajos-forrás környékén, így a magyarok a szentendrei szerbek nyelvén korábban „Dobra voda”, Jó-víz néven emlegetett forrást királyukról nevezték el (PILISI ZÖLDÚT).

A török elől menekülő (ciprovaci) szerbek házai egészen a Bükkös-patakig húzódtak.

A történelem folyamán a patak vallásilag és gazdaságilag is fontos szerepet játszott a közelében élő népcsoportok életében (VOIT 1968).

A patak vízgyűjtő területén, több helyen is értékes kőzeteket, ásványi kincseket bányásztak. Az Annavölgyben barnakőszén, mészkő és márga található. Az Izbég melletti Kéki-hegy kőbányáiban könnyen faragható zöldes színű andezitet fejtettek. Ezt a kőzetet szívesen használták díszítésre, az erősen kéntartalmú levegő azonban hamar tönkretette (pl. Népstadion). Korábban Szentendre a dömörkapui kőbánya piroxénandezitjét közel 7 km-es drótkötélpályán szállította a szentendrei zúzóműhöz. A kőzet jó minőségű, elsősorban útépitésre használták. A térség egykori építőipari-, illetve építőanyag-ipari nyersanyag lelőhelyei közé tartozott Pilisszentkereszt (falazó mészkő) és Szentendre (faragható andezit, folyami betonkavics, bányászati betonkavics) (RÉTVÁRI 1986).

2.3. Domborzat

A Bükkös-patak vize Dobogókő déli lejtőin ered, közel 600 méter magasan. Számtalan kisebb vízeséssel tarkított útján, 500 méter szintkülönbség után érkezik Szentendre belvárosába.

A Börzsönytől a Duna által leválasztott kistáj felszínének kb. 55 %-a a háts típusú középhegységi, kb. 15 %-a az alacsony középhegységi fennsík, mintegy 30 %-a pedig az alacsony domblábi háta és lejtők ortográfiai domborzattípusába sorolható. A tengerszint feletti magasság 140 és 699 m B. f. között változik. A terület északi és keleti lejtőin jelentékeny az erózió; a felszín hasznosítását különböző deráziós folyamatok akadályozzák. A domborzati adottságok az erdőgazdasági és rekreációs célú területhasznosítás szempontjából kedvezőek (DÖVÉNYI 2010).

2.4. Éghajlat

A terület magasabb (600 m B. f.) részei a hűvös-mérsékelt nedves, az alacsonyabban fekvők a mérsékelt hűvös-mérsékelt nedves, a keleti és nyugati szegélyek a mérsékelt száraz éghajlati típushoz tartoznak.

Az évi napfénytartam általában 1900 óra körüli, de a legmagasabb pontokon eléri az 1950 órát. Nyáron 760-780 óra napsütés a valószínű, míg télen 180-190 óra, az 500 m B. f. feletti tetőkön meghaladja a 200 órát.

Az évi középhőmérséklet Dobogókőn kevéssel 8 °C alatti, a hegység lábánál 9,5-10 °C közötti, míg a tenyészidőszakban várhatóan ugyanilyen eloszlásban 14 és 16 °C között alakul. A 10 °C középhőmérsékletet meghaladó napok száma az 500 m B. f. feletti területeken 166-180 nap körüli (április-október). Az utolsó fagy április 18-22., az első őszi fagy október 18-22. között várható. A fagymentes időszak hossza így 175-180 nap. A nyári maximális abszolút hőmérsékletek sokévi átlaga 30-32 °C, Dobogókőn 29 °C, a téli minimális abszolút hőmérséklet -16 °C.

A csapadék évi összege a hegylábaknál 580 mm körüli, Dobogókőn 750 mm. A tenyészidőszak csapadéka 320 és 420 mm között változik. Az egy nap alatt lehullott legtöbb csapadékot (87 mm-t) Dobogókőn mérték. A hegység lábát általában 35-40 napig takarja a hó, de Dobogókőn megközelíti a 90 napot is. Az átlagos maximális hó-vastagság a Duna völgyében 25 cm, Dobogókőn eléri a 40 cm-t.

Az ariditási index 0,94-1,18 (a hegytetőkön 0,94-1,00, az alacsonyabb területeken 1,15-1,18).

Az uralkodó szélirány ÉNy-i, az átlagos szélesség a tetőkön 4-4, 5 m/s, a völgyekben kb. 3 m/s (DÖVÉNYI 2010).

2.5. Talaj és növénytakaró

Magyarország kistájainak katasztere alapján a Visegrádi-hegység kistáját, ahová a Bükkös-patak vízgyűjtője is tartozik, nagyjából (76 %) andeziten, andezittufán kialakult, és zömmel (90 %) erdővel borított, vályog mechanikai összetételű, közepes vízvezető és jó vízraktározó képességű agyagbemosódásos barna erdőtalajok borítják. A meredek lejtők erodált erdőtalajai a sekély termőréteg miatt szélsőséges vízgazdálkodásúak. A lejtők pihenőin és a hegylábakon az erdőtalajok löszfoltokon találhatók.

Az ormok és gerincek lágy, porló tufáin agyagásványos erdővel borított fekete nyirok talajok képződtek 4 % területen. Zömmel (70 %) erdőként, de 20 %-ban szőlőként, 10 %-ban gyümölcsösként hasznosíthatók.

A Dunára néző hegyhát menti domboldalakon részben löszön, részben idősebb üledékeken 10 %-os kiterjedésben vályog fizikai féleségű, közepes vízvezető és jó vízraktározó képességű barnaföldek találhatók. A közepesen erodált barnaföldek termőrétege közettörmelékes. A barnaföldek 40 %-a szántóként, 10 %-a gyümölcsösként, 30 %-a szőlőként, 20 %-a pedig erdőterületként hasznosítható.

A közethatású rendzina talajok kiterjedése mindössze 1 %. Teljes egészében erdőterületet alkotnak.

Az ormokon és a hegygerinceken 6 % kiterjedésben földes és köves kopárok találhatók, pionír jellegű fás (90 %) vagy füves (5 %) vegetációval és szőlővel.

A sík völgyek meszes, homokos öntésanyagán réti öntés talajok fordulnak elő 3 % területen. Zömmel (80 %) szántóként és rét-legelőként hasznosíthatók.

A kistáj taljai búza, őszi árpa, kukorica, napraforgó, lucerna és szója termesztésére is alkalmasak. A homokos öntés talajokra gyümölcsösök is telepíthetők (Pilismarót).

Déli kittedben és az alacsonyabb tetőkön cseres-tölgyes a zonális erdőtársulás. Gyertyános-tölgyesek zonálisan csak a legmagasabb tetőkön, fennsíkszerű magaslatokon jelennek meg. A bükkösök kis területet borítanak, lombkoronaszintjükbe kocsánytalan tölgy elegyedik. A törmeléklejtőkön és a sziklás gerincvölgyekben szurdokerdő helyi változata alakult ki. A déli oldalakon melegkedvelő társulások jutnak uralomra. A hegység dél-nyugati felén, az egykori szőlőkultúrák helyén jellegzetes kontinentális gyepek alakulnak ki (DÖVÉNYI 2010).

2.6. Vízrajz

A Bükkös-patak vizét a Dunazug-hegység 17 forrása és három patakja táplálja, amelyek az alábbiak: Király-patak, Jóvízű-patak, Száraz-patak.

A vízgyűjtőn a hegytetők jó vízellátásúak, a peremek vízszegény területek. A vízhozamok nagy szélsőségek között ingadoznak, így rájuk vízhasználatot alapozni nem lehet. Az időszakos jelleg miatt vizük szennyezett. A vízhiány és a meredek lejtők mellett állóvizek sem jöhettek létre, mert a keletkező mélyedések gyorsan feltöltődnek.

A vízfolyás mentén szétszórta elhelyezkedő, nagyszámú forrás (1. táblázat) többsége foglalt. Bár a helyszín bejárásakor a turista-térképen és a Környezetvédelmi és Vízgazdálkodási Kutató Intézet (VITUKI) nyilvántartásában foglaltként szereplő források egy részét az idők során tönkretette a fagy, elmosták a viharok és a korábban rendszeren kiépített források helyén csak törött csövek találhatók.



1. kép: Törött, rozsdás vezetékdarab, Lajos-forrástól kb. 500 m-re, feltehetően a Kékvízű-forrás kiépítésének maradványai, 2011. 01. 23.

Mint az 1. táblázat mutatja, a források vízáadó kőzete a miocénben keletkezett andezit, illetve andezittufa, melyek erősen vízzáró tulajdonságokkal rendelkeznek.

A források vizének hőmérséklete évszaktól függetlenül állandónak, 10,5 ° C-nak vehető. Hozamuk változó, viszonylag kicsi, a tavaszi hóolvadáskor viszont köbözéssel jelentősebb hozamokat is mértünk.

Egyik forrás vagy patak vize sem iható, mivel a baktérium-tartalom túllépi a megengedett határértéket, ahogyan ezt az ÁNTSZ vizsgálatai bizonyítják. Oka feltehetően, hogy a patak Dobogókőhöz közeli szakasza az ottani szennyvíztelep vizével terhelt. A patak mentén korábban működő bányákat és malmokat mind felszámolták, így ezek már nem szennyezik a patak vizét.

1. táblázat: A Bükkös-patak forrásainak legfontosabb adatai

Település	Forrás neve	Z (m B.f.)	Vízáadó kora	Vízáadó kőzet	Megjegyzés
Pilisszentlászló	Királykút (Kolacsovsky)	415	miocén	andezittufa	foglalt
Pilisszentlászló	Schubert (Kárpát)- forrás	304	miocén	andezittufa	foglalt
Pilisszentlászló	Szilágyi Bernát- forrás	340	miocén	andezittufa	foglalt
Pomáz	Kékvízű-forrás	493	miocén	andezittufa	foglalt
Pomáz	Lajos (Jóvíz)- forrás	444	miocén	andezit	foglalt
Szentendre	Csepel-forrás	328	miocén	andezittufa	
Szentendre	Helyiipari (Gábor)- forrás	424	miocén	andezittufa	foglalt
Szentendre	Kármán (Bodzás)- forrás	446	miocén	andezit agglomerátu m	foglalt
Pilisszentkereszt	Mogyorós- forrás	374	miocén	andezittufa	

Pilisszentkereszt	Szürke (Pomázi)- forrás	505	miocén	andezit	
Pilisszentlászló	Karmak- forrás	288	miocén	andezittufa	foglalt
Pilisszentlászló	Kárpát II.- forrás	304	miocén	andezittufa	
Pomáz	Géza (Kék)- forrás	470	miocén	andezittufa	
Szentendre	Anna- völgyi- forrás	198	miocén	andezittufa	
Szentendre	Bánhidya (Sándor)- forrás	252	miocén	andezittufa	foglalt
Szentendre	Foglalatlan- forrás	210	miocén	andezitagglo merátum	
Szentendre	Ivóvíz-forrás	204	miocén	andezittufa	foglalt
Szentendre	Kőhegy K. – i – forrás	225	miocén	andezittufa	
Szentendre	Üdülői- forrás	181	miocén	andezittufa	

2.7. Földtan

A Dera-Cserepes-völgy törése a területet földtani szempontból alapvetően két különböző részre tagolja. A töréstől délnyugatra az üledékes kőzetekből álló Pilis, északkeletre az eruptív kőzetekből álló Dunazug-hegység fekszik. A Pilis és Dunazug-hegység földtani története az oligocén korig, a fent említett törésvonal kialakulásáig azonos.

A terület legidősebb képződménye a sötétbarna bitumenes mészkő és fölötté sötét színű bitumenes dolomit.

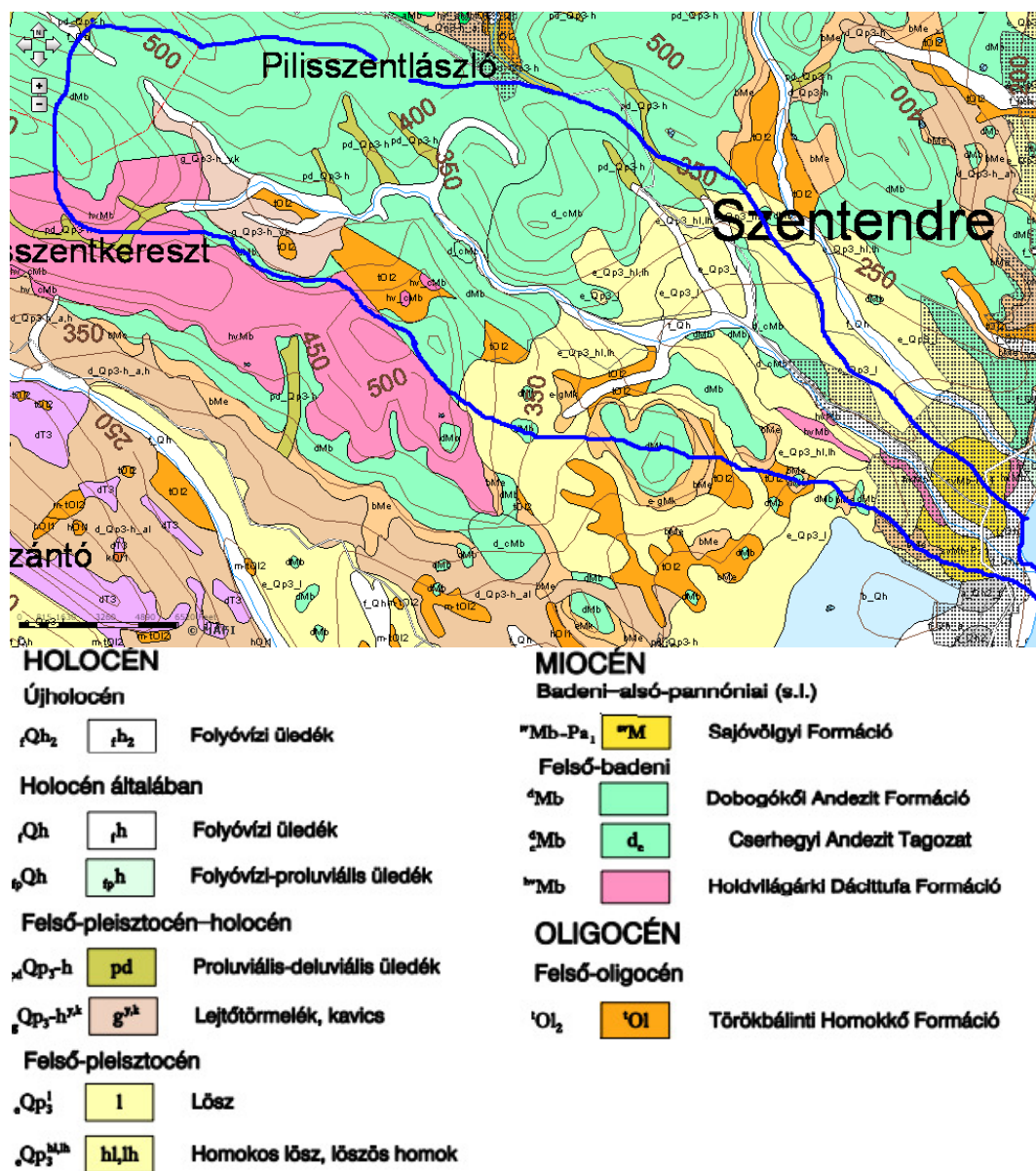
Triász tengeri üledék a dolomit, mely a Pilisben csak néhány helyen fordul elő (Feketekövek, Fekete-hegy). A hegység főtömege dachsteini mészkő. Az átmenet övében a mészkő és dolomit sávonként váltakozik. A mészkő tömege eredetileg egész hosszában összefüggött, Pilisszentlélek és Klastrompuszta között azonban még a hárshegyi homokkő lerakódása előtt két részre szakadt.

A triász korszaktól a krétáig a hegység állandóan emelkedett, a jurában már majdnem szárazulattá vált.

Szárazföldi viszonyok jellemzik a harmadidőszak elejét, az eocént is. Az alsó-eocén vége felé azonban a hegység egyes részei süllyedni kezdtek, ezáltal tengervíz nyomult be az alacsonyabb területekre, és az eddigi édes- és elegyvízi rétegeket elborította. Az alsó-eocén végén és a középső eocénban egymás után ülepedtek le agyagmárga és márga rétegek, illetve mocsaras területek keletkeztek. A hegység szélein barnakőszén nyomokat tartalmazó édesvízi mészkő rakódott le, majd a felső eocénban keletkezett medencékben pedig úgynevezett priabonai mészkő.

Az oligocénre megint emelkedés jellemző és így a Pilis-hegység szélein vetődések alakultak ki. Majd nagyfokú vulkáni tevékenység vette kezdetét. A vulkáni kitörések a Börzsönyt és a tőle északra és keletre emelkedő hegyeket is létrehozó erőteljes eruptív tevékenységgel egy időben mentek végbe. A Szentendre-Visegrádi-hegység ekkor még összefüggött a Börzsönnyel; a Duna csak a felső pliocénban választotta őket ketté. A vulkáni működést heves por- és tufaszórás előzte meg és kísérte, aminek következtében az andezit jóval kevesebb, mint az andezittufa és az agglomerátum.

A felső miocénban befejeződött a vulkáni tevékenység, és a hegység peremén az újra előrenyomuló tengerből úgynevezett lajtamészko rakódott le. (SCHAFARZIK-VENDL-PAPP 1964). A felszíni kőzeteket (Magyarország fedett földtani térképe alapján, 1869.) a 3. ábra mutatja.



3. ábra: A lehatárolt terület földtani térképe, késsel jelölve a vízgyűjtőterületet (forrás MÁFI 2005)

A patak vízgyűjtő területén a legidősebb kőzetek a földtörténeti harmadidőszak oligocén korában képződtek. Ide tartozik a források és a patak menti vetők felszínre bukkanó Törökbálinti Homokkő Formációja (Sikárosi-rét, Hosszú-rét, Bükkipusztá, Sás-völgy, Zengő-völgy, Bubán-hegy körül, a szőlők alatt).

A földtörténeti korbeosztás szerint továbbhaladva, az alsó-miocén eggenburgi korszakában keletkezett Budafoki Formáció, illetve a kárpáti korszakba tartozó összevont Egyházasgergei és Garábi Formáció helyenként, főképp a patak alsó szakaszán (így például a Csepel-forrás eredeténél) található. A miocén korban keletkezett kőzetek közül ezeknél jóval összefüggőbb és nagyobb területekre kiterjedő rétegeket képeznek a Közép-miocén, badeni andezit, andezittufa és dácittufa formációi. Ilyen a Holdvilágárki Dácittufa Formáció (Pilisszentkeresztől nyugatra a Dera- és Bükkös-patakat elválasztó hegyekben és Izbégen).

Szintén a miocénben keletkezett a Dobogókői Andezit Formáció (Kő-hegy, Cseresznye-hegy, Bubán-hegy, Dobos-hegy). A Cserhegyi Andezit Tagozat (Pilisszentlászlótól délre, Som-hegy, Cser-hegy, Tölgyes-hegy, Borz-hegy, Kapitány-hegy és Szarvashegy) itteni előfordulása nagyméretű szubvulkáni központként értelmezhető. Végül egészen a torkolatnál, Püspökmajornál található a badeni-alsó-pannóniai Sajóvölgyi Formáció.

A negyedidőszak pleisztocén korának képződményei a homokos lösz, löszös homok és lösz, mely rétegek a patak folyása mentén, Szentendre felé haladva egyre nagyobb területeken találhatók meg, így a korábban katonai lőtérenként használt gyakorlótéren, Sztravoda, Izbég, Pismány településeken és térségükben.

A pleisztocén és holocén korok közti átmenet idejéből, felső-pleisztocén-holocénben Proluviális-deluviális üledék és lejtőtörmelék maradt fent. Az üledék a források eredeténél, a völgyekben (Száráz-patak eredeténél), illetve a vízgyűjtő területet határoló hegyek és magaslatok között húzódó völgyekben rakódott le. Lejtőtörmelék hasonló helyeken, például a Király-patak völgyében fordul elő.

A legfiatalabb kőzetek a holocénből maradtak fent. Ilyen a torkolatnál megfigyelhető folyóvízi-proluviális üledék, illetve a patakot végig, a folyása mentén szegélyező folyóvízi üledék, az újholocénből.

3. Helyszíni mérések

3.1. Hidrológiai mérések

3.1.1. A mérések rövid bemutatása

A hidrológiai számítások elvégzéséhez, illetve a vízgyűjtő modellezéséhez gyakori és pontos vízállás és vízhozam adatokra van szükség. A Bükkös-patakon 2005-ben telepített vízmérce által 2009-ig rögzített napi vízállás és az ezekből számított (illetve néhány alkalommal mért) vízhozam adatokat, valamint a 2011-es vízállás-vízhozam értékeket és a patakon nagyobb esőzések alkalmával, 2005 óta levonuló árhullámok 15 perces, vízmércénél rögzített vízállás adatait a Közép-Duna-völgyi Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság (KDV-KÖVIZIG) Vízgyűjtő-gazdálkodási és Informatikai Osztálytól kaptam meg.

Az igazgatóság által számított vízhozamok ellenőrzése végett 2011 januárjától kezdve több alkalommal is megmértük a patak vízhozamát (kézi köbözéssel, kémiai vízhozam-mérési módszerrel és forgószárnyas sebességmérővel). Az általunk mért értékek nem minden esetben egyeztek meg a KDV-KÖVIZIG által számított adatok nagyságrendjével, aminek legfőbb oka az alkalmazott mérési módszerek és műszerek pontossága.

1. Köbözéssel a források vizének hozamát határoztuk meg, mivel ez a módszer kis vízhozamok esetében alkalmazható. Télen elegendő volt egy egyszerű, literes, ml beosztású mérőhenger; olvadáskor azonban még a 10 literes vödörrel is nehéz volt pontos mérési eredményeket rögzíteni a nagy vízhozam miatt. A szabad vízsugarat ezekben az edényekben fogtuk fel, miközben stopperórával rögzítettük az edény telésének idejét (KORIS-WINTER 2001).
2. Sebességmérő szárnyal olyan szakaszokon határoztuk meg a vízhozamot, ahol a mederszelvény felmérése nem okozott nehézséget (például: városi szakaszokon és a vízmércénél kiépített mederben). A szelvény méreteinek jegyzőkönyvben való rögzítését követően rúdon elhelyezett forgószárnyal sebességet mértünk, egy vagy két perc elteltével leolvastuk a szárny fordulatainak számát. Kisvízfolyásról lévén szó, csak egy függély mentén végeztük el a mérést, illetve csak a szélesebb szakaszon (vízmércénél), nagyvíz idején osztottuk több részre keresztirányban a patakot (KORIS-WINTER 2001).
3. A kémiai vízhozam-méréskor ismert koncentrációjú jódozatlan só (NaCl) oldatot öntöttünk hirtelen a vízfolyásba és a beadagolás helyétől kellő távolságban elektrokémiai módszerekkel (konduktométerrel, illetve Kahlsico Surveyor 3 műszerrel) határoztuk meg annak hígulását. Általában 500 vagy 1000 gramm sót oldottunk fel 10 liter vízben, olvadáskor előfordult, hogy 2000 grammot is. A stopperóra indítása előtt jegyzőkönyvben rögzítettük a patak természetes vezetőképességét (mS/cm), majd az óra indításakor öntöttük bele az oldatot a patak vizébe és általában 10 másodpercenként feljegyeztük, illetve a műszer automatikusan, másodpercenként rögzítette a vezetőképesség értékét (KORIS-WINTER 2001).



2. kép: Kahlisco Surveyor 3 mérőműszer adatrögzítő része



3. kép: Kahlisco Surveyor 3 érzékelő része

3.1.2. A mérési eredmények feldolgozása

1. Köbözés

A vízhozamot a $Q=W/t$ képletből számítottam, ahol:

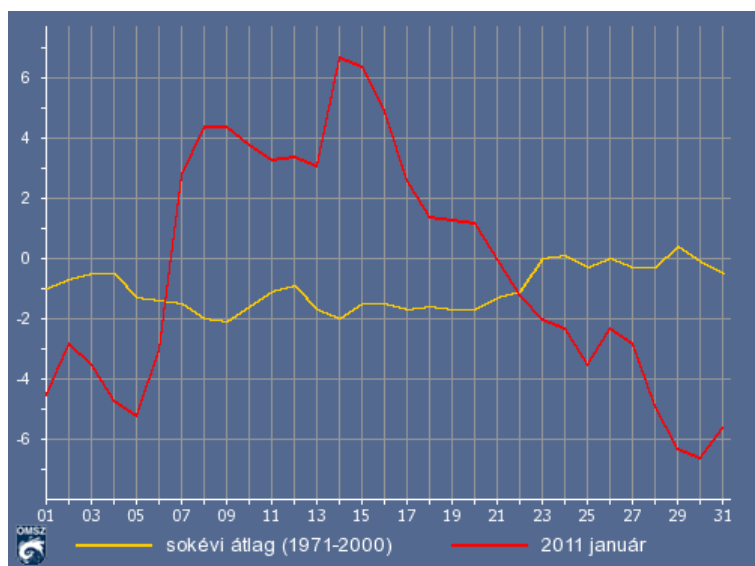
Q - az ismeretlen vízhozam

W – az edényben felfogott víz mennyisége

t – az észlelési idő

Köbözéssel csak kisebb források vízhozamát mértük meg. A Lajos-forrásnak így háromszor határoztuk meg a hozamát, először a téli időszakban (2011. 01. 23-án 1,23 l/s), másodsor a tavaszi olvadások idején (2011. 03. 18-án 1,12 l/s), harmadszor pedig nyáron (2011. 08. 13-án 0,67 l/s).

Tehát jelentős különbség a forrás vízhozamában a nyári, száraz és a téli-tavaszi, csapadékosabb időszakok között van. A viszonylag hasonló januári és márciusi mérési eredmény oka a 2011. januári magas középhőmérséklet (4. ábra) lehetett, ami miatt nemcsak márciusban volt nagy a patak vízhozama (tavaszi olvadások miatt), hanem januárban is.



