



Miskolci Egyetem

Műszaki Földtudományi Kar

Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola

A doktori iskola vezetője: Prof. Dr. Szűcs Péter

Doktori (PhD) értekezés

## **Csápos kutak hidrodinamikai vizsgálata**

**Készítette:**

Nyiri Gábor

okl. hidrogeológus mérnök

**Tudományos témavezető:**

Prof. Dr. Szűcs Péter

egyetemi tanár

**Társ-témavezető:**

Dr. Zákányi Balázs

egyetemi docens

Környezetgazdálkodási Intézet

Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Intézeti Tanszék

Miskolc, 2022.

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b> .....	- 2 -
<b>2. Csápos kutak működése parti szűrésű rendszerekben</b> .....	- 4 -
2.1. A folyó és környezetének kölcsönhatása: a parti szűrés és annak folyamata.....	- 4 -
2.2. A parti szűrésű rendszerek jellemző víztermelő műtárgyai .....	- 8 -
2.2.1. <i>Csápos kutak kútkialakítási módszerei</i> .....	- 13 -
2.2.2. <i>A csápos kutak hozamszámítási módszereinek áttekintése</i> .....	- 18 -
2.3. A parti szűrésű rendszerek monitoring műtárgyai .....	- 24 -
2.4. Véges differencia módszer .....	- 25 -
<b>3. Elméleti alapok és számítások a csápos kutak vonatkozásában</b> .....	- 29 -
3.1. A Revised Multi-Node Well (MNW2) modullal végzett összehasonlító vizsgálatok.....	- 29 -
3.2. Csápos kutak hozamának vizsgálata .....	- 35 -
3.3. A tartózkodási idő vizsgálata .....	- 43 -
<b>4. Csápos kutak működésének bemutatása valós környezetben</b> .....	- 57 -
4.1. A Tiszta Ivóvíz projektről röviden .....	- 58 -
4.2. A Surányi vízbázis bemutatása .....	- 60 -
4.2.1. <i>A vízbázis geológiai adottságai</i> .....	- 60 -
4.2.2. <i>A vizsgált terület termelőkútjainak jellemzése</i> .....	- 63 -
4.2.3. <i>A terepi vizsgálatok ismertetése</i> .....	- 68 -
4.3. A surányi vízbázis hidrodinamikai vizsgálata.....	- 75 -
<b>5. Összefoglalás</b> .....	- 87 -
<b>6. Summary</b> .....	- 89 -
<b>7. Köszönetnyilvánítás</b> .....	- 91 -
<b>8. Irodalomjegyzék</b> .....	- 92 -

## 1. Bevezetés

Az emberiség kultúrájában rendkívüli fontossággal bírnak a folyók, hiszen a történelem első jelentős civilizációi (Egyiptom, Mezopotámia stb.) is többnyire vízparton alakultak ki. Nagy világvárosok kialakulása is folyókhoz köthető, hiszen a folyó az emberek számára egyaránt jelent ivóvízforrást, szállítási lehetőséget, és élelemforrást. Az ilyen folyóparton kialakult városok (London, Párizs, Róma, Pozsony, Budapest stb.) környezetében az ott élő emberek könnyen kihasználhatták a folyók kínálta kedvező lehetőségeket a víz különböző célú felhasználására. Hazánkban a folyó természetének kihasználása nagy múltra tekint vissza, hiszen a folyószabályozások időszakáig az ártéri vízgazdálkodás segítette a folyóink mellett élők életét (Andrásfalvy, 2007). A hazánkban történt folyószabályozások után azonban ez a rendszer átalakult, viszont más szempontból is ki tudtuk használni a folyó és annak környezetének adottságait.

A folyóinknak és környezetüknek kölcsönhatása hidrogeológiai szempontból számunkra fontos kedvező körülményeket alakíthat ki, amely hazánk rendkívül fontos vízgazdálkodási ágazatát érinti, az ivóvízellátást. Az úgynevezett parti szűrésű rendszerek olyan hidrogeológiai adottságokkal rendelkeznek, amelyek alkalmasak nagy mennyiségű ivóvíz kitermelésére. A nagy vízmennyiség mellett a parti szűrés sajátosságainak köszönhetően gyakran a termelt víz minősége is megfelelő. A parti szűrés folyamata során a folyóból beszivárgó víz a termelőkutakig elérve a különböző biológiai, és fizikai folyamatoknak köszönhetően akár ivóvíz minőségűre tisztulhat. A folyók környezetében létesített kutakkal tehát nagy mennyiségű és jó minőségű vizet tudunk termelni, amelynek minőségi és mennyiségi paramétereit a kutak kialakításának megfelelő megválasztásával tovább javíthatunk. Az úgynevezett csápos kutak megfelelő eszközök arra, hogy a parti szűrésű vízadókra jellemző, viszonylag vékony vízadókból nagy mennyiségű vizet termeljenek. Fontos azonban ismerni ezen speciális vízkivételi művek hidraulikai viszonyait. Az üzemszerűen működő csápos kutakat érintő hidraulikai vizsgálatok nehézkesen kivitelezhetőek, viszont a kút környezetében kialakuló áramlási viszonyok a mai modern számítástechnikai eszközökkel jól modellezhetőek. Doktori munkám ezen csápos kutak hidraulikai vizsgálatát tűztem ki célul. Munkámban a MODFLOW Revised Multi-Node-Well (MNW2) csomagját használom, amelyet több szinten szűrőzött kutak, vízszintes-, illetve ferde irányban fúrt kutak hidrodinamikai modellezésére fejlesztettek ki. Az elméleti hidraulikai és hidrodinamikai szimulációk során vizsgálom, hogy az MNW2 modul alkalmas-e, és ha igen, akkor milyen korlátokkal alkalmas a csápos kutak

szivárgáshidraulikai szimulációjára. Munkám során az elméleti számításaimat gyakorlati vizsgálati eredményekkel támasztom alá. A csápos kutak hozamának, a csápok hozamarányainak, valamint a parti szűrésű rendszerekre jellemző tartózkodási idő vizsgálata a kútelhelyezés szempontjából fontos információt adhat a tervezés fázisában. A csápos kutak esetében is fennáll az a kihívás, hogy a parti szűrésre jellemző természetes fizikai és biokémiai folyamatokat, valamint a hozam maximalizálást egyaránt megvalósítsuk. Doktori munkám első részében ezen irányok kapcsán tűztem ki célokat, amelyek hasznos információval szolgáltathatnak a csápos kutak tervezési fázisában. A második részben az elméleti szimulációs vizsgálatok eredményeit alkalmaztam egy valós mintaterületen. A disszertációm elkészítésében nagy segítséget jelentett a Környezetgazdálkodási Intézetben megvalósuló „Tiszta Ivóvíz” projekt, amely kapcsán lehetőségem nyílt a Duna-mentén található surányi kútsor vizsgálatára. Ezen terület a Fővárosi Vízművek stratégiai fontosságú víztermelő létesítménye, amely vízbázison teljes mértékben csápos kutak segítségével történik a víztermelés.

A fentiek kapcsán kutatásom fő célkitűzéseit az alábbi pontokban foglalom össze:

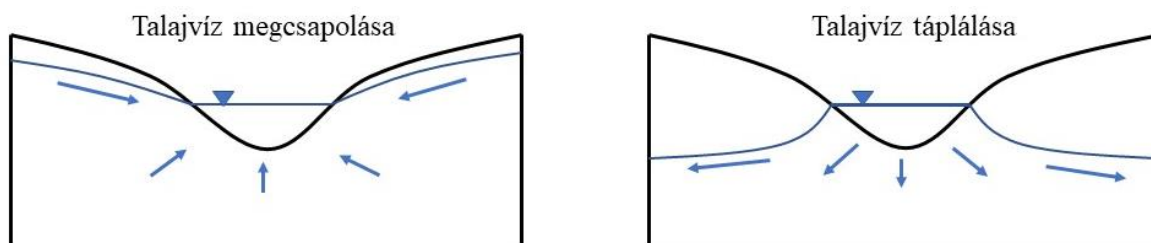
- A folyó környezetére gyakorolt hatásainak összegzése, a lejátszódó szivárgáshidraulikai folyamatok vizsgálata.
- A Groundwater Modeling System (GMS) modellezési környezetben véges differencia módszer alkalmazása parti szűrésű rendszerek hidrodinamikai szimulációjára.
- A Revised Multi-Node Well (MNW2) alkalmazhatóságának vizsgálata csápos kutak hidrodinamikai szimulációjára. Összehasonlító vizsgálatok elvégzése annak érdekében, hogy az MNW2 modul alkalmasságát megismerjem, és bizonyítsam.
- A csápos kutak hidrodinamikai működésének változása a folyótól való távolság függvényében. A csápos kút elhelyezésének áramlási képre, potenciálviszonyokra, valamint tartózkodási időre gyakorolt hatásainak vizsgálata.
- Csápos kutak hidrodinamikai szimulációja valós körülmények között. A surányi parti szűrésű rendszer csápos kutakkal történő termelésének vízföldtani vizsgálata terepi mérések és a modellezés eszközének segítségével.
- Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek, valamint az ezekből levonható elméleti és gyakorlati következtetések ismertetése.

## 2. Csápos kutak működése parti szűrésű rendszerekben

Folyóink környezetében különböző típusú szivárgási folyamatok mehetnek végbe. Ezen szivárgási folyamatoknak a pozitív és humánkockázat, valamint a területhasználatok szempontjából negatív hatásait is érezhetjük. Értekezésemben azokat a szivárgási folyamatokat vizsgálom, amelyek az ivóvíztermeléshez, mint a vízgazdálkodás stratégiai ágazatához köthetők. A parti szűrés folyamán kialakuló szivárgási viszonyok alapvetően meghatározzák az ivóvíz mennyiségi és minőségi állapotát. A különböző típusú műtárgyak alkalmazása árnyalja ezt a képet, így fontos, hogy ezen folyamatokat minél jobban megértsük. Az alábbiakban az ivóvíz egyik jelentős forrásának, a parti szűrésű rendszereknek jellemzőit ismertetem.

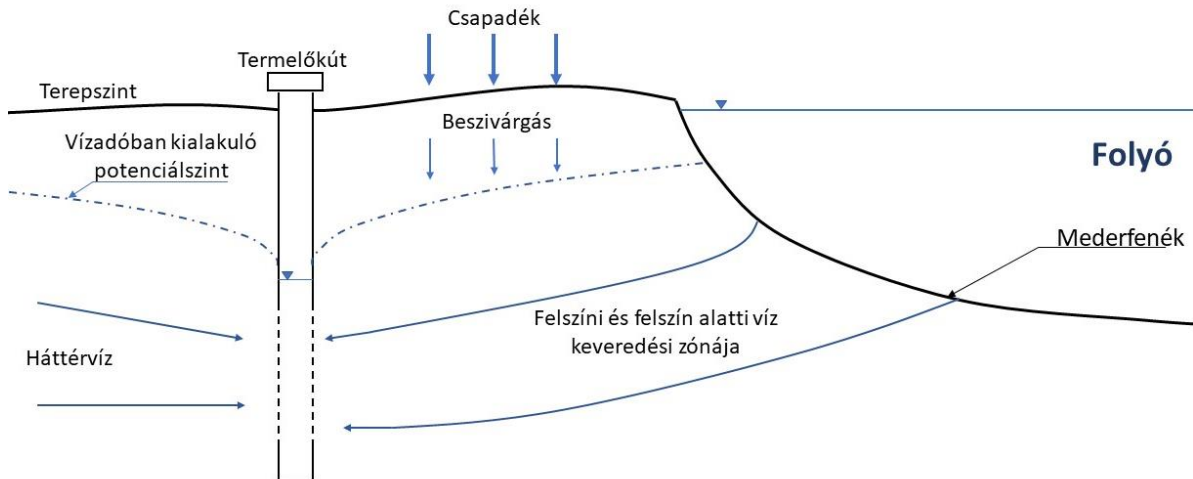
### 2.1. A folyó és környezetének kölcsönhatása: a parti szűrés és annak folyamata

A folyó és környezetének kölcsönhatása olyan kedvező feltételeket teremthet, amelyet ivóvíztermelés során is hasznosíthatunk. A folyó és a környezetében lévő felszín alatti vízről elmondhatjuk, hogy hidraulikailag kapcsolatban állnak egymással (Ray és társai, 2002). A folyó, a felszín alatti víz potenciálszintje, valamint a két potenciálszint különbsége határozza meg, hogy a folyó táplálja, vagy megcsapolja a felszín alatti vizet (K. Tóth, 2017). Ha a talajvíz potenciálszintje magasabb, mint a folyó szintje, akkor a folyó megcsapol, ha pedig a folyó vízszintje magasabb, mint a talajvizé, akkor a folyó táplálja a talajvizet (Putarich, 2006, Winter és társai, 1999). Egy adott folyó esetében a folyó vízállása dönti el, hogy megcsapolás, vagy táplálás történik, azonban a jellemző folyamat az, amikor a folyó megcsapolja a talajvizet (**1. ábra**). Ez jelenti a folyók úgynevezett minimális hozamát, vagy más néven alaphozamot (Völgyesi, 2005).



1. ábra: Talajvíz folyó általi megcsapolása, és táplálása (Brunner és társai, 2009 alapján a szerző saját szerkesztése).

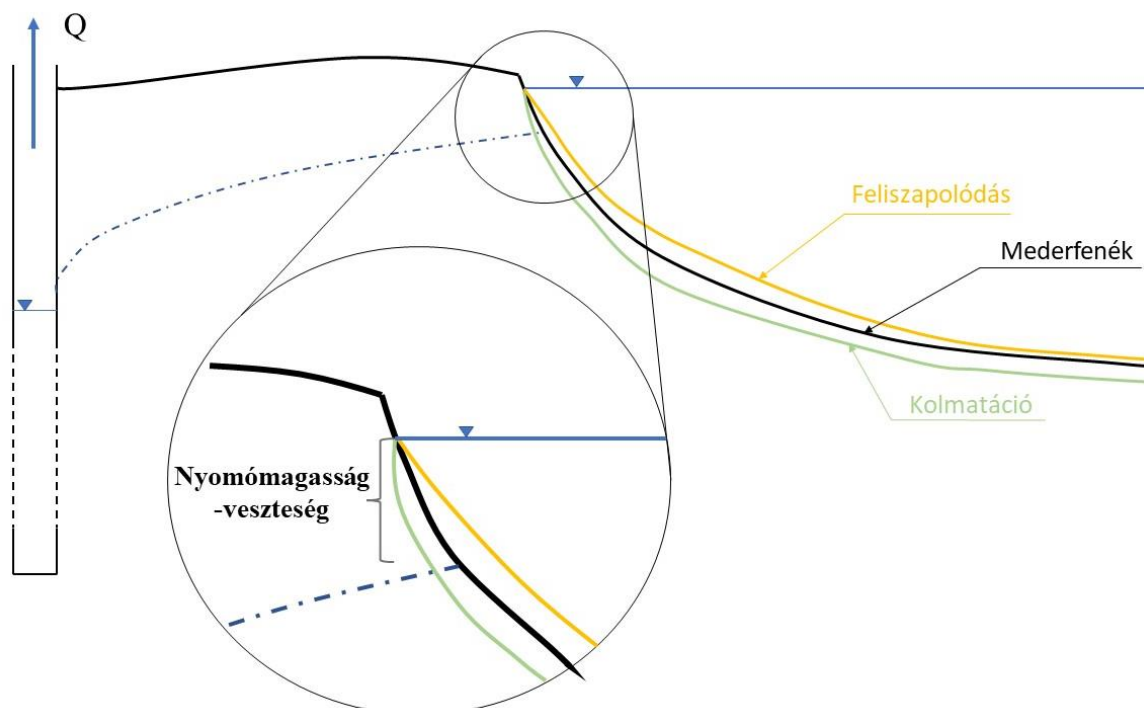
Parti szűrés során a felszíni víz közelében telepített vízbeszerző műtárgyak (aknakút, csőkút, csápos kút, galéria) segítségével vizet termelünk, amely során depressziós tér alakul ki a kutak környezetében (Rózsa, 2000). Ennek eredményeképpen a műtárgy környezetében a hidraulikus gradiens is változik (Kármán, 2013). A gradiens változásával szivárgás indul meg a folyó és a háttér felől. Megfelelő mederkapcsolat esetén a folyó felől nagyobb arányban (több mint 50%-ban) történik az utánpótlódás, ekkor beszélhetünk parti szűrésről (Ray és társai, 2002) (**2. ábra**). A folyamat során olyan természetes szűrési folyamat alakul ki a felszín alatti közegben, amelynek eredményeképpen a termelt víz akár ivóvíz minőségűre is tisztulhat. A parti szűrés során kialakuló természetes tisztítási folyamat magában foglalja a hidrodinamikai (hígulás), a mechanikai (szűrés), a biológiai (mikroorganizmusok tevékenysége), valamint a fizikai-kémiai (csapadékképződés, adszorpció, koaguláció stb.) tisztítási folyamatot (Hiscock és Grischek, 2002). Az ilyen víztermelési lehetőségek kiaknázásával, valamint a víztermelési intenzitás megfelelő megválasztásával elkerülhető, illetve redukálható a költséges víztisztító technológiák telepítése. Ezen rendszerek jelentősége igen nagy hazánkban. Magyarország Vízyűjtő-gazdálkodási Tervének adatbázisa 94 db parti szűrésű vízbázist tart nyilván, amelyből 37 távlati vízbázis. Az összes védett vízkészlet 29,5 %-át az üzemelő, míg 25,5 %-át a távlati parti szűrésű vízbázis adja (VGT3, 2021).



2. ábra: Parti szűrés folyamatának sematikus ábrája (a szerző saját szerkesztése).

A parti szűrésű vízbázis jogszabályban megfogalmazott definíciója a következő: „felszíni víz közelében lévő felszín alatti vízbázis, melyben a vízkivételi művek által termelt víz utánpótlódása 50%-ot meghaladó mértékben a felszíni vízből történő

beszivárgásból származik” (123/1997 (VII.18.) Korm. rendelet). Tehát a jelenlegi jogszabályi környezet nagymértékben támaszkodik a folyóhányad mértékére, de nem tárgyalja az elérési időt, ami alatt a vízrészecske a folyóból a termelőkhöz eljut. A jogszabályban lévő fogalom tehát nem köti elérési időhöz a parti szűrés fogalmát, azonban ezen rendszerek esetében fontos tudnunk azt, hogy az adott vízrészecske milyen úton és mennyi idő alatt éri el a termelőkutat. Másként fogalmazva fontos ismernünk azt, hogy a termelt víz mennyi időt tartózkodik a vízadó rétegben. Ezen információ birtokában az utánpótlódás hidraulikai és vízkémiai természetét megismerhetjük, valamint következtethetünk a folyóhányadra is. Bármilyen közegbeli vízáramlást vizsgálva különböző szivárgási veszteségek jelentkeznek, amelyeknek eredményeképpen potenciál csökkenés tapasztalható. A kutak termelése során kialakuló vízszálszakadás jelensége közismert, azonban a folyó vízének vízadóba történő belépésénél is adódnak olyan szivárgási veszteségek, amelyek befolyásolják a folyóhányad mértékét (Völgyesi, 1993). A folyó és a mederanyag közti ellenállásokat a **3. ábra** szemlélteti.



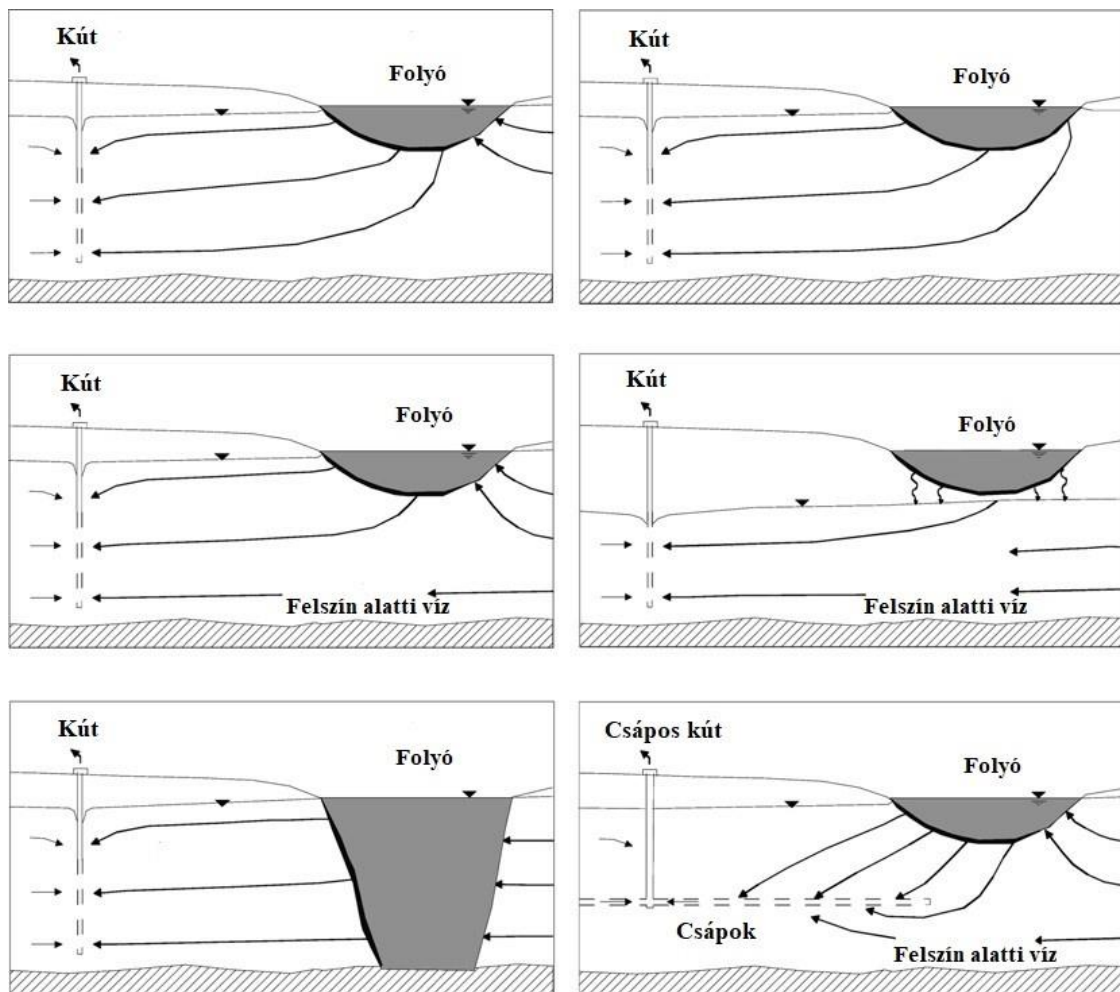
3. ábra: A mederellenállás tényezői (a szerző saját szerkesztése).