4. ábra: Napi középhőmérsékletek és a sokévi átlagok országosan (° C) (forrás: OMSZ)

A patak számos forrása közül csak egy-kettő közelíthető meg járművel, a többi turistaúton érhető el. Emiatt csak néhány adatot sikerült begyűjtenem, érdekességképpen, melyek az alábbiak:

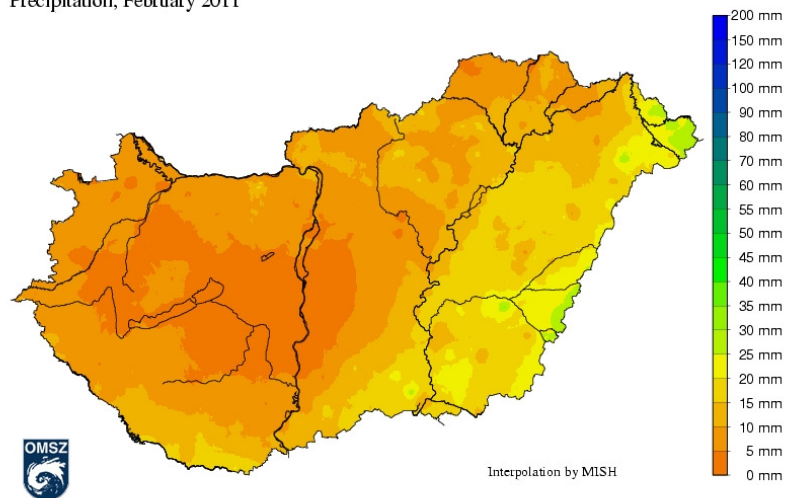
- A korábban kiépített Kékvízű-forrás helyén 2011. január 23-án csak törött csődarabokat találtam, egy jobban hozzáférhető helyen literes mérőhengerrel mértem meg a hozamot. A számított hozam: 0,05 l/s, egészen minimális.
- Ugyanezen a napon (2011. 01. 23.) a Kékvízű-forrás közelében lévő Kármán-forrás vízhozamát is megmértem. A számított hozam: 0,04 l/s.



4. kép: Vízhozam-mérés a Kármán-forrásnál, 2011. 01. 23.

- 2011. 02. 05-én a Csepel-forrás vízhozama 0,02 l/s volt. Ez nagyon kevés, ami azzal magyarázható, hogy 2011 februárja száraz hónap volt. A csapadék havi mennyisége az országban sehol nem haladta meg a 38 mm-t.

Csapadékösszeg, 2011. február
Precipitation, February 2011



5. ábra: 2011 februárjának csapadékösszege (forrás: OMSZ)

- 2011. 08. 13-án a Hosszú-rét széli Helyiipari-forrást sajnos szintén nem sikerült megtalálni, holott a VITUKI forráskataszterében is „foglalt” forrásként szerepel.



5. kép: Mocsár, háttérben a Hosszú-réttel, 2011. 08. 13.

A mérési eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A köbözések mérési eredményei

FORRÁS NEVE	HOZAM (l/s)
2011. január 23. Lajos-forrás	1.23
2011. január 23. Kékvízű- forrás	0.05
2011. január 23. Kármán- forrás	0.04
2011. február 5. Csepel- forrás	0.02
2011. március 18. Lajos-forrás	1.12
2011. augusztus 13. Lajos-forrás	0.67

2. Forgószárnyas sebességmérésen alapuló vízhozam meghatározás

Forgószárnyas sebességmérés esetén, első lépésben, a leolvasott fordulatszám és az eltelt idő hányadosaként a sebességmérő szárny n fordulatszámát határoztam meg. Ezután a sebességmérőt lineáris interpolációval, az 4. táblázat paramétereivel hitelesítettem:

3. táblázat: Sebességmérő hitelesítésének paraméterei

Fordulatszám, n (1/s)	Sebesség, v (m/s)
0	0
0.9	0.08
5	0.55
15	1.62
20	2.16
25	2.59

A keresztmetszvény és a sebesség adataiból a vízhozam az alábbi összefüggésből számítható:

$$Q_{össz} = \sum Q_i = \sum v_i \cdot A_i$$

A torkolatnál 2011. 02. 02-án végzett két mérés esetén egyszerű trapéz alakú mederrel számoltam. Ekkor a patak vízhozama körülbelül 40 l/s volt, mely kisvíz idején egy reális érték, azonban feleakkora, mint az igazgatóság által, erre a napra számított 85 l/s.

A vízmércénél (2011. 04. 14-én) a szélesebb meder miatt három részre osztott szelvény esetén az egyes szelvényterületeken mért vízhozamokat összegeztem. Ekkor a vízhozam két mérés alapján kb. 60 l/s volt, mely nagyvíz idején elfogadható érték és szinte megegyezik a KDV-KÖVIZIG által számolt 73 l/s-os vízhozammal.



6. kép: Forgószárnyas mérés a vízmércénél, 2011. 04. 14.

3. Kémiai vízhozam-mérés

Sózásos vízhozam-mérésnél integráló, azaz összegző vízhozam-mérést végeztünk. A felső szelvényben hirtelen (2-3 s alatt) beadagolt só által előidézett sóhullám időben változó $c(t)$ koncentrációval szállítja el a sómennyiséget. A beadagolt só mennyisége:

$$S = c_1 \cdot Q \cdot \Delta t + c_2 \cdot Q \cdot \Delta t + \dots + c_n \cdot Q \cdot \Delta t,$$

ahol:

S – a beadagolt só mennyisége (g),

c_i – az i -edik időpillanatban vett minta töménysége (g/cm³),

Δt – a mintavételek közötti konstans időköz (s),

Q – a patak ismeretlen vízhozama (m^3/s),

n – a Δt időintervallumonkénti mintavételek száma.

Kiemelve a $Q \cdot \Delta t$ szorzatot, szorozva és osztva n -nel:

$$S = Q \cdot n \cdot \Delta t \cdot (c_1 + c_2 + \dots + c_n) / n$$

Mivel $n \cdot \Delta t = T$ a sóhullám levonulási ideje, $(c_1 + c_2 + \dots + c_n) / n = C_{\text{átl}}$ az átlagsótöménység (a patak c_0 természetes sótöménységét elhanyagolva), a vízhozam meghatározására szolgáló összefüggés:

$$S = Q \cdot T \cdot C_{\text{átl}}$$

Ez alapján a patak ismeretlen vízhozama:

$$Q = S / (T \cdot C_{\text{átl}}),$$

ahol:

Q – az ismeretlen patakvízhozam (m^3/s),

S – a beadagolt sómennyiség (g),

T – a mintavételi szelvényben az átvonulási idő (s),

$C_{\text{átl}}$ – az átlagos sótöménység a mintavételi szelvényben (g/m^3).



7. kép: Vízhozam-mérés sózással a torkolatnál, 2011. 02. 02.

A fent leírt módon számított mérési eredmények az 4. táblázatban szerepelnek.

4. táblázat: Sózásos vízhozam-mérés eredményei (Sózás I. = konduktométerrel, Sózás II. = Kahlisco Surveyor 3 mérőműszerrel)

Dátum	Mérés helye	Sózás I. (l/s)	Sózás II. (l/s)	Forgószárnyas (l/s)	VIZIG számított (l/s)
2011.02.02	Torkolat	164.2		41.9	85.0
2011.03.18	Királykúti-f. mellett	6.5	166.0		1600.0
2011.04.14	Torkolat	277.0	167.4		73.0
2011.04.14	Vízmérce		95.2	58.6	73.0

Az 4. táblázat vízhozam értékei pontatlanok, többnyire eltérnek a KDV-KÖVIZIG által mért vízállásokból számolt vízhozamoktól. A két műszer által mért értékek között is nagyságrendi különbségek vannak.

2011. 02. 02-án téli időjárás mellett a vízállás alacsony (18 cm), a hozam kevés (85 l/s) volt. A helyszíni kémiai vízhozam-mérések eredményei kétszer akkorának adódtak, mint a számítottak, mégis elfogadhatónak tekinthetők, mivel a szelvények méretei, a mérési hely (vízmérce 4,3 km-re van a torkolattól) és a mederanyag különbözősége is okozhatott egy ilyen nagyságú eltérést. (A forgószárnyas mérést figyelmen kívül hagyjuk.)

2011. 03. 18-án végzett terepi mérésekkor a jelentős tavaszi olvadás miatt kiemelkedően magas volt a vízhozam, a csapadék is jelentős és tartós volt ebben az időszakban, a patak sok helyen elhagyta a medrét. A vízállás napi értéke március 18-án 71 cm, a számított vízhozam 1600 l/s volt. Ezek alapján az olvadás valamivel 2011. 03. 18. előtt indulhatott meg. Sajnos a helyszíni mérésekkel ezeket az értékeket nem tudtuk alátámasztani, mivel a nagy vízhozam lehetetlenné tette a mérések kivitelezését (9. és 9. kép).



8. kép: Nagyvíz a torkolatnál 2011. 03. 18-án.



9. kép: Sikertelen sózásos vízhozam-mérés a torkolatnál, nagyvíz miatt kötéllel rögzített mérőműszerrel 2011. 03. 18-án.



10. kép: 2011. 03. 18., nagyvíz a vízmércénél, mérés Kahlisco Surveyor 3 mérőműszerrel.

2011. 04. 14-én alacsony vízállás és vízhozam volt (mért vízállás: 16 cm, számított vízhozam: 73 l/s). Ezek az értékek az általunk mértekkel jó egyezést mutatnak.

Átalakítások és elemzések után a kapott adatsorok biztos kiindulási alapadatokat jelentettek a modell kalibrálásának megkezdésekor.

3.1.3. Összegzés

A mérési tapasztalatok alapján a következő összegzés tehető meg:

- A vízmércénél történő mérés egyik célja a későbbiekben bemutatott és a modellezés kalibrálási adatainak előállításához használt vízhozamgörbe ellenőrzése volt. A vízmércénél egy alkalommal sikerült mérni, a nagyvízi állapotban a mérés az erős sodrás miatt megghiúsult. Az sikeres mérés eredményei jó egyezést mutatnak a számított értékkel.

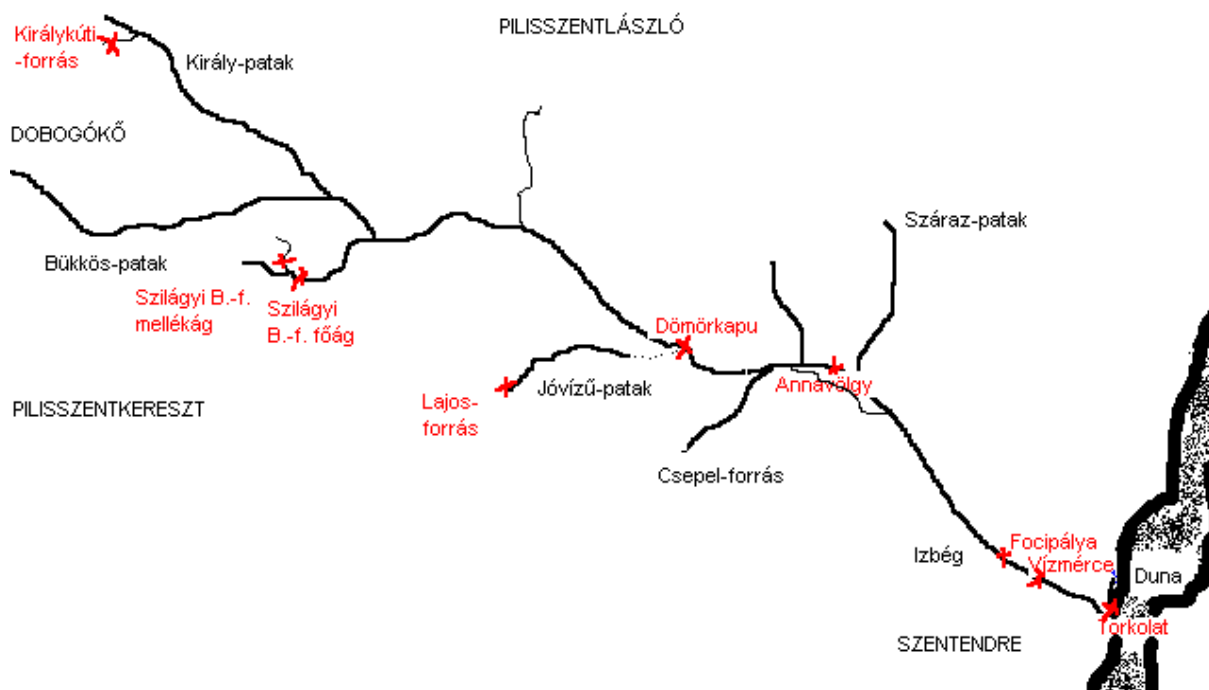
- A sózásos mérések nagy bizonytalanságot mutatnak. Ennek egyik oka, hogy a konduktométer kalibrálatlan volt. A másik műszer esetében a mérési eredmények elfogadhatónak tűnnek.
- Különösen nagyvíz esetén a forgószárnyas sebességmérésen alapuló vízhozam-mérés (több függély felvételével) a mérési eredmények szórása alapján nagyobb pontossággal kivitelezhető.

3.2. Vízkémiai mérések

3.2.1. A mérések rövid bemutatása

A patakon végzett vízhozam-mérésekkel egyidejűleg vízmintákat is vettünk, laborbeli vizsgálatok elvégzéséhez, melyekkel különböző vízkémiai paramétereket állapítottunk meg. A vezetőképességet Radelkis OK 102/1, a fotometriás méréseket (klorid, nitrit, nitrát) Merck SQ 118 műszerrel, az összes keménységet szintén a Merck gyorsesztyjével végeztük.

A mintavételi helyeket a 6. ábra szemlélteti.

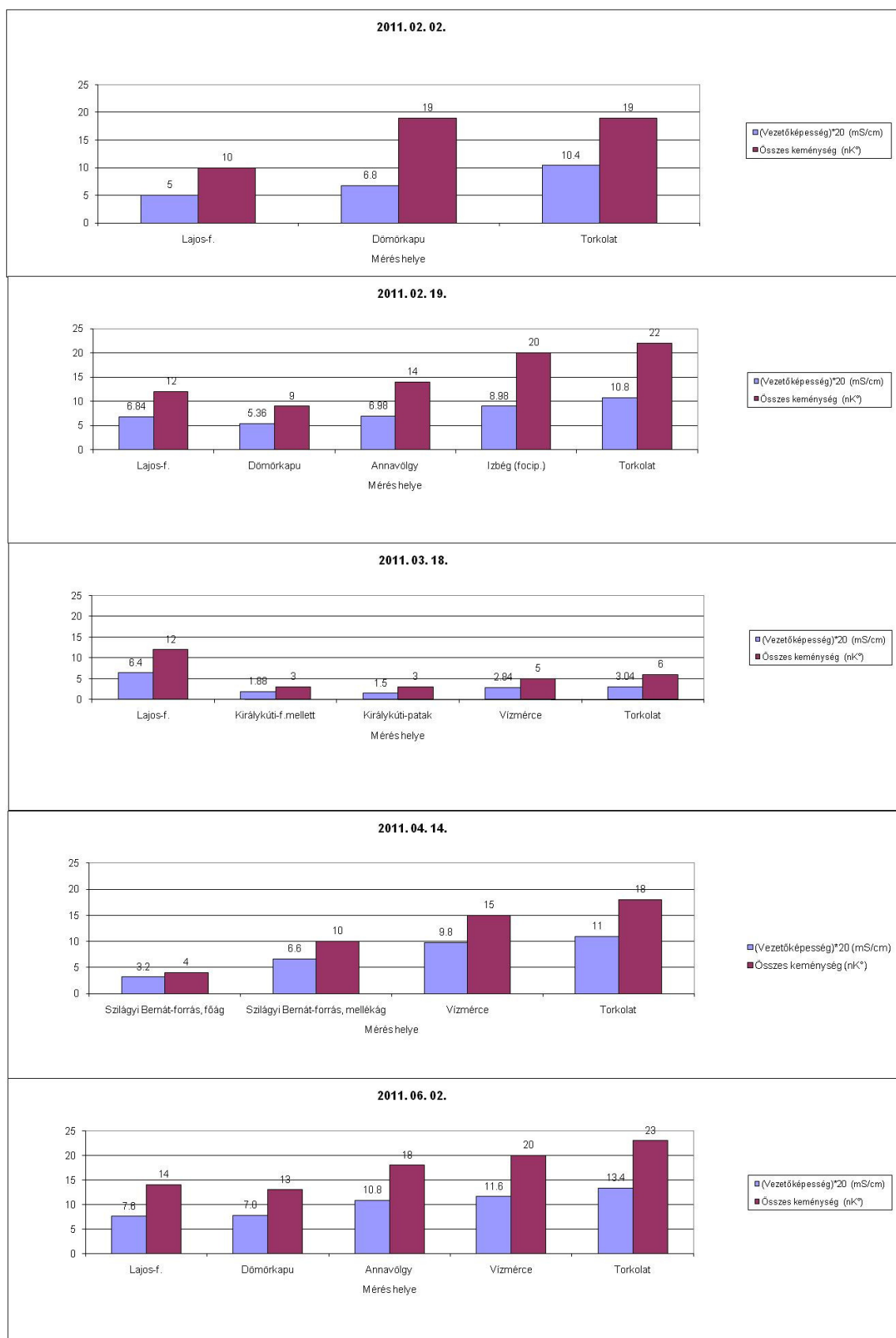


6. ábra: A mérési helyek térképábrázolása (mérési helyek piros színnel jelölve)

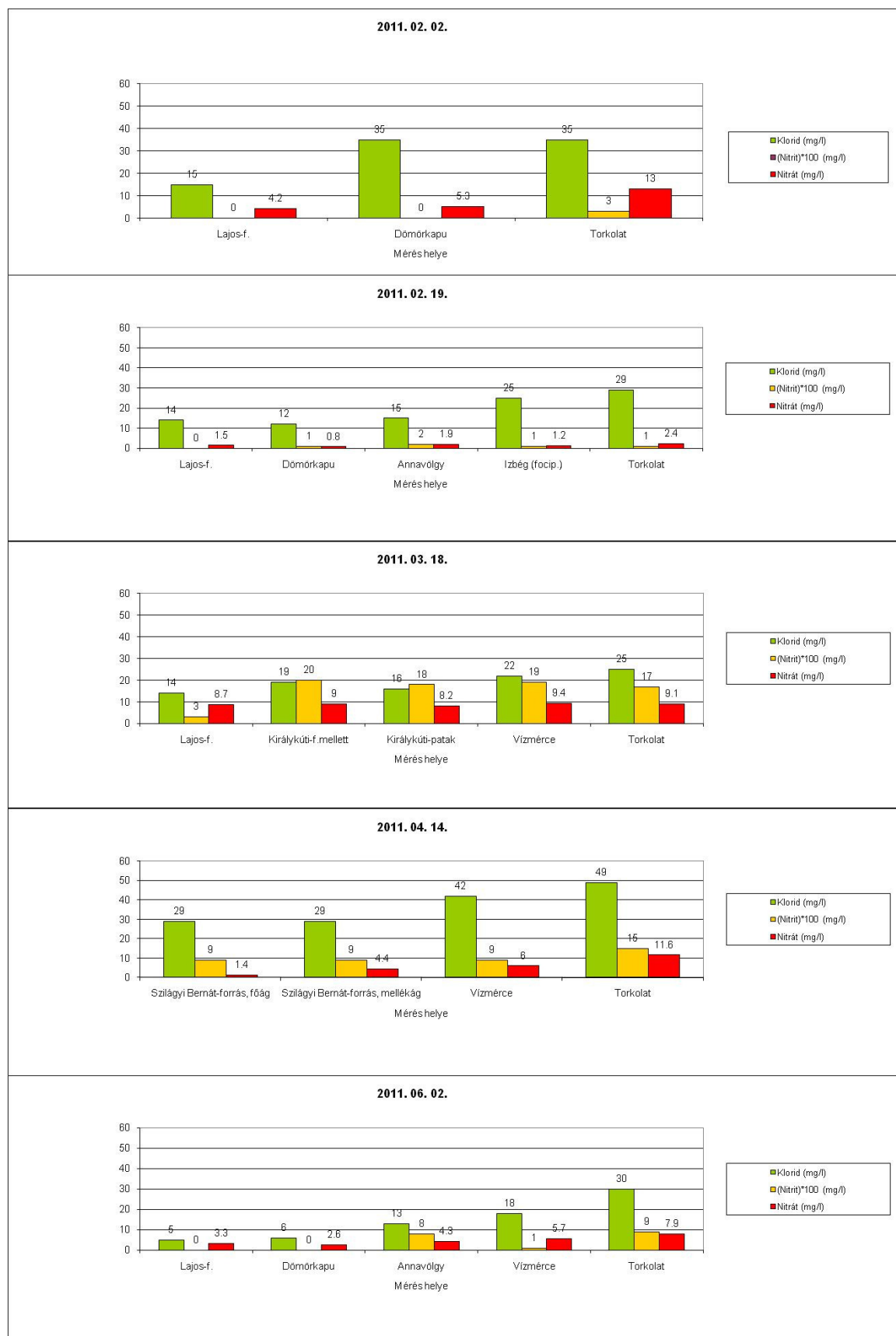
3.2.2. A mérési eredmények kiértékelése

A patak vízhozama és az ábrázolt vízkémiai diagramok (7. ábra, 8. ábra) között szoros összefüggés figyelhető meg.

A grafikonok vízszintes tengelyén a mérési helyeket a forrásoktól a torkolat irányába való haladás szerint tüntettem fel. Ez egyedül a Lajos-forrás becsatlakozására nem teljesül, mivel ez a forrás nem felszíni hozzáfolyásként táplálja a Bükkös-patakot, hanem valahol a dömörkapui ágba szivároghat a felszín alatt. Emiatt a forrásvíz mért vezetőképesség és összes keménység értékei viszonylag állandóak.



7. ábra: A mért vezetőképesség és összes keménység a különböző mintavételi helyeken és időpontokban



8. ábra: A mért klorid-, nitrit-, és nitrát-ion tartalom a különböző mintavételi helyeken és időpontokban

Összességében elmondható, hogy a vízhozam és a vezetőképesség, illetve az összes keménység párhuzamosan változnak. Kisvíz idején, amikor kevesebb víz folyt a patakban, a vízben oldott ásványi anyagok koncentrációja magasabb volt, ezért a vezetőképességet és összes keménységet ábrázoló grafikonok is magasabb értékeket mutatnak (2011. 02. 02.; 2011. 02. 19.; 2011. 06. 02.). Amint megnő a hozam, olvadás vagy jelentősebb csapadék, esőzések, egy levonuló árhullám idején, a víz felhígul, a vezetőképesség és az összes keménység csökken (2011. 03. 18.).

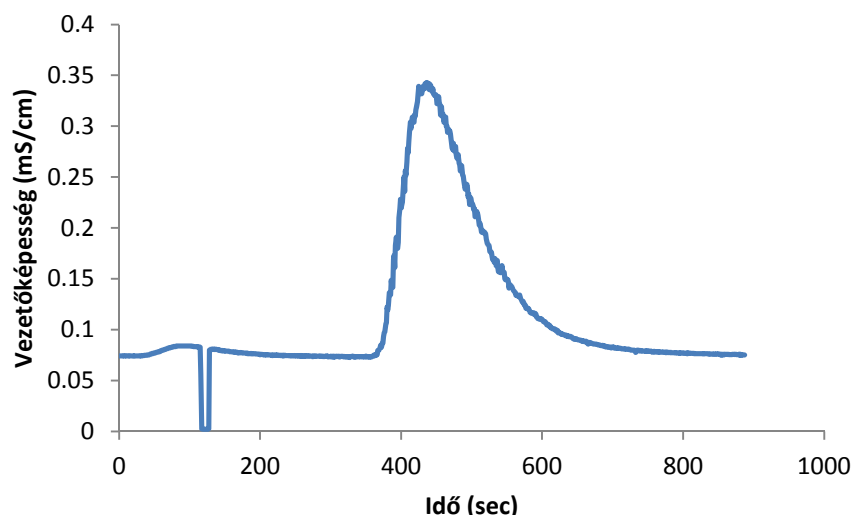
A vezetőképességet és az összes keménységet egymás mellett, különböző mérési időpontokban ábrázoló grafikonokon (7. ábra) megfigyelhető egy fokozatos töményedés, ahogyan a patak vize a torkolat felé közeledik. Általában ugyanez vonatkozik a klorid-, nitrát- és nitrit-ionra is (8. ábra). A Lajos-forráson végzett mérésektől eltekintve, a forrásoktól a Dunába való betorkollás felé haladva megfigyelhető koncentráció-növekedés diffúz terhelésre utal. Ezt igazolja egyrészt, hogy a terhelés mértéke a városi (izbégi és szentendrei) szakaszon nem nagyobb, mint a felső, erdei részekén, továbbá néha közel lineárisnak mondható, azaz a patakot folyamatosan egy felszín alatti terhelés éri.

A téli időszakban, amikor kevesebb biokémiai folyamat zajlik az élővizekben, a patak klorid tartalma viszonylag alacsonynak mondható (10-30 mg/l). Ez alól kivételnek számít a 2011. 02. 02-án végzett mérés, amikor nemcsak a torkolatnál, de már Dömörkapunál is magasabb értékeket mértünk, mint például a márciusi vizsgálatkor. Ez az eltérés a nitrát tartalomban is megfigyelhető. A nitráttal ellentétben a nitritet ábrázoló grafikonok viszont, ahogyan erre az alacsony biológiai aktivitású téli időszakban számítani is lehet, kis értékeket mutatnak.

Áradáskor a nitrát tartalom megnő (2011. 03. 18.), majd kisvíz idején ismét csökken (2011. 06. 02.). Ugyanez, bár nem ilyen jelentős mértékben, de a nitrit tartalomnál is jól látszik. Tehát a kis és nagy értékeket a 2011. 02. 02-ai méréstől eltekintve a nitrit és nitrát is ugyanakkor veszik fel.

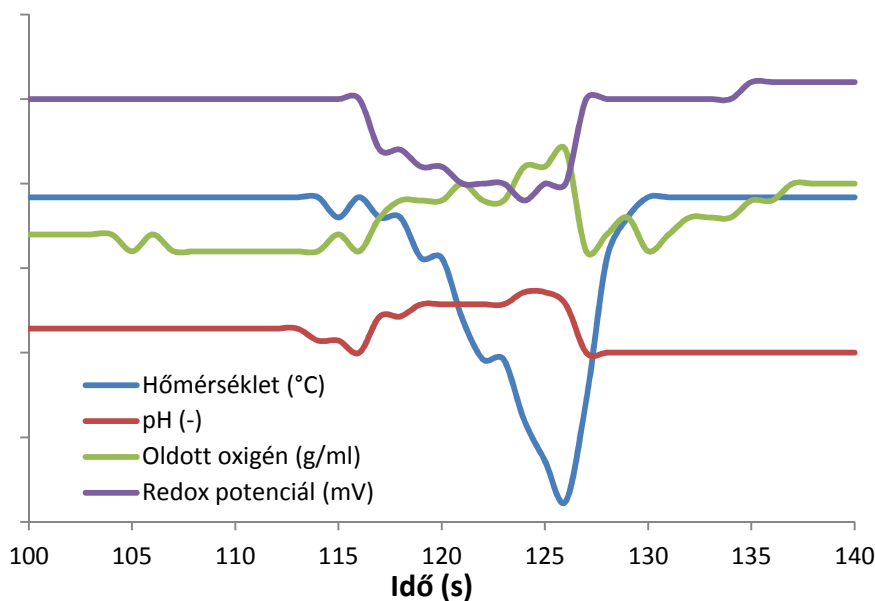
A vízgyűjtőterületen kismértékű mezőgazdasági tevékenység folyik, ami abból is látszik, hogy a tápanyagok koncentrációjának nagyságát nem annyira az évszak, hanem sokkal inkább a vízhozam befolyásolja. Kisvíz idején alacsony, nagyvíz és áradás idején viszont magas a többi mért komponenshez hasonlóan.

2011. 03. 18-án a torkolatnál nemcsak vezetőképességet mérő konduktométerrel, hanem oldott oxigén tartalmat, pH-t, redox potenciált és hőmérsékletet is rögzítő műszerrel (Kahlsico Surveyor 3) végzett mérési adatsorban egy érdekes dolog figyelhető meg. A 9. ábra grafikonja az egész mérést ábrázolja, és jól látható egy elég hirtelen bekövetkező, körülbelül 10 másodperc alatt lejátszódó ugrásszerű csökkenés a vezetőképességben.



9. ábra: A vezetőképesség az idő függvényében, 2011.03.18-án, a torkolatnál

Ha ebben az idő-intervallumban a műszerrel mért többi jellemzőt is kisebb módosításokkal ábrázoljuk, a 10. ábra grafikonját kapjuk:



10. ábra: Az egyes vízkémiai jellemzők változása az idő függvényében.

Itt szépen látszik, hogy nemcsak a vezetőképesség változott meg, hanem néhány másodperc elteltével a redox-potenciál és a hőmérséklet is csökkent, míg a pH és az oldott oxigén tartalom megnőtt. Ezek a változások körülbelül 15 s alatt le is zajlottak, majd a vizsgált kémiai paraméterek kisebb ingadozás után ismét felvették eredeti értéküket.

Ez a folyamat még a sóhullám megérkezése előtt következett be. Sózás hatására a vezetőképesség értéke emelkedik, ahogy a 9. ábra grafikonján is látható a 400-600 másodperc közötti időszakban. Eleinte csak feltételezéseink voltak (esetleges műszerhiba, patakba öntött szennyezőanyag vagy nagy mennyiségű folyadék), melyek nem tűntek valószínűnek, mivel a hozam a méréskor (2011. 03. 18.) eleve magas volt és egy ilyen ugrásszerű változást csak nagy mennyiségű tiszta víz beöntése válthatott volna ki.

Sokkal valószínűbbnek tűnt, hogy a műszer a mérés közben levegőre került, azaz rövid időre (néhány másodperc) az érzékelő része kiemelkedett a patakából a nagy hozam és hullámok következtében.

Ezt a feltételezést laboratóriumi körülmények között modelleztük: laborbeli méréskor háromszor egymás után, körülbelül 1-2 percre kiemeltük a mérőműszert a folyadékból. A rögzített adatok hasonló tendenciát mutattak, mint a tavaszi, torkolatnál végzett mérések eredményei. A vezetőképesség hirtelen és ugrásszerűen csökkent; a hőmérséklet csökkent (nem olyan intenzíven, mint télen, mivel ezt a kísérletet nyár végén, 25-27°C-ban végeztük); a pH a grafikonon látszólag változatlan, de a mérési adatok között látszik, hogy több századot is csökkent; a redoxpotenciál is csökkent; az oldott oxigén pedig nőtt.

Tehát a laborbeli kísérletek igazolták, hogy a mérőműszer valóban levegőre került és ez volt az oka a mérési eredményekben megfigyelhető változásnak.

Fontos megemlíteni, hogy a patak vize számos helyen kommunális szennyvízzel terhelt, ahogyan ezt több forrás is említi (például: 2009 májusában a Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság és a Közép-Duna völgyi Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság által közreadott Vízyűjtő-gazdálkodási Terv 1-9. jelű, Közép-Duna vízgyűjtőre vonatkozó terv). További jó példák Dukay Igor 2004-es vízminőséggel kapcsolatos megfigyelései, illetve a Bükkös-patakon végzett mérési eredményei, melyek ugyan 2006-os feljegyzések, mégis hasonlóak a mai állapotokhoz.

Dukay Igor és a mi eredményeink és megállapításaink hasonlóak (a nitrit-ion tartalom koncentrációja szakaszosan nő, a torkolat felé már IV. osztályú (MSZ 12749 SZABVÁNY szerint, 1993-ból) értéket ér el, a nitrát-ion tartalom a teljes szakaszon a III. és IV. osztály határán mozog, tehát értéke szokatlan módon nem változik, a vízkeménység a torkolatig fokozatosan nő).

Összevetve Dukay Igor adatait az ivóvíz határértékekkel (VÍZKUTATÓ, 2011) egyedül az ammónium- és nitrit-ion tartalom lépik át a 201/2001-es kormányrendeletben előírt határokat, viszont az ideiglenes határértékeket (továbbá a WHO 1996-os és 83EU 1998-as határait) egyik érték sem lépi túl. Ugyanez elmondható az általunk, 2011-ben végzett mérésekről is, melyek jóval a határértékek alatt vannak.

A források vize nem minősül ivóvíznek, a szabványokat (201/2001.(X.25.) kormány rendelet) és 47/2005.(III.11.)) meghaladó baktérium tartalmuk miatt. Ezt támasztják alá az ÁNTSZ Kémiai és Biológiai Laboratórium Osztályai által végzett bakteriológiai és kémiai vizsgálatok eredményeit tartalmazó táblázatokból kiemelt részletek, bár az általunk ismert mérések elég régiek, 2005-ből származnak. Ezeket a vizsgálatokat a Bükkös-patak három forrásán (Lajos-forrás, Kárpát-forrás, és Szilágyi Bernát-forrás) vett mintákon végezték.

a. Lajos-forrás

Forrás: Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat Budapest Fővárosi Intézete, Ivóvíz vizsgálati jegyzőkönyve (2005/04026, 1544-7006-8028)

Bakteriológiai vizsgálatok:

Megnevezés	Mennyiség	Szabvány
Coliform baktériumok	50/100 ml	MSZ EN ISO 9308-1:2001

b. Kárpát-forrás

Forrás: Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat Budapest Fővárosi Intézetének Ivóvíz vizsgálati jegyzőkönyve (2005/07067, 1544-7005-8128 kóddal)

Bakteriológiai vizsgálatok:

Megnevezés	Mennyiség	Szabvány
Escherichia coli	110/100ml	MSZ EN ISO 9308-1:2001
Enterococcusok	7/100ml	MSZ EN ISO 6222:2000

c. Szilágyi Bernát-forrás

Forrás: Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat Pest Megyei Intézete Laboratóriumi osztály Ivóvíz vizsgálati jelentése (2004/H02114, 1544-813-6028 kóddal)

Bakteriológiai vizsgálatok:

Megnevezés	Mennyiség	Szabvány
Coliform-szám	1/100ml	MSZ EN ISO 9308-1:2001

A fentiek ellenére a helybeliek napi rendszerességgel járnak a Lajos-forráshoz és kannákban szállítják el ivás céljára a forrás vizét (11. kép). Egy forrás közelében sem találtunk táblákat, melyek jelezték volna, hogy a források vize nem ivóvíz.



11. kép: Lajos-forrás, 2011. 08. 13., vízvétel

4. Hidrológiai számítások

4.1. Hidrológiai adatok

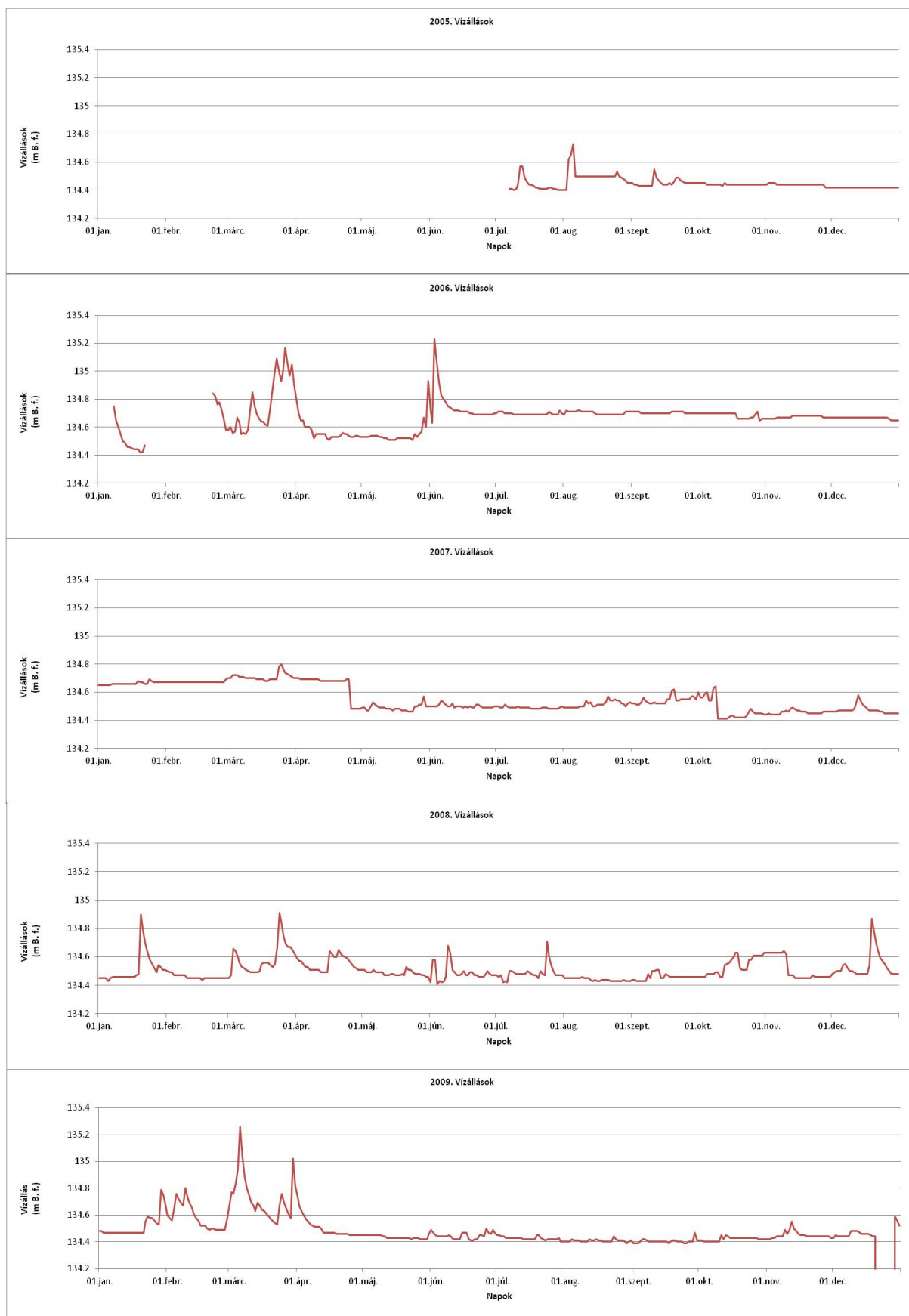
A hidrológiai számításokhoz szükséges kiindulási adatokat, azaz a patak vízállás-vízhozam adatsorait, napi bontásban a KDV-KÖVIZIG-től kaptam meg. Az igazgatóság 2005-ben telepített egy úszós, 15 percenként regisztráló műszerrel felszerelt lapvízmércét (004607 állomás) a Bükkös-patakon, a torkolattól 4,2 fkm-re, melynek nullpontja 134,30 m B. f. magasságban van. A vízmércéig a patak vízgyűjtő területe 33,4 km².



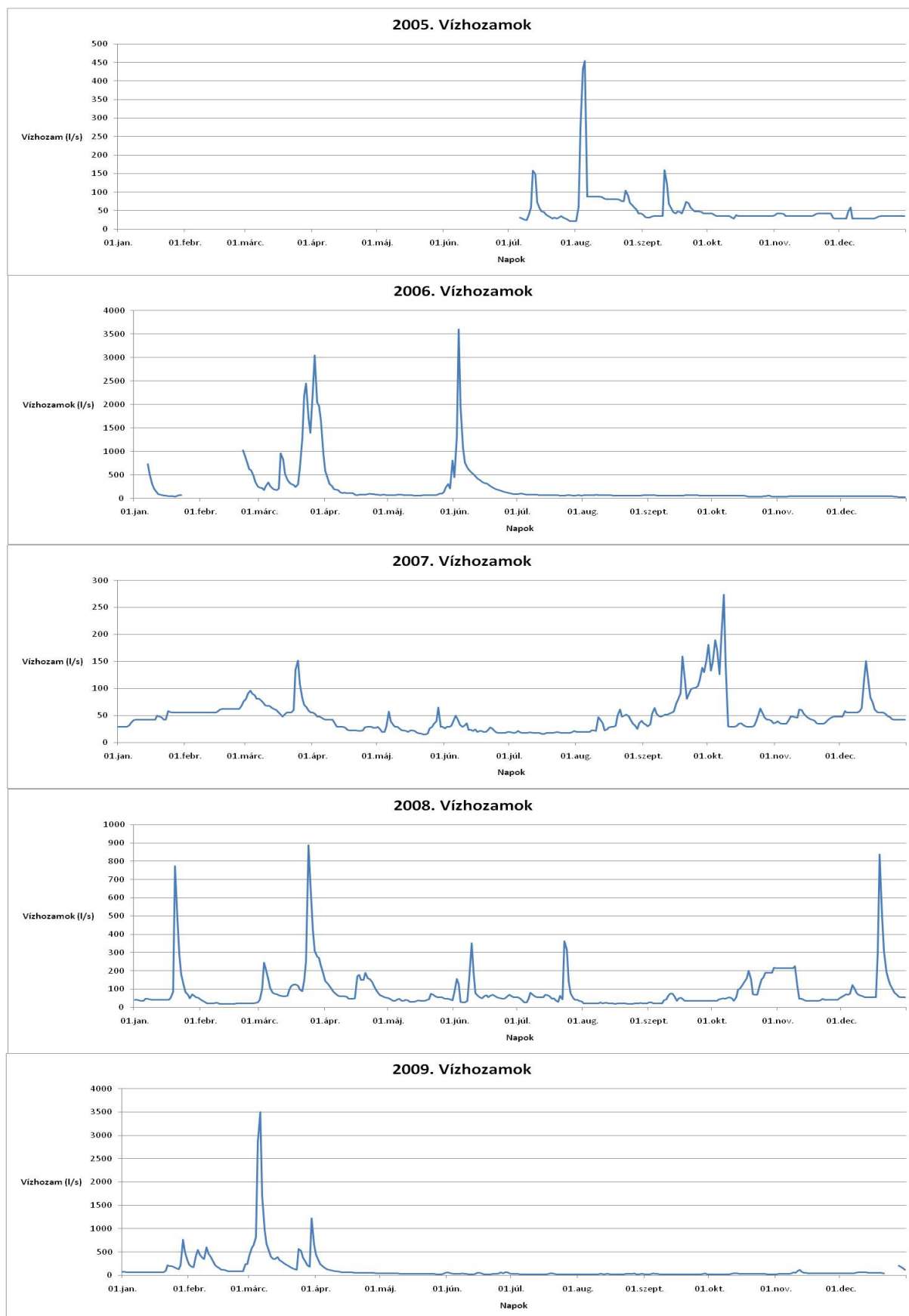
12. kép: Lapvízmérce a Bükkös-patakon

Így rendelkezésemre álltak a 2005-2009-es időszakra terjedő napi átlagos vízállás adatsorok (11. ábra) és a körülbelül havi rendszerességgel mért vízhozam adatokból készítette vízhozamgörbék alapján számított napi vízhozam adatok (12. ábra).

Néhol az adatsorok hiányosak. Például: 2005-ben csak július elejétől rögzítettek vízállás adatokat, illetve 2006 februárjából és 2009 decemberéből hiányzik néhány vízállás adat. Ugyanez állapítható meg a vízhozam adatsorokról.



11. ábra: KDV-KÖVIZIG-től kapott napi vízállások, 2005-2009-ig, éves bontásban



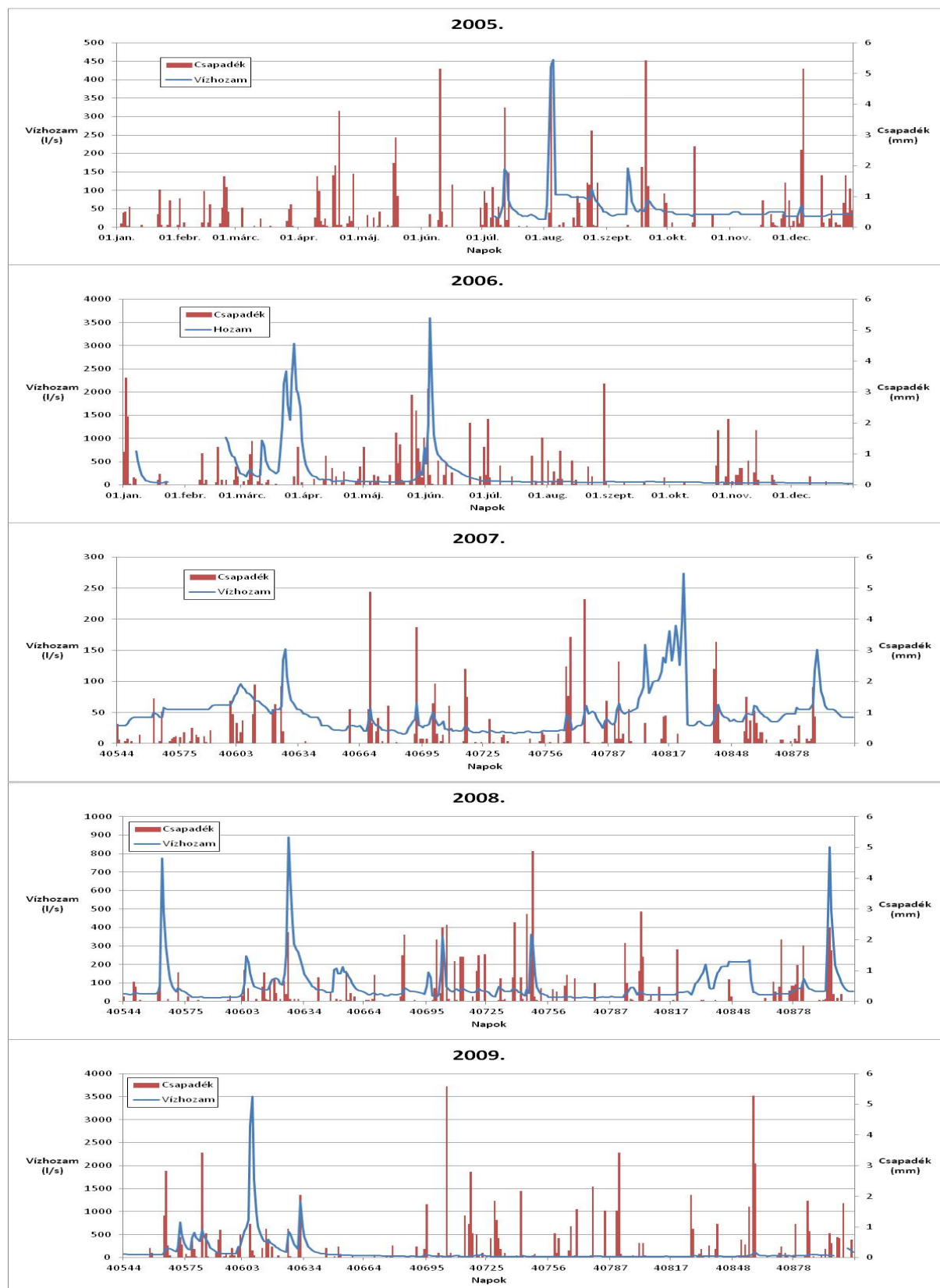
12. ábra: KDV-KÖVIZIG-től kapott napi vízhozamok 2005-2009-ig, éves bontásban

A KDV-KÖVIZIG-től a 2005-2009 között levonuló nagyobb árhullámok 15 perces vízállás adatait is megkaptam, melyeket a HEC-HMS vízgyűjtő-modellező program futtatásához használtam fel.

4.2. Csapadékadatok

A hidrológiai számításokhoz csapadék adatokat is be kellett szereznem. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) honlapján az éghajlati visszatekintő alatt csak grafikonok, illetve átlagos csapadék adatok találhatók, így a napi csapadék adatokat az amerikai Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal (NOAA, 2011) honlapjáról töltöttem le. A hivatal az egész világra kiterjedő meteorológiai adatbázist üzemeltet, amelyből napi adatok ingyenesen lekérhetők, így a vízgyűjtőtől 30 km-re eső Tát település mellett üzemeltetett állomáson mértek is. Az itt rögzített napi csapadékmennyiségeket a 2005-2009-es időszakra a vízhozamokkal együtt ábrázoltam (13. ábra). Egyértelműen látható, hogy a két idősor közötti kapcsolat gyenge. Ennek oka, hogy mérőállomás túlságosan messze helyezkedik el a vízgyűjtőtől. A csapadék mind területi, mind időbeli eloszlása a hozzávetőleg 30 km-en jelentősen megváltozhat, illetve a mérőállomást és a vízgyűjtőt érő csapadékesemények teljesen függetlenek lehetnek egymástól.

A modell vizsgálatok elvégzéséhez napi rendszerességű méréseknél részletesebb felbontású idősorokra van szükség. A 15 perces vízállásokhoz tartozó órás csapadékadatokért az OMSZ-hoz fordultam és a Gazdasági Főosztály fájl mellékletben elküldte a Budapest-Újpest területén működő automata meteorológiai állomás által rögzített az órás csapadékösszeg értékeket, a kért napokra vonatkozóan.

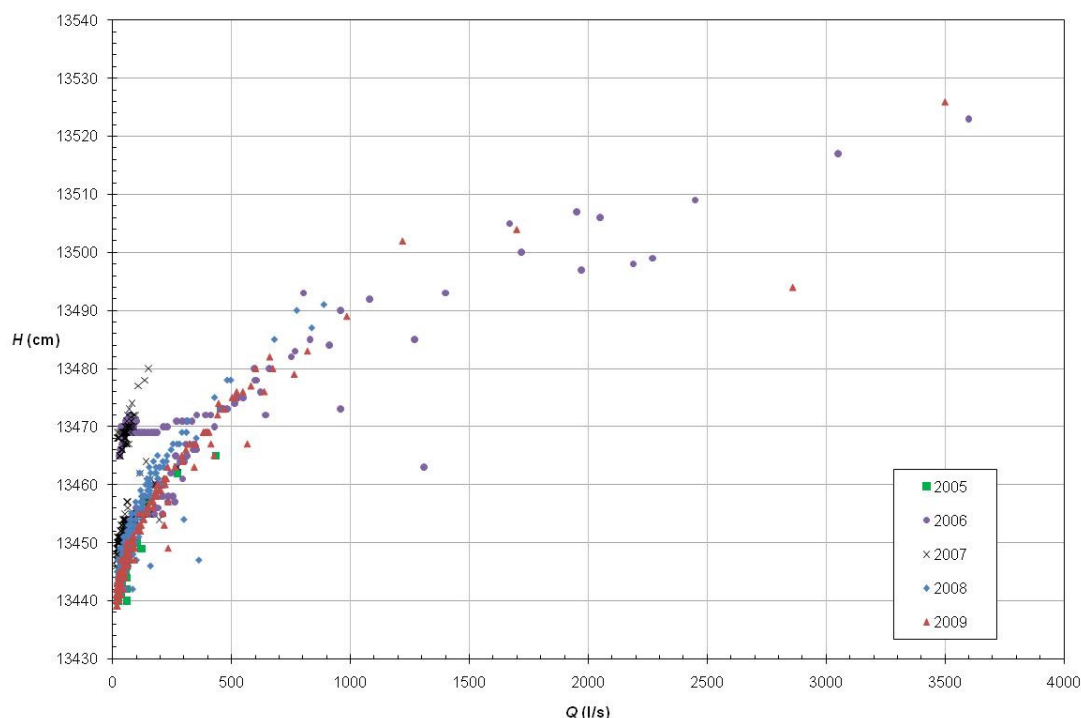


13. ábra: Napi csapadék és vízhozam adatok (2005-2009)

4.3. Q - H görbék szerkesztése

A kapott árhullámok vízszint-idősorainak többsége 2010-2011-es időszakba esik. A modellvizsgálatokhoz vízhozam idősorokra van szükség, amelyet vízhozamgörbe segítségével tudunk előállítani.

Első lépésben ábrázoltam, minden évre (2005-2009) vonatkozóan az egyes napi vízállás-vízhozam adatpárokat. Az így kapott „pontfelhőket” a Q - H koordináta-rendszerben a 14. ábra mutatja. Az egyes évekre külön ábrázolt vízhozam-vízszint pontpárok a 8.1 mellékletben találhatók.