A folyó vízadóba történő belépésénél több tényező hatására nyomómagasság-vesztés alakul ki. Ezen folyamatok a következők (Völgyesi, 1993):

- feliszapolódás miatt kialakuló szivárgási tényező csökkenés a mederfenéken,

- a kolmatáció, vagyis a finom szemcsészetű lebegőanyag vízadóba való beszüremkedése (Rózsa, 2000) révén szivárgási tényező csökkenés alakul ki, amely megnöveli a mederellenállást,
- görbületi veszteség: a vírzecskék sebességvektorainak megváltoztatásából adódó veszteség,
- részleges mederharántolás.

Ezen tényezők együttese alkotja azt a mederellenállást, valamint nyomómagasság veszteséget, amely a folyó és a vízadó réteg között lép fel. Ezen rendszeren belül több fajta áramlási szituáció is kialakulhat, amely olyan tényezőknek a függvénye, mint például a meder kolmatáltságának mértéke, a termelt hozam, a vízadó harántoltságának mértéke, a mederanyag, valamint a vízadó réteg szivárgási tényezője (K. Tóth, 2017; Hiscock és Grischek, 2002). A lehetséges áramlási helyzeteket a **4. ábra** szemlélteti.



4. ábra: Parti szűrészű rendszerekben kialakuló áramlási viszonyok (Hiscock és Grischek 2002 alapján).



Hazánk ivóvízellátása nagyjából 95%-ban felszín alatti vízbázisokból táplálkozik (Szűcs 2017). Hazai viszonylatban kiemelt jelentőségűnek tekinthetők a parti szűrésű vízbázisok egyrészt azért, mert a jelenleg termelt felszín alatti ivóvízbázisoknak 35-40 %-a parti szűrésű, másrészt pedig a távlati ivóvízbázisaink 70-75 %-a folyóparti környezetben helyezkedik el (Kármán, 2013). Magyarországon főként a Duna mentén, a Sajó és a Hernád mentén, valamint a Mura és a Rába mentén helyezkednek el ezen ivóvízbázisok.

Ezen folyók mentén az áramlási viszonyokat tekintve az a jellemző folyamat, hogy a folyó megcsapolja a talajvizet. Ez alól csak a nagyvízi időszakok kivételek, amikor is a folyó betáplál a felszín alatti vízbe (Rózsa, 2000). A mederharántolást tekintve a hazai folyóink többé-kevésbé bevágódnak a vízadó rétegekbe, viszont a teljes mederharántolás ritka előfordulást mutat (Léczfalvy, 2004). A hazai viszonyok tekintetében az a jellemző áramlási szituáció, amikor a termelt víz utánpótlódása a mederből, a háttérből, valamint kisebb folyók (Sajó, Hernád, Mura) esetében a túlsó part felől is történhet. Mindezek alapján megállapíthatjuk, hogy hazánkban a folyó-talajvíz kapcsolat igen nagy változatosságokat mutat. Völgyesi (1993) próbaszivattyúzási vizsgálatai során például a Sajó mentén, a túlsó parton lévő piezométerekben is hasonló mértékű depresszió értéket mért, mint a háttérkutakban (Völgyesi, 1993), gyakorlatilag elhanyagolható mértékű folyó felőli beszivárgás mutatkozott.

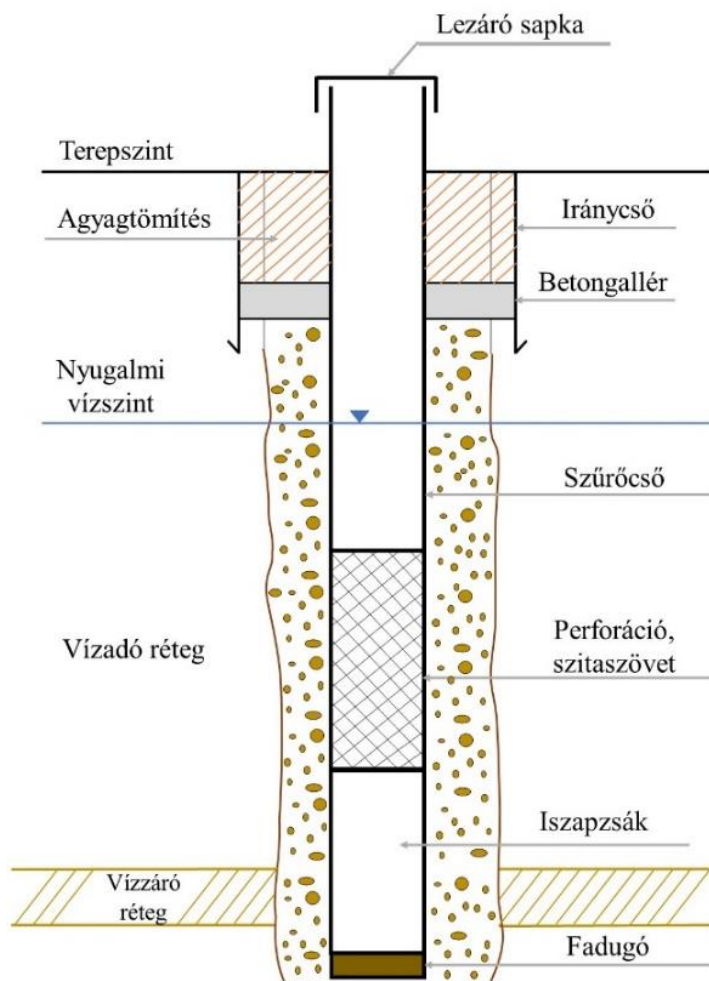
## 2.2. A parti szűrésű rendszerek jellemző víztermelő műtárgyai

Bármilyen vízkivétel során a víztermelő műtárgyak segítségével történik a víz felszínre hozatala, amellyel egyidejűleg depressziós tér alakul ki a vízadóban. A kutak célja, hogy megadja annak a lehetőségét, hogy a vízadóban a lehető legtöbb vizet termeljük ki (Léczfalvy, 1971). Kialakításuk, és a kialakítás megválasztása is ezt a célt szolgálja. A parti szűrésű vízbázisok jellemző víztermelő műtárgyai a következők, amelyeket az alábbiakban külön-külön ismertetek:

- csőkút,
- aknakút,
- galéria,
- csápos kút.

### Csőkút

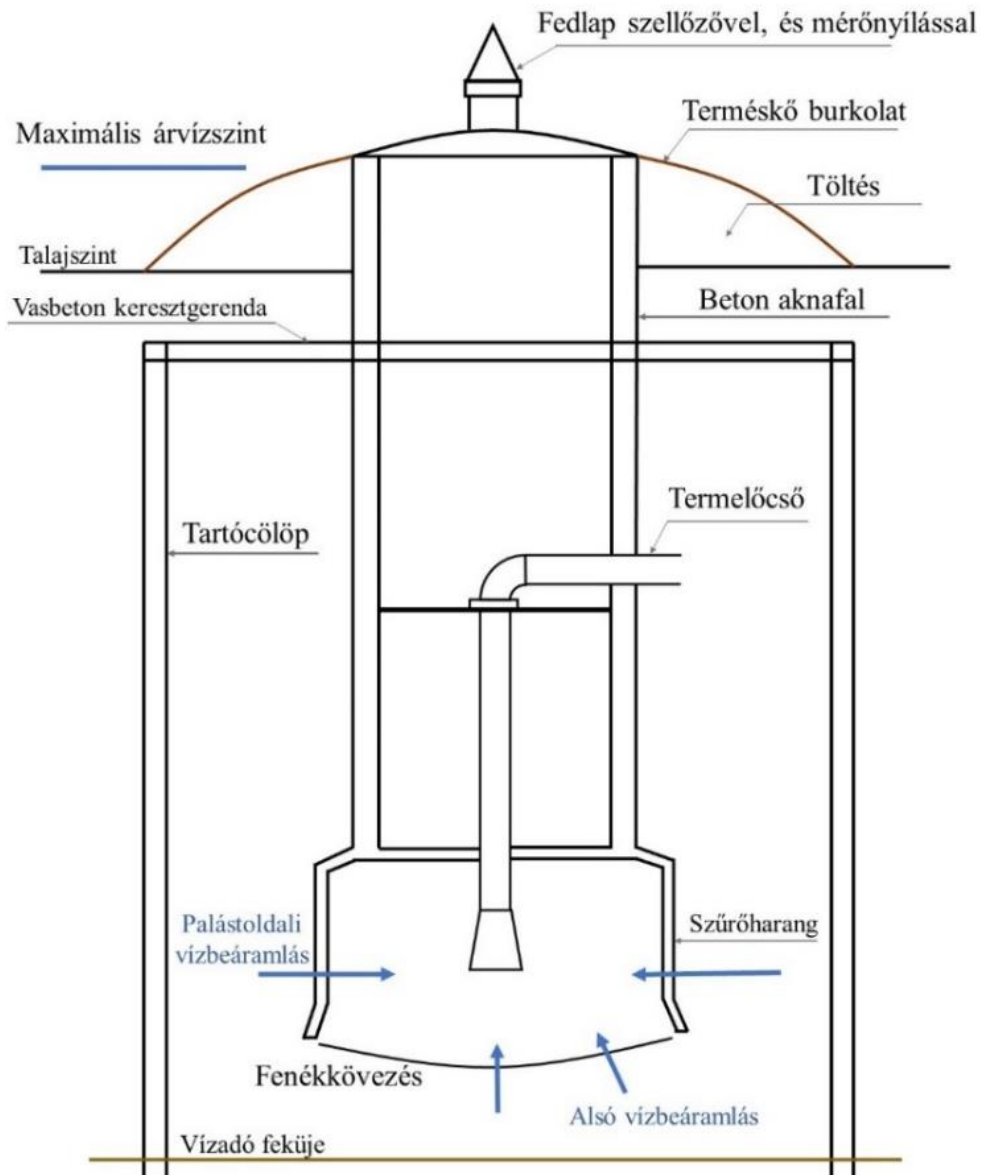
Függőlegesen, vagy ferdén fűrt, a vízadó rétegre szűrőzött kutak, amelyeknek üzemeltetése főként szivattyúval vagy kútrendszerek esetében szifonrendszerrel történik (5. *ábra*). Olcsón előállítható kúttípus, azonban víztermelő képessége is alacsony (Tolnai, 2008). Magyarországon parti szűrésű rendszerek termelésére főként a Sajó és a Hernád mentén, valamint a Rába és a Mura mentén alkalmaznak ilyen kúttípusokat.



5. ábra: Nyílt tükrű vízadóra telepített vertikális kút vázlatos rajza (Léczfalvy, 1971 nyomán a szerző saját szerkesztése).

### Aknakút

Nagy átmérővel rendelkező vasbeton, vagy falazott kutak, amelyeknél a vízbeáramlás alulról a nyitott fenéken, vagy a paláston kialakított perforációkon keresztül történik (6. *ábra*). Előállítása drágább, de a nagyobb beáramlási felület miatt nagyobb hozamot is képes produkálni (Tolnai, 2008). Alkalmazásuk széles körben elterjedt a Duna-menti parti szűrésű rendszereknél.



6. ábra: A Szentendrei-szigeten alkalmazott aknakút-típus vázlatos rajza (Tolnai, 2008 nyomán a szerző saját szerkesztése).

### Galéria

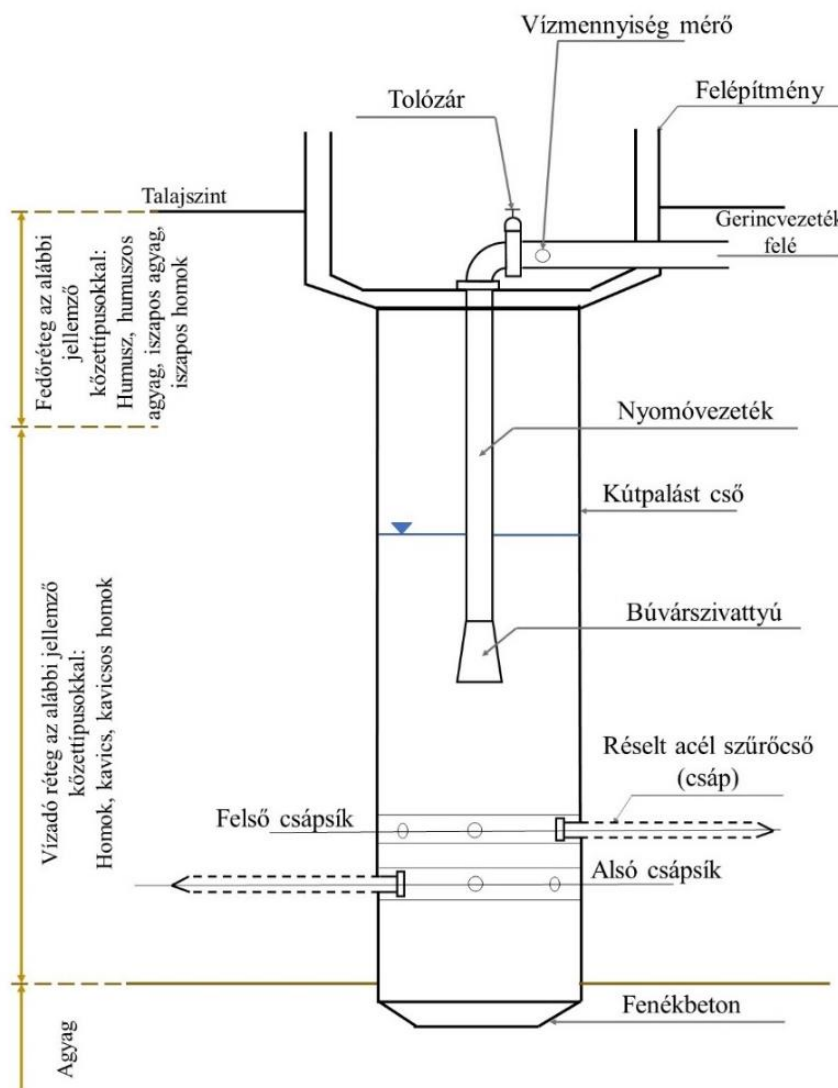
Vízszintesen, vagy közel vízszintesen elhelyezett gyűjtőcső, amely kiválóan aknázza ki a parti szűrésű vízbázisokat. A Duna-menti galéria kialakításokra jellemző, hogy két, az agyagrétegig lesüllyesztett akna között árkot létesítettek, amelybe megfelelő alákavicsolással egy gyűjtőcsövet helyeztek. A gyűjtőcső feletti térrészt alulról fölfelé haladva egyre kisebb szemcseszerkezetű kavicsal töltötték fel, majd agyaggal zárták le. Előnye, hogy nagy vízhozamot képes produkálni, viszont nagy kivitelezési költségek terhelik.

## Csápos kút

A csápos kút feltalálója, Leo Ranney volt, aki sugarasan elrendezett vízszintes csápok alkalmazásával az olajkutak hatékonyságát szándékozta megnövelni. Először, mint egy alternatív kúttípust alkalmazták, azonban mára ez a fajta kútkialakítás világszerte elterjedt, Budapest vízellátását is ilyen kutak biztosítják (Székely, 2011). Néhány fontosabb időpont a csápos kutak kialakulásával kapcsolatban:

- 1927 Első horizontális olajkút kialakítása (Texas)
- 1930 Első csápos kút alkalmazása az olajkitermelésben (Ohio)
- 1933 Első csápos kút alkalmazása ivóvíztermelésre (London)
- 1936 Első ivóvíztermelésre kialakított csápos kút az USA-ban (Ohio)
- 1940 Első parti szűrésű rendszerre kialakított csápos kút az USA-ban (New York, New Jersey)
- 1946 Első Fehlmann módszerrel kialakított csápos kút (Svájc)
- 1953 Első Preussag módszerrel kialakított csápos kút (Németország)
- 1954 Első szűrt sós víz kitermelésére létesített csápos kút (Kalifornia)
- 1997 Az addigi legnagyobb hozamú csápos kút kialakítása ( $Q = 1,75 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Kansas) (Ray, 2002).

Az elgondolás szerint vízszintesen, vagy közel vízszintesen hajtanak csápokot a vízadó formációba, ezáltal nagyobb szűrőfelület találkozik a vízadó összlettel. Ennek eredményeképpen megnövekszik a hasznos szűrőfelület, és ezáltal az egységnyi szűrőfelületen beáramló vízmennyiség is. Elsősorban vékony vízadó rétegeknél alkalmazható jó hatásokkal, hiszen a sűrűn telepített, rövid szűrőzéssel ellátott kutak helyett a szinte teljes felületükön szűrőzött vízszintes csápok szállítják a vizet a kútaknába. Különösen előnyös ez vékony, illetve kiékelődő vízadók esetében. A csápos kutak nagy víztermelő kapacitására jó példa a Varsóban található Gruba Kaska nevezetű vízkivételi műtárgy. A Varsó ivóvízellátását szolgáló, a Visztula közepén kialakított, 15 csáppal rendelkező csápos kút akár  $150\,000 \text{ m}^3/\text{nap}$  vízhozamot is tud szolgáltatni a városnak (Babac és Babac, 2009). Magyarországon a Fővárosi Vízművek ZRt. alkalmazza (**7. ábra**) nagy számban ezen kúttípusokat, de előfordulnak a Rába, valamint a Mura-mentén lévő parti szűrésű vízbázisok vízkivételeinél is.



7. ábra: A Szentendrei-szigeten alkalmazott csápos kút, a jellemző földtani viszonyokkal (Tolnai, 2008 alapján a szerző saját szerkesztése).

A telepítési helyet, valamint az utánpótlódási viszonyokat tekintve több csoportba oszthatók a csápos kutak.

Anatolevsky és Galperin a következő osztályozást adta meg (**8. ábra**) (Babac és Babac, 2009):

1. Folyami csápos kút típus

1.1. A kútakna a folyóban van elhelyezve, és a csápok a folyó kavicssteraszába nyúlnak ki

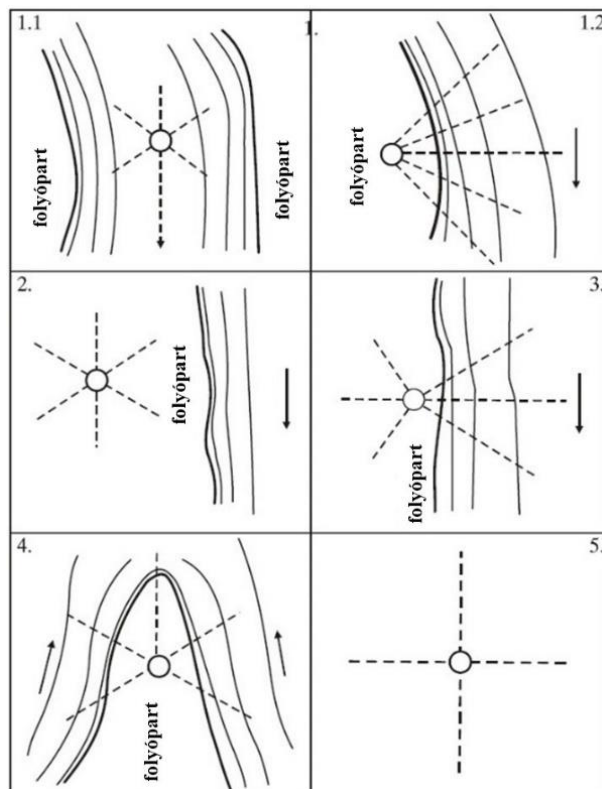
1.2. A kútakna a parton kerül kialakításra és a csápok benyúlnak a folyómeder alá

2. Parti csápos kút típus (a csápok nem érnek be a folyómeder alá)

3. Kombinált kúttípus (a csápok egy része benyúlik a folyómeder alá, egy része pedig a háttér felé orientálódik)

4. Inter-fluviális típus (a kútakna éles folyókanyarulatban, vagy szigetcsúcson van elhelyezve, amelynek csápjai benyúlnak a folyómeder alá)

5. Nyitott típus (a csápos kút telepítése nem kötődik folyómederhez).



8. ábra: A csápos kút folyóhoz viszonyított lehetséges helyzetei (Babac és Babac, 2009).

### 2.2.1. Csápos kutak kútkialakítási módszerei

Fontos kérdés a tervezés és kivitelezés fázisában, hogy a leendő kutat milyen módszerrel alakítsuk ki. A kialakítási típus megválasztását nagymértékben befolyásolja a tervezett kút folyóhoz viszonyított helyzete, a vízadó réteg vastagsága, a vízadó réteg szemcseméretének eloszlása, valamint gazdasági megfontolások is. Számos kritérium figyelembevétele szükséges a csápos kutak megvalósíthatóságának és elhelyezésének vizsgálata során. Ilyen kritériumok lehetnek a következők:

- megfelelő mennyiségű felszíni vízből beszivárgó vízmennyiség,
- hatékony hidraulikai kapcsolat a folyó és a vízadó között,
- megfelelő szivárgási tulajdonságokkal rendelkező vízadó, amely közvetíteni tudja a folyóból beszivárgó vízmennyiséget,
- a felszíni víz, és a vízadóban lévő víz megfelelő minőséggel rendelkezzen,

- fenntartható felszíni vízből történő utánpótlódás (Sterrett, 2007).