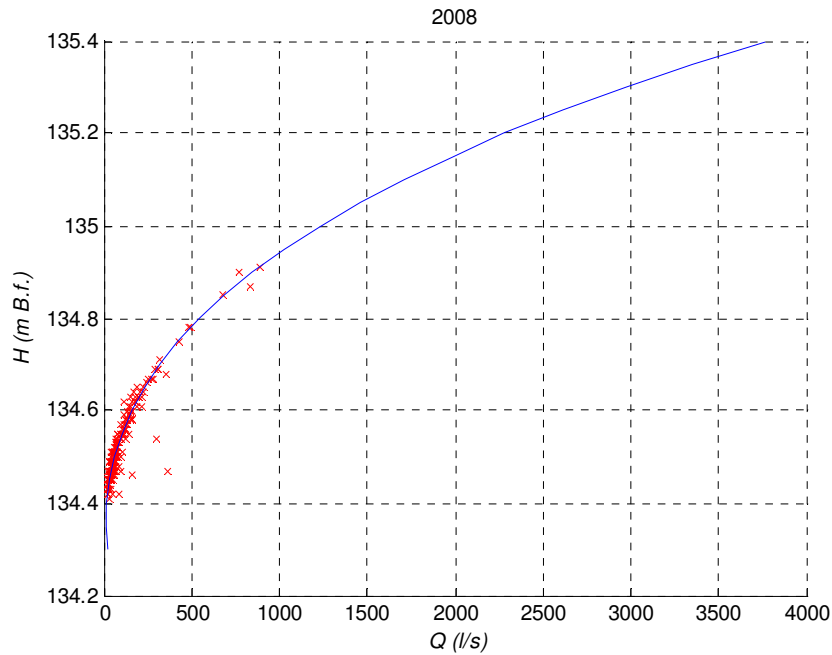


14. ábra: Az öt év Q - H pontpárjai (2005-2009)

Ezekre a pontfelhőkre szerettem volna görbét illeszteni, továbbá az egyes görbék egyenleteit meghatározni, majd egyetlen, a patakra jellemző vízhozam görbét kiválasztani.

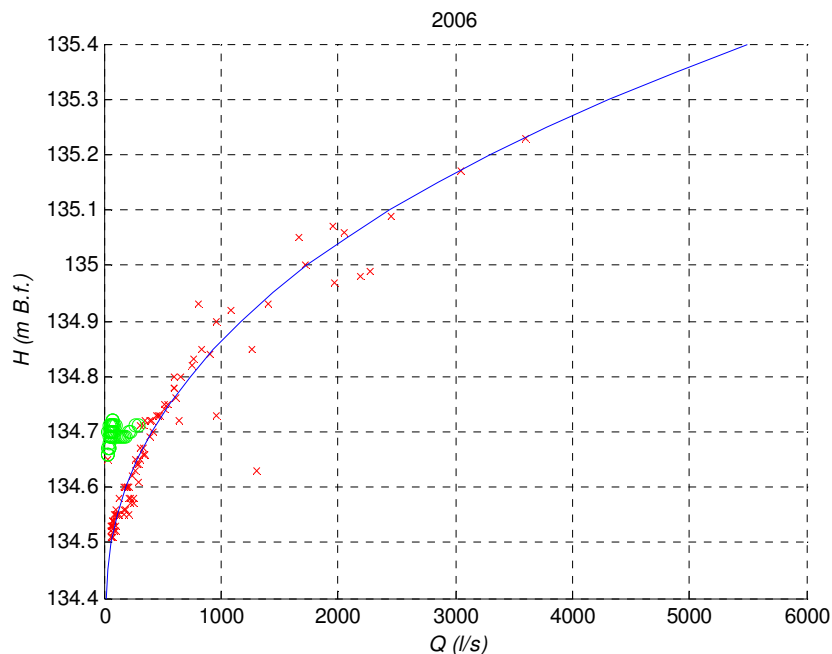
Észrevehető, hogy a 2006-os és 2007-es évben a pontfelhők az egyik esetben kettő, a másik esetben három helyen, egymás alatt sűrűsödnek. Ennek okát nem ismerjük, feltételezhető, hogy a patak vizét egy árhullámmal érkező majd lerakódó hordalék vagy uszadék visszaduzzasztotta.

Először Excelben különböző interpolációk segítségével illesztettem Q - H görbéket a pontfelhőkre, amellyel azonban nem tudtam elérni a kellő pontosságot. Végül Matlab segítségével határoztam meg az egyenleteket. A program a legkisebb négyzetek módszerével harmadfokú polinomot illesztett az összetartozó Q - H pontokra. Az együtthatókat, illetve az egyenleteket hosszuk és bonyolultságuk miatt itt most nem közlöm. Ez a módszer a „szabályos” Q - H görbével rendelkező évekre pontos eredményt és elfogadható görbét adott. Például ilyen volt a 2008-as év (15. ábra).



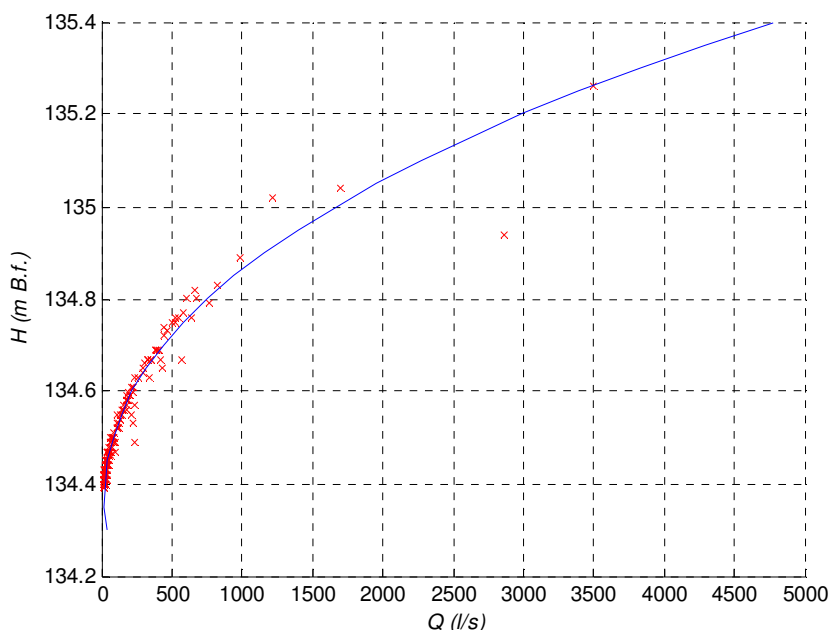
15. ábra: Vízhozamgörbe, 2008.

Sajnos ez a közelítés az olyan években, amikor egymás felett több pontfelhő is megjelent, hibás görbéket eredményezett. Erre jó példa a 2006-os év. Az ilyen évekre bizonyos határfeltételek kikötésével (például: adott hozam egy konkrét vízállásnál nagyobb vízállások mellett már nem vonulhat le) mégis szabványos Q - H görbéket tudtam létrehozni. Ilyen adatok esetén a szűrésnek köszönhetően a program ezeket az eseteket nem veszi bele a regresszióba, így azok nem fogják „megzavarni”, azaz a szabályos irányból eltéríteni a görbét). Erre példa a 2006-os év módosított görbéje (16. ábra).



16. ábra: Szűrés utáni vízhozam-görbe, 2006. Zöld színnel vannak jelölve azok a pontpárok, amelyeket az interpoláció figyelmen kívül hagyott.

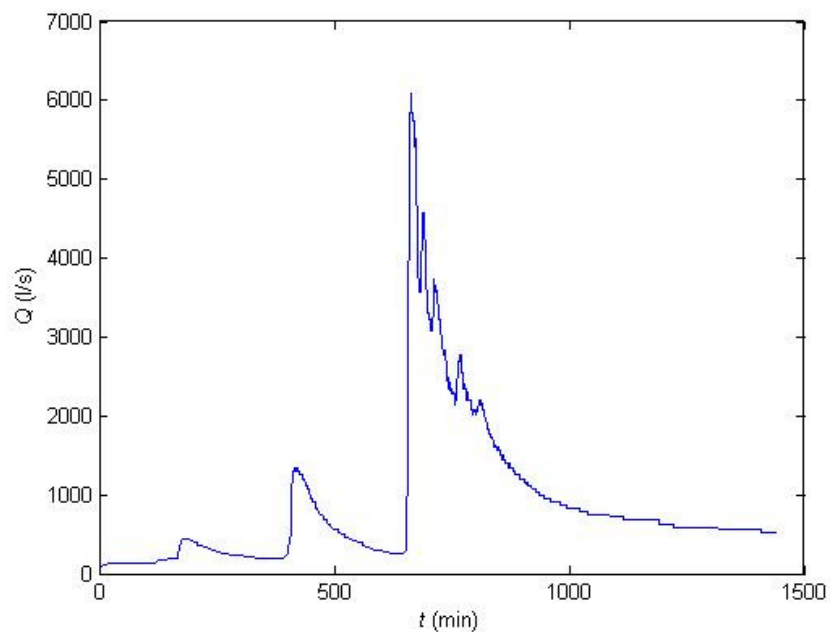
Az öt év közül, jó közelítéssel, mindegyik illeszkedik a 2009-es év görbéjére, így ezt az évet választottam ki és ennek az egyenletével számoltam tovább, a későbbi évekre. Az 17. ábra a 2009-es év Q - H görbét szemlélteti.



17. ábra: Q - H görbe, 2009.

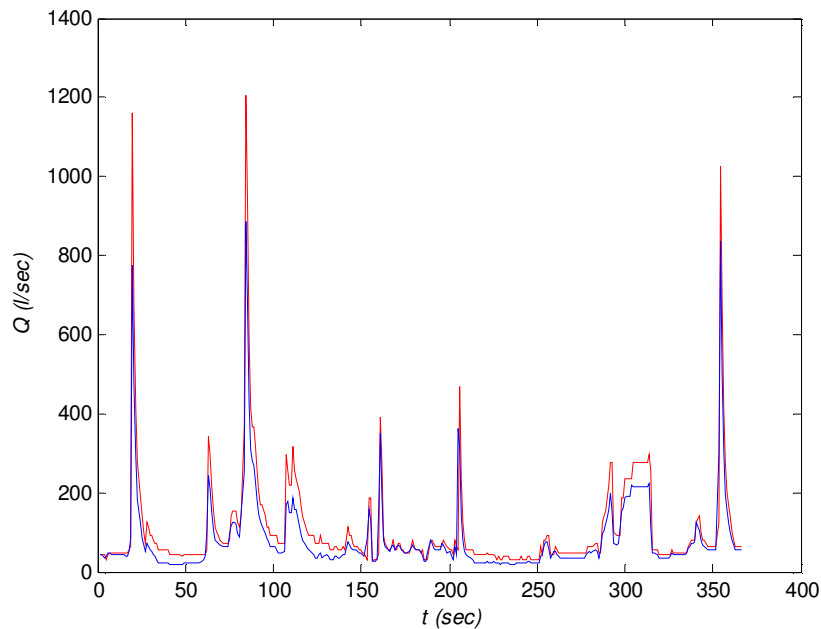
Ezzel sikerült egy bármikor használható vízállás-vízhozam összefüggést találni a patakra.

Ez a további számításokhoz szükséges, ugyanis a 15 perces KDV-KÖVIZIG-es vízállásokhoz ennek segítségével Matlab-ban 15 perces vízhozam értékeket generáltam. Például a 2006 májusában levonuló árhullám ismert vízállásai esetén csak annyit kellett tennem, hogy beolvastam őket Matlab-ba, kiértékeltem őket a 2009-es évre vonatkozó Q - H összefüggés egyenletével, úgy, hogy a kapott értékek mindig az adott vízállásnak megfelelő vízhozamok legyenek és az így kapott vízhozamokat egy fájlba írtam. Például a 2006 májusában levonuló árhullám fenti program segítségével számított vízhozamait ábrázolja a 16. ábra.

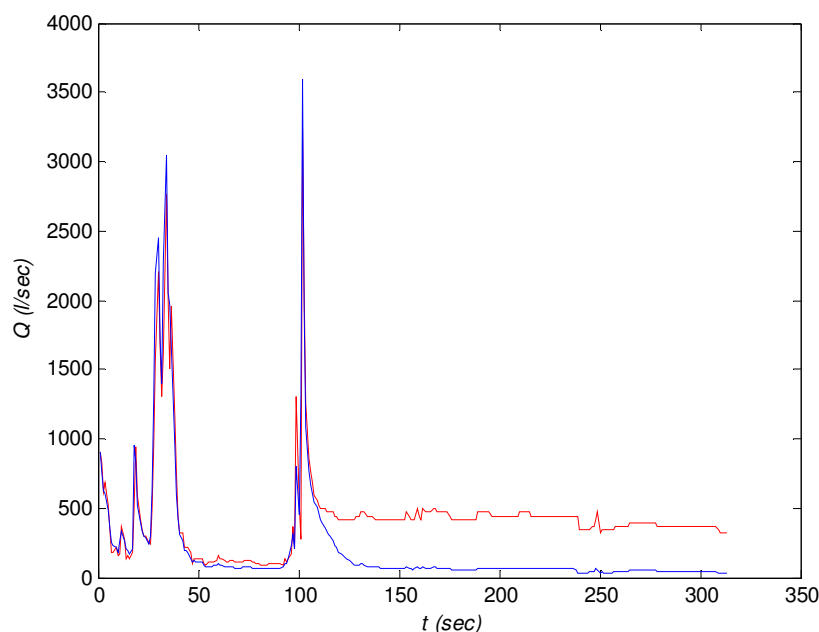


18. ábra: 2006 májusában levonuló árhullám számított vízhozam-idősora.

A számítási algoritmus ellenőrzésére lefuttattam a programot a 2008. év napi vízszint adataival is. A program és az igazgatóság által számított vízhozam idősor nagyon jó egyezését mutatja a 19. ábra. Ugyanezt a számítást elvégezve 2006-ra, az egyezés már nem ilyen jó (20. ábra). Ennek oka a már említett ismeretlen eredetű időszakos vízhozamgörbe eltolódás. Ezt a későbbi vizsgálatoknál figyelembe vettük.



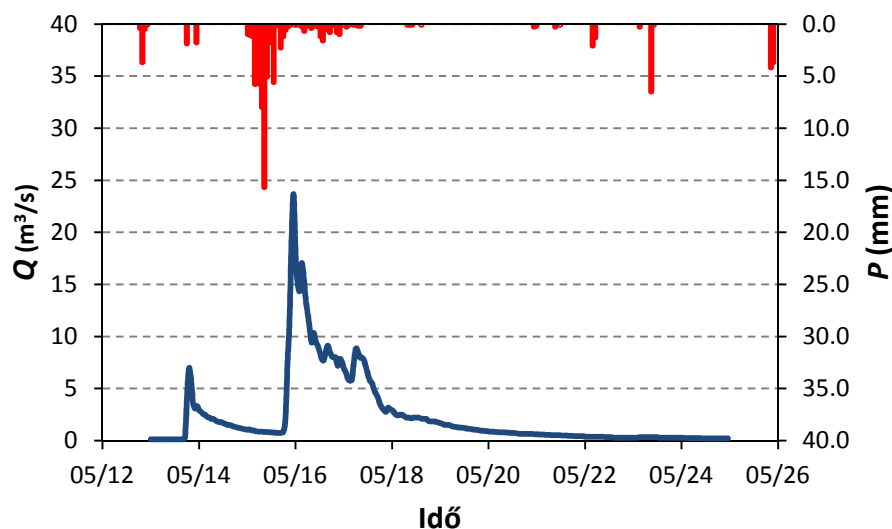
19. ábra: A program által (piros) és az igazgatóság által számolt (kék) vízhozamok 2008-ra.



20. ábra: A program által (piros) és az igazgatóság által számolt (kék) vízhozamok 2006-ra.

4.4. Szeparálás és egységárhullámkép előállítás

Az egységárhullám előállításának kiindulási adatait a 2010. májusi árhullám fent leírt módon számított 15 perces vízhozam és az OMSZ-től kapott órás csapadék adatsorok képezték (21. ábra).



21. ábra: 2010. május csapadék és számított vízhozam adatai

Azért esett erre az árhullámra a választás a 14 árhullám közül (8.3 melléklet), mert egyrészt 4 mm-t meghaladó, jelentősebb csapadékmennyiség csak ekkor esett (2008 májusában 11 mm volt a maximum, de ekkor időben az árhullám megjelenése túlzottan eltoltna követte a csapadékot), másrészt az árhullám tetőzése is időben megfelelő módon jelentkezett ebben az időszakban.

A számított vízhozam nagyságrendi helyességét Chézy-képlettel ellenőriztem, mivel ez a hozam a vízhozamgörbén már nem szerepel, azon extrapolációt kell végezni. Ebben a tartományban a görbe meredeksége kicsi, így az extrapoláció nagy bizonytalansággal jár. A vízmércénél egy vízhozam-mérés alkalmával mederfelvételt is végeztünk (a meder méretei adottak voltak: trapéz alakú kiépített meder 60 cm széles fenékkal, 1,3-as rézsűhajlással, 2,18 m-es maximális vízmélységgel a KDV-KÖVIZIG mérései szerint erre a napra); az esést egy Bükkös-patak geodéziai felméréséről szóló diplomamunkából (HUBINA MÁTÉ, 2010) kerestem ki (a felmérés a torkolattól számítva csak a 2+260-as szelvényig terjedt, 10,15 ‰-es eséssel, de nagyságrendileg ez az érték a körülbelül 2 km-re lévő vízmércénél is elfogadhatónak bizonyult); $k=36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ -os simasági együtthatóval számoltam, mivel a vízmércénél csak minimális, körülbelül 10 m-es szakaszt borít beton burkolat. A vízhozam így $25,52 \text{ m}^3/\text{s}$ -nak adódott, amely egyezik az általunk számított $25 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal. A számítás kiindulási adatait, rész- és végeredményeit az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat: Vízhozam ellenőrzése Chézy-képlettel, kiindulási adatok

Kiindulási adatok	
<i>B</i> , mederfenék szélesség	0,60 m
<i>h</i> , vízmélység	2,18 m
ρ , rézsűhajlás	1,3
<i>S</i> , esés	10,15‰
Számított adatok	
<i>A</i> , szelvényterület	$7,25 \text{ m}^2$
<i>P</i> , nedvesített kerület	7.58 m
<i>R</i> , hidraulikus sugár	0.96 m
<i>v</i> , sebesség	3.52 m/s
<i>Q</i> , vízhozam	$25.52 \text{ m}^3/\text{s}$

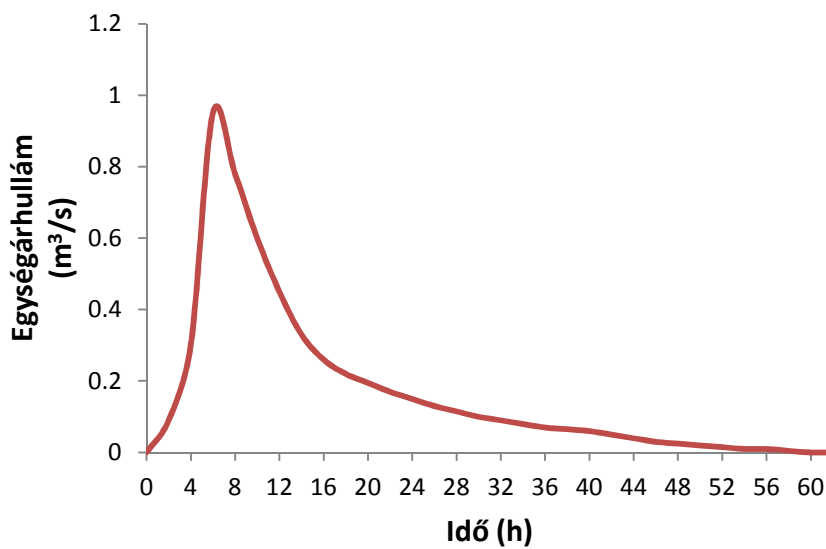
A 2010. májusi árhullám egy 12 napos idő-intervallumot ölel fel, így a kezelhetőbb számolás érdekében 4 órás egységárhullám előállítás mellett döntöttünk.

A vizsgált időszakban az árhullámot kiváltó csapadék és az árhullám megjelenése is 2010. május 15-17. között történt. Árhullámot kiváltó csapadéknak, a 2010. 15-én 14-17 óráig tartó minimális mennyiséget (előkészítő csapadék) nem számítva, a 17-24 óráig lehullott csapadék mennyiség számít. Az első négy órában összesen 24,3 mm, a rákövetkező négy órában 21.2 mm hullott le. Ez összeadva 45,5 mm. Tehát a lefolyásképző csapadék meghatározásakor az első négy órát ($24,3/45,5=$) 0,53-as, a második négy órát ($21,2/45,5=$) 0,47-es súllyal vettem figyelembe.

Az árhullám szeparáláskor az 8.2 mellékletben található oszcilláló egységárhullám-görbét kézzel közelítőleg kiegyenlítettem. A vízgyűjtő felszín alatti tulajdonságairól nem sok információval rendelkeztem, emiatt az árhullám kezdetének időpontját a felszín közeli lefolyás végével kötöttem össze. A vonal alatti terület reprezentálta a felszín alatti lefolyást, illetve a vonal és az árhullám görbéje közötti terület a lefolyásra kerülő vízmennyiséget. A négy órás időnek megfelelő lefolyásra kerülő vízhozam értékeket a 8.2 melléklet tartalmazza. A lefolyásra kerülő vízmennyiség számításakor a táblázatban feltüntetett lefolyt vízhozam értékeket összegezhettem ($73,2 \text{ m}^3/\text{s}$), az időtengely sűrű beosztása miatt. Az így kapott vízhozam összeget $4 \cdot 3600$ s-mal felszorozva, megkaptam a lefolyt vízmennyiséget (a

görbe alatti területet „téglalapok” összegzésével közelítettem). A lefolyási rétegvastagság a kapott 1054080 m^3 és a terület (33 km^2) hányadosaként $31,94 \text{ mm}$ -nek adódott. Ezután a hatékony csapadékot súlyozással számíthattam $h_1=0,53*31,94=16,9 \text{ mm}$, $h_2=0,47*31,94=15,0 \text{ mm}$.

Az egységárhullám ordinátáit a két hatékony csapadékmagassággal már könnyen számítható, a klasszikus módszer göngyölítéses eljárásával. Az ordináták között több is negatív értéknek adódott. Ezt ábrázolva egy időben „pulzáló” grafikont kaptam, amelyet kézzel kiegyenlítettem. Az eredeti és javított ordinátákat a 8. táblázat tartalmazza a 8.2 mellékletben. A 22. ábra a kiegyenlített egység-árhullámképet mutatja.



22. ábra: Kiegyenlített, 4 órás egységárhullámkép, 2010. május.

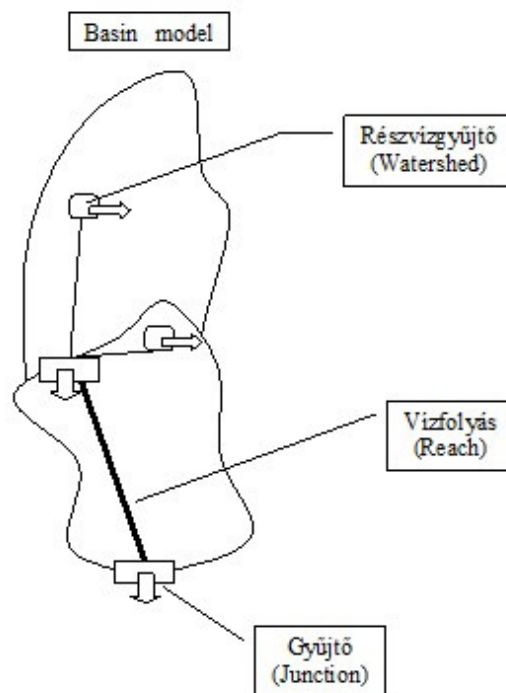
5. Vízgyűjtő modellezés HEC-HMS szoftverrel

A HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) csapadék-lefolyás folyamatok szimulálására kifejlesztett vízgyűjtő modellező szoftver, amelyet a HEC már több mint 30 éve fejleszt. Ezek a fejlesztések ugyanakkor bárki, még a külföldiek számára is elérhetőek, ingyenesen és legálisan internetről letölthetőek.

A HEC-HMS grafikus felhasználói felületet, saját adatbázis-kezelőt valamint szöveges és ábrákkal illusztrált eredménykijelzést kínál a felhasználók számára. Fa alakú vízgyűjtő hálózattal rendelkező vízgyűjtő terület esetén rengeteg hidrológiai és hidraulikai számítási módszer közül választva szimulálható a csapadék-lefolyás folyamata. Ezen kívül a program segítséget nyújt a földhasználat változásának, urbanizáció vízgyűjtőre gyakorolt hatásának modellezéséhez; hidraulikai műtárgyak vízfolyást befolyásoló hatásainak vizsgálatához (építendő műtárgyak méretezéséhez); árhullám szimulációhoz; árvíz előrejelzéshez.

A HMS modell fő részei: vízgyűjtő modell, meteorológiai modell, a bemeneti adathalmaz megadása és a modellfuttatási paraméterek beállítása.

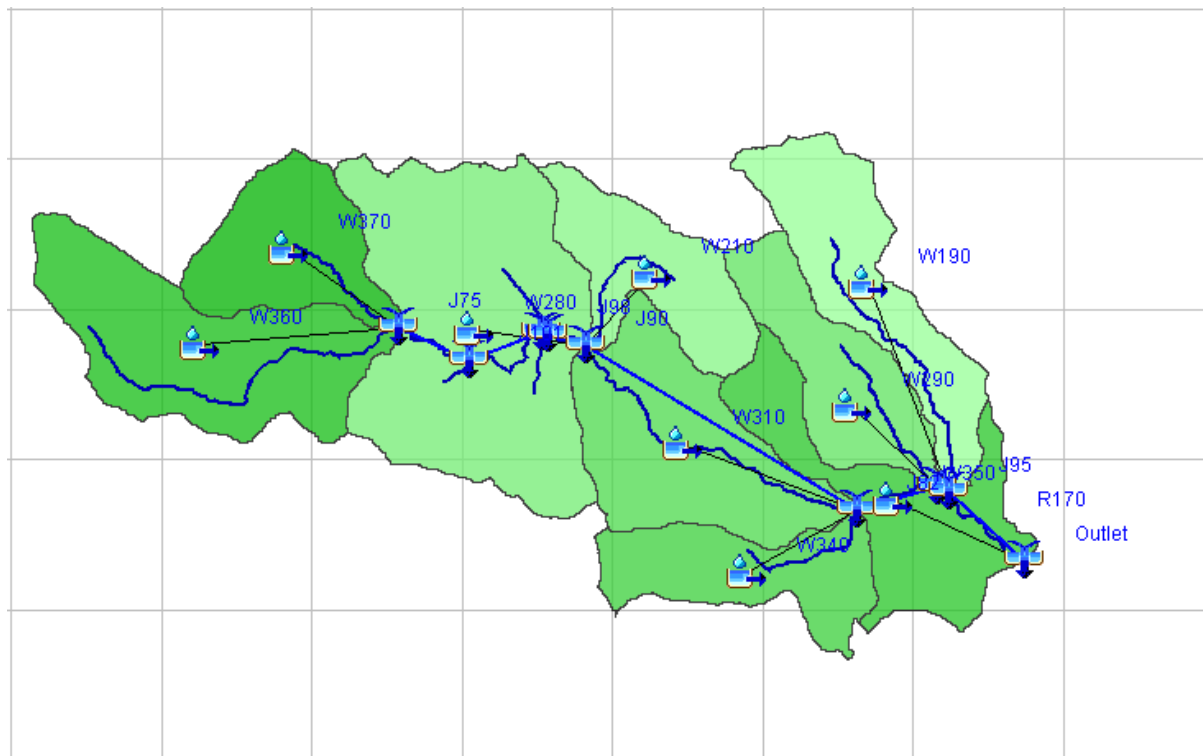
A vízgyűjtő (basin) modell fizikailag reprezentálja a vízgyűjtő területet. Több féle hidrológiai egység variálásából, összekapcsolásából tevődik össze (részvízgyűjtő, vízfolyás, gyűjtő, forrás, kifolyás, tározó, elvezető csatorna), melyek közül hármat alkalmaztam a Bükkös-patak modelljében (részvízgyűjtő, vízfolyás, gyűjtő). A lenti 23. ábra egy egyszerűsített vízgyűjtőt és a használt hidrológiai egységeket szemlélteti.



23. ábra: Egyszerűsített vízgyűjtő terület modellje

A részvízgyűjtő területet pontszerűen ábrázolt úgynevezett watershed jeleníti meg, melynek nagyságát bemenő adatként meg kell adni. A részvízgyűjtőkön összegyűlt víz gyűjtőpontokban (junction) koncentrálódik. Az egyes gyűjtőket pedig vízfolyások (reach) kapcsolják össze, melyek hosszát a program csak bizonyos számítási eljárások során igényli. Az 24. ábra a modellben használt vízgyűjtő modellt mutatja, melynek összetettsége a

kalibrációt ugyan megnehezítette, de a patak nagyszámú oldalága miatt az egyszerűsítések (például: részvízgyűjtők számának redukálása) pontatlanná tették volna az eredményeket.



24. ábra: Bükkös-patak vízgyűjtő területének modellje

A meteorológiai modell a csapadékkal, párolgással és párologtatással, illetve hóolvadással számol, melyek közül én csak a csapadékkal foglalkoztam. A modell feladata mért adatok vagy csapadék maximum függvények felhasználásával kiszámítani a vízgyűjtőt elérő teljes csapadékmennyiséget. A csapadékok közül a Specified Hyetograph típust választottam, mivel a modell az OMSZ-től kapott, óránként mért csapadék adatsorral számolt. Itt kell beállítani azt is, hogy melyik vízgyűjtő modellre vonatkozik a meteorológiai modell.

Bemenő adatoknak csak időben megfigyelt adatsorokat vittem be a modellbe (további lehetőség: adatként és adathálózatok betöltése), azok közül is órás csapadékadatokat és 15 perces vízhozam adatokat, minden esetben beállítva egy úgynevezett Time Window-t (mely megszabta, hogy a bemenő adatok közül milyen intervallumot vegyen figyelembe a modell). Az OMSZ-től és KDV-KÖVIZIG-től kapott adatsorokat DSS file-okként töltöttem be a rendszerbe. A mért vízhozam adatokra a modell kalibrálása végett volt szükség.

Végül a vezérlési leírásban a szimuláció kezdeti és záró időpontját és a számítási időlépcsőt kell megadni. Néhány napról lévén szó, 20 perces számolási időlépcsőt választottam.

5.1. A modell hidrológiai elemeinek ismertetése

A HEC-HMS számtalan számítási módszert kínál a felhasználók részére, melyeket az Egyesült Államokban fejlesztették ki, így magyarországi területeken az eltérő éghajlati és domborzati viszonyok miatt csak komoly odafigyeléssel alkalmazhatók, továbbá az egyes segédletekben javasolt paraméter beállításokat is értékelni kell.

A vízgyűjtő modell számítási típusai közé tartozik a párologtatás, felszín párolgása, veszteségek, felszín alatti hozzáfolyás számítása a részvízgyűjtőkre, továbbá a késleltetés és elnyelés számítása a patak szakaszokra. Ezek közül is választani lehet, nem kell mindegyiket figyelembe venni. Az alábbiakban az általam választott számítási eljárásokat ismertetem.

Növényzet egyszerű figyelembe vételére több módszer közül választhatunk. Esetünkben a legegyszerűbbet (Simple Canopy) választottam, mivel a másik lehetőség (Gridded Simple Canopy) cellás adatállományra alkalmazható. Itt egy a szimuláció elejére vonatkozó, százalékban megadott kezdeti tározott vízmennyiséget (Initial storage) és a növényzet által maximálisan felfogható, mm-ben megadott vízmennyiséget (Max Storage) kell megadni.

A veszteségek számítására az Initial and Constant Loss Method-ot választottam, mivel ez a módszer igényli a legkevesebb bemenő adatot, amely nagy előnyt jelentett, mert a terület talajviszonyairól nem állt rendelkezésemre megfelelő mennyiségű információ. A kezdeti veszteség (Initial Loss) a leesett csapadékmennyiségből beszivárgó vagy a részvízgyűjtőn eltárolt vízmennyiséget jelenti, a felszíni lefolyás kezdete előtt. A Technical Reference Manual szerint ez a teljes csapadékmennyiség 10-20 %-a lehet, de maximálisan 1,37 mm. A Constant rate paraméter azt szabja meg, hogy a kezdeti veszteség elérését követően mekkora arányú a további beszivárgás. Továbbá %-ban megadható az egyes részvízgyűjtőkön a beszivárgás nélküli (Impervious) területek aránya.

Az árhullám transzformációnál hét módszer közül lehetett választani, melyek közül a meder szabálytalan alakja (kevés szelvény pontos mérete, kiépítetlen, kavicsos, erdei patakmeder) miatt újból a csupán egy paraméter beállítását igénylő SCS Transform módszert választottam ki. Legfeljebb a városi, szentendrei szakaszon alkalmazhattam volna a Chézy-képleten alapuló Kinematic Wave Transform módszert, de a vízgyűjtő modell Outlet nevű hidrológiai eleme, azaz a legutolsó kifolyási szelvény a vízmércénél helyezkedik el, azaz a teljes városi szakasz hiányzik a modellből (ez azért van így, mert a modellbe betöltött „megfigyelt vízhozamok”-at is a vízmérce rögzítette, tehát az ezt követő patakszakaszt nem lett volna értelme modellezni). Az árhullám alakját a Standard Shape határozza meg, mivel a Delmarva típus csak az Egyesült Államok nyugati partjain lévő síkságokon teljesül. A Lag Time percben adja meg a csapadék súlypontja és az eredményezett árhullám csúcsának megjelenése közötti időt. Amerikai kutatások szerint (Természeti Erőforrások Megőrzésének Szervezete) ez az idő hozzávetőlegesen az összegyülekezési idő 60 %-a. A transzformációs időket a részvízgyűjtők területeinek arányában súlyozva határoztam meg.

A felszín alatti hozzáfolyás (Baseflow) a vízgyűjtőterületen konzerválódó vízmennyiséget modellezi. Meghatározásánál, mivel a területre jellemző, hónapokra bontott konkrét értékek (például: Constant Monthly) nem álltak rendelkezésemre, a Linear Reservoir beállítási módszert választottam. A veszteség (Loss) során meghatározott beszivárgást a program úgy tekinti, mint a lineáris tározóba (Linear Reservoir) befolyó hozamot. Egy vagy két talajvízréteget lehet figyelembe venni (GW1 és GW2), melyek között a felhasználó által megszabott arányokban oszlik meg a beszivárgott vízmennyiség. A második rétegből azonban a víz elszivárog és nem kerül vissza a vízfolyásba. Lehetőség van arra is, hogy bizonyos talajnedvességgel számoló módszereket alkalmazva, a beszivárgásként megadott értékek később felszín alatti hozzáfolyásként visszakerüljenek a patakba. Kétféle paramétert kell kiválasztani az egyes talajvízrétegekre: egy kezdeti értéket m^3/s -ban (GW Initial) és egy tározási együtthatót (GW Coefficient). A kezdeti érték megadja, hogy időegység alatt mekkora vízmennyiség kerül a talajból a vízfolyásba (területegységre is megadható lenne ez az érték), a tározási együttható egy konstans időmennyiség a lineáris tározás idejére az egyes rétegekben. Ezeken kívül az egyes talajvízrétegekre beállítható az egymás után sorba

következő tározási rétegek száma, melyek növekedésével a késleltetés is nő. Itt csak egy réteget választottam.

A lefolyási módszerek közül a patakszakaszokra a csupán egy szabad paramétert igénylő Lag nevű módszert használtam, mely rövid vízfolyásokra ideális. Az itt beállított idő az árhullámok időbeli eltolódását jelenti, vagyis megadja, hogy a patakszakasz elején belépő vízmennyiség mennyi idő múlva éri el annak végét. Az általam választott paraméterek a patakszakaszok térképről lemért hosszaival arányosak.

5.2. Vizsgált időszakok kiválasztása

A modell felállításához, ellenőrzéséhez és a vizsgálatokhoz összesen 14 árhullám csapadék-vízhozam adatsorai álltak rendelkezésemre. Ezek grafikonját a 8.2 melléklet tartalmazza. Ezek közül csak a

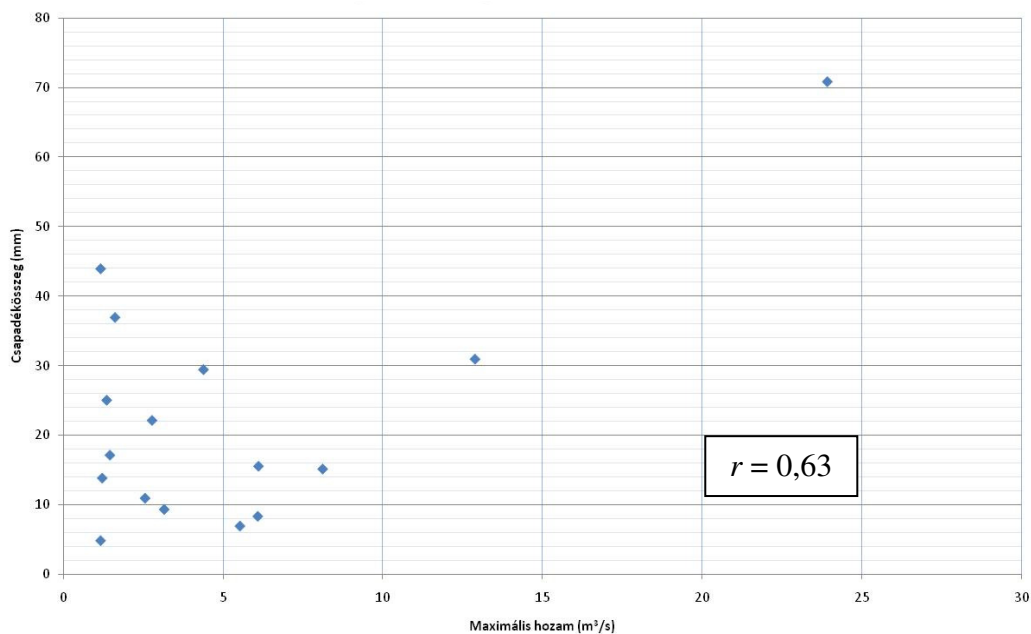
- 2008. júliusi,
- 2009. februári,
- 2010. április,
- 2010. májusi,
- 2010. júniusi,
- 2010. szeptemberi,
- 2011. januári és
- 2011. márciusi

adatpárokról mondható el, hogy összetartozó csapadék-vízhozam értékpárok. A többi esetben 10 óránál is több időkülönbség figyelhető meg a csapadékmennyiség súlypontja és az árhullám megjelenése között, tehát biztosan nem lehetnek összetartozó értékek. Ez annak a következménye, hogy a csapadékadatokat egy újpesti állomás rögzítette, több km-re a vízgyűjtőtől. Mint már említettem, ez volt a legközelebbi órás csapadék értékeket mérő automatikus műszer.

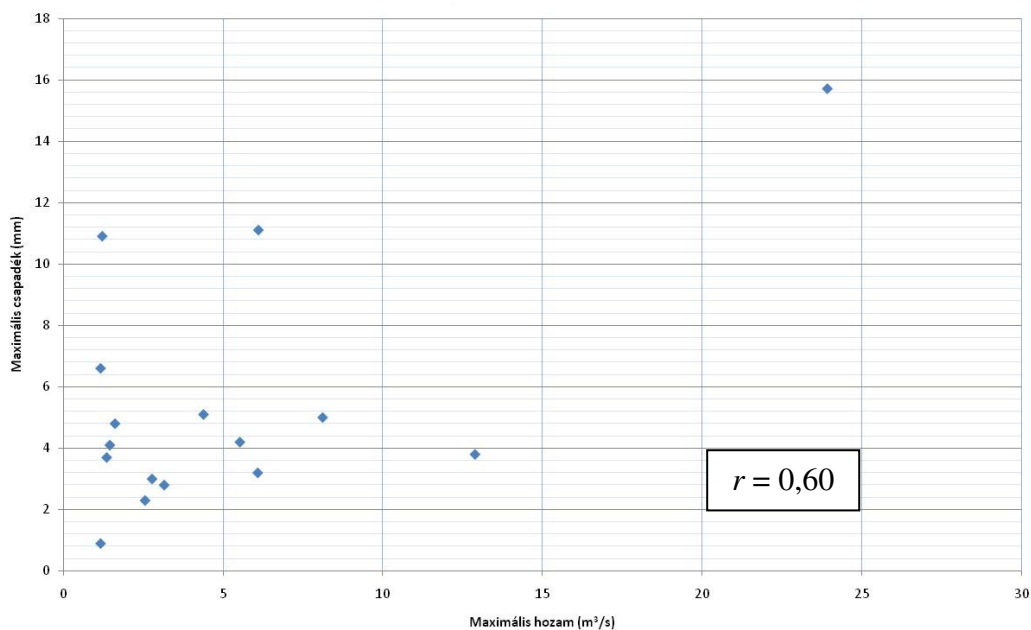
Ilyen adatmennyiség mellett nem volt lehetőségem hosszú időszakok vizsgálatára. Hirtelen záporok, zivatarok keltette árhullámok kialakulásának vizsgálatát tűzhettem csak ki célul.

Legalább két olyan árhullámra volt szükségem a kalibráció és a validáció elvégzéséhez, amelyeket közel azonos évszakban figyeltek meg. Eltérő vegetációs időszakban a lefolyási viszonyok nagymértékben megváltozhatnak, így pl. a nyári és téli árhullámokat nem lehet egységesen kezelni. A fenti problémák megnehezítették a bemenő adatsorok megválasztását.

A maximális csapadékkintenzitás (mm), a csapadékösszeg (mm) és a maximális hozam (m^3/s) táblázatba foglalásakor észrevehető, hogy a maximális csapadék többnyire a 4 mm-t sem éri el, tehát a veszteségek levonása után jelentős árhullámot nem okozhat. A maximális vízhozamokat ábrázoltam az előbbi két csapadékjellemző függvényében (25. ábra és 26. ábra). A szórt pontfelhőn látható, hogy közöttük erős összefüggés nem figyelhető meg. A maximális hozam és csapadékösszeg, mint két egymástól nem független, sztochasztikus kapcsolatban álló valószínűségi változó korrelációs kapcsolatára kapott érték: $r=0,63$. Ez 16 elemszámú minta esetén stabilnak tekinthető. A korrelációs számítás menetét és eredményeit a 8.4 melléklet tartalmazza.



25. ábra: Csapadékösszeg és a maximális hozam kapcsolata



26. ábra: A maximális csapadékintenzitás és maximális hozam kapcsolata

A kalibráció elkezdése előtt próbáltam a fent felsorolt árhullámok közül (összetartozó csapadék-lefolyás párok) a legnagyobb csapadékokat (4 mm feletti) és a hozzájuk tartozó vízhozamokat kiválasztani.

A 2010. májusi adatsor ezt a feltételt ugyan kielégítette, azonban hasonló nagyságrendű csapadékeseményt a validáláshoz nem találtam. A 2008. júliusi és 2010. szeptemberi események esetén a vízhozam jóval alulmarad a várthoz képest, ami azt feltételezi, hogy az Újpesten mért csapadék nem jellemzi jól a vízgyűjtőt ért csapadékot.

2010. júniusi eseményt nem tekinthetjük rövid idejű csapadéknak, mert több mint két napig tartott. Az ennek hatására kialakuló viszonyokat (pl. erősen átázott talaj) nem tudjuk leképezni a modellben, amennyiben rövid, gyors lefolyású eseményeket vizsgálunk.

A modell felállítása végeredményben az alábbi eseményekkel történt, vizsgálva ezzel a téli, illetve a kora tavaszi állapotokat:

- 2011. január,
- 2009. február,

valamint:

- 2011. március végi és
- 2010. április.

5.3. A modell kalibrálása

A modell arányosításakor elsődleges célom az volt, hogy egy levonuló árhullám vízhozam idősorát mértékadó keresztszelvényben közelítsem oly módon, hogy a maximális vízhozamnál alakuljon ki a legjobb egyezés. Természetesen igyekeztem a paramétereket úgy felvenni, hogy az árhullám alakja, időbeli lefutása is közelítsen a mért értékekhez.

Az OMSZ adatai szerint ezekben az időszakokban csak eső esett, azaz hó nem volt, így a meteorológiai modellt nem kellett olvadás beállításával bonyolítani.

A modell kalibrálása több nehézségbe is ütközött. A modell kalibrálásának elején csak a veszteségeket, transzformációs eljárásokat és késleltetést vettem figyelembe, minimalizálva a szabad változók számát. Így azonban a modell túl gyors lefolyást eredményezett, az árhullámok görbéi meredek lefutásúakká váltak, emiatt szükségessé vált a felszín alatti hozzáfolyás bevezetése. Így az árhullám képe szabályosabb, szélesebb lett, azonban jelentősen túlbecsülte a valódi hozamot. Ebből azt a következtetést vontam le, hogy valamilyen módon számottevő veszteség keletkezik a vízgyűjtőn, ami a lefolyási hányad csökkenését eredményezi. Ennek több oka lehet, mint pl. az intercepció vagy a felszíni mélyedések. Ezt az együttes hatást a növényzet (Canopy) hatásának bevezetésével próbáltam modellezni. Végül egyedül a felszínen keletkező veszteségek és a patakszakaszok (reach elements) veszteségével nem számoltam.

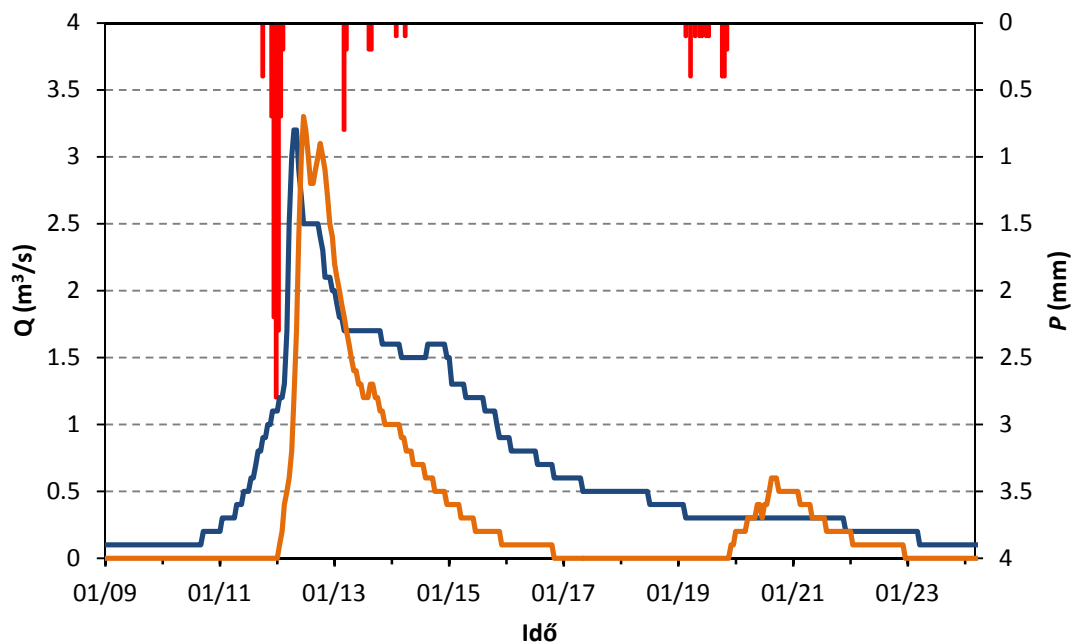
A növényzet párologtatásánál, a felszín alatti hozzáfolyásnál és a veszteségek figyelembe vételekor azonos paramétereket vettem fel az egyes részvízgyűjtőkre és patakszakaszokra. Fontos, hogy a transzformációs eljárásnál a vízgyűjtőterületek területének arányában osztottam el az összes időt az egyes részvízgyűjtő területek között; továbbá a Routing-nál beállítható időket a patakszakaszok hossza szerint súlyoztam.

A modellt két különböző időszakra igyekeztem kalibrálni, egy télire és egy tavaszra. A futtatások során igazolódott, hogy a modell nagyon érzékeny az évszakokra, azaz a tavaszi, olvadásos időszakra vonatkozó paraméterek nagyban különböznek a téli, fagyott időszaktól. Az előbbi időszakban a talaj vízfelvevő képessége magasabb, ami a felszín alatti lefolyás megnövekedésével jár. Ezzel összhangban a modell paramétereit úgy választottuk meg a téli időszakhoz képest (6. táblázat), hogy a megjelenő növényzet hatására kialakuló veszteségeket növeltük meg, illetve a talajba való beszívargást és az ottani lefolyást. A további paraméterekhez nem nyúltunk (transzformációs és mederbeli lefolyási idők).

6. táblázat: Beállított paraméterek a téli időszakra

SIMPLE CANOPY	Initial storage	20%
	Max storage	3 mm
INITIAL AND CONSTANT LOSS	Initial loss	3 mm
	Constant rate	2 mm/hr
	Impervious	0%
SCS UNIT HYDROGRAPH TRANSFORM	Lag time	3 hr
	(vízgyűjtőterületek arányában elosztva a 9 részvízgyűjtőn)	
LINEAR RESERVOIR BASEFLOW	GW 1/2 Initial	0.001 m ³ /s
	GW 1/2 Coefficient	20 hr
	GW 1/2 Reservoir	1
LAG ROUTING	Lag Time	1,5 hr
	(vízfolyások hosszának arányában elosztva a 8 reach-re)	

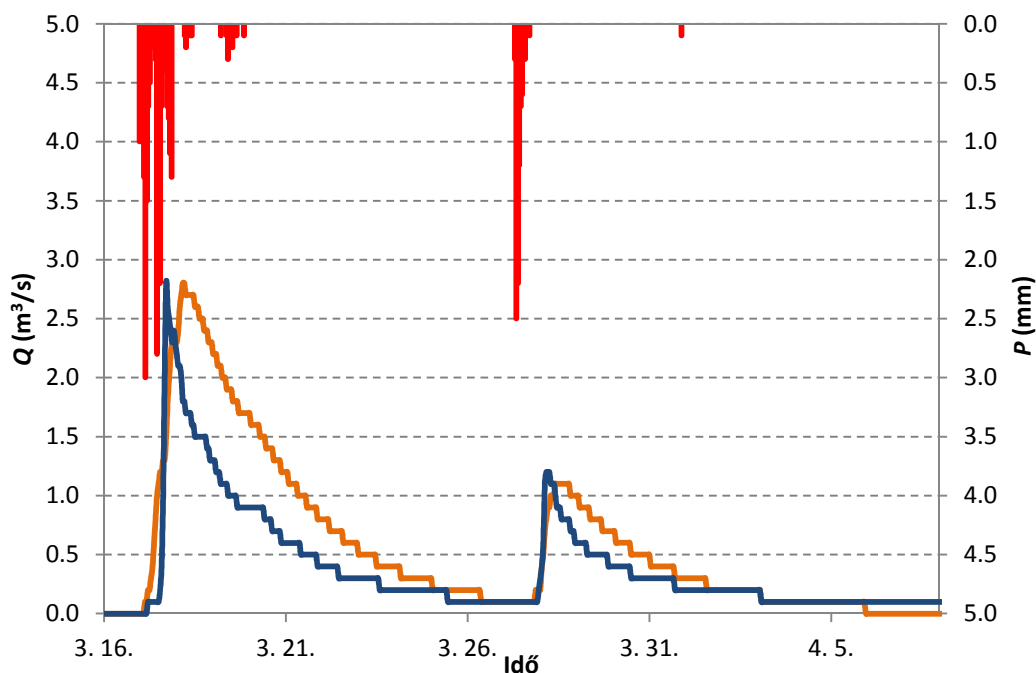
A kalibráció eredményét a *téli időszakra*, vagyis a modell által számított vízhozamot a 2011. januári árhullámra a 27. ábra szemlélteti, narancssárgával a számított, kék színnel a mért vízhozamokat ábrázolva.



27. ábra: Kalibráció a 2011. januári eseményre.

(A modell által számított vízhozam narancssárgával, a mért vízhozam kék színnel, míg a csapadék piros színnel jelölve.)

A kalibráció eredményét a *tavaszi időszakra*, vagyis a modell által számított vízhozamot a 2011. március végi árhullámra a 28. ábra szemlélteti.