Alapvetően a csápos kutak kivitelezése három fázisra osztható:

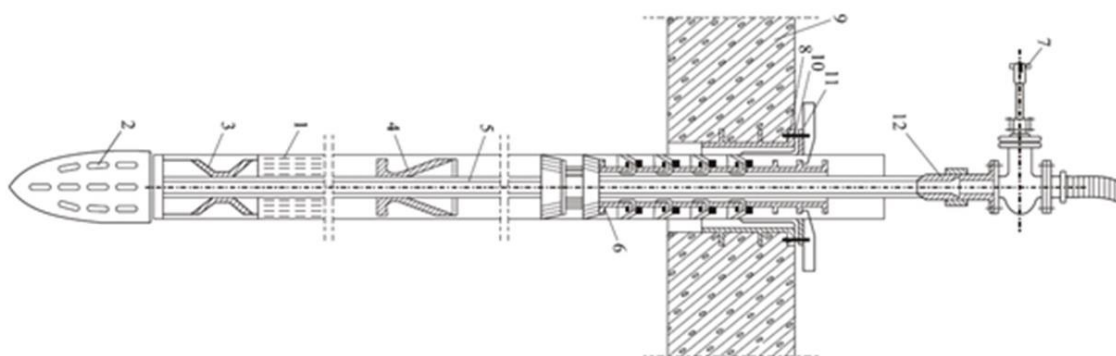
- akna kialakítása,
- csápok kihajtása,
- tisztítószivattyúzás.

Az akna kialakítása nagyban hasonlít a süllyesztett kutak kialakításához, amely során nagy átmérőjű, általában vasbeton anyagú gyűrűket süllyesztenek le a tervezési mélységig (Bloetscher és társai, 2007). A kútakna kialakítása után a csápok kihajtása következik, ami több módszer alkalmazásával történhet. Ezen módszereket az alábbiakban foglalom össze.

### Ranney módszer

A Leo Ranney által kifejlesztett kialakítási módszer mai napig használatban lévő módszer, amelyet több kivitelező is alkalmaz. A csáp kihajtásának első lépéseként a csáp első szakaszát a fúrófejjel együtt behelyezik a kútakna falán előre kialakított furatokba. A fúrófej előre tolásával, víznyomás segítségével történik a kőzet bontása. A víz - kőzet keverék a fúrófejen belépve a szűrőcsövön keresztül jut ki a kútaknába, onnan pedig szivattyúval a felszínre. A csápok ezen módon történő kihajtása után tisztítószivattyúzás történik mindaddig, amíg a kút homokolása bizonyos határ alá nem csökken.

A csápok szűrőszakaszai általában 8 mm vastag acélcső, 200 mm-es külső átmérővel, és 4,5 – 6 mm-es résmérettel rendelkeznek. A Ranney módszer elsősorban olyan kavics, illetve homokos kavics vízadókba való telepítésre alkalmas, melynek szemeloszlási görbéje a  $d_{50} > 3$  mm értékkel jellemezhető (Babac és Babac, 2009). A csáp kialakítását az **9. ábra** mutatja.



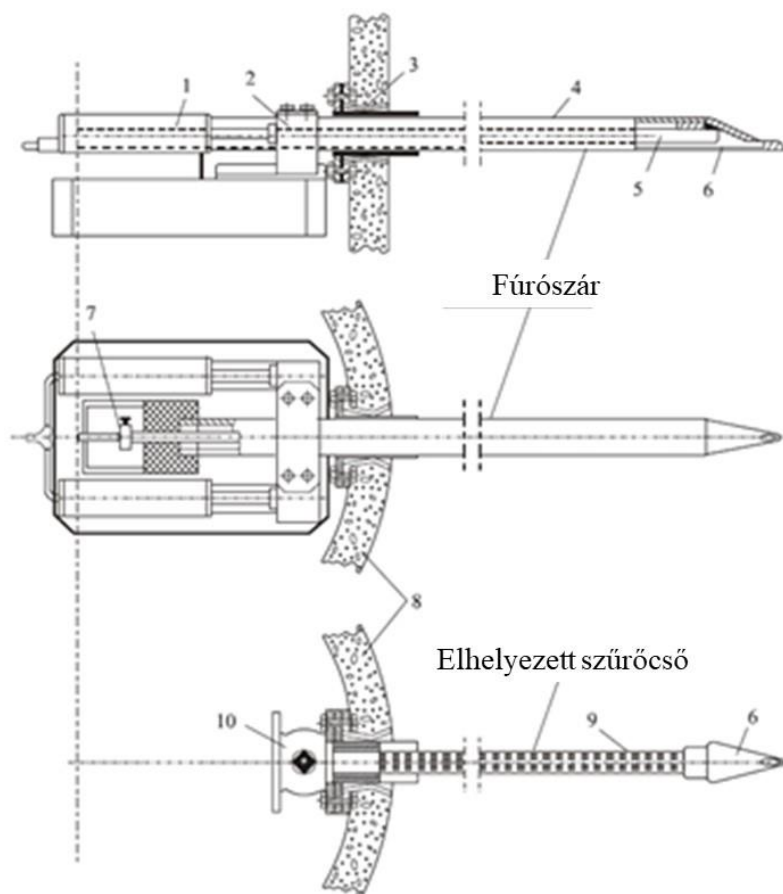
#### LEÍRÁS:

- |              |              |             |                 |
|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| 1. Szűrőcső  | 4. Védőgyűrű | 7. Szelep   | 10. Gumicsipesz |
| 2. Fúrófej   | 5. Öblítőcső | 8. Iránycső | 11. Súly        |
| 3. Védőgyűrű | 6. Gumigyűrű | 9. Akafal   | 12. Nyomócsavar |

9. ábra: Kútkialakítás a Ranney módszer szerint (Babac és Babac, 2009).

### Fehlmann módszer

A csáp kihajtásának ezen módját Fehlmann 1941-ben javasolta. Ezen megoldás szerint egy nem szűrőzött béléscsővet hajtanak ki a vízáadó rétegbe, majd miután a kőzet szemeloszlását megállapították, a szűrőszabálynak megfelelő szűrőcsövet helyeznek el a béléscsőben, majd a béléscsővet visszahúzzák (**11. ábra**). Ezen módszer előnye, hogy a szemeloszlás meghatározásával és a szűrőszabály figyelembevételével a finomabb szemeloszlású rétegekben is alkalmazható az eljárás, azonban nem nélkülözheti a nagyobb szemcseméretű, kavics kőzetalkotókat (Babac és Babac, 2009). Nagyobb csáphossz kialakítása esetén szükség lehet úgynevezett teleszkópos kialakításra, melyet a **10. ábra** szemléltet.

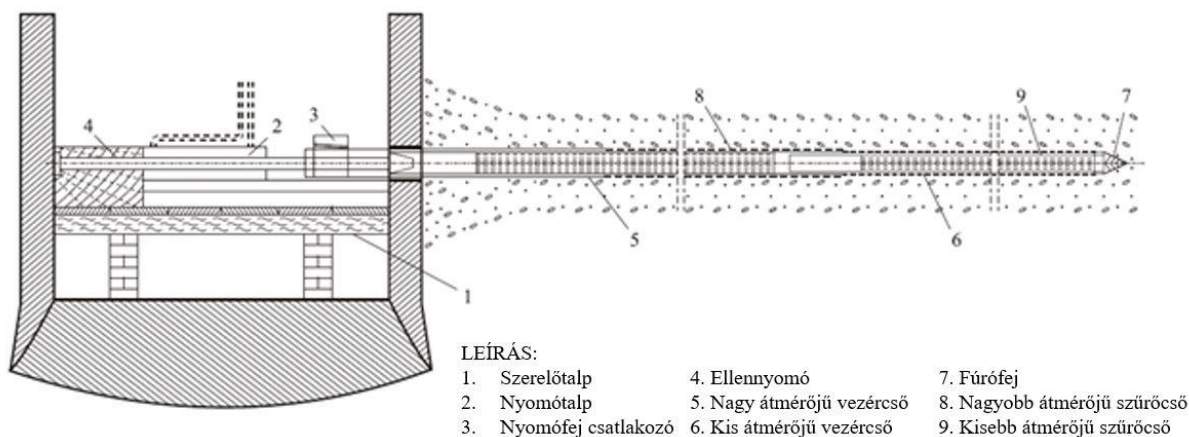


#### LEÍRÁS:

- |                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| 1. Hidraulikus nyomás   | 6. Fúrófej       |
| 2. Nyomófej csatlakozás | 7. Öblítő szelep |
| 3. Iránycső csatlakozás | 8. Aknafal       |
| 4. Vak cső              | 9. Szűrőcső      |
| 5. Öblítőcső            | 10. Tolózár      |

10. ábra: Csápkihajtás Fehlmann módszer szerint (Babac és Babac, 2009).





11. ábra: Fehlmann módszer szerinti teleszkópikus rendszer (Babac és Babac, 2009).

### Preussag módszer

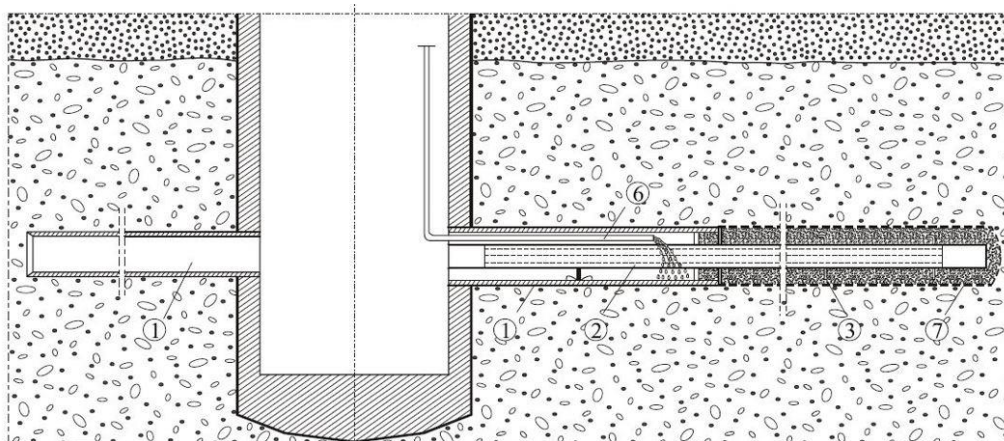
A Preussag módszer tulajdonképpen a Fehlmann módszer egyik változata, különbségük a szűrőcső körülötti szűrőrétegben van. A kialakítás kezdete egy vastag fúrócső bejuttatása a vízáadó rétegbe, és a szűrőcső perforációjának kiválasztása ugyanúgy történik, mint a Fehlmann módszernél. Amikor a fúrócső elérte a kívánt behatolási mélységet a szűrőcső beépítésre kerül központosítók segítségével. A szűrőcső elhelyezése után egy előre meghatározott szemcseméretű anyaggal töltik ki a szűrőcső és a fúrócső közötti gyűrűs teret. A fúrócső ezek után eltávolításra kerül (**12. ábra**).

A módszer előnyei:

- szinte bármilyen szemcseeloszlású és méretű vízáadó rétegekben alkalmazható a megfelelő szemcseméretű szűrőanyag megválasztásával
- A szűrő lyukméretét növelni lehet, ami csökkenti az eltömődés kockázatát, valamint a szűrőellenállást

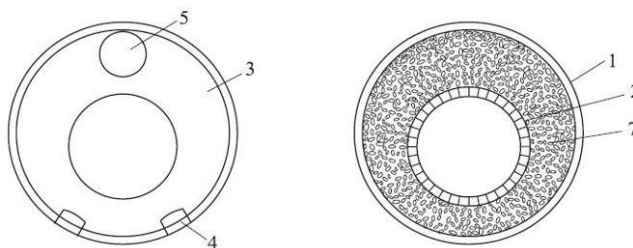
A módszer hátrányai

- a fúrócső kihúzása során az egyébként kb 10 cm vastag mesterséges szűrőréteg elvékonyodhat, rongálódhat,
- a mesterséges szűrőréteg bejuttatása a csáp belseje felé nehezebb, ezáltal nem biztos, hogy a csáp belsejében eléri a megfelelő (kb 10 cm) vastagságot (Babac és Babac, 2009)



LEÍRÁS:

1. Vízszintes cső
2. Szűrőcső
3. Kihúzást akadályozó elem
4. Csúsztatógyűrű
5. Szűrőanyag bejuttatásához szükséges cső
6. Szűrőanyagot bejuttató cső
7. Szűrőanyag



12. ábra: Preussag módszer (Babac és Babac, 2009).

A csápok kihajtása után megtörténik a tisztítózivattyúzás, aminek kettős célja is van. Egyrészt, hogy a kialakítás során a kútaknába bekerülő közetszemcséket eltávolítsuk, másrészt pedig a csápok környezetében, a vízadó rétegben kialakuljon a természetes szűrőváz. Ennek végrehajtásához egy speciális szelepet használnak, amelyet a **13. ábra** mutat.



13. ábra: A csáp tisztításához használt szelep (a szerző saját fotója).

A csápok kútaknában lévő végére ezt a szelepet ráhelyezik, és a szelepet hirtelen kinyitva, majd bezárva nyomásingadozást hoznak létre a csápban, valamint a vízáadó rétegben. Ez a nyomásingadozás segít a finom szemcsézetű kőztdarabokat eltávolítani a csáp körül elhelyezkedő gyűrűs kőzettérből. Amikor a finom szemcsék beáramlása, vagyis a homokolás elhanyagolható mértékre lecsökken, akkor a kút víztermelésre alkalmasnak tekinthető.

### 2.2.2. *A csápos kutak hozamszámítási módszereinek áttekintése*

Egy adott kút létesítése után és a működtetése alatt is fontos ismernünk a kút termelése során kialakuló hidrogelológiai viszonyokat. Már a tervezés fázisában előnyös ismernünk a várható kitermelhető hozamot és a víztermelés által kialakított depressziót, áramlási viszonyokat. A csápos kutak által kitermelhető hozam az alábbi tényezők függvénye (Patel és társai, 2010):

- leszívás mértéke,
- csápok elrendezése,
- vízáadó telített vastagsága,
- a folyó csápos kúthoz viszonyított helyzete,
- a vízáadó réteg szivárgási tényezője,
- a folyómeder vízáteresztő képessége,
- távolhatás.

A leszívás mértékét a kútaknában lévő statikus vízszint és az üzemi vízszint különbségeként értelmezzük. A vízáadó telített állapotban lévő vastagságának, a szivárgási tényezőnek és a távolhatásnak hozam-leszívás kapcsolatra gyakorolt hatását hasonlóképpen kezelhetjük, mint a vertikálisan fúrt kutak esetében. A víztermelés által kialakított depressziós teret azonban ebben az esetben befolyásolja még a csápok kihajtásának iránya, a csápok mélysége, valamint a csápok folyóhoz viszonyított helyzete (Patel és társai, 2010). A folyó, mint határfeltétel ugyancsak befolyásolja a termelés hatására kialakuló depressziós teret. Fontos tehát egy olyan számítási módszer használata, amely segítségével meghatározható a csápos kút segítségével kitermelhető hozam. Több tapasztalati képlet is napvilágot látott, amelyek a csápos kutak tervezési fázisában adnak összefüggést a várható kitermelhető hozam meghatározására. Ezek az összefüggések a csápos kutak hozamszámítási problémáit a vertikális kutak hozamszámítási problémájára vezetik vissza.

A kapcsolatot az egyenértékű kútsugár fogalmának bevezetése adta. Az egyenértékű kútsugár az az elméleti függőleges kút sugara, amely ugyanannyi hozamot termel, mint a csápos kút (Nyíri és társai, 2019; Babac és Babac, 2009). A kitermelhető hozamot az alábbi összefüggés alapján számíthatjuk (Hantush, 1964; Walton, 1992):

$$Q = \frac{\pi \cdot k (H^2 - h_w^2)}{\ln \frac{R}{R_e}} \quad (1)$$

ahol:

Q: hozam,

k: vízadó réteg szivárgási tényezője,

H: telített közeg vastagsága,

$h_w$ : üzemi vízszint,

R: távolhatás,

$R_e$ : egyenértékű kútsugár.

Az egyenértékű kútsugár meghatározására több szerző is kísérletet tett, amelyek közül néhányat az 1. táblázatban összesíték. A táblázatban lévő jelölések a következők:

L: csáphossz,

n: csápok száma.

1. táblázat: Az egyenértékű kútsugár számításának különböző módszerei.

Módszer	$R_e$ számítása
Citrini (1951)	$R_e = L \cdot \sqrt[n]{0,25}$
Nering (1952)	$R_e = \frac{2 \cdot \sum L}{3 \cdot n}$
Wegenstein (1954)	$R_e = L$
Mikels és Klaer (1956)	$R_e = L \cdot (0,75 - 0,8)$
Mc Worther és Sunada (1977)	$R_e = L \cdot 0,61$

Napvilágot láttak olyan tapasztalati képletek is, amelyek nem használják az egyenértékű kútsugár értékét a várható hozam meghatározására. Ezen analitikus képletek olyan tapasztalati képletek, amelyek nem nagy általánosságban kezelik a csápos kutak hozamszámítási problémáit, hanem többnyire helyzetspecifikusak. Az alábbiakban néhány ilyen típusú módszer bemutatására kerül sor.

Petrovic 1956-ban prezentálta analitikus megoldását, amelyet Haefeli és Zeller (1953) nyílt tükrű rendszerben megvalósított kutatásai alapján írt fel. A Petrovic (1956) által

publikált összefüggés a következő (Petrovic, 1956; Babac és Babac, 2009; Patel és társai, 2010):

$$Q = \frac{L \cdot m \cdot K \cdot H \sqrt{A - B \cdot \frac{h_0}{H} - 1}}{c} \quad (2)$$

ahol,

Q: kitermelhető hozam,

L: csáphossz,

m: csápok száma,

K: hidraulikus vezetőképesség,

H: nyugalmi vízszint,

h<sub>0</sub>: kútaknában mért üzemi vízszint,

A, B, C: a 2. táblázat szerinti állandók.

2. táblázat: A Petrovic (1956) által használt konstansok (Babac és Babac, 2009).

Csápok száma	A	B	C
4	4	3	5,25
8	3,9	2,9	7,31
12	4,068	3,068	10
16	3,718	2,718	11,2

Haefeli és Zeller (1953) csápos kutakkal kapcsolatos vizsgálatai alapján a fenti összefüggés az alábbi öt kitéttel érvényes:

$$0,161 \leq \frac{H}{L} \leq 0,465$$

$$1,54 \leq \frac{R}{L} \leq 4,44$$

$$0,00846 \leq \frac{d}{L} \leq 0,0244$$

$$02,00423 \leq \frac{t}{L} \leq 0,0127$$

$$0 \leq \frac{h_0}{H} \leq 1$$

ahol:

H: nyugalmi vízszint,

R: távolhatás,

L: csáphossz,

d: csáp átmérője,

t: a csáp és a vízadó fekéje közti távolság.

Ezen kitevételek alapján látható, hogy a módszer foglalkozik a csápok átmérőjével, valamint a csápok vízadóban elfoglalt helyzetével, így meghaladva az eddigi módszereket. Ezen két paraméter figyelembevétele miatt a módszer megbízhatóbb eredményt ad, még akkor is, ha csak szűkre szabott feltételrendszer mellett használható (Babac és Babac, 2009).

Kordas 1960-ban publikálta munkáját, amelyben a Polubarinova Kochina matematikai módszerét terjesztette ki végtelen vastagságú vízadóban lévő csápos kutak hozamának meghatározására (Babac és Babac, 2009). A Kordas (1960) által meghatározott összefüggés a következő (Kordas, 1960; Patel és társai, 2010):

$$\frac{Q}{K \cdot L \cdot S} = \frac{4,52 \cdot m^{0,175} \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot L}\right)^{0,15} \cdot \arctg\left(\frac{T}{L}\right)}{\log \frac{R}{1,93 \cdot L}} \quad (3)$$

ahol,

Q: kitermelhető hozam,

L: csáphossz,

m: csápok száma,

K: hidraulikus vezetőképesség,

T: a csáp és a vízadó fekjüje közti távolság

R: távolhatás,

d: csáp átmérője,

S: depresszió a kútaknában.

A fenti összefüggés Kordas (1960) szerint végtelen horizontális kiterjedésű és limitált vastagságú vízadóban, zárt tükrű rendszerben telepített csápos kutakra érvényes. A szerző az elektrodinamika törvényeinek analógiájára modellezte az ebben az esetben kialakuló hidraulikai viszonyokat (Babac és Babac, 2009).

Kordas (1960) munkájához hasonlóan Milojevic (1961) is publikált egy elektrodinamikai analógián nyugvó hozamszámítási összefüggést, amely zárt tükrű rendszerekre érvényes végtelen horizontális kiterjedésű vízadó esetében. Az alkalmazott összefüggés figyelembe veszi a kút folyótól való távolságát is, amely harántolja a vízadó réteget. A Milojevic (1961) által meghatározott összefüggés az alábbi módon írható fel:

$$\frac{Q}{K \cdot T \cdot (H - h_0)} = \left(\frac{t}{L}\right)^{0,10} \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^{0,15} \cdot \left[4,51 \cdot m^{0,126} - 1,97 \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^{2/3}\right] \cdot V^* \quad (4)$$

ahol,

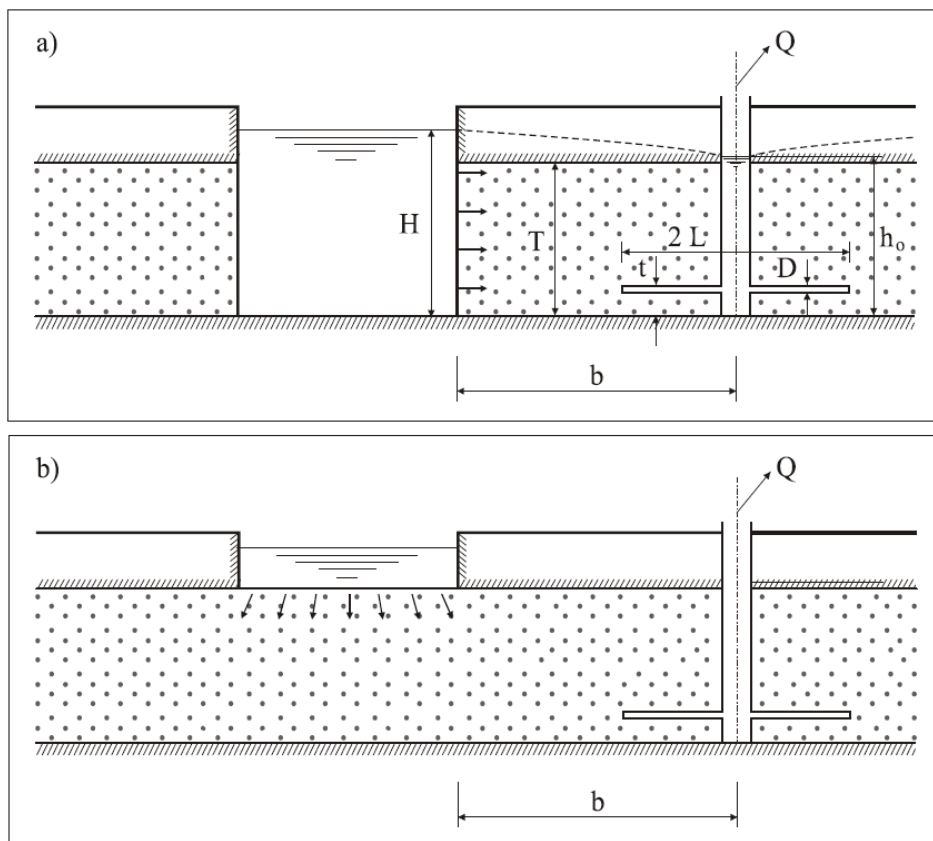
$$V^* = \left( \frac{1}{sh \frac{2 \cdot \pi \cdot b}{L} \cdot \frac{c}{L}} \log \frac{\frac{L}{\pi}}{sh \frac{\pi}{c} \cdot \frac{L}{L}} \right)^{0,743 \cdot m^{0,131} - 0,194 \cdot \frac{t}{L}}$$

ahol,

- Q: kitermelhető hozam,
- L: csáphossz,
- m: csápok száma,
- K: hidraulikus vezetőképesség,
- t: a csáp és a vízadó fekéje közti távolság
- T: vízadó vastagsága,
- D: csáp átmérője,
- b: a kút és a folyó távolsága,
- H-h<sub>0</sub>: depresszió,
- c: kutak közti távolság.

Milojevic (1961) a vízadó harántolására két alapesetet határozott meg, amelyet a **14. ábra** szemléltet:

- a) a folyó teljes vastagságában harántolja a vízadó réteget,
- b) a folyó csak kismértékben harántolja a vízadó réteget (Babac és Babac 2009; Milojevic 1961,1963)



14. ábra: Milojevic által meghatározott két alapeset (Babac és Babac, 2009).

Csápos kutak tervezése és üzemeltetése során mindinkább előtérbe kerül, hogy ne csak a várható kitermelhető hozam mértékét ismerjük, hanem az általa kialakított depressziós teret is. Mindinkább nagyobb hangsúlyt kap ennek ismerete, ha nem csak egy kút üzemelését, hanem egy egész kútsor felszín alatti vízforgalomra gyakorolt hatását vizsgáljuk. Ekkor kerülnek előtérbe a numerikus módszerek és a különböző modellező szoftverek, amelyek az elmúlt évtizedekben hatalmas fejlődésen mentek keresztül. Csápos kutak hidraulikai és hidrodinamikai modellezésére több szerző is kísérletet tett. A felszín alatti vízáramlásra alkalmas modellezési eszközök közül gyakorlatilag mindegyiket alkalmazták csápos kutak hidrodinamikai viszonyainak meghatározására (Collins és Houben, 2020). Kútszektor modellt alkalmazott Falcke (1962), Kotowski (1985, 1988), Chen et al (2003), Birch és társai (2007), és Kim és társai (2008), ahol a korábban alkalmazott empirikus összefüggéseket terepi körülmények között valósították meg (Collins és Houben, 2020). Ahogy már fentebb említettem, láthatunk példát arra is, amikor az elektrodinamika és a hidrodinamika törvényeinek analógiáját használva modellezték a csápos kutak hidrodinamikai viszonyait (Kordas, 1961; Milojevic, 1961, 1963; Debrine, 1970). Az analitikus elemek módszerét alkalmazta a csápos kutak hidraulikai viszonyainak



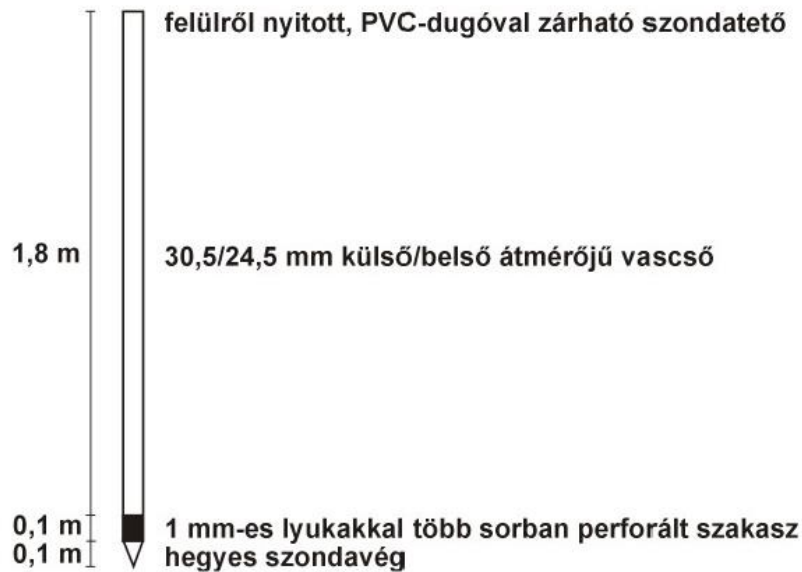
számítására Patel és társai (2010), valamint Bakker és társai (2005). Számos szerző használt numerikus módszereket arra, hogy a csápos kutak, és azok környezetében kialakuló potenciáletteret szimulálni tudják (Collins és Houben, 2020). Ezen publikációk olyan numerikus módszereket alkalmaztak, amelyek túlmutattak a klasszikus Darcy-féle lamináris áramlás feltételezésén, és nem lineáris lamináris áramlással valamint turbulens áramlással számoltak (Bischoff, 1981; Ophori és Farvolden, 1985; Eberts és Bair, 1990; Beljin és Losonsky, 1992; Zhan és társai, 2001; Cunningham és társai, 1995; Luther és Haitjema, 1999; Mohamed és Rushton, 2006; Birch és társai, 2007; Haitjema és társai, 2010; Lee és társai, 2010; Dimkić és társai, 2011; Kelson, 2012). A numerikus módszerek, valamint a rendelkezésre álló szoftverek fejlődésének segítségével a csápos kutak hidrodinamikai modellezése is egyre pontosabbá válik és bonyolultabb földtani szituációkban is egyre jobban alkalmazhatóak. Minél több vízáramlást befolyásoló tényezőt veszünk figyelembe, annál pontosabb információt kapunk a kialakuló potenciálviszonyokról, sebességviszonyokról, amelyek az optimális üzemeltetést segítik elő. Igaz ez abban az esetben is, amikor időjárás, víztermelési extrémításokat veszünk figyelembe.

### 2.3. A parti szűrészű rendszerek monitoring műtárgyai

A vízszint-, és a vízminőség megfigyelésére monitoring rendszer kiépítésére van szükség. Fontos ez parti szűrészű vízbázisok esetében is ahhoz, hogy tudjuk követni a vízbázison végbemenő hidraulikai és vízminőségi folyamatokat. A kialakításuk időtartama alapján beszélhetünk ideiglenes, valamint állandó kialakítású megfigyelő rendszerekről, amelyeknek legfontosabb műtárgyai a figyelőkutak (Pethő, 2008). Mindkét esetben jellemző a figyelőkutakra, hogy a vizsgált termelőkút vonalában a folyóra merőlegesen, valamint a folyóval párhuzamosan helyezkednek el (Deák és társai, 1992; Völgyesi, 1993; Hunt és társai, 2003). A Duna esetében jellemző, hogy a part mentén több száz méter hosszan történik víztermelés. Ebben az esetben egy adott kút vizsgálatára nem telepítettek a túlparton figyelőkutat. Ennek oka, hogy gyakran előáll az a szituáció, amikor mindkét parton történik víztermelés, így a túlparton lévő figyelőkút nem ad releváns információt a vizsgált termelőkútra (Pethő, 2008; Völgyesi, 1993).

A parti szűrészű rendszerek vizsgálata esetében beszélhetünk ideiglenesen kialakított potenciométerekről is, amelyeket főként a vízadóban bekövetkező hidraulikai változások észlelésére, és nyomon követésére alkalmaznak. Ezen kutakat kevésbé használatosak vízmintavételre, bár alkalmasak lehetnek ezen feladatok ellátására (Pethő, 2008).

A parton kialakított állandó vagy ideiglenes figyelőkutak mellett alkalmazhatunk a vízzel telt folyómederben is ideiglenes potenciométereket (**15. ábra**). Előnyük ezen eszközöknek, hogy a folyómeder alatt a mederhez közeli vízáadó rétegben tudjuk mérni a potenciálszintet, valamint annak változását. Szűrőzött szakaszuk a medertől számított néhány méteres mélységbe kell, hogy érjen, annak érdekében, hogy minél jobban tükrözze a sekély mélységű vízáadó réteg vízszintváltozásait (Pethő, 2008; Balassa és társai, 2003).



15. ábra: Mederszonda műszaki rajza (Pethő, 2008).

A hidrogeológia mai modern vizsgálati módszerei között, a klasszikus módszerek mellett fontos helyet foglal el a numerikus modellezés. A modellezés segítségével különböző vízföldtani szituációkra is képesek lehetünk megbízható eredményeket adni. Doktori munkámban a numerikus modellezést alkalmazom együtt a folyó környezetében kialakuló szivárgási folyamatok hatásainak elemzésére. Az alábbiakban a folyó környezetének általam alkalmazott hidrodinamikai modellezési módszerét ismertetem.

## 2.4. Véges differencia módszer

A vízföldtani kutatások egyik leggyakrabban alkalmazott eszköze a véges differencia módszer. A módszer sajátossága, hogy a vizsgált térrészt egy rácshálóval osztjuk fel, és a rácsháló elemeiben számítjuk a vízforgalmat. Az elemek egymáshoz hézagmentesen csatlakozó téglatestek. A téglatestek között a Darcy-egyenlet, valamint a kontinuitási egyenlet segítségével számítjuk a vízforgalmat. Meg kell határoznunk a kutak, szivárgók

által kivett, vagy betáplált vízhozamokat, valamint a vizsgált térrész vízforgalmát befolyásoló objektumok hozamait. Minden egyes elemre összegezzük a vízmérleg-elemeit, majd összegezve a vízmérleg-elemeket meghatározzuk a modellezett tér vízforgalmát (Kovács, 2004). A csápos kutak vizsgálatakor a kitermelhető hozam mellett ismernünk kell a kutak környezetében kialakuló vízforgalmat is, hogy pontos képet kapjunk egy adott vízbázis hidrodinamikájáról. Ebben az esetben nem szükséges a vizsgált térrész pontos lefedése, így a véges differencia módszer megfelelő eszköz, hogy ezen kúttípusok szivárgáshidraulikai vizsgálatára. Praktikus ebben az esetben olyan széleskörben alkalmazott programcsomagot használni, amely bizonyítottan használható eredményt ad. Az általam alkalmazott Groundwater Modeling System (GMS) modellezési környezetben alkalmazott MODFLOW program megfelel ezen elvárásoknak. A csápos kutak modellezési feladatainak nehézsége a vízszintesen, sugarasan elhelyezkedő vízkivételi objektumok miatt bonyolultabb. A MODFLOW Multi-Node Well 2 (MNW2) modulja vízszintesen, vagy ferdén fúrt kutak modellezésére alkalmas (Konikow és társai, 2009). Az MNW2 csomag egy kútközpontú rendszer, amely használatakor a felhasználó a kút karakterisztikáját könnyebben tudja meghatározni (Konikow és társai, 2009).

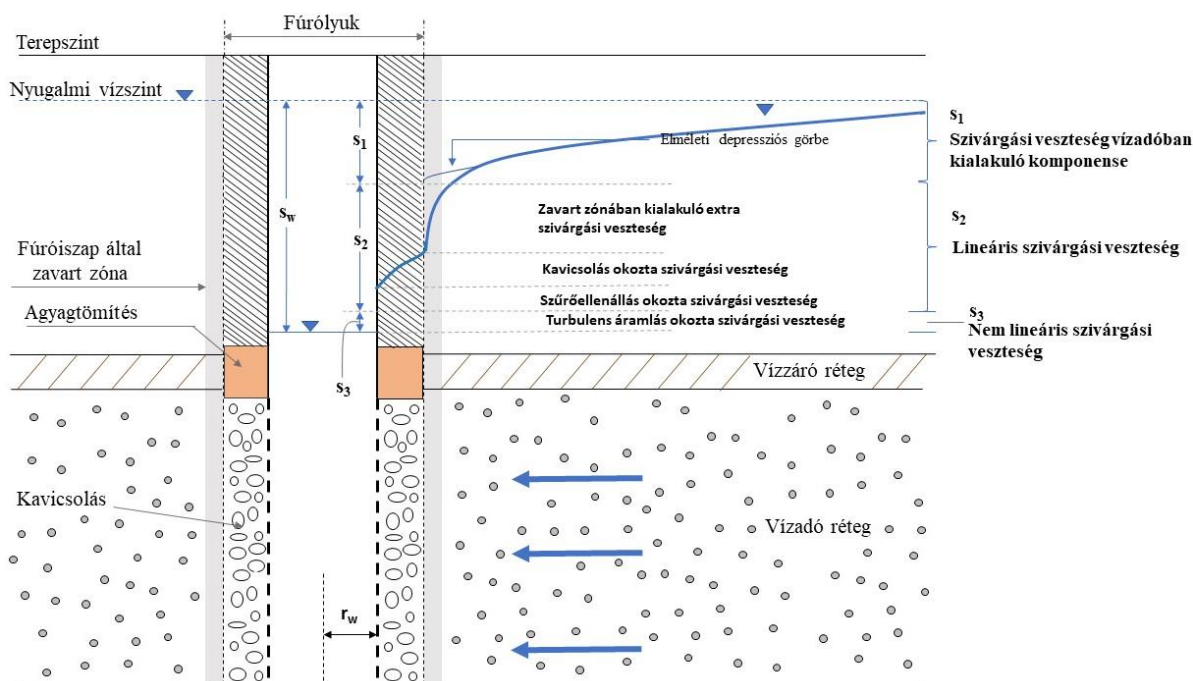
Az MNW2 főbb jellemzői az alábbiakban foglalhatók össze:

- Átalakított beviteli formátum, amely lehetővé teszi a kút szűrőzött szakaszainak figyelembevételét, azok mélységét, valamint a skin hatás figyelembevételét.
- Képes figyelembe venni azokat a nyomásváltozásokat, amelyek akkor keletkeznek, ha a kútszűrő nem teljes mértékben csapolja meg a vízadót.
- Az MNW2 képes vízszintes és ferde kialakítású kutak szimulálására.
- Képes a víztermelés időbeli változásának követésére, szivattyú megadásával.
- Szivattyú megadásának lehetősége különböző mélységekben (Konikow és társai, 2009).

Egy kút termelése során fellépnek olyan veszteségek, amelyek egy adott pontban a potenciálszintet csökkentik. Ezen veszteségek eredményeképpen alakul ki a kútban lévő vízszint, amelyet vízszintmérővel, vagy egyéb regisztráló eszközökkel mérhetünk. Alapvetően három fő veszteségi komponenssel kell, hogy számoljunk egy kút termelése során (**16. ábra**):

- a leszívás vízadóban kialakuló komponense
- a leszívás kút környezetében kialakuló lineáris vesztesége
  - fúróiszap behatolása miatt kialakuló szivárgási veszteség

- kavicsolás által okozott szivárgási veszteség
- a vízrészecske szűrőbe való belépésénél jelentkező szivárgási veszteség
- a leszívás kút környezetében kialakuló nem lineáris vesztesége
  - turbulens áramlás által okozott nyomásveszteség



16. ábra: Függőleges kútban kialakuló szivárgási veszteségek (a szerző saját szerkesztése).

Egy adott kút hidraulikus vesztesége a következőképp számolható:

$$h_{WELL} = h_n + [AQ_n + BQ_n + CQ_n^P] \quad (5)$$

ahol:

$h_{WELL}$ : nyomásszint a kútban

$Q_n$ : az n-ik cella és a kút közötti hozam

A: rétegben kialakuló lineáris nyomásveszteség

B: a kút környezetében kialakuló lineáris nyomásveszteség

C: a kút környezetében kialakuló nem lineáris nyomásveszteség

P: a kút környezetében kialakuló nem lineáris nyomásveszteség kitevője  
(Halford és Hanson, 2002)

A modellezés során az MNW2 modul használatakor meg kell adnunk azt, hogy milyen szivárgási veszteséggel számoljon a program. A veszteségeket többféleképpen tudjuk

számolni, amelyek opcióit legördülő listából tudjuk kiválasztani. A veszteségek számítására az alábbi opciók választhatók:

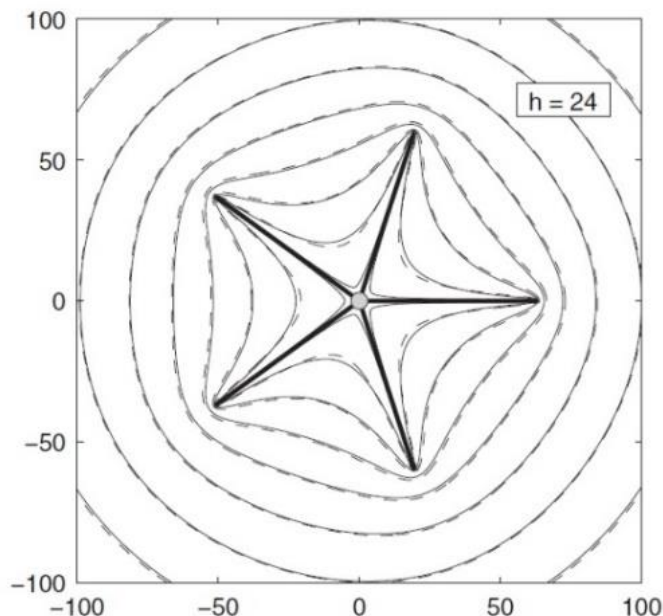
- NONE: nincs veszteségi korrekció. A kútban lévő potenciálérték egyenlő a cellában lévő potenciálértékkal. Ez az opció egyenértékű a MODFLOW WEL csomagjával.
- THIEM: a kút-cella korrekciót a Thiem egyenlet alapján számolja a program (Thiem, 1906). Az 5. képlet ez esetben a következőre módosul:  $h_{WELL} = h_n + A Q_n$ . Az A paramétert a program a kút sugarából számítja. Bemenő paraméterként a kút sugarat kell megadnunk.
- SKIN: Azt a hatást veszi figyelembe, amikor is a szűrők körül egy megváltozott, általában csökkent szivárgási tényezőjű zóna jön létre. Az 5. egyenlet ez esetben a következőre módosul:  $h_{WELL} = h_n + A Q_n + B Q_n$ . Ekkor bemenő paraméterként a skin zóna sugarát ( $R_{skin}$ ), és szivárgási tényezőjét ( $k_{skin}$ ) kell megadnunk, amelyből a program a B paramétert számolja.
- GENERAL: az áramlási veszteség az A, B, és C együtthatókkal egyaránt figyelembe van véve. A program az 5. egyenlettel számol, ahol bemenő paraméterként meg kell adnunk a kút sugarát ( $R_w$ ), valamint a B, C, és P paramétereket.
- SPECIFYcwc: ebben az esetben bemenő paraméterként a kútgeometria mellett a kút-cella konduktancia érték (cell-to-well conductance) kézi megadása szükséges, amely érték a kút (jelen esetünkben a csáp), és a cella közötti hidraulikus vezetőképességet adja meg (Konikow és társai, 2009).

Munkám során a csápos kutak hidraulikai szimulációit véges differencia módszerrel végeztem el. A csápok horizontális kialakítása miatt célszerűek tűnt, hogy a véges differencia módszert alkalmazó MODFLOW program MNW2 modulját alkalmazzam. Ezen kúttípusok hidraulikai vizsgálataiban az MNW2 modul alkalmazhatóságát is meghatározom. A választott parti szűrésű ivóvízbázis vizsgálatára is alkalmas a véges differencia módszer, így az MNW2 modult valós vízföldtani környezetben is tesztelni tudom.

### 3. Elméleti alapok és számítások a csápos kutak vonatkozásában

#### 3.1. A Revised Multi-Node Well (MNW2) modullal végzett összehasonlító vizsgálatok

A MODFLOW MNW2 szoftver blokk-központú véges differencia módszert (FD) alkalmaz, amely a cellák középpontjához egy csomópontot rendel. Azt, hogy a szoftver csápos kutak hidraulikai szimulációjára való alkalmasságát megismerjük, független, más módszerekkel történő összehasonlítás szükségeltetik. Bakker és szerzőtársainak (Bakker, 2005) vizsgálata alapjául szolgált az MNW2 modul alkalmazási lehetőségeinek megismerésére. A szerzők az analitikus elemek módszerével (3D AEM, Multi Layer AEM) vizsgált egy ötágú csápos kút típust, amelyet a **17. ábra** mutat.