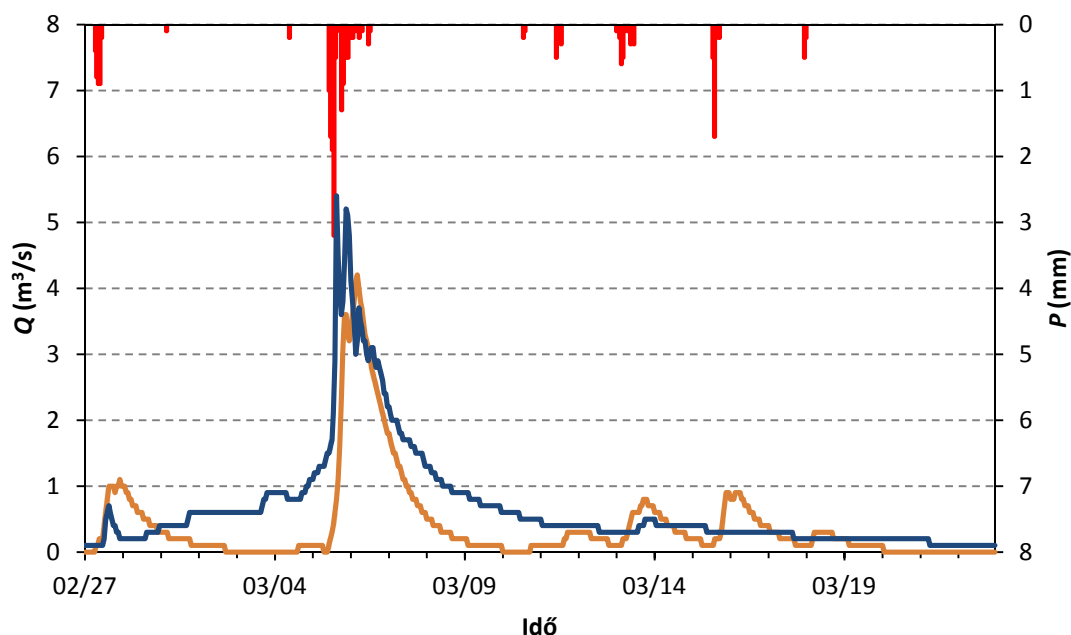
28. ábra: Kalibráció a 2011. március végi eseményre.

(A modell által számított vízhozam narancssárgával, a mért vízhozam kék színnel, míg a csapadék piros színnel jelölve.)

5.4. A modell validálása

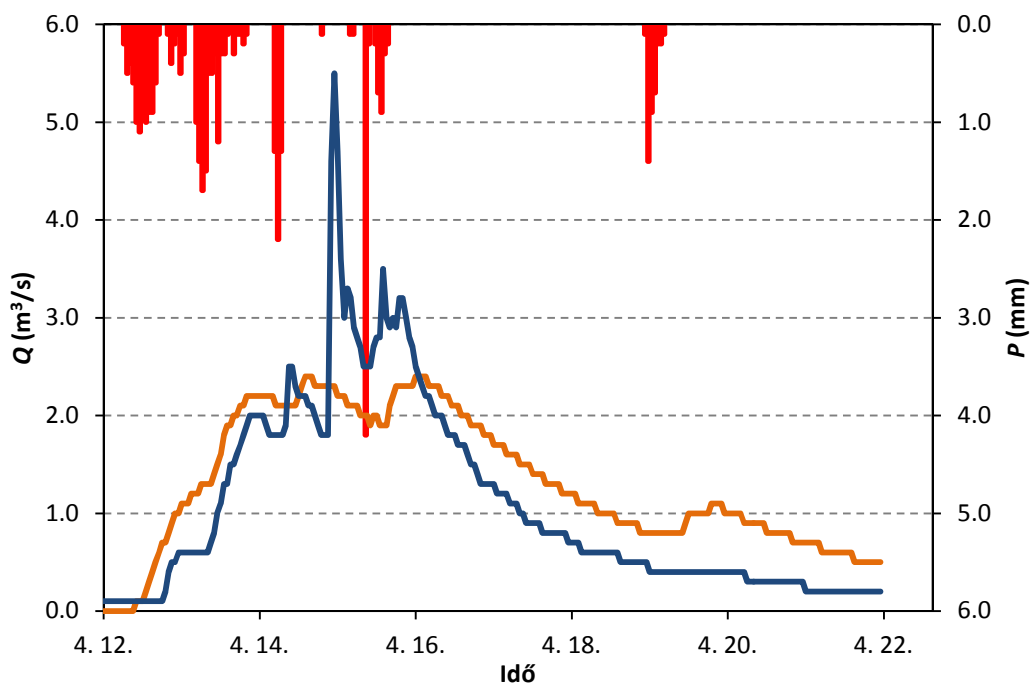
A modell paramétereinek helyes megválasztásának ellenőrzését (validációt) egy független esemény szimulálásával végeztem. Ekkor már a paraméterek értékein nem változtattam. Továbbra is feltételeztem, hogy térben homogén csapadék érte a vízgyűjtőt.

A validáció eredményeit a 2009. februári árhullámra a 29. ábra diagramja szemlélteti, mely a valódi hozamot a legnagyobb árhullámra kicsit alulbecsli (körülbelül $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$), de ez a hiba nem jelentős, tekintve, hogy a számított hozam az összes, tehát a kisebb árhullámokra is hozzávetőlegesen illeszkedik. Valamint ne feledjük a bementi csapadékadatok és paraméterek bizonytalanságát. Ennél nagyobb pontosságot a modell felállításának kezdeti stádiumában nem várhatunk el.



29. ábra: Validáció a 2009. február eseményre
(A modell által számított vízhozam narancssárgával, a mért vízhozam kék színnel, míg a csapadék piros színnel jelölve.)

A validációt a tavaszi időszakra is elvégeztem, amelynek eredményét a 30. ábra mutatja. A számított árhullám lefutása mind időben, mind nagyságrendben nagyon jól illeszkedik a mért értékekhez. Azonban látható, hogy a modell a maximális vízhozamot jelentősen alulbecsüli. A tetőző hozam megnövekedésének meredeksége arra utal, hogy egy rövid idejű hirtelen csapadékként, amely azonban az újpesti mérőállomás térségében nem alakult már ki.



30. ábra: Validáció a 2010. április eseményre
(A modell által számított vízhozam narancssárgával, a mért vízhozam kék színnel, míg a csapadék piros színnel jelölve.)

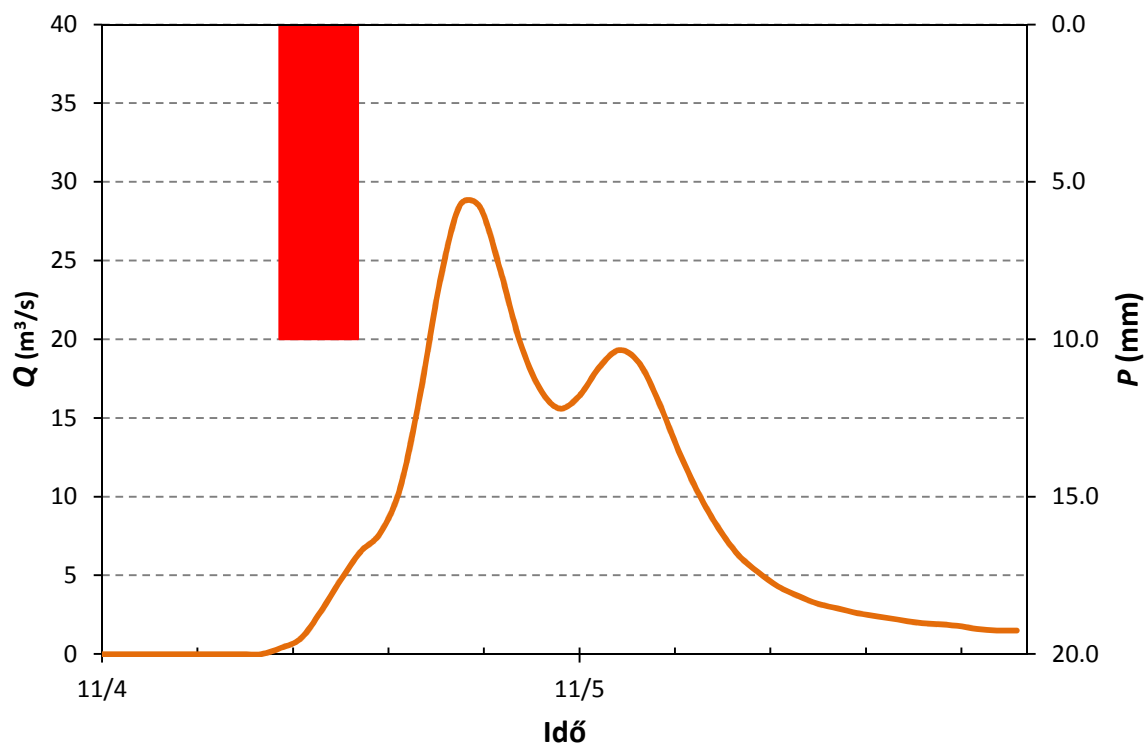
5.5. A modell alkalmazása, vizsgálatok

Az első vizsgálat során a 2011. március végi eseményekre végeztem modell számítást téli modell paraméterekkel. A számított hozam a mértet jelentősen felülbecsli (közel azonos maximális csapadék és maximális hozam, mint 2011. januárban), pedig a korábbi két időszakhoz képest csak 2 hónap a differencia. Mégis: a futtatásból pontosan látszik, hogy az olvadások kezdetével, ahogy a fagyott föld felenged, és a növényzet megjelenik, a valóságban a hozam ezek következményében csökken a tavaszi időszakban. Tehát ha a modellben egy tavaszi időszakra (nagyobb beszívárgás, sűrűbb növényzet) egy téli időszak (fagyott földréteg; hiányzó növényzet: csak avar) jellemző paraméter beállításokat alkalmazunk, úgy a számított hozam jelentősen felülbecsli a mért hozamokat.

A rendelkezésünkre álló csapadékeseményekről elmondható, hogy nem okozott egyik esetben sem mértékadó árhullámot a kifolyási szelvényben, amely már lakott területen található.

A kisvízfolyások mederrendezési munkálatait és a vízgyűjtő-gazdálkodási tervezést mértékadó nagyvizes állapotok figyelembe vételével kell végezni. Ehhez ismerni kell a tetőző hozamokat ($NQ_{p\%}$), illetve a lefolyó víztömeget. Ennek meghatározása gyakran nagy bizonytalanságot mutat. Az elmúlt évtizedek csapadékadatainak vizsgálatával azonban a kis visszatérési valószínűségű, mértékadó árhullámokat okozó csapadékokat meg tudjuk határozni. Egy jól felállított (validált) modellel lehetőségünk van különböző időszakokra meghatározni ezen csapadékok hatására kialakuló árhullámokat. Ezt végeztem el a már említett két időszakra és hasonlítottam össze az egységárhullámkép segítségével generált árhullámmal.

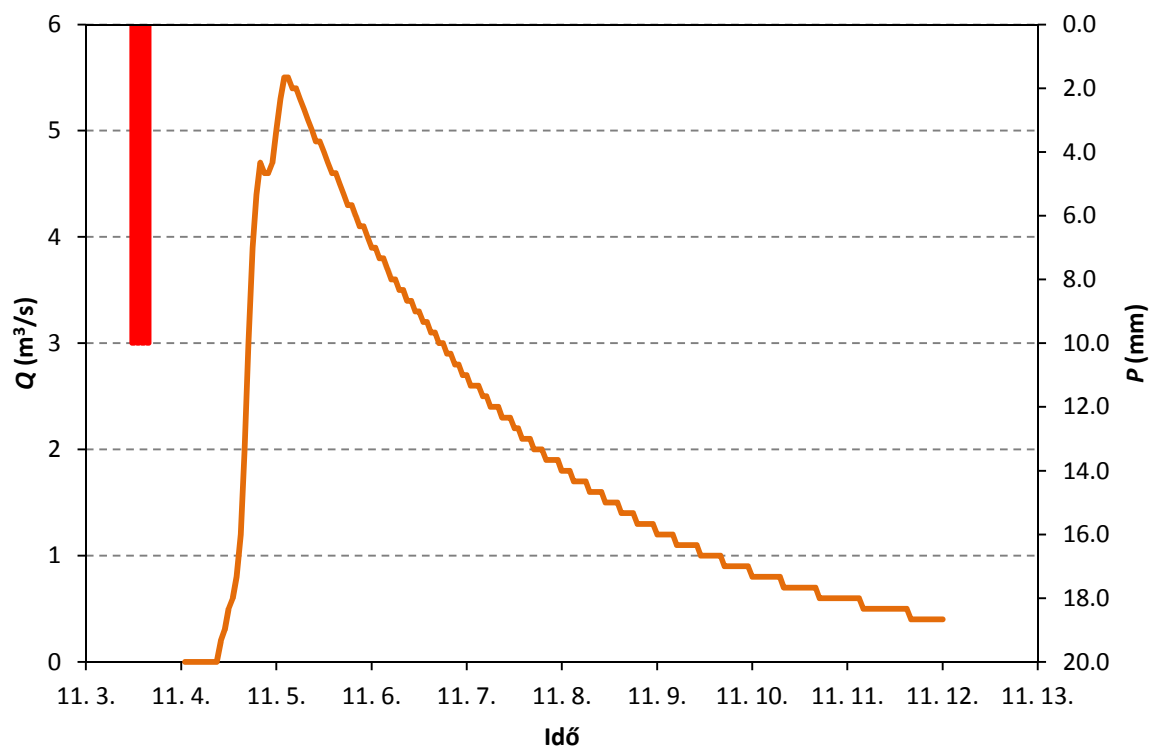
A mértékadó csapadékintenzitást csapadékmaximum függvény alapján vettük fel (Montanari-féle összefüggés). Kisvízgyűjtők esetén az a tapasztalat, hogy mértékadó esemény heves zivatarok esetén alakul ki amikor is a csapadék időtartama (T) közelítőleg megegyezik az összegyülekezési idővel (τ). Ez a mi jelentősen elnyújtott vízgyűjtőnk esetén 4-8 óra körüli. Az ehhez tartozó csapadékintenzitás $p=3\%$ -os visszatérési valószínűség esetén, ha a $\tau=4$ órát feltételezünk $i=16,4$ mm/h, míg $\tau=8$ óra esetén $i=9,7$ mm/h. Ezen értékek alapján egy 4 órás 10mm/h intenzitási csapadékot vettem fel, mint mértékadó eseményt. A csapadék intenzitását egyenletesnek feltételezem. A téli időszakra alkalmazott paraméterekkel számított árhullámot a 31. ábra mutatja. Látható az ábrán egy második alacsonyabb szintű tetőzés, amely a vízgyűjtő alakjából, valamint abból származik, hogy 9 részvízgyűjtőre bontottuk a területet. Ennek valóság alapja megkérdőjelezhető. A tetőző vízhozam illetve a lefolyó víztömeg értéke nagyságrendileg elfogadható.



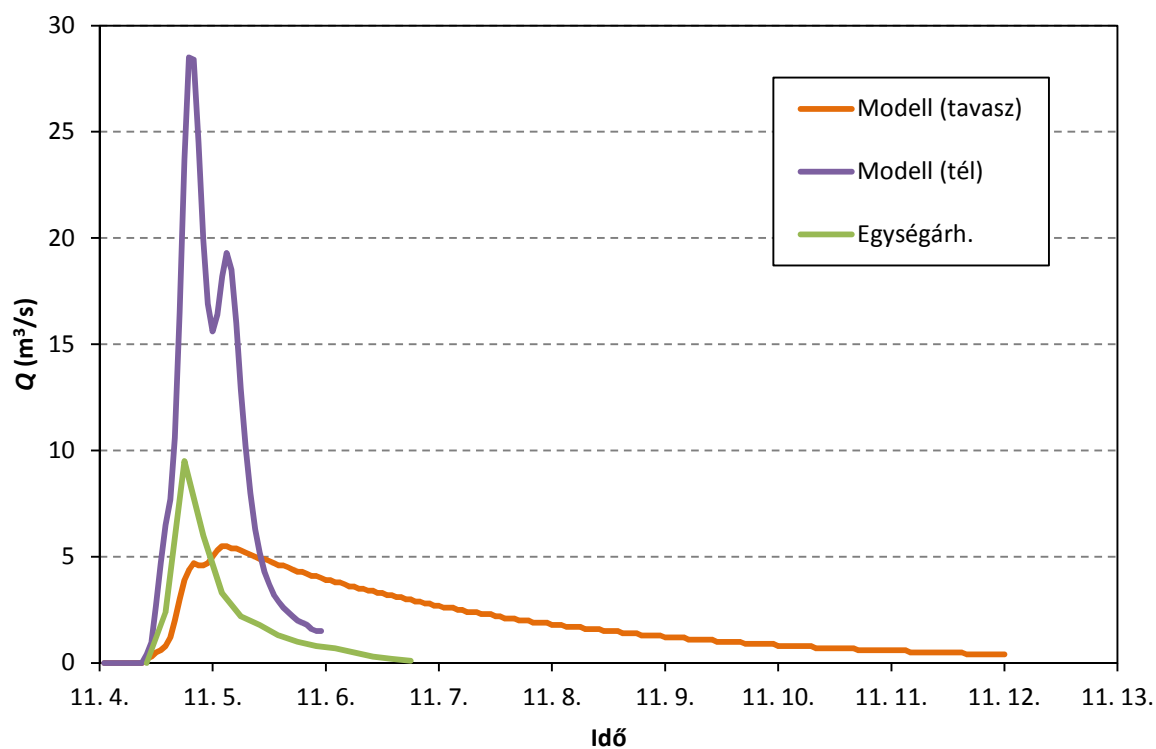
31. ábra: 4 óra időtartamú, 10 mm/h intenzitású csapadék hatására levonuló árhullám a téli időszakban.

Elvégeztem a modellel számítást a tavaszi időszak paramétereivel. Ezt mutatja a 32. ábra. Az árhullám lefutása ekkor sokkal lassabb, a megváltozott talajviszonyoknak és növényborítottságnak köszönhetően. Míg télen a levonulási idő két nap körüli, addig tavasszal 5-6 nap. A tetőző vízhozam természetesen utóbbi esetben lecsökken, hozzávetőleg a hatodára.

Az egységárhullámkép alkalmazásával számított árhullámot jeleníti meg a 33. ábra. Az ár levonulási ideje a vártnál kisebb, a tetőző vízhozam nagyságrendileg elfogadható.



32. ábra: 4 óra időtartamú, 10 mm/h intenzitású csapadék hatására levonuló árhullám a tavaszi időszakban.



33. ábra: 4 óra időtartamú, 10 mm/h intenzitású csapadék hatására levonuló árhullám a modell és az egységárhullámkép alkalmazásával.

5.6. Összegzés, tapasztalatok

Több elfogadható adatsor hiányában a modellek (téli, tavaszi) validációját egy-egy árhullámra végeztem el, azonban több adat birtokában további ellenőrző futtatások szükségességét látom. Ennek oka, hogy a modellparaméterek száma magas, amelyet a részvízgyűjtők számának redukálásával csökkenteni lehetne. Várakozásaim szerint ez a modell eredmények pontosságát nem befolyásolná jelentősen, viszont a kalibrálás folyamatát jelentősen egyszerűsítene.

Egy ilyen kisméretű vízgyűjtőn belül is jelentősen eltérhet a csapadék mind időbeli, mind térbeli eloszlása, amely jelentősen befolyásolja a kialakuló árhullámot, annak jellemző értékeit (pl. lefolyási hányad, tetőző vízhozam).

Két hidrológiai eseményre sikerült közelítőleg kalibrálnom a modellt. Ez már önmagában lehetőséget adott a vizsgálatok elvégzésére és a vízgyűjtőt jellemző folyamatok feltárására ezen időszakokban. A téli és tavaszi időszak közötti 1-2 hónapban a megjelenő növényzet és a megváltozó talajviszonyok jelentősen átalakítják a lefolyási viszonyokat. Ezek közül a legfontosabbak:

- Egyrésztől megnövekszenek a veszteségek (nem lefolyó vízmennyiség), esetünkben hozzávetőleg 3-5-szörösére a téli viszonyokhoz képest.
- A talaj felolvadásával megnövekszik annak vízáteresztő képessége. A felszín alatt és felett lefolyó víz hányadosa jelentősen megváltozik. A tavaszi időszakban a talajba történő beszivárgás szintén 3-5-szörösére növekszik a téli időszakhoz képest.
- Az általam felvett mértékadó csapadékesemény modell vizsgálata, illetve a helyszíni bejárásaim alapján elképzelhetőnek tartom, hogy egy ilyen hegy és dombvidéki vízgyűjtőn a mértékadó nagyvízi esemény nem hirtelen lezúduló csapadék hatására alakul ki, hanem hóolvadás esetén. Feltételezésem azon alapszik, hogy vegetációs időszakban a hirtelen lezúduló csapadék jó részét képes a növényzet felfogni (intercepció), illetve a talaj beszívárogtatni majd késleltetve levezetni. Ezzel szemben hóolvadáskor nem beszélhetünk intercepcióról, a talajba szivárgás kevésbé intenzív, valamint a hirtelen melegezés hatására bekövetkező olvadás is hosszabb időtartamú.

A Bükkös-patak vízgyűjtőjének HEC-HMS szoftverrel való modellezése nemcsak a program megismerését tette lehetővé, hanem a hidrológiai folyamatok pontosabb megértését. Egy ilyen modellel lehetőségünk lenne kis- és közepes vízgyűjtők lefolyási viszonyainak általánosabb feltérképezésére konkrét példákon keresztül.

A modell szabad paramétereinek száma jelentős. Ezekre célszerű lenne érzékenységvizsgálatot végezni, továbbá más módszereket is kipróbálni az egyes részfolyamatok leírására. További vízgyűjtők vizsgálatával esetleg megadható lenne, hogy különböző vízgyűjtő típusok esetén melyek a legjobb közelítést adó számítási algoritmusok, illetve leginkább alkalmazhatók az adatok részletességének, a vízgyűjtő feltártságának függvényében.

A modell vizsgálatok pontosságát leginkább befolyásoló tényező a csapadékadatok mennyisége és minősége. A 14 árhullámból mindösszesen 4-et tudtunk alkalmazni, aminek az volt az oka, hogy a csapadék adatok nem álltak szoros összefüggésben sem nagyságukat tekintve, sem időben az árhullámokkal. A csapadékmérő állomás messze helyezkedett el a vízgyűjtőtől. Ilyen vizsgálatokhoz szükségesnek látom csapadékmérő állomás(ok) telepítését a vizsgált vízgyűjtőre. A rögzítés időbeli felbontását a vízgyűjtő mérete határozza meg. Esetünkben (~ 30-50 km²) az órás felbontás elegendőnek bizonyulhat.

6. Összefoglalás

TDK munkámban részletesen bemutattam egy kisvízgyűjtő, a Bükkös-patak átfogó hidrológiai jellemzését.

Az előzetes könyvtári kutatómunka és a szakirodalom áttanulmányozása nagyban megkönnyítette a későbbi munkámat. A vízgyűjtő helyszíni bejárása és a terepen végzett mérések (hidrológiai vízhozammérés, illetve vízmintavétel és annak laborbeli kiértékelése) elsősorban expedíciószerű, kontrollmérések voltak, melyek arra szolgáltak, hogy a rendelkezésemre bocsátott adatokat nagyságrendileg ellenőrizhessem, illetve közelítő képet kapjak a vízgyűjtő fizikai jellemzőiről. Azonban ezeknek a méréseknek köszönhető, hogy a későbbi számítások kiértékelésekor, továbbá a modell kalibrálásakor felmerülő kérdésekre választ találhattam.

A hagyományos hidrológiai számításokat megnehezítette a rendelkezésre álló adatok szórása, mégis sikerült egy, a patakra jellemző vízhozamgörbét definiálni, amely bemenő vízállás adatokból egyértelmű vízhozam adatokat állított elő. A számítások helyességét a helyszíni méréseken kívül a görbe szélső tartományán Chézy-képlettel igazoltam.

Munkám legnehezebb részét képezte a vízgyűjtő csapadék-lefolyás kapcsolatának HEC-HMS szoftverrel való modellezése, melynek során először dolgoztam ilyen hidroinformatikai eszközzel. Itt ismét a korábbi problémával találkoztam: az összefüggő csapadék és vízhozam maximumok közti gyenge korreláció miatt a modellt csupán két rövidebb időszakra tudtam felállítani. A kalibrációt a magas modellparaméter szám tovább nehezítette. Mégis sikerült egy téli és egy tavaszi időszakot elfogadhatóan modellezni, mely kiegészítette a korábbi számításaimat, így a fagymentes időszakra vonatkozó egységárhullámképet is.

Ezzel elmondható, hogy bármely időszakra vizsgálni tudom egy mértékadó csapadékeseményre a vízgyűjtő hozzávetőleges válaszát. Noha a patak egyedi jellemzője, amely részben a hosszából, részben pedig a szerteágazó struktúrájából fakad, hogy a vízfolyáson jelentős árhullámot nem egy intenzív csapadékesemény, hanem a tavaszi hóolvadások okoznak, mely aztán napokig is eltarthat, az időjárás függvényében.

További vízgyűjtők vizsgálatával a munkámban leírt vizsgálatok és módszerek más kisvízgyűjtőkre is kiterjeszthetőnek tűnnek, illetve lehetőséget adnának a rajtuk lezajló folyamatok általánosabb feltárására relatíve kevés mérés árán.