17. ábra: A Bakker és szerzőtársai által alkalmazott csápos kút elrendezés (Bakker és társai, 2005).

A modell főbb paramétereit a 3. táblázat tartalmazza. Fontos körülmény az összehasonlítás szempontjából, hogy mindkét kúttípusnál körvonal menti utánpótlódással számoltam, és a tápterület határa a kutak közepétől számított 100 m távolságban van. A feltételezett földtani közeg homogén és izotróp. A szimuláció áramlástól mentes hidraulikai környezetben, vízszintes kezdeti nyomásszint mellett történik. Peremfeltételként állandó nyomású peremet használtam, amely segítségével a kialakíthattam a körvonal menti utánpótlódást.

3. táblázat: Az alkalmazott modell főbb paramétereit

	Ötágú csápos kút
Szivárgási tényező (m/d)	150
Modell vastagsága (m)	24
Csápok mélysége (m)	21
Csápos kút hozama (m <sup>3</sup> /d)	60 000
Csáphossz (m)	60
Csápok belső sugara (m)	0,15

Az MNW2 modul használatakor, annak érdekében, hogy a használt peremfeltételek hatása, valamint a csápok egyedi hatása ne legyen jelentős, megfelelő nagyságú modellméretet kellett alkalmaznom. Van Tonder nyomán az utánpótlódási terület sugarát a csáphossz legalább ötszörösével kell felvenni ahhoz, hogy a csápok egyedi hatása ne jelentkezzen és körvonal menti utánpótlódással számolhassunk (Van Tonder és társai, 2002).

A modellterület méretét geometriai okok miatt 602x602 m-re választottam. Ezzel a modellmérettel a Van Tonder-féle kritérium (Van Tonder és társai, 2002) is teljesíthető, valamint ezáltal biztosítva van az, hogy a csápos kút pontosan a modell közepén helyezkedjen el, biztosítva a modell szimmetriáját. A rétegrendet tekintve a Bakker és társai által használtat alkalmaztam, amelyek fedője rendre a következő magasságokban értendők: 24; 16; 11; 7; 5; 4,05; 3,45; 3,15; 2,85; 2,55; 1,95, és 1 m.

Két esettel próbáltam közelíteni, és összehasonlíthatóvá tenni a modelleket. Egyik esetben öt különálló, egyenként 12 000 m<sup>3</sup>/nap hozamú vízszintes kúttal szimuláltam a csápos kút csápjait, másik esetben a kút csápjait egyben, egy 60 000 m<sup>3</sup>/nap hozamú kútként definiáltam. Az MNW2 modul által számított adatokat a Bakker és szerzőtársai által számított értékeken kívül a Székely Ferenc által fejlesztett fél-analitikus CW (Székely, 2015) és numerikus FLOW (Székely, 1998) szoftverek eredményeit is felhasználtam az összehasonlítás során. Az összehasonlítás alapját a különböző pontokon számított vízszintek és vízszintkülönbségek, valamint a csápmenti hozameloszlás vizsgálatait adták.

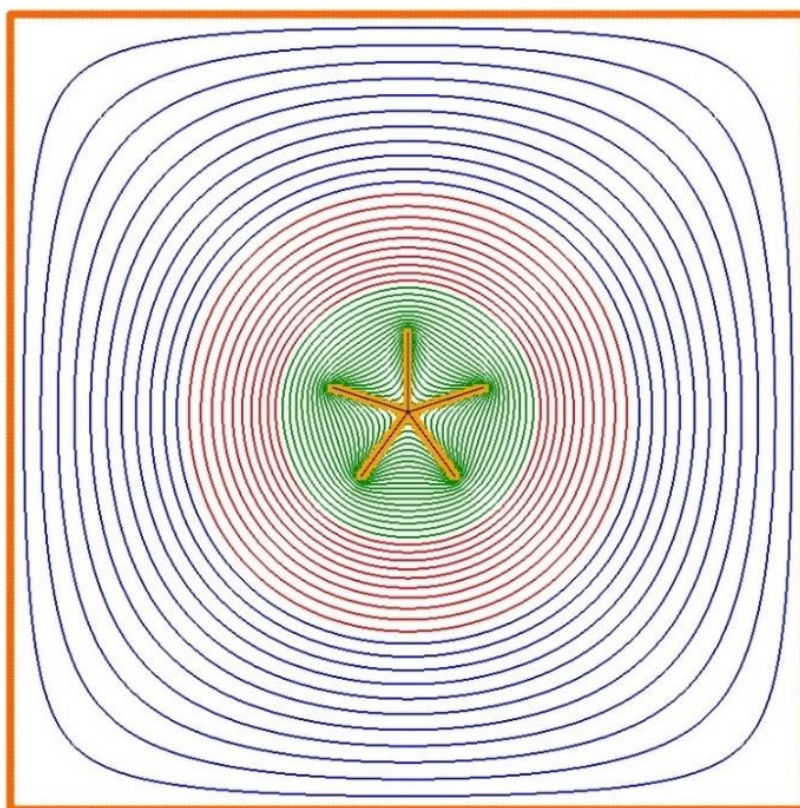
A 4. táblázatban láthatóak azok a vízszint értékek és vízszint különbség értékek összehasonlítása. A táblázatban használt jelölések a következők:

- $dH_1$ : a kútaknában kialakuló nyomásszint, és a tápterület határán lévő nyomásszint különbsége méterben kifejezve
- $dH_c$ : a talajvíz nyomásszintje és a kútaknában kialakuló nyomásszint különbsége méterben kifejezve
- $H_c$ : a kútaknában kialakuló vízszint méterben kifejezve.

4. táblázat: A modellezés eredményeképpen kapott vízszintkülönbségek összehasonlítása.

Módszer	ML AEM	3D AEM	analitikus	FHN	1 csápos kút	<b>1 csápos kút</b>	5 különálló vízszintes kút
Szoftver			CW	FLOW	FLOW	<b>MNW2</b>	FLOW
dH <sub>1</sub> (m)	2.56	2.57	2.523	2.53	2.586	<b>2.635</b>	2.568
dH <sub>c</sub> (m)	0.7	0.64	0.664	0.676	0.645	<b>0.655</b>	0.656
H <sub>c</sub> (m)	20.74	20.79	20.813	20.794	20.769	<b>20.71</b>	20.776

A 4. táblázatban látható, hogy az MNW2 által számított vízszintek nem maradnak el a többi módszer alkalmazásával számított vízszintektől. Abban az esetben, amikor egy csáposkútként definiáltam a vízkivételi művet, a vízszintek tekintetében jó egyezést kaptam a többi módszerrel összevetve. A kúthidraulikai veszteségeket ebben az esetben a CWC opció használatával vettem figyelembe. A CWC paraméter beállítása az úgynevezett „trial and error” módszerrel került meghatározásra, amelynek segítségével, a futtatási sorozatnak eredményeképpen, a CWC paraméter kézi beállításával a jó egyezést kaptam a vízszintekre vonatkozóan.



18. ábra: Az MNW2 modul használatával kialakult potenciálszintek, és áramlási tartományok (Székely és társai, 2021; Nyíri és társai, 2019).



A legjobb egyezés eredménye egy olyan vízszinteloszlás-térkép, amelyen három jól elkülöníthető áramlási zónát tudunk elkülöníteni (**18. ábra**). A három áramlási zóna a következő:

- csápok hatását mutató, áramlási tartomány (zöld)
- radiális áramlási tartomány (piros)
- peremfeltétel hatását mutató áramlási tartomány (kék).

A **18. ábra** markáns radiális áramlási tartományt mutat (piros vonalak), ami jelzi, hogy a Bakker és szerzőtársai által feltételezett markáns körvonalmenti utánpótlódást az általam felépített modellezési körülmények is teljesítik. A fenti eredmények alapján a következő tézist fogalmaztam meg.

### **I. Tézis:**

**Szimulációs vizsgálatok segítségével bebizonyítottam, hogy a MODFLOW MNW2 moduljának segítségével a csápos kutak termelése során a kútaknában és környezetében kialakuló depresszió megbízhatóan számítható homogén, izotróp közegben. A csápos kutak kivitelezési sajátosságai geometria és szivárgási veszteségek tekintetében egyaránt figyelembe vehetők az MNW2 modul alkalmazásával. Ezáltal a víztermelés hatására kialakuló depressziós tér pontosabban számítható.**

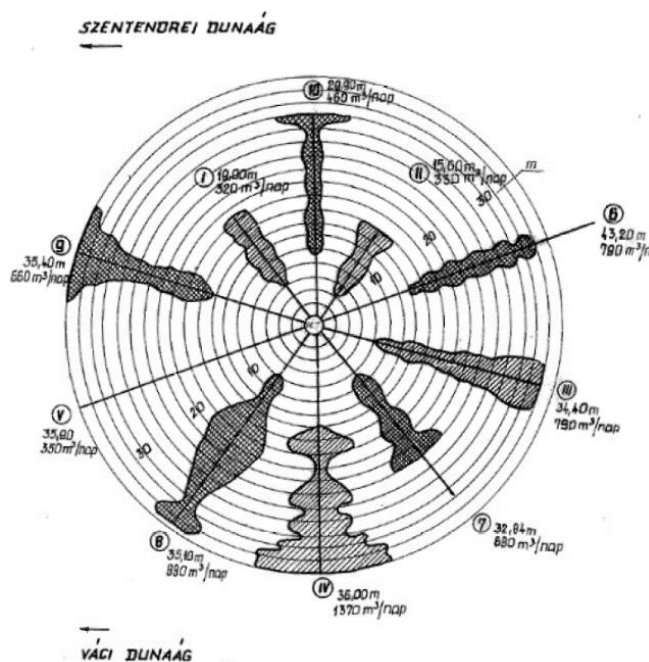
A csápos kutak vizsgálata során a vízszintek, és vízszintkülönbségek mellett a csápok hozamait, valamint a csápmenti hozameloszlást is vizsgáltam. A csáphozamokkal a Bakker és társai által írt cikk nem foglalkozik, így a Székely Ferenc által alkalmazott program (Székely, 2020) eredményit vettem figyelembe az összehasonlítás során. Az 5. táblázat mutatja az MNW2 által számolt hozamokat csáponként lebontva. A hozamokat a cellák vízforgalmából állapítottam meg. Azon cellák hozamát, amelyek a geometria miatt több csáp is érint, szétosztottam a cellát érintő csápok között és ezt külön jelöltem a táblázatban. Ezen hozamelosztás a közeg homogén és izotróp mivolta miatt alkalmazható. A táblázatból látható, hogy az északi csápra szimmetrikus a rendszer, a hozam értékek szimmetriát mutatnak. A teljes csáposkút hozama ( $Q_e$ ) elhanyagolható mértékben ( $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{nap}$ ) tér el a Bakker és szerzőtársai által alkalmazott  $60\,000 \text{ m}^3/\text{nap}$  értékhez képest.

5. táblázat: Az MNW2 modul használata esetén kapott csáp-hozam értékek.

Csáp száma és iránya	Csápok hozama (m <sup>3</sup> /nap)	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /nap)	hozam eltérés (%)
1 – É	10942.261 + 20.812	10963.074	-8.641
2 – ÉK	12146.123 + 20.812	12166.936	1.391
5 – ÉNY	12146.130 + 20.812	12166.942	1.391
3 – DK	12283.016 + 20.812 + 47.699	12351.528	2.929
4 – DNY	12283.008 + 20.812 + 47.699	12351.519	2.929
Középső cella hozama, amelyet öt csáp érint		104.062	
A 3-as és 4-es csáp által érintett cella hozama		95.398	
<b>Q<sub>e</sub></b>		<b>59999.99989</b>	<b>-0.001</b>

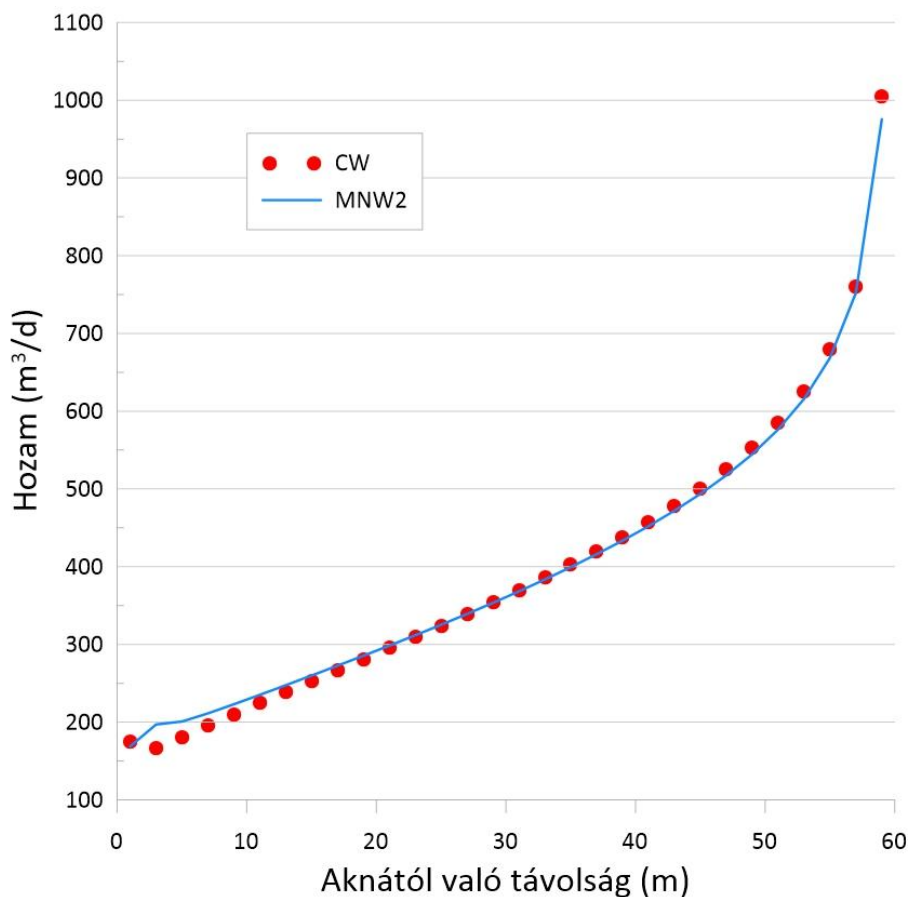
Abban az esetben tehát, amikor a csápos kutat egy kútként definiáltam, és a CWC opciót használtam a szivárgási veszteségek figyelembevételére, a kialakuló vízszintekre és vízszintkülönbségekre jó egyezést kaptam a többi módszerrel. A csáponkénti hozamösszegek esetében szimmetria tapasztalható, valamint ugyancsak jó egyezést kaptam a FLOW szoftver eredményeivel.

A csápos kutak hidraulikai vizsgálatainak során bebizonyosodott, hogy a csáp mentén haladva az áramlási sebesség (és ezáltal állandó keresztmetszet lévén a csápra belépő hozam is) változik. A Szentendrei-sziget csápos kútjainak reométeres vizsgálatai is kimutatták (19. ábra), hogy az áramlási sebesség a csáp legtávolabbi pontjától, a kútaknához közeledve csökken (Székely, 2011).



19. ábra: A Szentendrei-sziget egyik csáposkútjának csápjában mért hozam értékek változása (Székely, 2011).

Célszerűnek találtam tehát, hogy a Bakker-teszt vizsgálata terjedjen ki a csáp mentén belépő hozam, vagyis a csápmenti hozameloszlás vizsgálatára is. Az északi csáp esetében előáll az a kedvező geometriai szituáció, hogy a csáp iránya megegyezik a rácsháló oszlopainak irányával. Ez esetben meg lehet vizsgálni a cellák vízforgalmát és a csáp mentén végig haladva meg lehet határozni a csáp menti hozameloszlást. Felépítettem tehát egy olyan modellt a koherencia érdekében, hogy az öt csápot külön-külön vízszintes kutakként definiáltam, egyenként  $12\,000\text{ m}^3/\text{nap}$  hozammal. A kútban és környezetében előálló veszteségek figyelembevételéhez a THIEM opciót alkalmaztam. Egy cella mérete a használt modellben  $2 \times 2\text{ m}$ , így  $2\text{ méteres}$  felbontásban megállapítható a hozameloszlás a csáp mentén. Az összehasonlítás alapját itt a CW modellezési eredmények adták. A **20. ábra** mutatja a  $60\text{ m}$  hosszú csáp mentén a  $30$  beáramlási adatot a CW (pontok) valamint az MNW2 (vonal) modellezés esetében. A **20. ábra** jól mutatja, hogy a csáp menti hozam értékek között elhanyagolható mértékű eltérés van. Mindezek alapján megállapítható, hogy az MNW2 modul alkalmazható csápos kutak hidraulikai szimulációjára mind a vízszintek, mind pedig a csáphozamok tekintetében.



20. ábra: A csáp menti hozameloszlás összehasonlítása.

## II. Tézis:

**Munkám során a MODFLOW MNW2 moduljának csápmenti hozameloszlásra vonatkozó számítási eredményeit összehasonlítottam a CW szoftver által számított eredményekkel. Ezen szimulációs vizsgálatok segítségével bebizonyítottam, hogy a MODFLOW program MNW2 moduljának segítségével a csápos kutak csápjai mentén belépő hozam eloszlása homogén, izotróp közegben megfelelő pontossággal számítható. Mindezek alapján megállapítható, hogy az MNW2 modul alkalmas csápos kutak hidraulikai szimulációjára.**

### 3.2. Csápos kutak hozamának vizsgálata

Munkám során az MNW2 modul csápos kutak hidraulikai modellezésére való alkalmasságát bizonyítva lehetőség adódott a csápos kutak kialakításához, valamint folyótól való távolságához kapcsolódó vizsgálatok elvégzésére. A parti szűrésű rendszerekre telepítendő kutak esetében több tényező befolyásolja a kitermelhető hozamot és a kialakuló potenciálszinteket. A fenntartható módon kitermelhető vízmennyiséget befolyásolja maga a földtani környezet, ahova az adott csápos kút telepítjük, a kút műszaki kialakítása, valamint a folyóhoz viszonyított helyzete. Ezek közül a földtani adottság egy olyan tényező, amelyet csak nagyon kismértékben, vagy egyáltalán nem tudunk megváltoztatni. Ilyen adottság a vízáadó réteg szivárgási tényezője, porozitása, a mederkapcsolati hatások stb. Egy új kút telepítésénél azt tudjuk megválasztani, hogy milyen távol legyen a kút a folyótól, valamint a csápokot milyen számban és irányban hajtsuk ki. Megválaszthatjuk továbbá a kút üzemelése során termelt hozamot, (bár ez is egyfajta igényként merülhet fel) amely vízigényt a kút üzemelése során igyekeznünk kell teljesíteni. Ezen műszaki paraméterek megfelelő megválasztásával el tudjuk azt érni, hogy a csápos kút üzemelése során kedvező hidraulikai körülmények és optimális üzemeltetés alakuljon ki. Ilyen optimális körülmény lehet például, hogy a kút kevés vizet termeljen a háttérből és a vízáadóban való minimális tartózkodási idő kritériuma is teljesüljön.

A csápos kutak telepítése esetén az alábbi követelményeket támasztjuk tehát az üzemelő rendszerrel szemben:

- képes legyen a vízigény kielégítésére, vagyis termelni tudja a megadott hozamot,
- a háttérből származó víz aránya alacsony legyen,

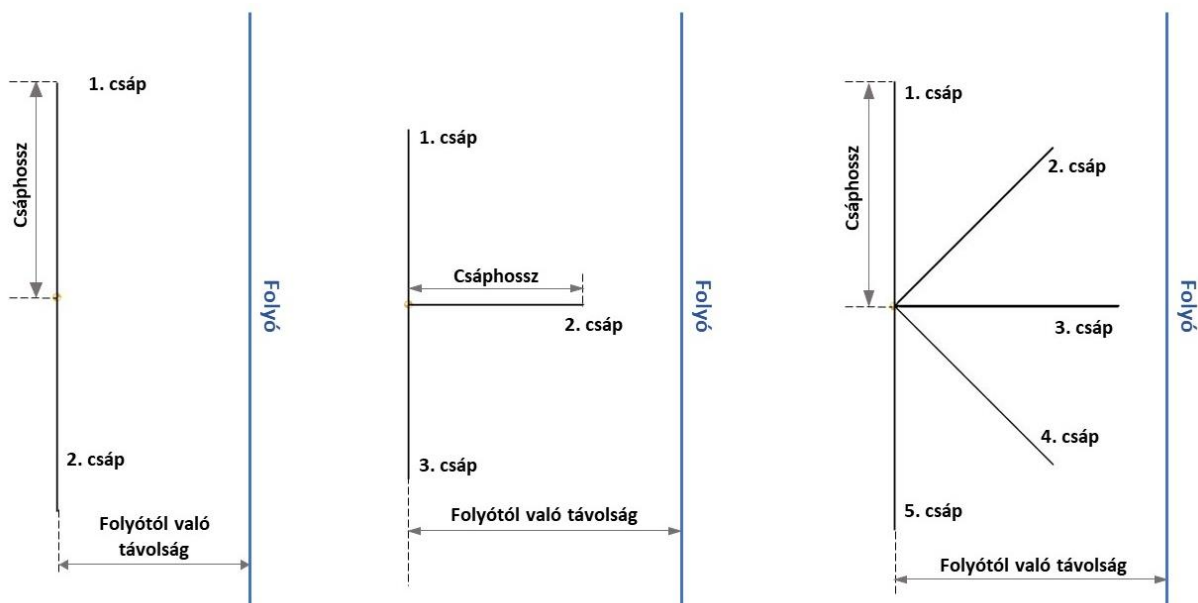
- a termelt víz töltsön elég időt a vízáadó rétegben annak érdekében, hogy a parti szűrés folyamata a legnagyobb tisztítási hatásokkal működjön.

A megfelelő kialakítás megválasztásához azonban tudnunk kell, hogy milyen mechanizmusok játszódnak le a csápok számának és irányának változtatása esetén, illetve a folyótól való távolság változtatásának esetén. Ezen tendenciák, szivárgási mechanizmusok vizsgálatához a modellezés eszközt választottam. Az MNW2 modul segítségével szimulálni tudom a csápos kutak által kialakuló szivárgási körülményeket, valamint követni tudom a csápos kút termelésének hatására kialakuló vízforgalmat és a potenciálszinteket. A vizsgálatokhoz egy olyan alapmodellt alakítottam ki, amely segítségével a csápos kút kialakításának szivárgási viszonyokra gyakorolt hatása, valamint a folyótól való távolságának hatása vizsgálható. A felépített modell a már ismertetett Bakker-féle modell módosított változata. A modellezett terület 850 m kelet-nyugati irányban, valamint 600 m észak-déli irányban. A cellák 2 m x 2 m kiterjedésűek, valamint a rétegek fedőszintje megegyezik a Bakker-féle modell rétegeinek fedőszintjével. A modellezett tér homogén és izotróp, a földtani és a szivárgást jellemző paraméterek a Bakker-féle modelltől átvett értékek. A modell keleti részén egy folyót definiáltam 250 m szélességben. A folyó 12 m mély és a folyóban lévő vízszint megegyezik a legfelső réteg fedőszintjével.

A mederkapcsolati hatások meghatározásakor egy jó folyó-vízáadó kapcsolatot feltételezve  $170 \text{ (m}^2/\text{nap)} / (\text{m}^2)$  értéket vettem fel. A modell egy időben állandó, steady-state állapotot feltételez. A termelt hozamot tekintve három különböző scenáriót vizsgáltam. A három hozamérték  $20\,000 \text{ m}^3/\text{nap}$ ,  $40\,000 \text{ m}^3/\text{nap}$  és  $60\,000 \text{ m}^3/\text{nap}$ .

Manapság a parti szűrésű rendszerek termelésénél fontos lehet az a kritérium, hogy a háttérből származó víz minél kisebb arányban jelenjen meg a termelőkútban, ugyanakkor a megfelelő tartózkodási időt is eltöltse a vízáadó rétegben a folyóból származó víz annak érdekében, hogy a parti szűrésre jellemző fizikai és kémiai tisztítási folyamatok mindinkább érvényesüljenek. Ennek érdekében három különböző kúttípust építettem be a modellbe, amelyet a 21. ábra szemléltet. A kúttípusok közös jellemzője, hogy a csápok a folyó felé, vagy a folyóval párhuzamosan vannak kihajtva, a háttér felé nem nyúlik ki csáp, valamint alkalmazásuk igen gyakori a parti szűrésű rendszerek víztermelésénél (Houben és társai, 2021). Ezen csápelrendezés használata akkor kerül előtérbe, amikor a folyó felőli utánpótlódást kívánjuk növelni (Moore és társai, 2011). Ezen kúttípusok kiválasztásának másik oka, hogy a véges differencia módszernél alkalmazott rácsháló ezen csápirányok esetén fedi le egyértelműen a csápokot, ezáltal biztosítva azt, hogy a cellákban

a vízforgalom egyértelműen definiálható legyen. A kutak elhelyezéséről elmondható, hogy a kútakna a modellezett terület közepére került, ezáltal minden csáp a cellák közepén halad át. A középre történő elhelyezés biztosítja a modell szimmetriáját, tehát a hozamértékek és a kialakuló áramvonalak a modell kelet-nyugat irányú középvonalára szimmetrikusak. A szimulált csápos kutak csápjai 60 m hosszúak, átmérőjük pedig 0,3 m. Ezen kúttípusok termelését úgy szimuláltam, hogy a kútaknak folyótól való távolságát változtattam 10 m és 80 m-es intervallumban. Ezzel a vizsgálattal elsősorban a folyóhoz közeli régióban történő változásokat szerettem volna követni. Ebben a távolságokban várható annak hatása, hogy a csáp beér-e a folyó alá, vagy sem, illetve a folyó hidraulikai hatása is ebben a régióban érvényesül a legmarkánsabban. A csápos kút és a folyó elrendezésének sematikus vázlatát a **21. ábra** mutatja.



21. ábra: A vizsgált csápos kút típusok csápjainak elrendezése.

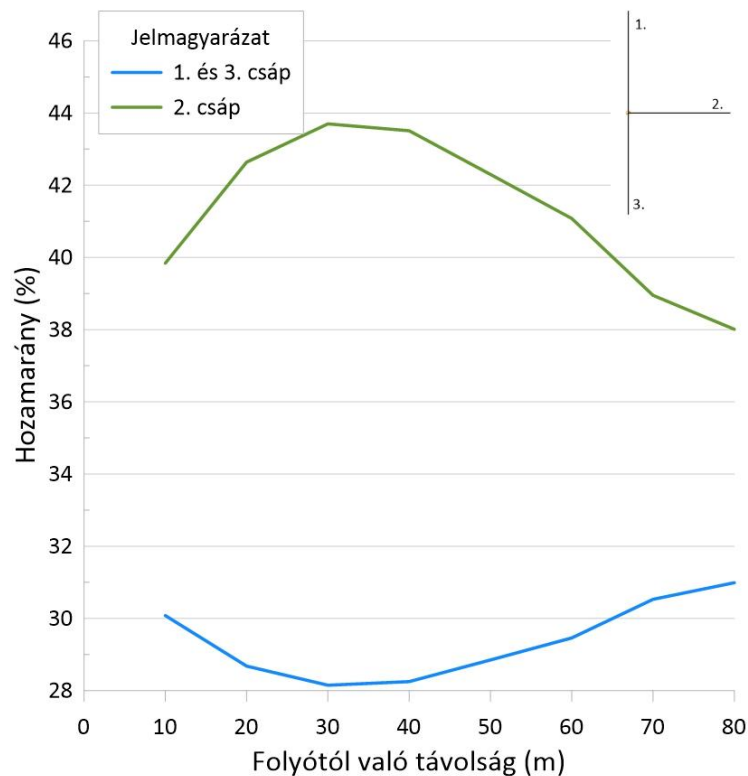
A három kúttípus vizsgálatánál alapesetnek vehetjük az egyirányban galéria szerűen kialakított csáposkutat. Ehhez az alapesethez viszonyítva számoltam a három-, illetve öt csáppal rendelkező csáposkutak által kialakult hozam-, és potenciálviszonyokat. A hozam vizsgálatokor meghatároztam a különböző csápok által termelt hozamarányt, valamint a csápok mentén kialakuló hozameloszlás változását. A csápok által termelt hozamok arányának változását a 6. táblázat mutatja.

6. táblázat: A csápok hozamának aránya a teljes kúthozamhoz viszonyítva.

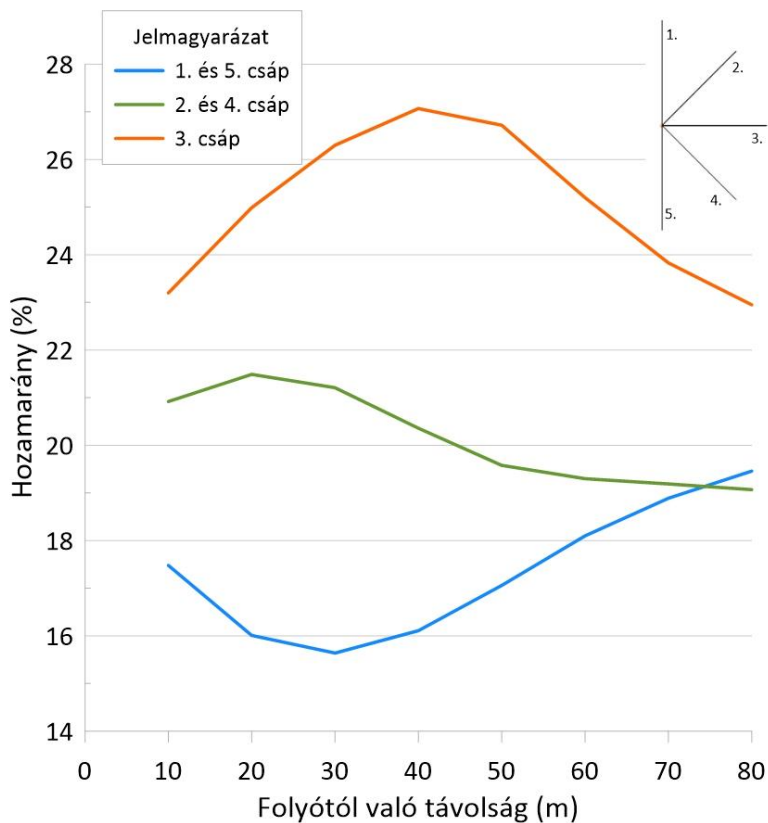
Folyótól való távolság (m)	Hozamarány (%)									
	2 csáp		3 csáp			5 csáp				
	1. sz. csáp	2. sz. csáp	1. sz. csáp	2. sz. csáp	3. sz. csáp	1. sz. csáp	2. sz. csáp	3. sz. csáp	4. sz. csáp	5. sz. csáp
10	50	50	30.08	39.84	30.08	17.48	20.92	23.2	20.92	17.48
20	50	50	28.68	42.64	28.68	16.01	21.49	24.99	21.49	16.01
30	50	50	28.15	43.7	28.15	15.64	21.21	26.3	21.21	15.64
40	50	50	28.25	43.51	28.25	16.11	20.36	27.07	20.36	16.11
50	50	50	28.85	42.3	28.85	17.06	19.58	26.72	19.58	17.06
60	50	50	29.46	41.08	29.46	18.1	19.3	25.2	19.3	18.1
70	50	50	30.53	38.95	30.53	18.89	19.19	23.83	19.19	18.89
80	50	50	30.99	38.01	30.99	19.46	19.07	22.95	19.07	19.46

A fenti táblázatból látható, hogy a két csáppal rendelkező csápos kutat kivéve a másik két esetben a csápok hozamarányai a távolsággal változnak. A két csáppal rendelkező csáposkút esetében a csápok hozamaránya kiegyenlített képet mutat minden távolságban.

Ha a 3 csáppal rendelkező csápos kutat vizsgáljuk (**22. ábra**), a következők mondhatók el: A folyótól távolodva a folyóhoz közeli csáp termelési aránya növekvő tendenciát mutat, ezzel együtt a folyóval párhuzamos 1-es és 3-es számú csáp hozamaránya csökken. Ez a tendencia 30 m távolságban megváltozik és a két görbe egymás felé kezd közeledni. Megállapítható tehát, hogy a folyóhoz közeli régióban a csápok hozamaránya kiegyenlített képet mutat. A folyótól távolodva ez a kiegyenlítettség felborul, majd a folyótól bizonyos távolságban újra a kiegyenlítettség felé törekszik. Látható tehát, hogy ebben az esetben a 30 m-es távolságban a csápok hozamaránya a legkiegyenlítetlenebb. Ebben a távolságban a folyó felé kialakított csáp majdnem 44 %-ot ad a termelt hozamból, a másik két csáp pedig 28-28 %-ot termel az összhozamból. Az 5 csáppal rendelkező csápos kút esetében a **23. ábra** mutatja a csápok hozamarányának változását a folyótól való távolság függvényében. A **23. ábra** görbéin látható, hogy az 1. számú csáp csökkenő, majd emelkedő tendenciát mutat ugyanúgy, mint az előző esetben. A folyó felé nyúló csápok esetében látszik a hozamarány emelkedése, majd csökkenése, azonban a hozamarány maximuma más helyen mutatkozik. A 2. számú csápnál 20 m-nél, a 3. számú csápnál pedig 40 m-nél található a hozamarány maximuma.



22. ábra: A csápok közötti hozamarány alakulása a folyótól való távolság függvényében 3 csáp esetén.



23. ábra: A csápok közötti hozamarány alakulása a folyótól való távolság függvényében 5 csáp esetén.



A gyakorlat szempontjából fontos tényező a csáposkút folyótól való távolságának meghatározása. Elmondható, hogy a folyótól való távolság függvényében a csápok termelési aránya változik. Ennek a jelenségnek hatása azonban kútüzemeltetés szempontjából fontos információ lehet, hiszen azonos földtani körülmények között célszerű, ha a csápok hasonló mértékű hidraulikai terhelést kapnak. Ha a kút egyik csápa nagyobb terhelést kap, akkor nagyobb a kockázata annak is, hogy ha az adott csáp, illetve a vízáadó rétegben kialakult szűrőváz sérül, akkor csökken a kút által kitermelhető hozam. Célszerű tehát a nem kiegyenlített hozamarányokkal rendelkező zóna elkerülése annak érdekében, hogy a kút csápai minél egyenletesebb hidraulikai terhelést kapjanak. Mindezek által a kút folyótól való távolságának megválasztása az egyenletes partélterhelés követelményét is befolyásolhatja.

A modellezés során vizsgálatom a csáp menti hozameloszlást és annak változását. Amint az előző fejezetben már említésre került, a beáramló hozam nem egyenletesen oszlik el a csápos kút csápai mentén. Megfigyelhető, hogy a modellben definiált csápok különböző módon harántolják a cellát. Az egyik esetben a rácsháló orientációjával megegyező irányban, a másik esetben pedig ehhez képest 45°-os szögben. Ez azt eredményezi, hogy egy adott cellát a két esetben más hosszban keresztezi a csáp. A különböző csáp elrendezések vizsgálatakor nem elég pusztán azon cellának a vízforgalmát a modell eredményfájlijából kigyűjteni, amelyben a kút definiálva van. Ha a csáp menti hozameloszlást reprezentatív módon kívánjuk kezelni, akkor a fajlagos hozamértékeket kell vizsgálnunk. Az egységnyi csáphosszra vetített, a csápa belépő fajlagos hozamot az alábbi összefüggéssel lehet számolni:

$$Q_f = \frac{q_{i,j}}{l_{i,j}} \left[ \frac{m^3}{nap} \right] \quad (6)$$

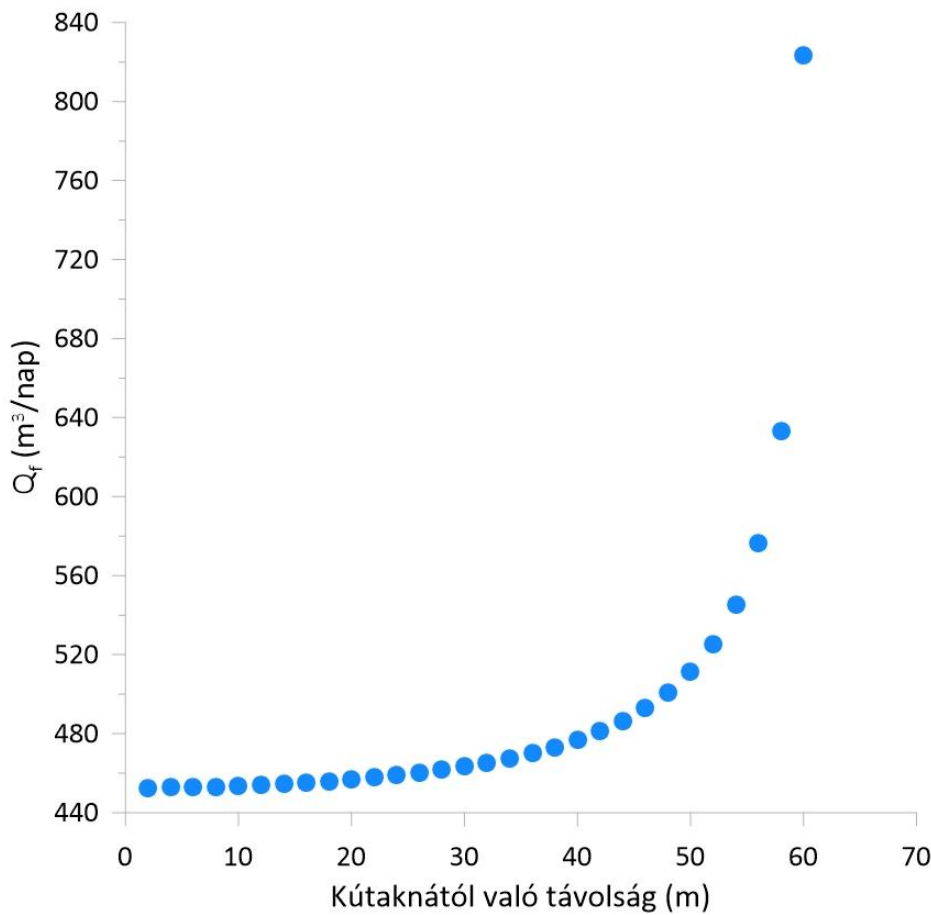
ahol:

$Q_f$ : egységnyi csáphosszra vetített fajlagos hozam

$q_{i,j}$ :  $i$ -edik csáp  $j$ -ik cellájának hozama,

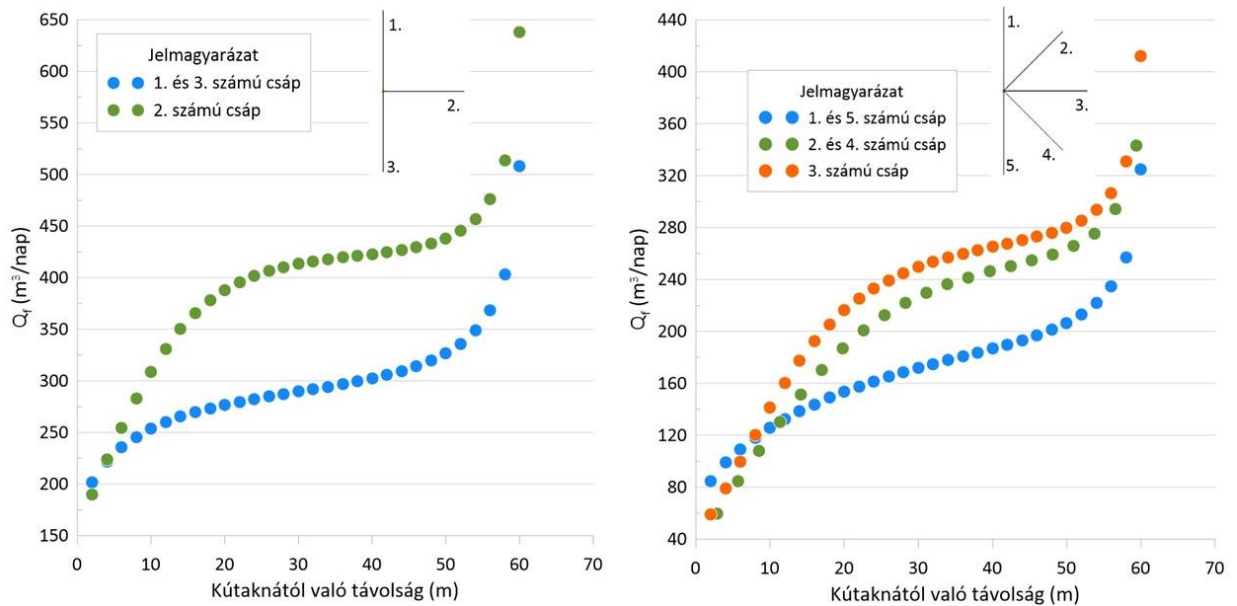
$l_{i,j}$ :  $i$ -edik csáp  $j$ -edik celláján átmenő csápszakasz hossza.

Egy cellához tartozó fajlagos hozam érték tehát a cellában egy méternyi csáphosszra vetített hozamot takar. A következőkben ezen fajlagos hozam értékeket mutatom be. A két csáppal rendelkező csápos kút esetén a **24. ábra** mutatja az „alap eset”, tehát a két csáppal rendelkező kút hozameloszlását.



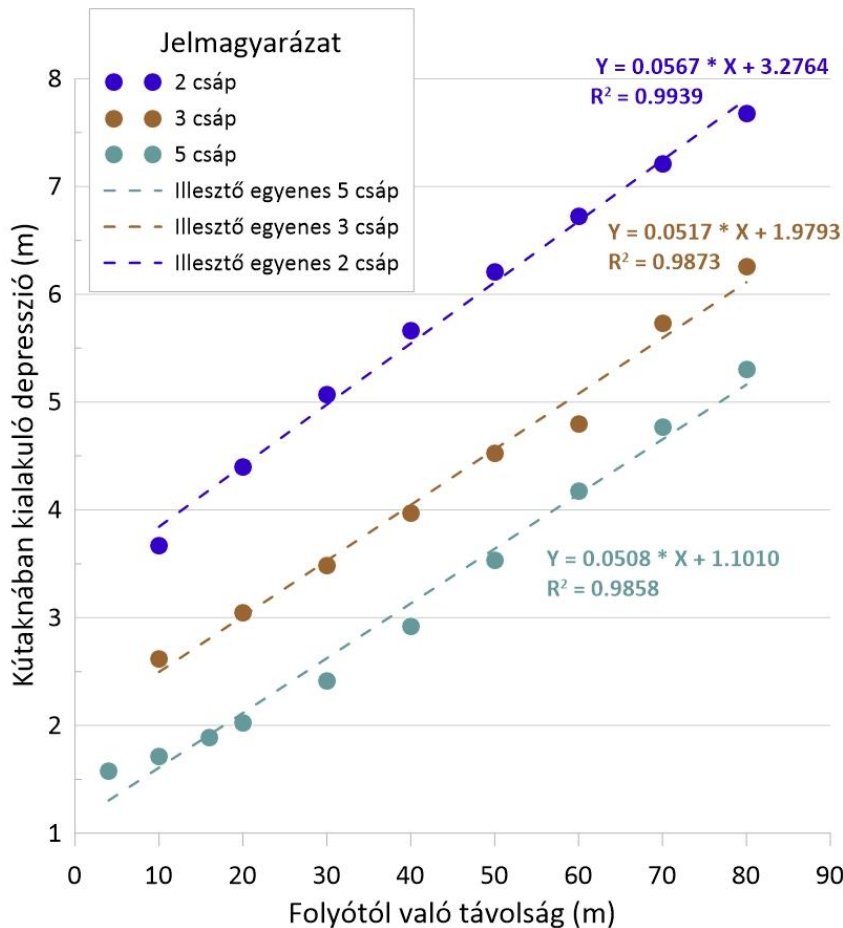
24. ábra: Az egységnyi csáphosszra vetített fajlagos hozam alakulása a csáp mentén a 2 csáppal rendelkező kút esetében.