7. Irodalomjegyzék

Cartographia Kft. (2001): A Pilis és a Visegrádi-hegység M 1:40000-es turistatérképe, Budapest

Dövényi Z. (szerk.) (2010): Magyarország kistájainak katasztere, MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest

Dukay I. (2004-2006): 2004-2006-os vízkémai vizsgálatainak eredményei, Kézirat

Gyalog L. (szerk.) (2005): Magyarázó Magyarország fedett földtani térképéhez, Budapest

Horváth Gergő (2011): Intézkedési programjavaslat a Bükkös-patak jó állapotba hozására, BME Építőmérnöki Kar, diplomamunka

Hubina Máté (2010): A Bükkös-patak felmérése és domborzatmodell készítése, BME Építőmérnöki Kar, diplomamunka

Koris K.-Winter J. (2001): Hidrológiai mérőgyakorlat, Műegyetemi Kiadó

Lázár Ildikó (2010): Tarna folyó vízgyűjtőjének hidrológia vizsgálata, BME Építőmérnöki Kar, diplomamunka

Mosonyi E.-Papp F. (1959): Műszaki földtan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest

Rétvári L. (szerk.) (1968): A Pilis-Visegrádi-hegység környezetminősítése, Budapest

Schafarzik F.-Vendl A.-Papp F. (1964): Geológiai kirándulások Budapest környékén, Műszaki Könyvkiadó, Budapest

Sívó M. (szerk.) (1973): Szentendre Lőrinczy György fényképeivel, Corvina Kiadó

Soproni S. (1987): Szentendre a rómaiak korában

Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság és a Közép-Duna völgyi Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság (2009): 1-9. jelű, Közép-Duna vízgyűjtő vízgyűjtő-gazdálkodási terve

MÁFI (2005) Magyarország M 1:1000000-e földtani térképe, Magyar Állami Földtani Intézet

NOAA (2011): Napi csapadék adatok 2005-2009, Tát mérőállomásra, www.ncdc.noaa.gov

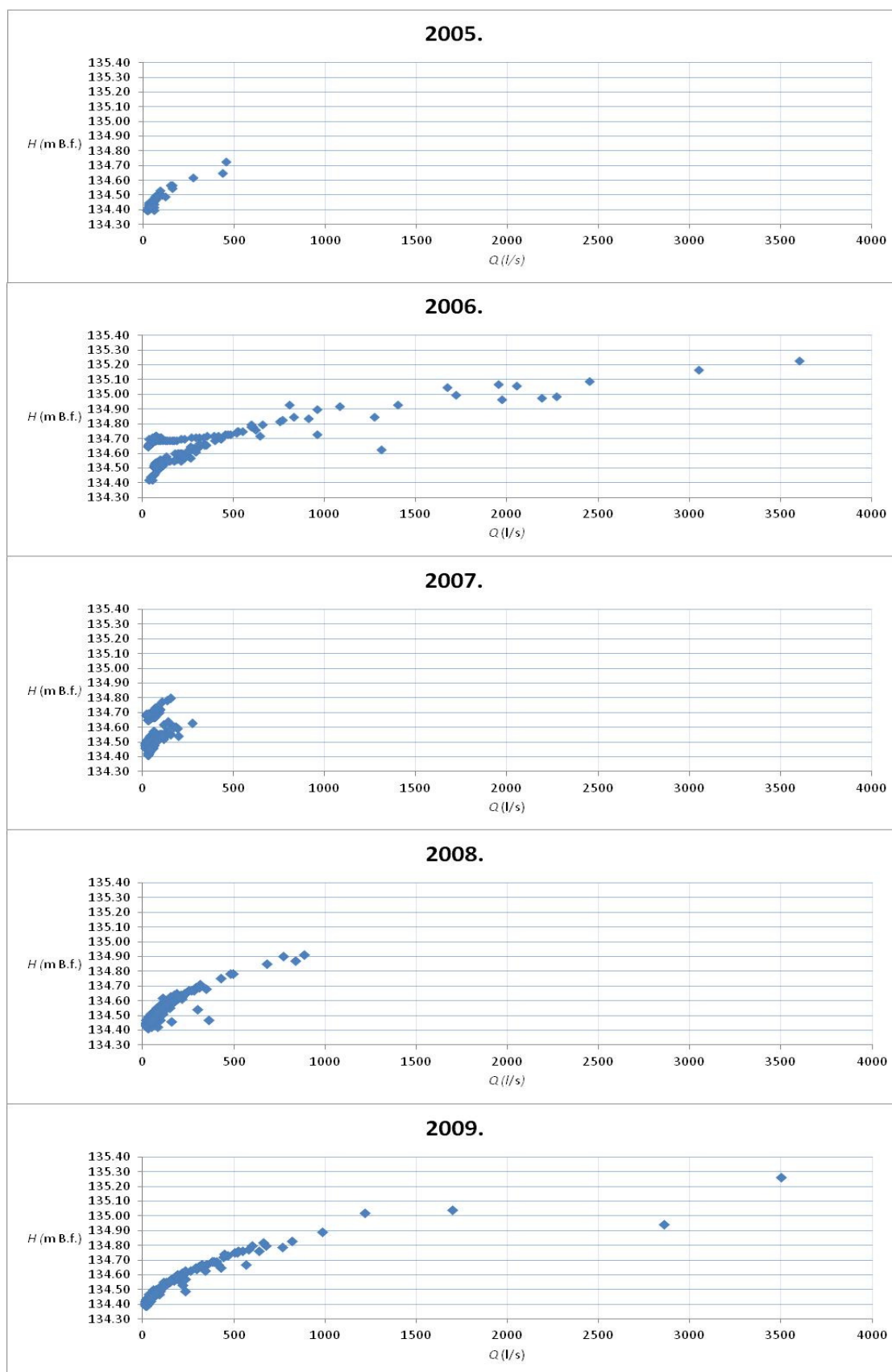
Vízkutató, (2011): Kémiai paraméterek és ivóvízhatárértékek táblázata, Vízkutató Vízkémia Kft, www.vizkemia.hu

Voit P. (1968): Szentendre, Corvina

Wikimpex (2010): Szentendre város Local Agenda 21 programja, melléklet, Wikimpex Kft.

8. Mellékletek

8.1. 2005-2009-es időszak vízhozamgörbéinek pontjai



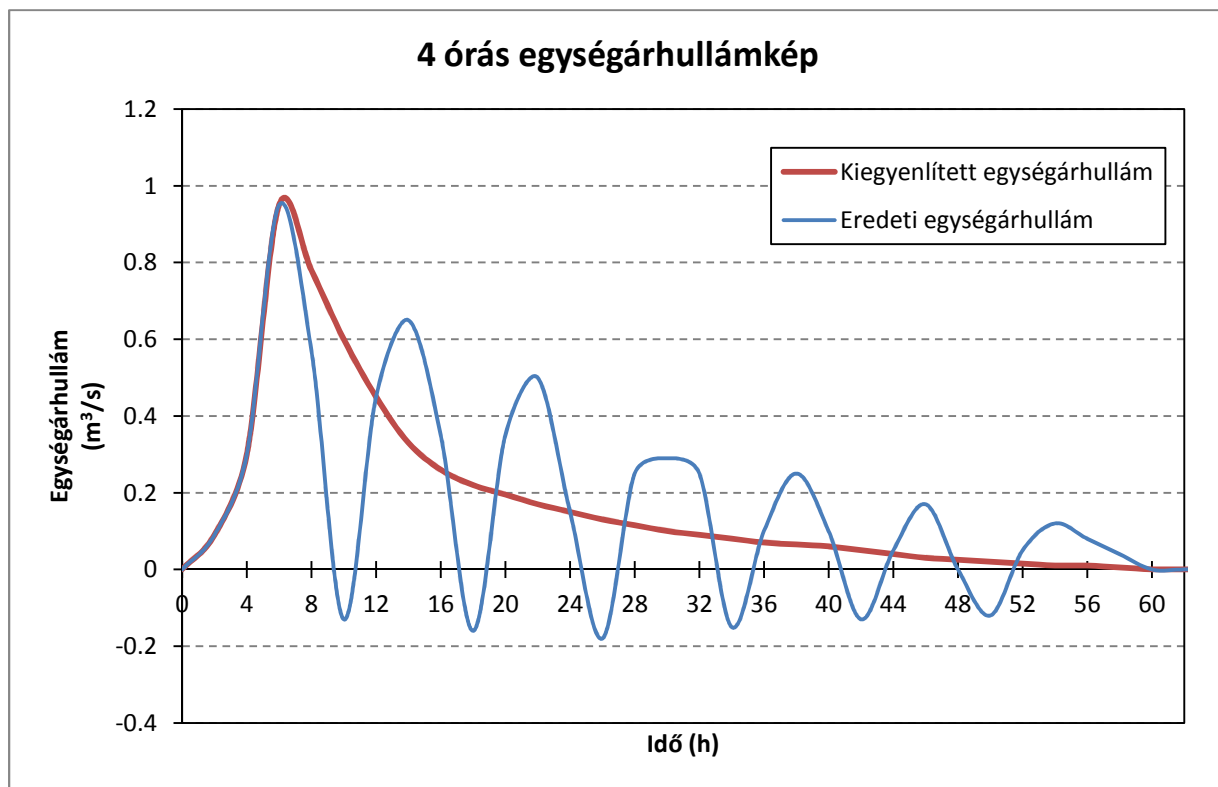
8.2. Egységárhullámkép számítása

7. táblázat: Csapadék szeparálás

	Idő intervallum (h)	Leesett csapadék mennyiség (mm)
Előkészítő csapadék:	14-15	1.0
	15-16	1.1
	16-17	1.2
Árhullámot kiváltó csapadék:	17-18	5.8
	18-19	4.7
	19-20	5.8
	20-21	8.0
	21-22	15.7
	22-23	5.1
	23-24	0.4

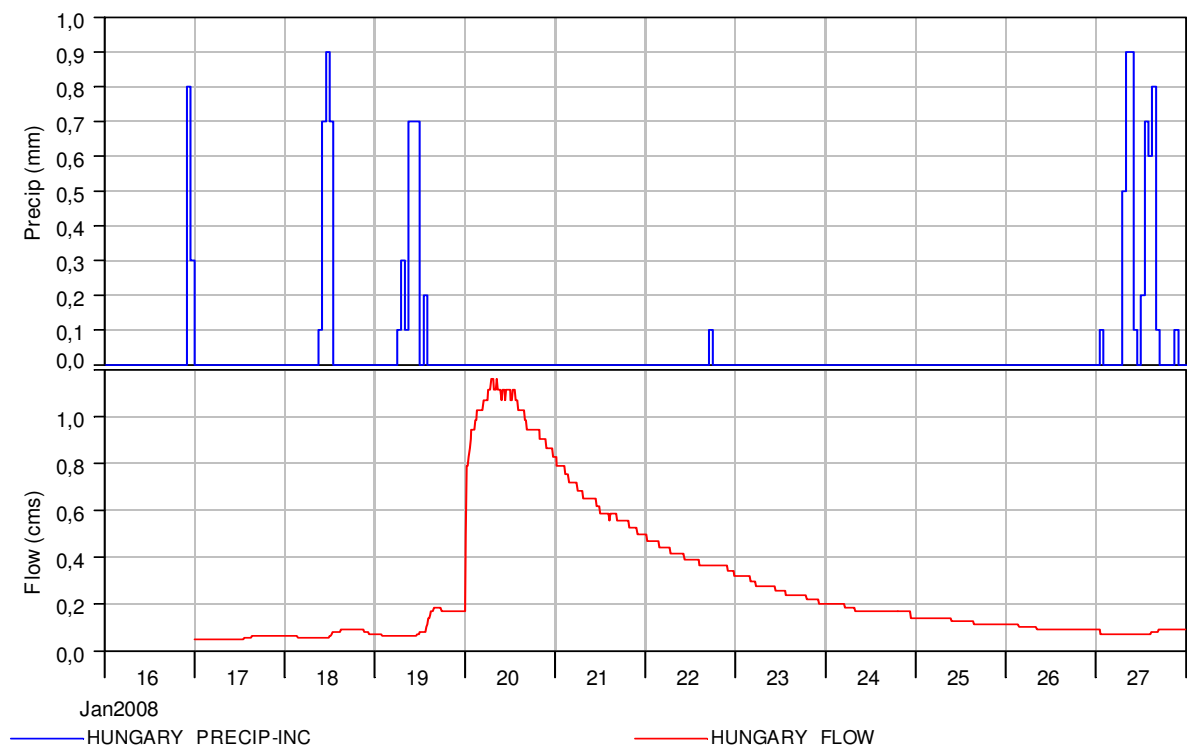
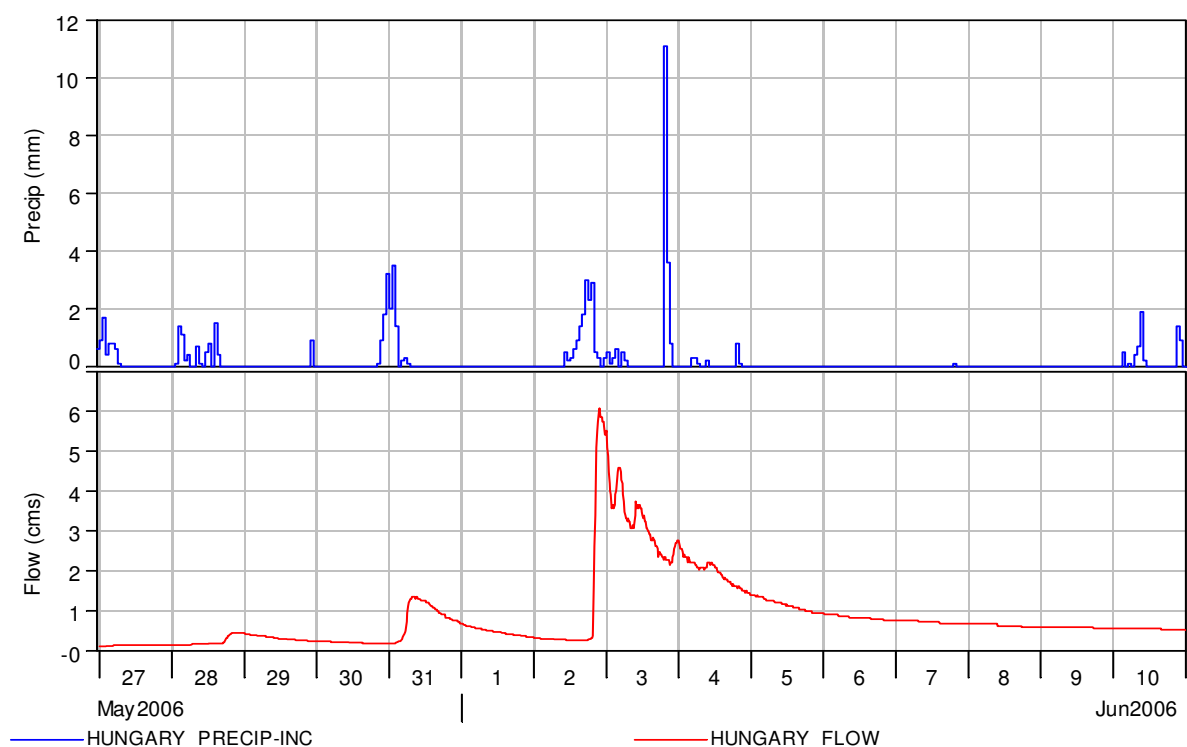
8. táblázat: Lefolyásra kerülő hozam, illetve egységárhullám számított és javított ordinátái

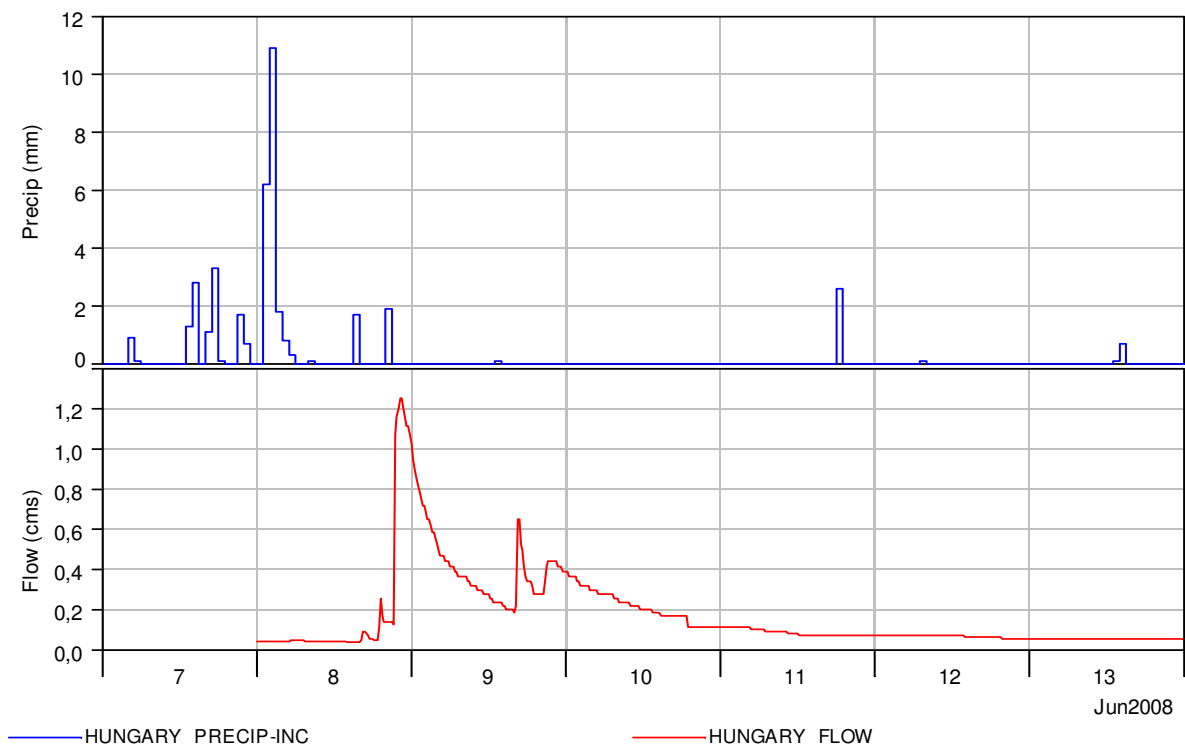
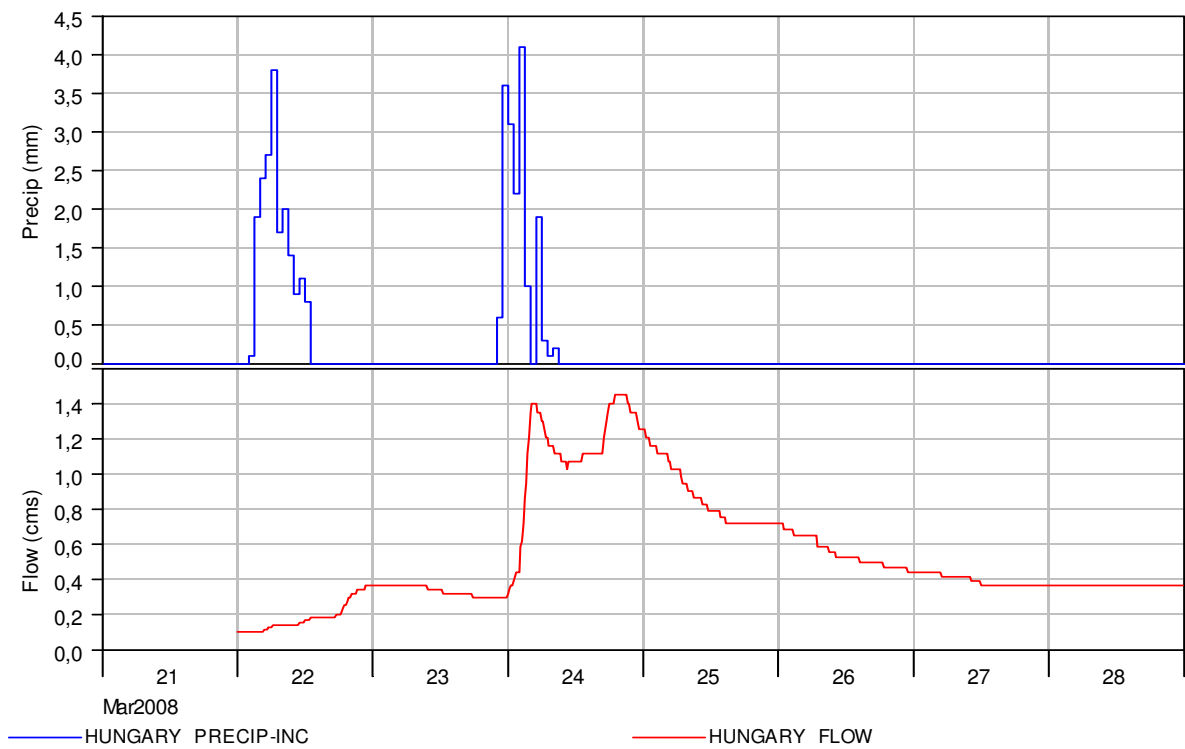
Óra	Lefolyásra kerülő vízmennyiség (m ³ /s)	Egységárhullám (m ³ /s)	Javított ordináták (m ³ /s)
0-4	4	0.24	0.24
4-8	19	0.95	0.95
8-12	12	-0.13	0.6
12-16	9	0.65	0.33
16-20	8	-0.16	0.22
20-24	6	0.5	0.18
24-28	4.15	-0.18	0.13
28-32	3.5	0.37	0.1
32-36	3	-0.15	0.08
36-40	2	0.25	0.07
40-44	1.5	-0.13	0.5
44-48	1	0.17	0.3
48-52	0.5	-0.12	0.2
52-56	0.2	0.12	0.1

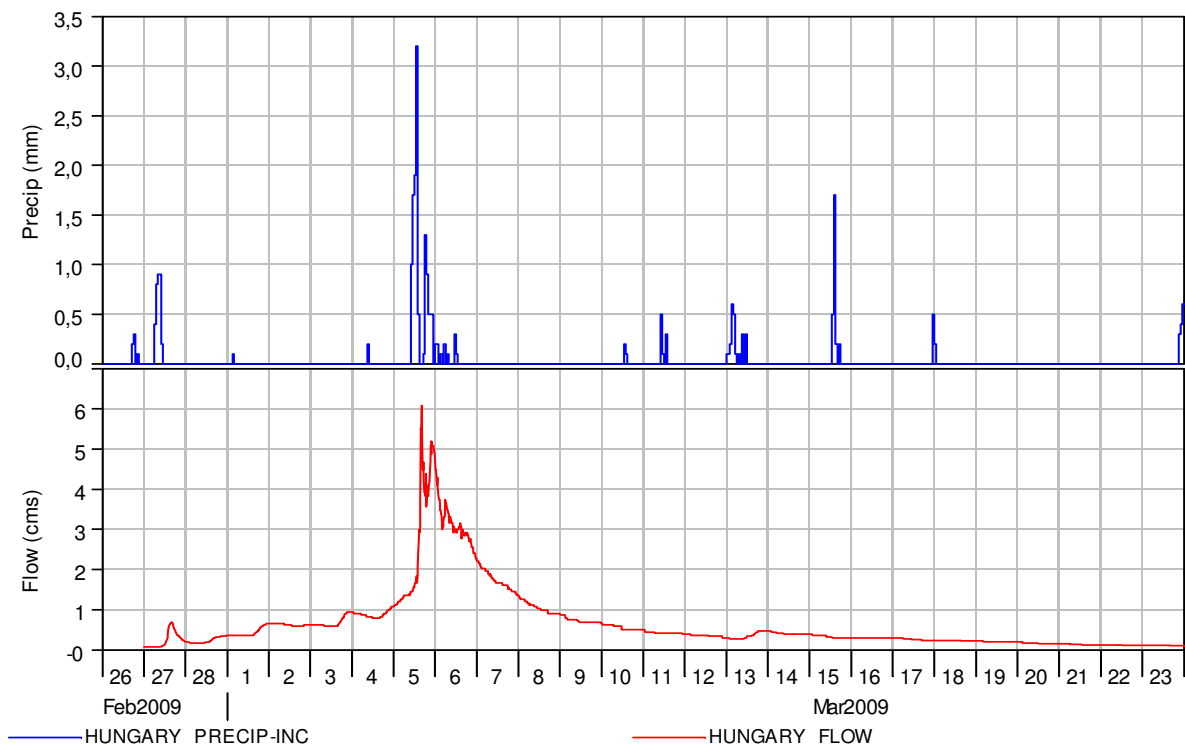
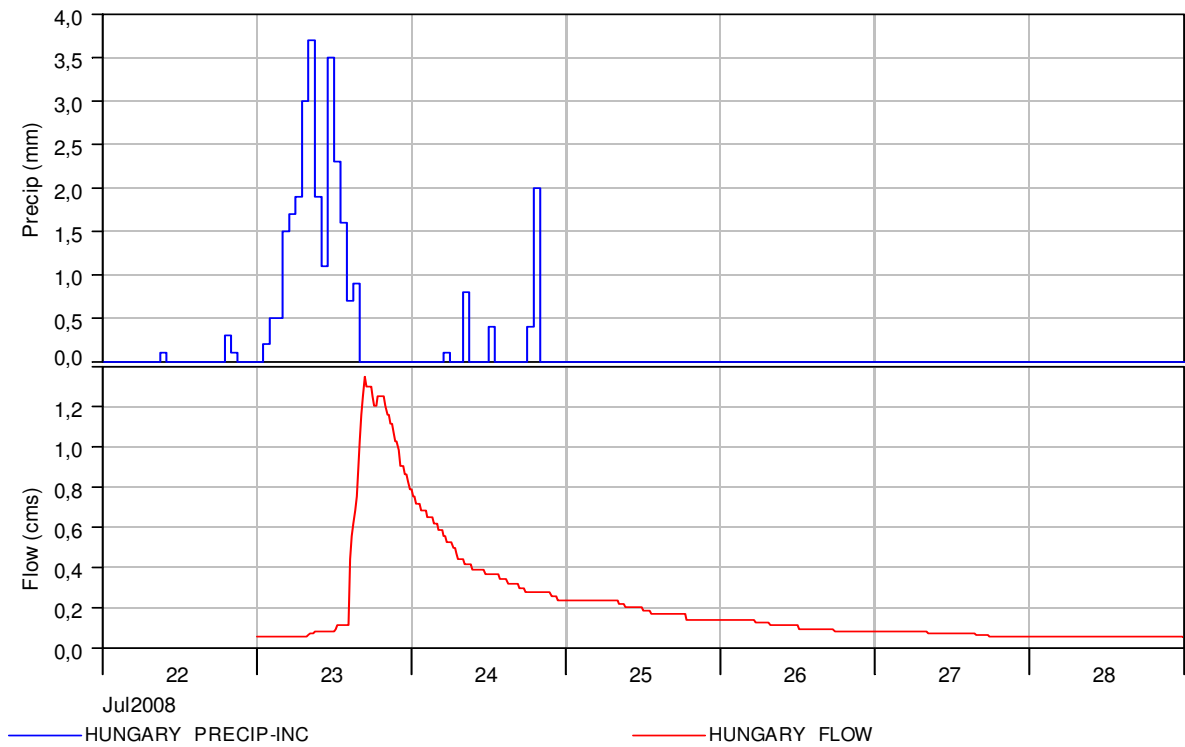