Ha erre a két csápra merőlegesen elhelyezünk egy harmadik csápot, akkor ez az exponenciális jellegű görbe megváltozik, hiszen a kútakna környezetében a csápok egymásra hatása nagymértékű. Ez az egymásra hatás megváltoztatja a görbe jellegét oly módon, hogy a kútaknától haladva a hozamváltozás görbéjének meredeksége nagy, majd ez a meredekség enyhül, végül pedig ismét nagy meredekségbe vált át (25. ábra). Az 5 csáppal rendelkező csápos kút esetében ez a hatás fokozottabban jelenik meg (25. ábra). Elmondható tehát, hogy a csápos kút kútaknájának közelében a csápok egymásra való hatása jelentősen befolyásolja a csáp menti hozameloszlást. A kútakna környezetében mindegyik csáp esetében lecsökken a hozam, a csáp vége felé haladva pedig jelentős mértékben növekedik. A csápos kutak esetében tehát elmondható, hogy a csápok hidraulikai terhelése a kútaknától a csáp vége felé növekszik. A csápok számának növelése ezt a terheléskülönbséget nagy mértékben fokozza.



25. ábra: A csáp menti hozameloszlás alakulása a 3 csáppal, és az 5 csáppal rendelkező kutak esetében ( $Q = 60\,000\text{ m}^3/\text{nap}$ ).

Munkám során vizsgálataim kiterjedtek a kút termelése által okozott depresszió változásának a vizsgálatára. A három különböző csápos kút által okozott depresszió vizsgálatát szemlélteti a **26. ábra**. A **26. ábra** alapján elmondható, hogy adott folyótól távolságban minél több csápot alakítunk ki egy kútnál annál kisebb depresszióra számíthatunk. Ez fizikailag is magyarázható, hiszen minél kevesebb csápot használunk, a termelésbe bevont térrész mérete csökken, ezáltal a depresszió mértéke növekszik. A nagyobb felületről történő vízkivétel a depresszió csökkenését vonja maga után. Egy adott csápos kút esetében megfigyelhető, hogy a folyótól távolodva a depresszió értéke növekedést mutat. A folyótól távolodva a folyó potenciálszintje egyre kevésbé hat a termelőkútra, ezáltal a termelőkút okozta depresszió mindinkább növekszik az általam vizsgált távolságokban. A depresszió távolságtól való függése a vizsgált tartományban lineáris tendenciát mutat (**26. ábra**).

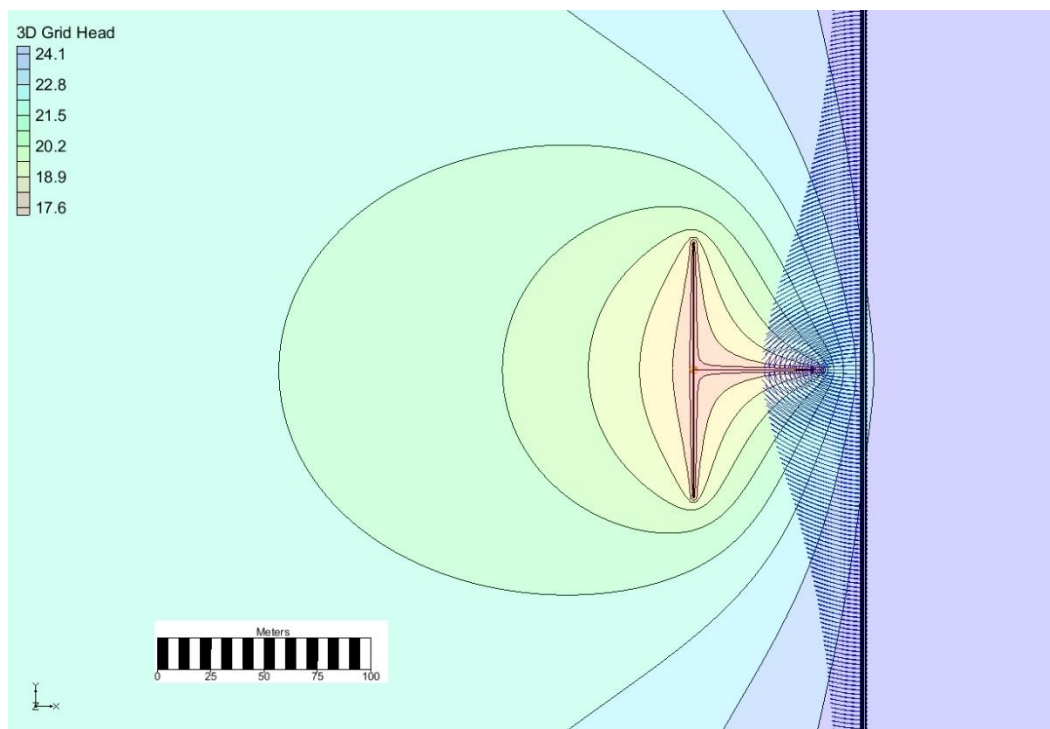


26. ábra: A kútaknában kialakuló depresszió változása a folyótól való távolság függvényében ( $Q = 60\,000\text{ m}^3/\text{nap}$ ).

### 3.3. A tartózkodási idő vizsgálata

Klasszikus értelemben, a csökutak esetében tartózkodási időnek azt az időtartamot tekintjük, ami alatt a folyó medréről a vízadó rétegbe belépő vízcsepe a függőleges kút szűrőjéig, vagyis a kút által meghatározott henger palástjáig elér, másfelől nézve az az időtartam, amit a víz a vízadóban eltölt. Csápos kutak esetében viszont a kút geometriája miatt ez a megközelítés nem teljesen helytálló. A csápos kutak különböző irányban, hosszban és magasságban történő kihajtása miatt a szűrőfelület nem egy függőleges hengerpaláttal, hanem vízszintesen orientált, több irányban kinyúló hengerpaláttal közelíthető. Ebből adódóan egy adott időpillanatban a folyóból a vízadó rétegbe belépő vízcsepek más-más időpontban érik el a csáposokat. Esetünkben a folyóból indított vízcsepek előrehaladását megfigyelve azt tapasztalhatjuk, hogy a folyóból azonos időben indított vízcsepek különböző időtartam alatt érik el az MNW2 által definiált csápos kút celláit. Lesz olyan

vízrészecske, ami hamar odaér a csáp falához, és lesz olyan, ami hosszabb időtartamot tölt a vízáadó rétegben. Ezt a jelenséget szemlélteti a **27. ábra**.



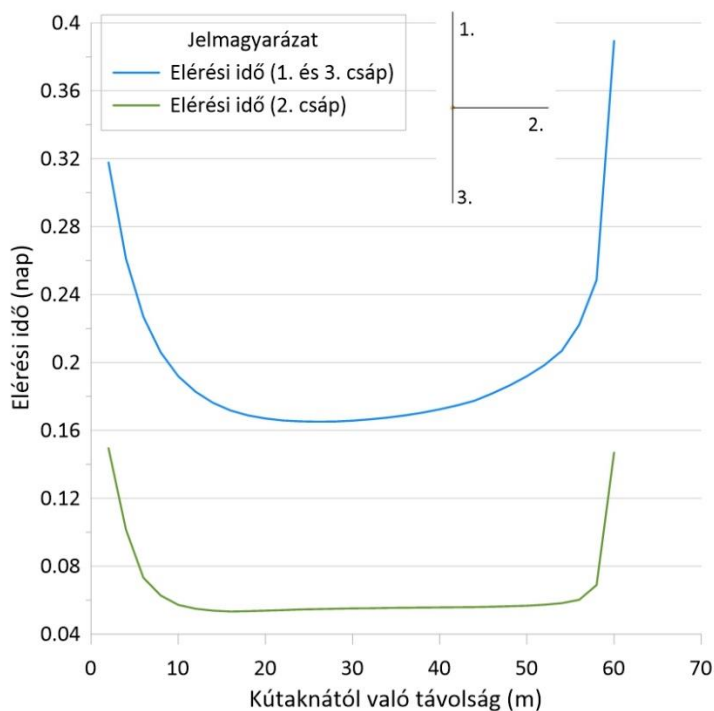
27. ábra: A vízrészecskék 1 nap alatt megtett útjának áramvonalai a 3 csáppal rendelkező kút esetében.

Elmondható tehát, hogy a folyóból indított vízrészecskék különböző elérési idővel – vagy másfelől megközelítve – különböző tartózkodási idővel jellemezhetőek. Ennek a jelenségnek két oka is van: egyrészt, hogy a csápok vízszintes kihajtásával a szűrőfelület folyótól való távolsága nem jellemezhető egy konstans értékkel, másrészt a csápok mentén kialakuló hozameloszlás sem konstans. Ezen két tényező együttes hatása bonyolult áramlási rendszert ad, amelyben a termelt víz tartózkodási idejének meghatározására kulcskérdés lehet. A modellezés során történő vízrészecske követés során a vízrészecske vízáadóban eltöltött tartózkodási ideje mellett a transzportfolyamat advektív komponenséről is információt kapunk. Ez azért fontos számunkra, mert a parti szűrésű rendszerek jó szivárgási tulajdonságokkal jellemezhető vízáadó rétegeiben az advektív transzport nagy jelentőséggel bír (Hiscock és Grischek, 2002). A csápos kutak vonatkozásában vízminőségi és hidraulikai szempontból is fontos a termelés hatására kialakuló áramlási pályák ismerete. A modellezés során történő részecskekövetést a MODFLOW-MODPATH rendszerrel vizsgáltam. A vízrészecskéket első körben a folyóból indítottam, amelynek eredményeképpen elmondható, hogy a vízrészecskék nem egy időben érik el a csáposkutat, így lesz egy olyan vízrészecske,

ami a leghamarabb éri el a csápos kút valamelyik csápját. Ha egy csápos kúthoz tartozó tartózkodási időt szeretnénk meghatározni, akkor az könnyen belátható, hogy a legrövidebb idő alatt eljutó vírzészecske segítségével nem jellemezhető teljes mértékben a termelt víz tartózkodási ideje. Ennek oka egyrészt, hogy a csáp mentén nem konstans a hozam, másrészt a különböző irányban kihajtott csápok különböző szakaszai más-más távolságokban vannak a folyótól. Mindezek alapján megállapíthatjuk, hogy a következő tényezők befolyásolják az adott csápszakaszhoz tartozó elérési időt:

- a csápszakasz folyótól való távolsága,
- a csápszakasz által termelt hozam.

A folyó közelében, a csáp mentén kialakuló elérési idő változását szemlélteti a **28. ábra**. A **28. ábra** azt mutatja, hogy az elérési időnek van egy minimuma a csápok mentén, amely minimum nem a legmagasabb fajlagos hozamértékkel rendelkező csápvégekre tevődik. Ennek oka, hogy a csápok végénél a vírzészecskék útvonala meghosszabbodik, mivel ezen a területen az ekvipotenciális felületek módosulnak. Az elérési idővel kapcsolatban összegzésként elmondható tehát, hogy az elérési idő minimuma nem ugyanazon a csápszakazon van, mint ahol a fajlagos hozam maximuma. A csápok menti elérési idő értékének változása úgy alakul, hogy a kútaknához közeli magas elérési idő értékek a csápvégék felé haladva először csökkenő, majd a csápvégékhez közelítve emelkedő tendenciát mutat.



28. ábra: Az elérési idő változása a 3 csáppal rendelkező csápos kút csápjai mentén ( $Q = 60\,000\text{ m}^3/\text{nap}$ , Folyótól való távolság = 10 m).

A cellánként vizsgált tartózkodási idő értéke fontos, azonban nem elégséges információt ad a termelt víz vízáadó rétegben eltöltött tartózkodási idejéről. Ahhoz, hogy egy jellemző paramétert kapjunk a termelt víz tartózkodási idejéről, figyelembe kell vennünk az adott ponton kitermelt hozamot is. A modellezés során elég sűrű cellaosztás esetén meghatározható az adott cella vízforgalma. A vízforgalom meghatározása mellett lehetőség van az adott cellából vízrészecskéket indítani a tartózkodási idő meghatározásához. Kérdésként merülhet fel, hogy a vízrészecskét a cellán belül honnan indítsuk el. A MODPATH lehetőséget biztosít arra, hogy a cella közepéből, jelen esetünkben a csáp közepéből indítsunk vízrészecskét, így a cella által termelt hozamhoz egy tartózkodási idő adat is tartozhat. Ha tudjuk, hogy az adott csápos kút milyen hozamot termel és a hozam hogyan oszlik el a csápok mentén, akkor megtehetjük azt, hogy a cellákhoz tartozó tartózkodási időt ezzel a hozammal súlyozzuk. Ezáltal megkaphatjuk a kútaknából termelt kevert víz átlagos tartózkodási idejét. Ez a paraméter információt ad számunkra a kútaknából kitermelt kevert víz vízáadóban eltöltött idejéről. Az alkalmazott módszer matematikai leírását az alábbi összefüggés adja meg:

$$T_{\text{átl}} = \frac{\sum q_{i,j} \cdot t_{i,j}}{\sum q_{i,j}} \text{ [nap]} \quad (7)$$

ahol,

$T_{\text{átl}}$ : átlagos tartózkodási idő,

$q_{i,j}$ : i-edik csáp j-ik cellájának hozama,

$t_{i,j}$ : i-edik csáp j-ik cellájához tartozó tartózkodási idő.

Az átlagos tartózkodási idő meghatározásának különböző korlátjai vannak. A modellfelépítés szempontjából az egyik kritérium az, hogy a modell rácshálójának felosztása megfelelő finomságú legyen. Ez előrevetíti azt a helyzetet, hogy nagy kiterjedésű, nagy cellamérettel rendelkező modelleknél a túl nagy felbontás miatt az átlagos tartózkodási idő értékét nem tudjuk megfelelő pontossággal számítani. Geometriai kíváncságot továbbá az is, hogy a rácsháló orientációja megegyezzen a csápok irányával annak érdekében, hogy a cellák vízforgalmát pontosabban tudjuk meghatározni.

Ha egy esetben megvizsgáljuk az elérési idő szélső értékeit akkor nagy változatosságot tapasztalhatunk. A 7. táblázat mutatja a 60 000 m<sup>3</sup>/nap hozammal termelt, a folyótól 30 méterre lévő csápos kúthoz tartozó tartózkodási időket. Látható, hogy a tartózkodási idő mértéke igen széles intervallumban mozog.

7. táblázat: A három csáppal, és 60 000 m<sup>3</sup>/nap hozammal termelő csápos kúthoz tartozó tartózkodási idő értékek.

Csápok száma	3
Folyótól való távolság (m)	30
Hozam (m <sup>3</sup> /nap)	60000
Legkisebb tartózkodási idő (nap)	0,04
Átlagos tartózkodási idő (nap)	3,11
Legnagyobb tartózkodási idő (nap)	219,59

A három tartózkodási idő érték közül a minimum érték azért fontos számunkra, mivel az esetlegesen a folyóból érkező kémiai anyagok ezen idő alatt érhetik el leghamarabb a csápos kutat. Az átlagos tartózkodási idő értéke arra ad nekünk információt, hogy a kútaknába beérkező, és onnan kitermelt kevert víz milyen tartózkodási idővel jellemezhető. A legnagyobb tartózkodási idő értékét vizsgálva megállapítható egyrészt, hogy ehhez az elérési időkhöz a termelt összhozamhoz képest alacsony fajlagos hozam tartozik. Másrészt a folyóból származó esetleges szennyezőanyag ezen az útvonalon tölti el a legnagyobb időt a vízáradó rétegben lehetőséget adva arra, hogy a kémiai, és fizikai tisztító folyamatok hatékonyan játszódjanak le. Mindezek alapján megállapíthatjuk, hogy a legnagyobb tartózkodási idő értéke nem lehet kulcsparaméter a csápos kutak tartózkodási idejének vizsgálatában.

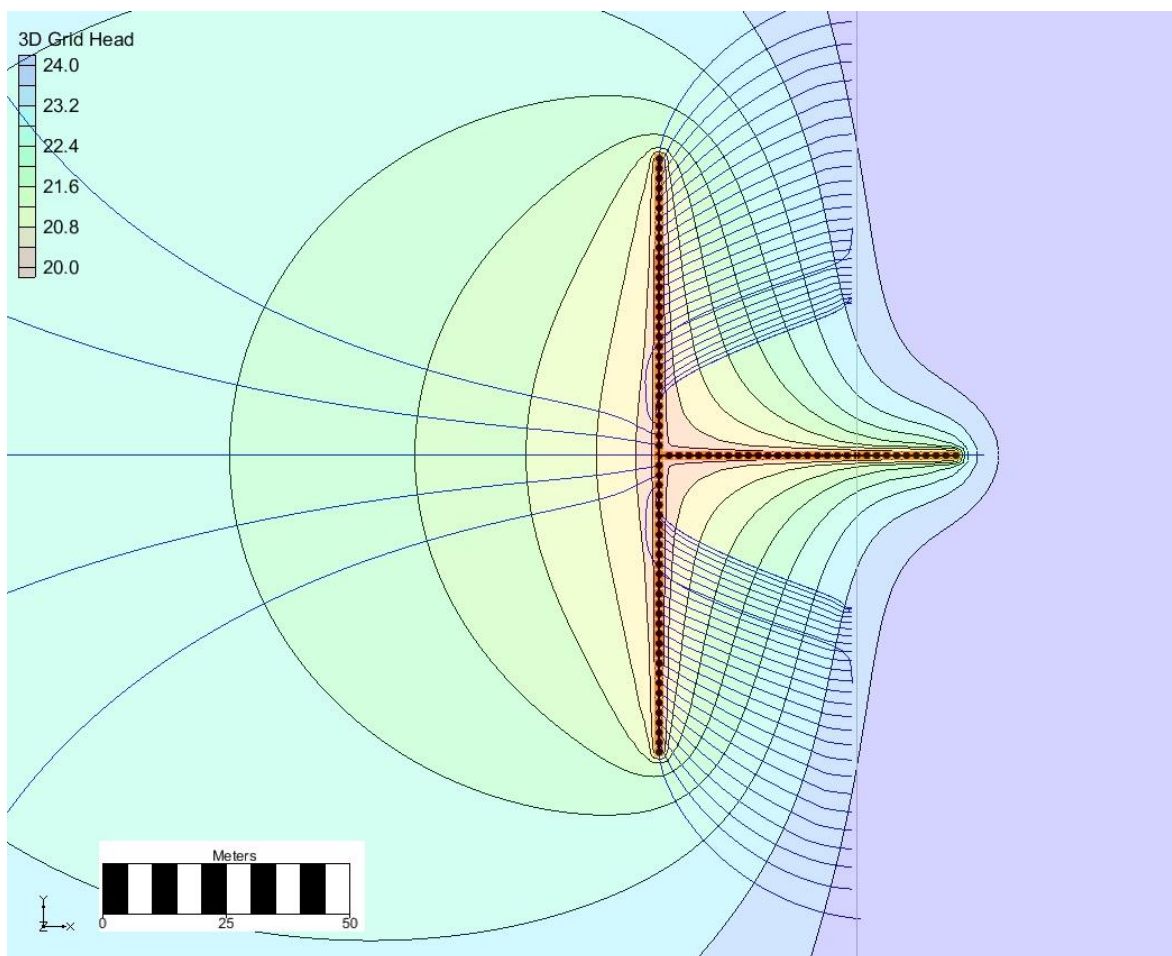
### III. tézis:

**Vizsgálataim során bebizonyítottam, hogy csápos kutak alkalmazása esetén a tartózkodási idő meghatározását két paraméterrel szükséges jellemezni. Az egyik az átlagos tartózkodási idő értéke, amely a termelt víz vízáradóban eltöltött idejére ad információt, a másik pedig a legkisebb tartózkodási idő értéke, amely megmutatja, hogy mi az a legrövidebb időtartam, ami alatt a folyóból a vízrészecske az adott csápig eljut.**

Már a hozamvizsgálatok esetében bemutattam azt a jelenséget, hogy a csápok számának növelésével a kútakna környezetében a termelt hozam nagymértékben lecsökken és a csáp a termelt hozamot igyekszik a csáp kútaknától távolabbi régióiból pótolni. A csápok egymásra hatása nem csak ebben a hozamcsökkenésben mutatkozik meg, hanem az



áramvonalak megváltozásában is. Vizsgálatom során összehasonlítottam a három különböző csápszámmal rendelkező csápos kutak által termelt víz áramvonalait. Elmondható, hogy a két csáppal rendelkező csápos kúthoz képest a folyó felé kihajtott csápok jelentős mértékben megváltoztatják az áramvonalak irányát (**29. ábra**). A folyó felé kihajtott csápok a kútakna környezetében olyan potenciálviszonyokat alakítanak ki, aminek hatására a folyóval párhuzamos csápok kútaknához közeli szakaszából kiinduló áramvonalak a háttér felé indulnak el, ezzel megnövekedik a tartózkodási idő. Ezt a jelenséget szemlélteti a **29. ábra**.