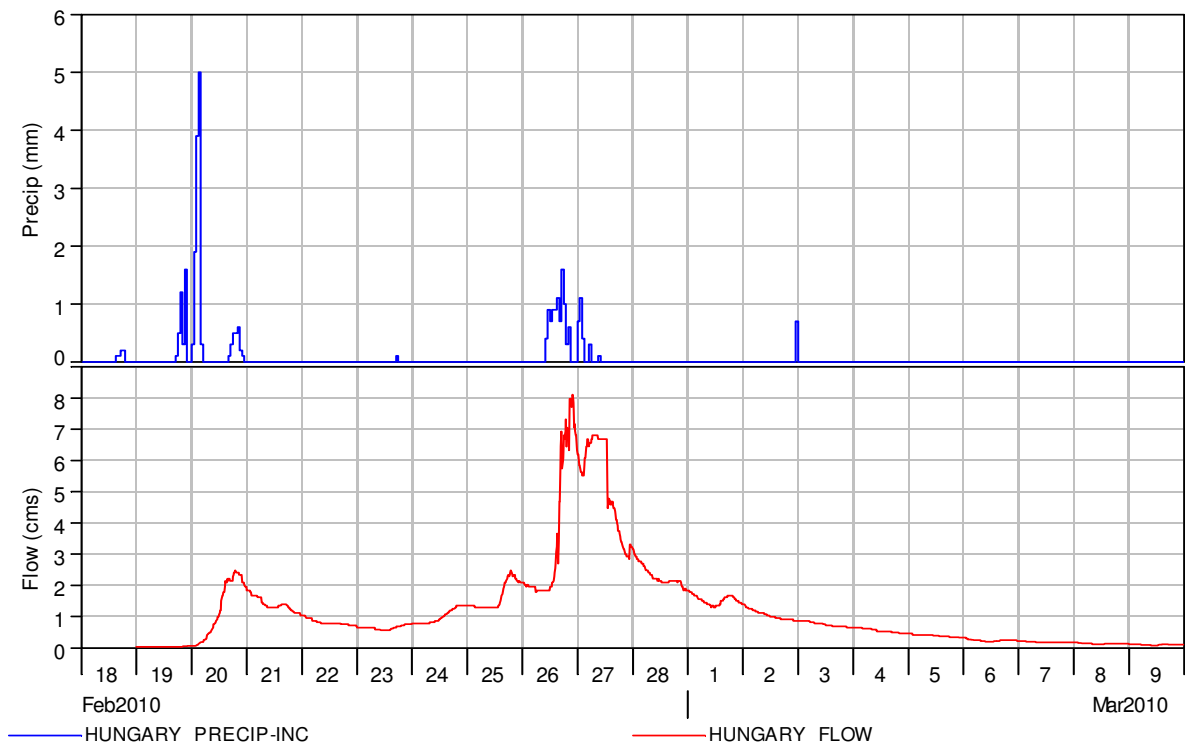
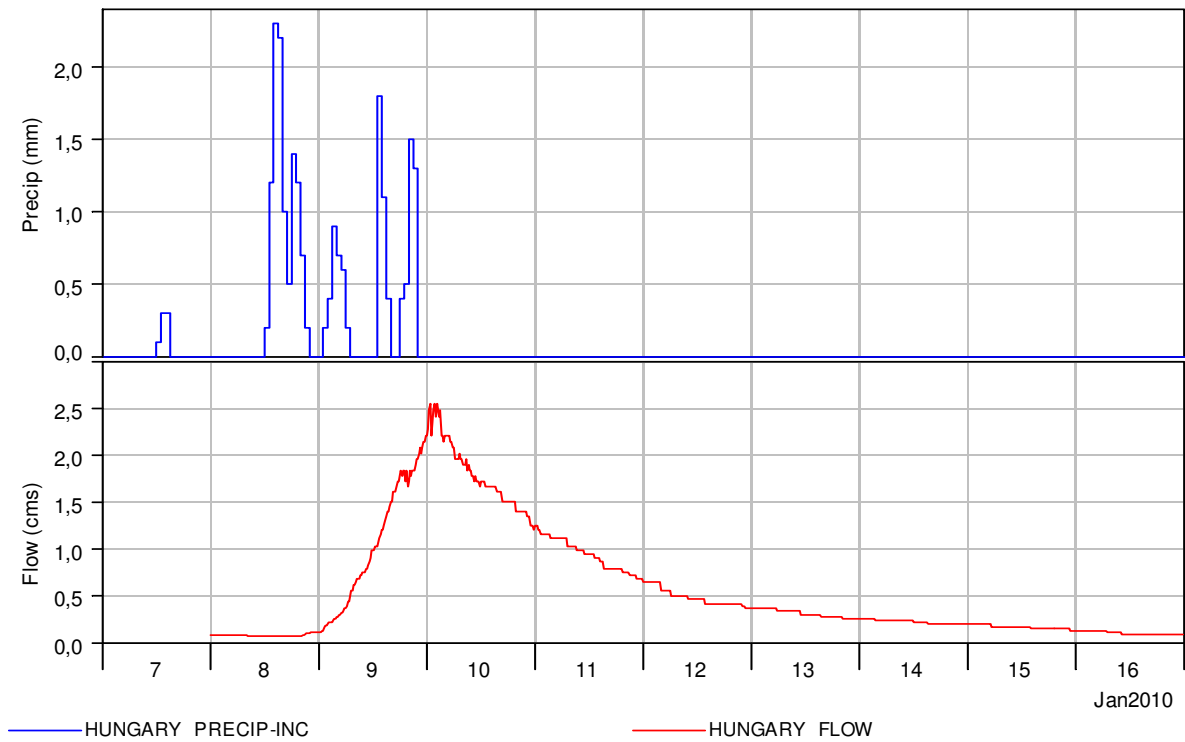
34. ábra: Eredeti és kiegyenlített egységárhullám

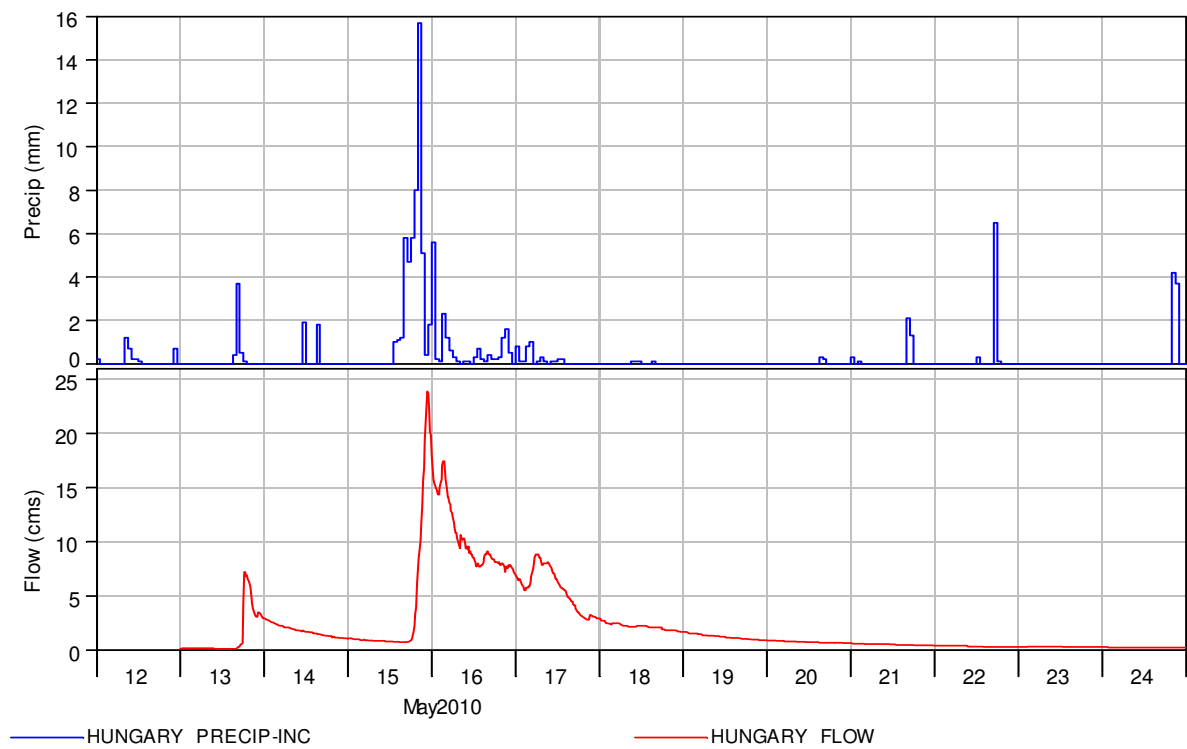
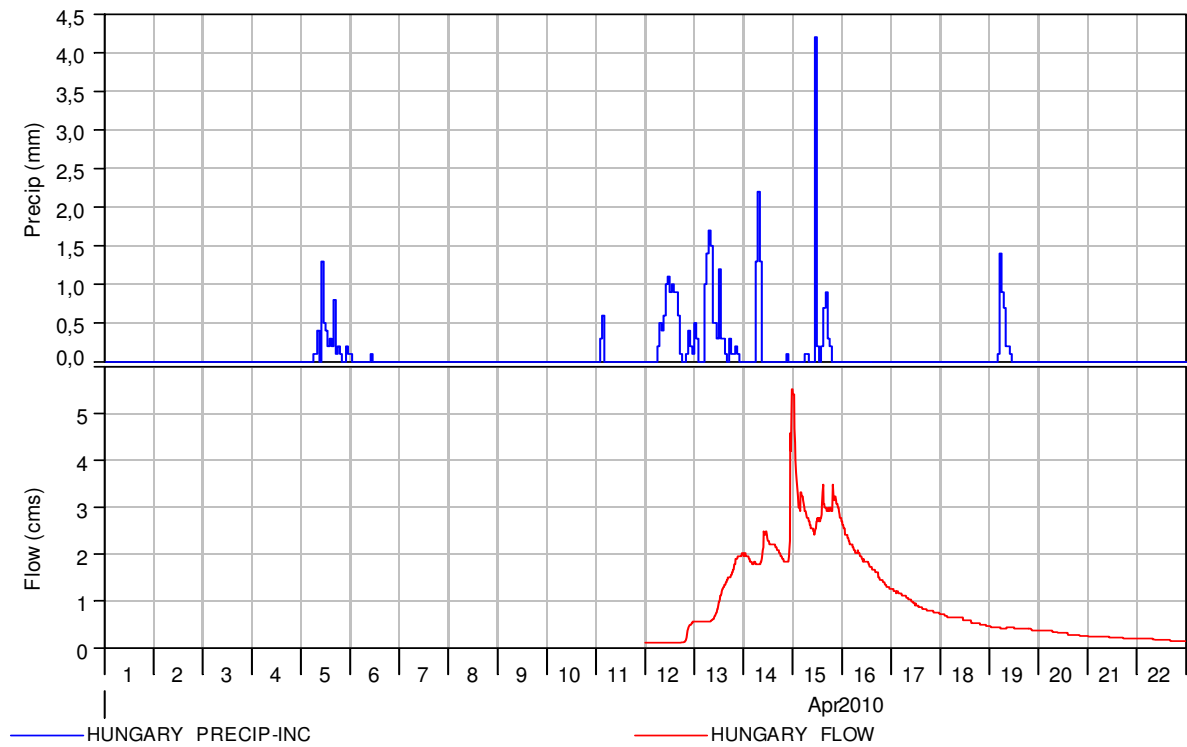
8.3. Összetartozó csapadék és vízhozam adatsorok az árhullámokra

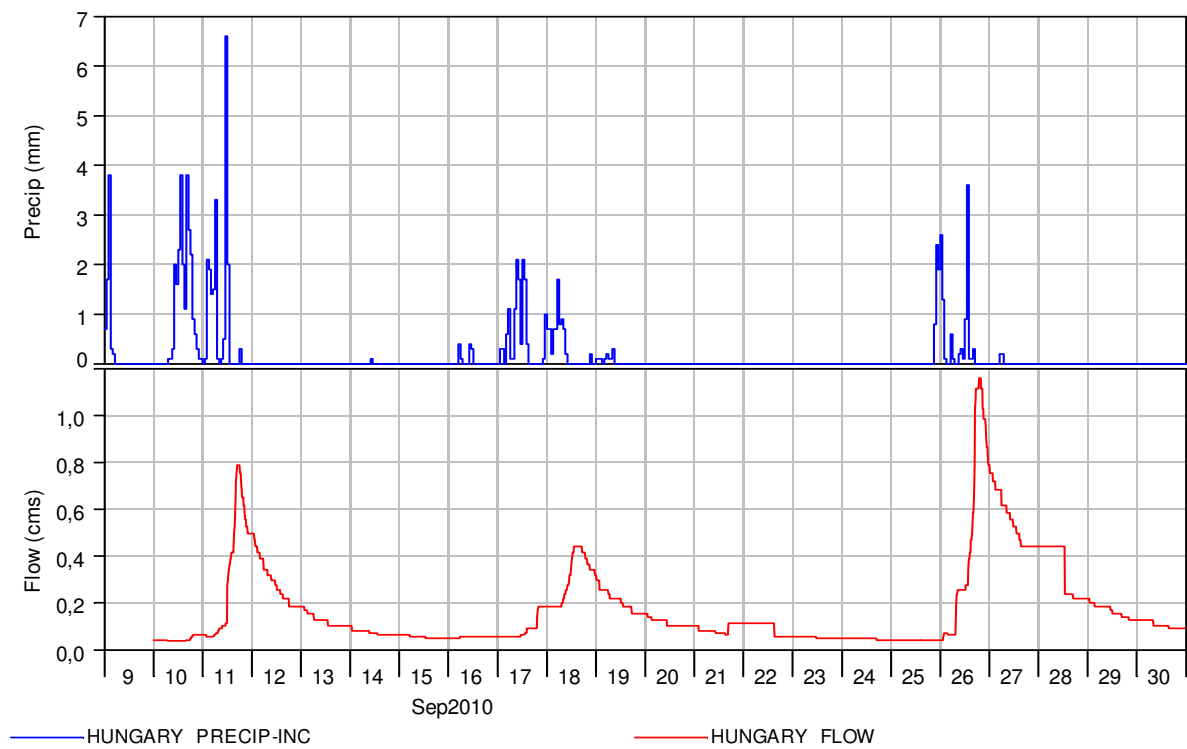
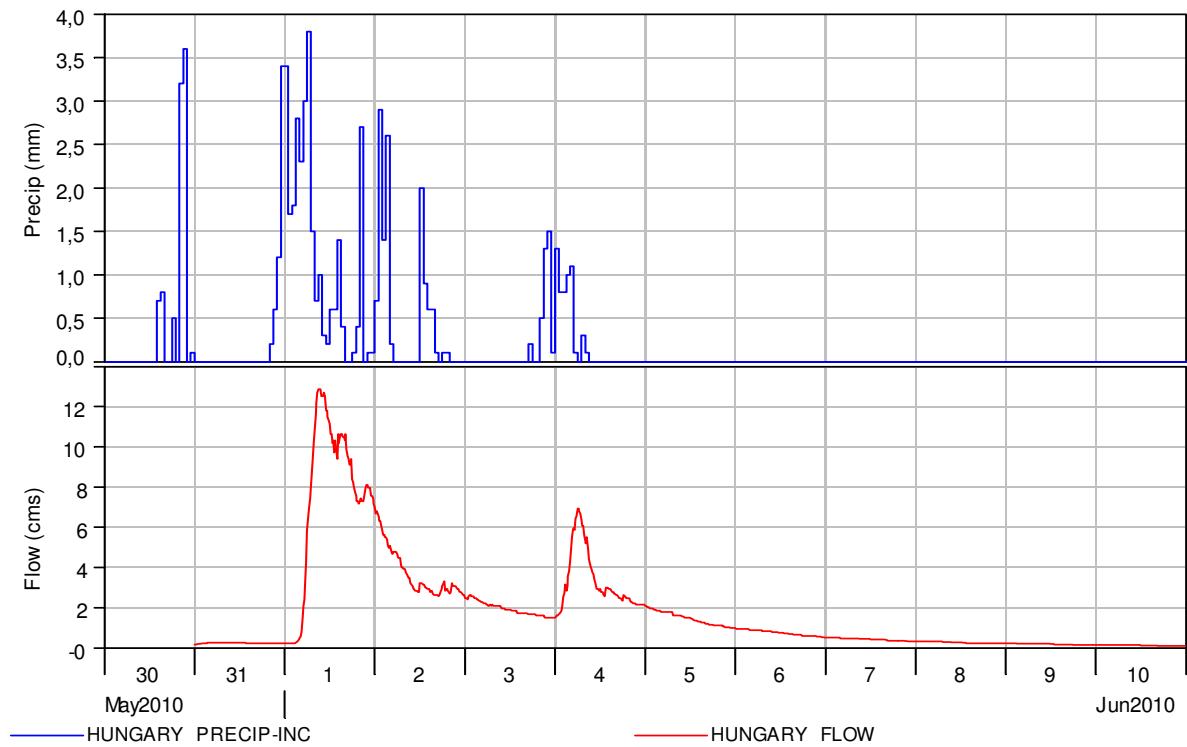


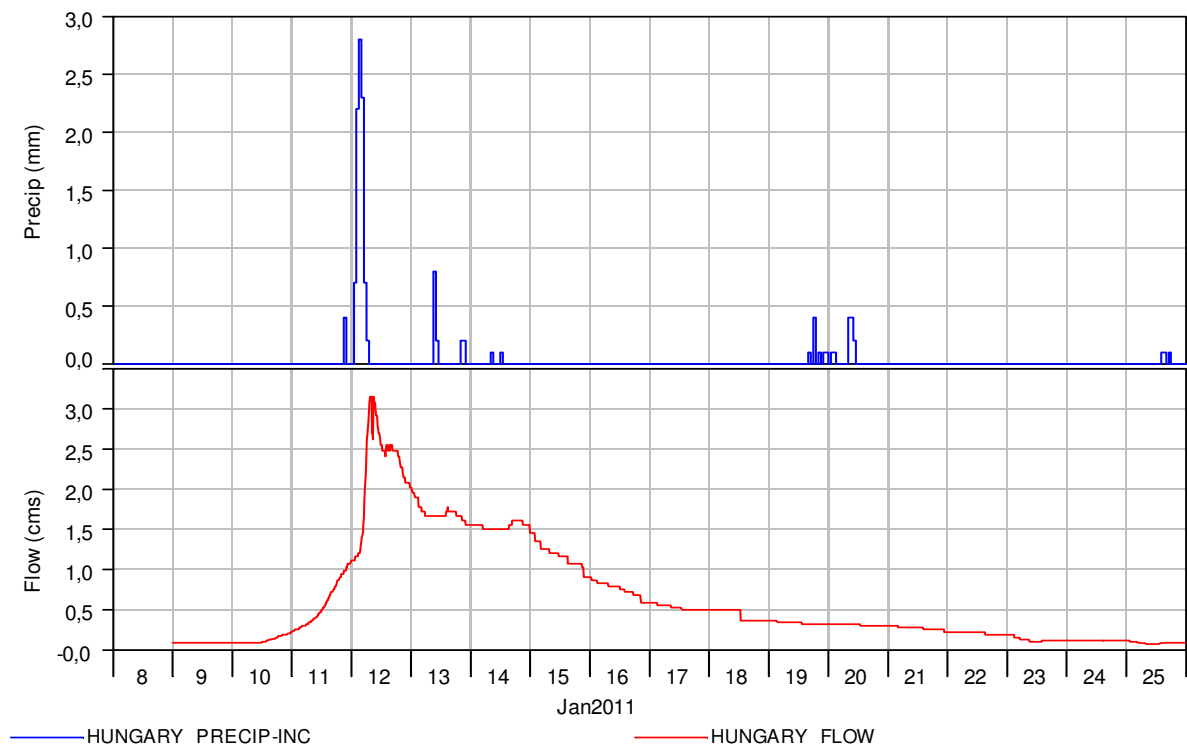
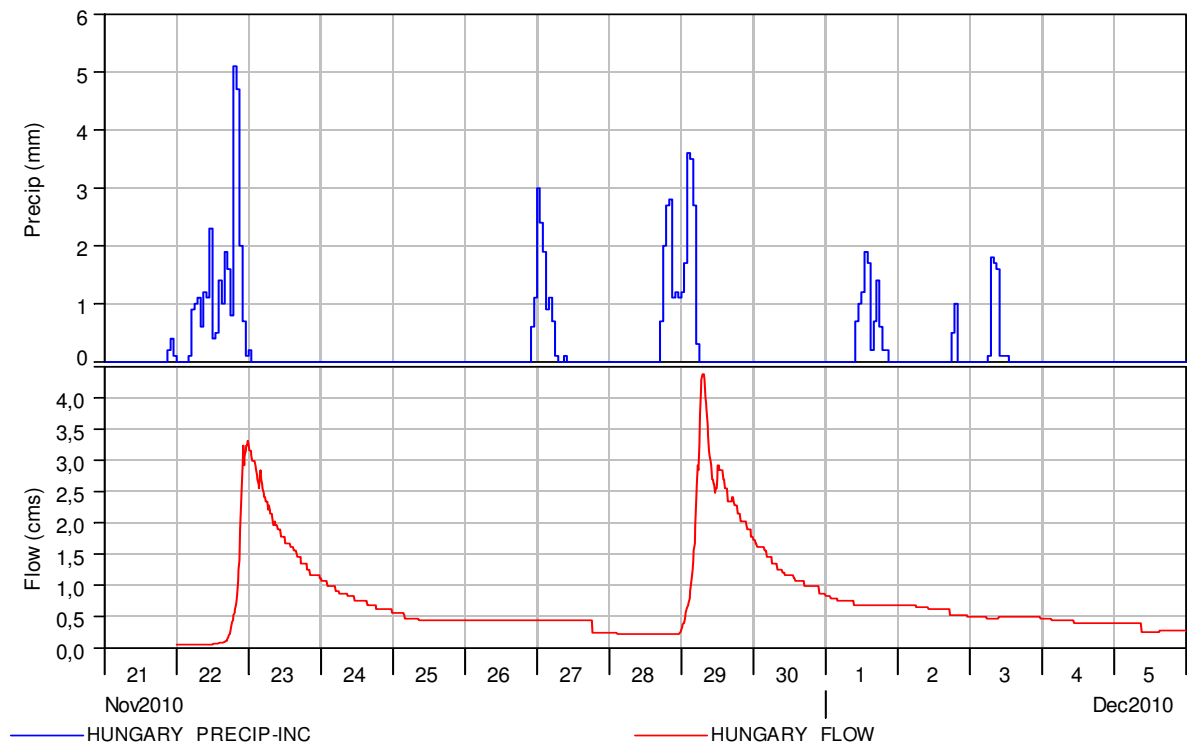


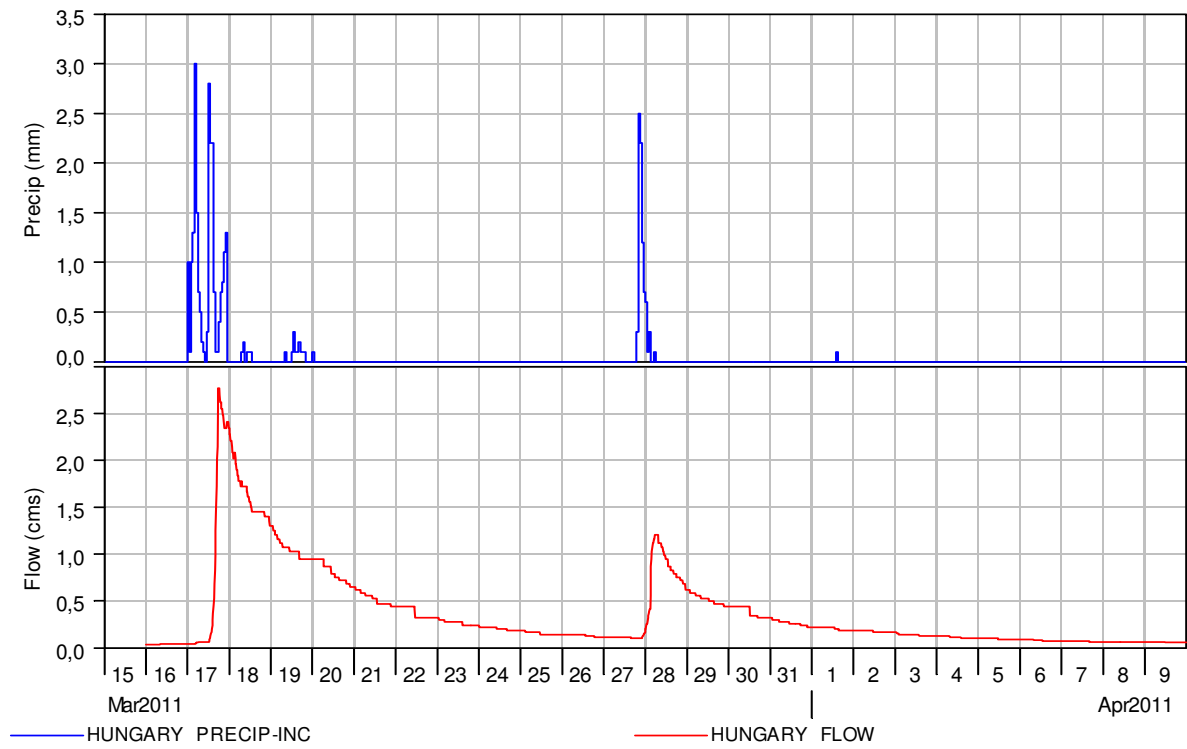












8.4. Korrelációs számítás

	i	y	x	Δy	$\Delta^2 y$	Δx	$\Delta^2 x$	$\Delta y \cdot \Delta y$
	1	6.1	15.5	1	1	-7	50	-6
	2	1.16	4.8	-4	16	-18	315	72
	3	1.45	17.1	-4	14	-5	30	20
	4	1.21	13.8	-4	16	-9	76	35
	5	1.35	25	-4	15	2	6	-9
	6	6.08	8.3	1	1	-14	203	-12
	7	2.55	10.9	-3	7	-12	136	31
	8	8.11	15.1	3	8	-7	55	-22
	9	5.52	6.9	0	0	-16	245	-5
	10	23.91	70.8	19	350	48	2329	902
	11	12.88	30.9	8	59	8	70	64
	12	1.16	43.9	-4	16	21	456	-87
	13	1.61	36.9	-4	13	14	206	-52
	14	4.38	29.4	-1	1	7	47	-6
	15	3.15	9.3	-2	4	-13	175	27
	16	2.77	22.1	-2	6	0	0	1
	Σ :	83.39	360.7	0	527	0	4398	955
N=16	Átlag:	5.21	22.54					
	σ_y	5.93						
	σ_x	17.12						
	r	0.63						
	Határ N=16-hoz:	r=0.42						