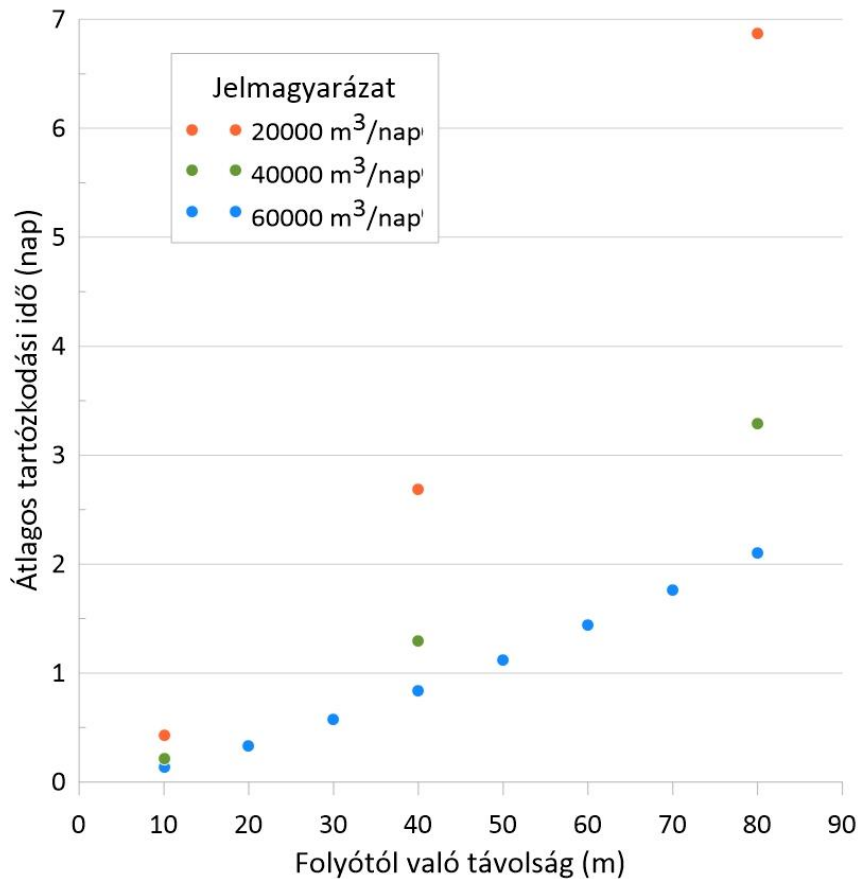
29. ábra: A folyó felé kihajtott csáp termelésének áramvonalakra gyakorolt hatása.

A csápos kutak tervezésekor cél lehet az, hogy a csápos kút kis mértékben, vagy egyáltalán ne termeljen a háttérből, viszont meglegyen a folyótól való megfelelő távolság annak érdekében, hogy a parti szűrésre jellemző vízminőségi változások a megfelelő idejű tartózkodási idő megtartásával végbe menjenek. A háttér megfelelő kizárását ennek a hatásnak a figyelembevételével a következőképpen lehet megvalósítani:

- a folyóhoz való minél közelebbi kúttelepítés,

- a folyóval párhuzamos csápok kútaknához közeli szakaszának termelésből való kizárása.

Munkám során kitértem továbbá az átlagos tartózkodási idő változására is. A csápos kút folyótól való távolságának növelésével ez az érték nagy jelentőséggel bír, hiszen a folyótól való távolság változtatásával a folyónak egyre kisebb hatása van a csápok által kialakított potenciáleloszlásra. A csápos kutakból történő vízmintavétel esetén ritkán és csak megfelelő körülmények esetén van lehetőségünk a csápokból vízmintát venni. Az „üzemszerű” vízmintavételek a kútaknában történnek, ami azt eredményezi, hogy a vízminta vízminőség, és tartózkodási idő szempontjából kevert víz lesz. A vízmintavétel mellett a vízhálózatba is ez a kevert víz jut. Ezért tehát az átlagos tartózkodási idő egy jó paraméter annak becslésére, hogy milyen tartózkodási idővel jellemezhető vizek keveredtek a csápos kútban. Az átlagos tartózkodási idő változását a már említett három kúttípus esetében 10 m-től 80 m-ig terjedő távolságokban és három különböző hozam esetében határoztam meg. A három hozamot  $20\,000\text{ m}^3/\text{nap}$ ,  $40\,000\text{ m}^3/\text{nap}$ ,  $60\,000\text{ m}^3/\text{nap}$  értékeknek választottam meg. A modellezés eredményeképpen az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának változását ábrázoltam a három különböző kúttípus, valamint a három különböző hozamértékek esetében. Így olyan jelleggörbéket kaptam, amelyek megmutatják, hogy adott hozam esetében, adott távolságokban milyen mértékű a várható átlagos tartózkodási idő. Az alábbiakban ezen vizsgálatok eredményét mutatom be részletesebben. Első tapasztalatként elmondható, hogy a két csáppal rendelkező, galériaszerű csápos kútnál meghatározott átlagos tartózkodási idő értéke másképp viselkedik a folyótól való távolság függvényében azokhoz a csápos kutakhoz képest, amik folyó felé kihajtott csápokkal rendelkeznek. Elsőként tehát a két csáppal rendelkező csápos kútra vonatkozó modellezési eredményeket ismertetem. A **30. ábra** mutatja a két csáppal rendelkező csápos kút modellezése során kapott átlagos tartózkodási idő-folyótól való távolság függvényét.

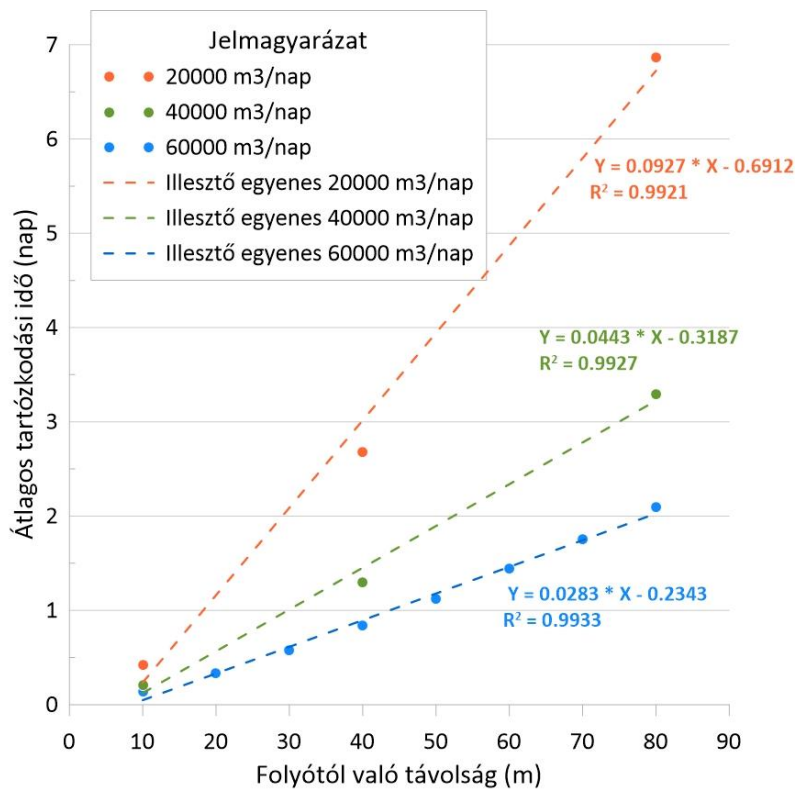


30. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változása a 2 csáppal rendelkező kút esetében, különböző hozamokra.

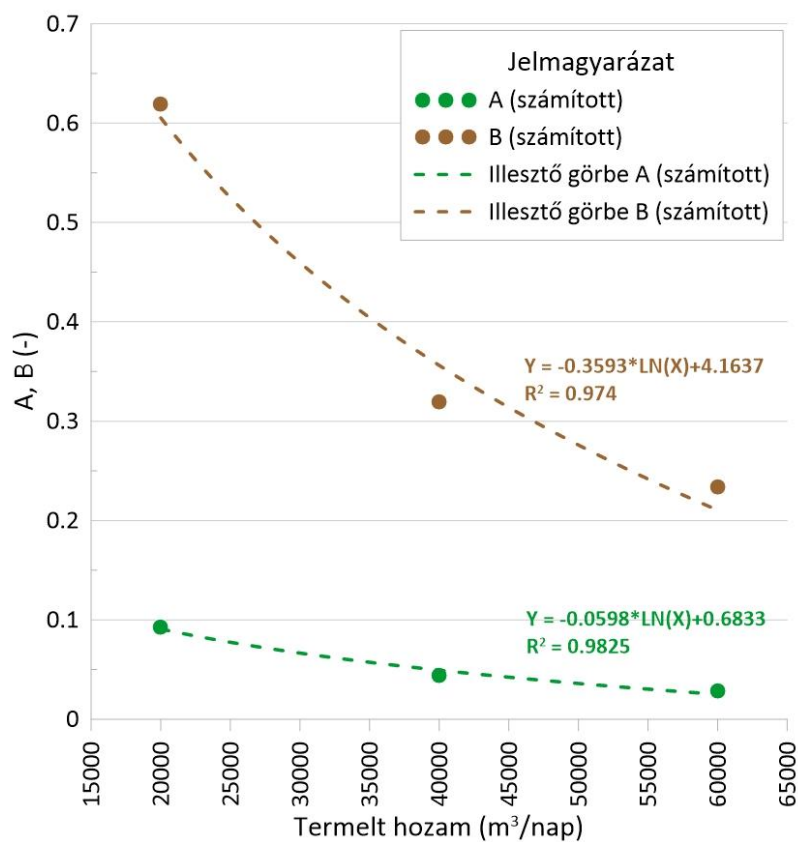
A **30. ábra** számítási eredményekből származó pontsora egy monoton növekedést mutat a vizsgált tartományban. Ebben az esetben a csápok a folyóval párhuzamos helyzetben vannak elrendezve, az emelkedés tendenciája folytonosnak mondható. Nem látunk a számított eredményekben hirtelen emelkedéseket, töréseket, az eredmények lineáris tendenciát mutatnak. A folyóhoz közeledve ez a tendencia minimálisan megváltozik, a számítási eredmények nem érik el a 0 értéket, hiszen a csápok a mederfenék alatt vannak. Ha tehát a folyóhoz legközelebb helyezzük el a csápokot, akkor is van egy bizonyos rétegvastagság, amelyen a víznek át kell szivárognia, és ekkor is beszélhetünk tartózkodási időről. Az átlagos tartózkodási idő növekedésének tendenciája megfigyelhető más hozamértékeknél is, azonban nagyobb meredekséggel. A számított pontsorra függvényt illesztettem, amelyet a **31. ábra** mutat. Az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának változása tehát az alábbi függvénnyel adható meg két csáp esetén:

$$f(x) = A \cdot x - B \tag{8}$$

Ahol A és B hozamtól függő paraméterek. Ezen paraméterek hozamtól való függését a **32. ábra** mutatja.

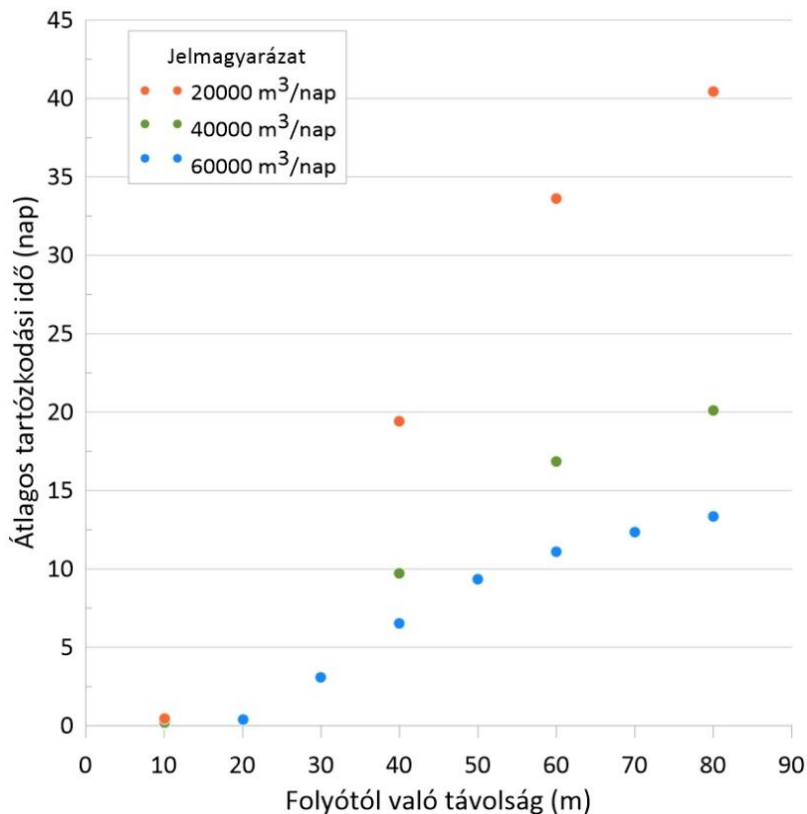


31. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változásának függvényei 2 csáp esetében, különböző hozamokra vonatkoztatva.



32. ábra: A és B paraméterek és a termelt hozam közti összefüggés a 2 csáppal rendelkező kút esetében.

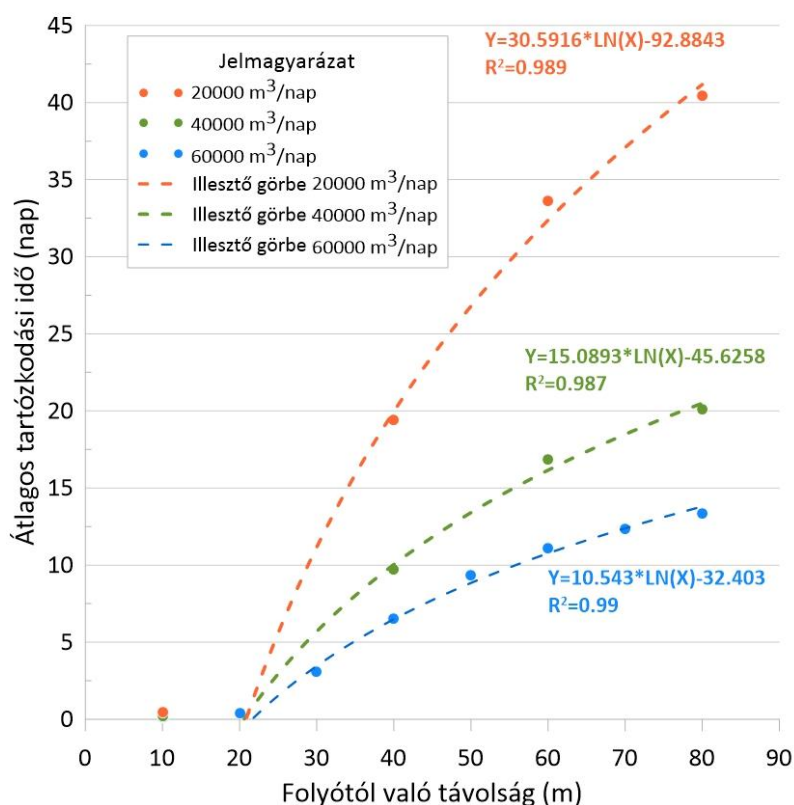
A három csáppal rendelkező csápos kút esetében az átlagos tartózkodási idő változása merőben más tendenciát mutat. A vizsgálat eredményeit több hozamérték esetén mutatja a **33. ábra**. A **33. ábra** alapján a következő figyelhető meg: Ha a folyóhoz közel vagyunk, akkor az átlagos tartózkodási idő a minimumot láthatjuk, azonban ez nem érheti el a 0 értéket. Ennek oka, hogy a csápoknak van egy folyómedertől számított mélysége is, és még ha minimális is, de idő kell ahhoz, hogy a vízrészecskék elérjenek a csápig.



33. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változása a 3 csáppal rendelkező kút esetében különböző hozamokra.

A **33. ábra** esetében 30 m-nél egy ugrást figyelhetünk meg az átlagos tartózkodási idő értékében. Ennek oka, hogy a kút már olyan távolságban van, ahol már érezhető a folyó hidraulikai hatásának csökkenése. Ebben a távolságban a folyóra merőlegesen kihajtott csáp „aktiválja” a háttérből érkező áramlást. Ez a már előzőekben bemutatott hatás megnöveli a kútakna környezetében a tartózkodási idő értékét, és ezáltal növeli az átlagos tartózkodási időt. Tovább távolodva az átlagos tartózkodási idő monoton növekszik, azonban itt már egy logaritmus jellegű növekedést láthatunk. A logaritmus jelleg mutatja a folyó hidraulikai hatásának csökkenését. A számított értékek tendenciáját két részre kell bontanunk, annak érdekében, hogy meg tudjuk határozni az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának

függvényét. A folyóhoz közel eső rész egy minimális átlagos tartózkodási idővel jellemezhető, amely egészen addig tart, amíg a folyó hidraulikai hatása lecsökken annyira, hogy a folyóval párhuzamos csápok kútaknához közeli szakaszából induló áramvonalak a háttér felé indulnak el. A számított átlagos tartózkodási idő értékek emelkedésétől logaritmikus függvény illeszthető a számított értékekre. Ezt az illesztést ábrázolja a **34. ábra**.

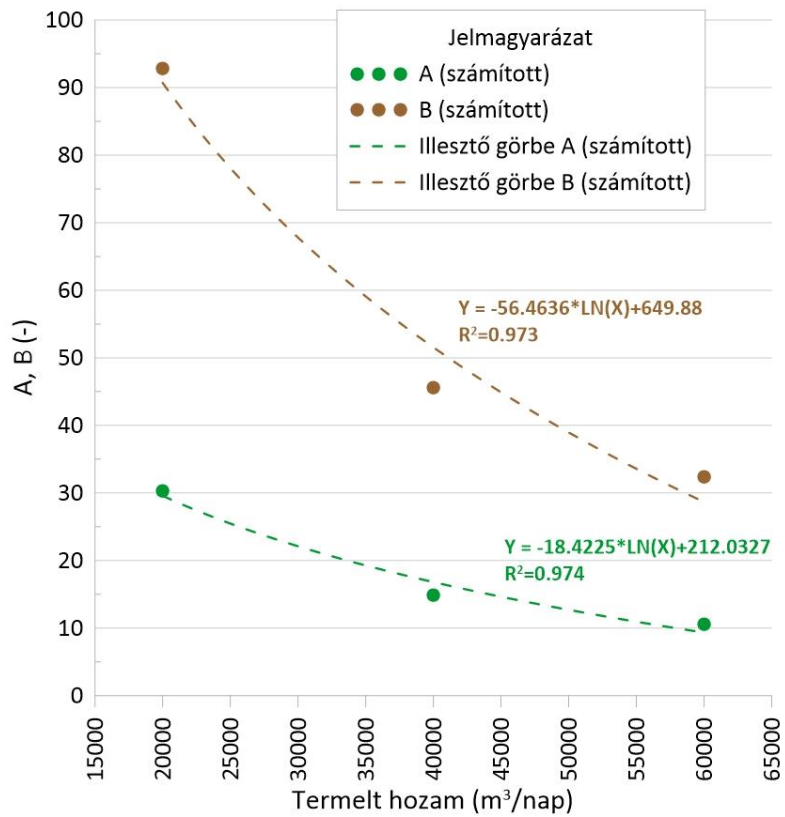


34. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változásának függvényei 3 csáp esetében, különböző hozamokra vonatkoztatva.

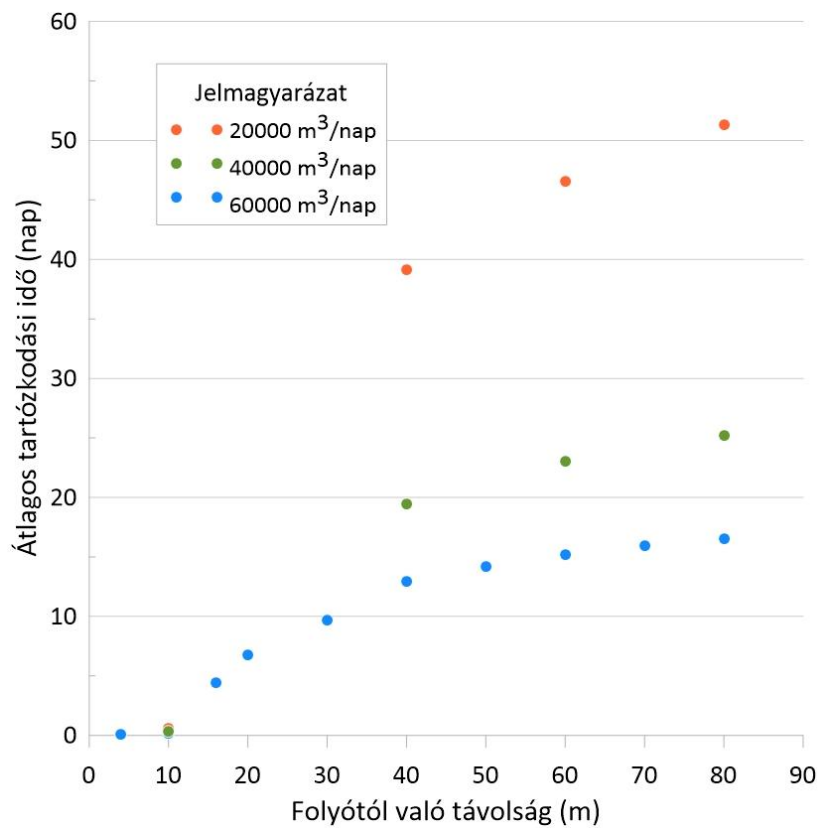
Az átlagos tartózkodási idő változását az alábbi függvény adja meg:

$$f(x) = A \cdot \ln(x) - B \quad (9)$$

A fenti függvény egy természetes alapú logaritmus függvény, amely két paraméterrel jellemezhető. Az A paraméter a függvény meredekségét hivatott jellemezni, míg a B paraméter megmutatja, hogy a függvény értéke mennyi lesz az  $x=1$  helyen. Mindkét paraméter függvénye a termelt hozamnak, amely ugyancsak egy természetes alapú logaritmikus függvénnyel jellemezhető. Az A és B paraméterek hozamtól való függvényének jellegét mutatja a **35. ábra**. A függvény x tengellyel való metszéspontja megadja azt a távolságot, amelynél a folyó felé kihajtott csáp tartózkodási időt növelő hatása megjelenik.

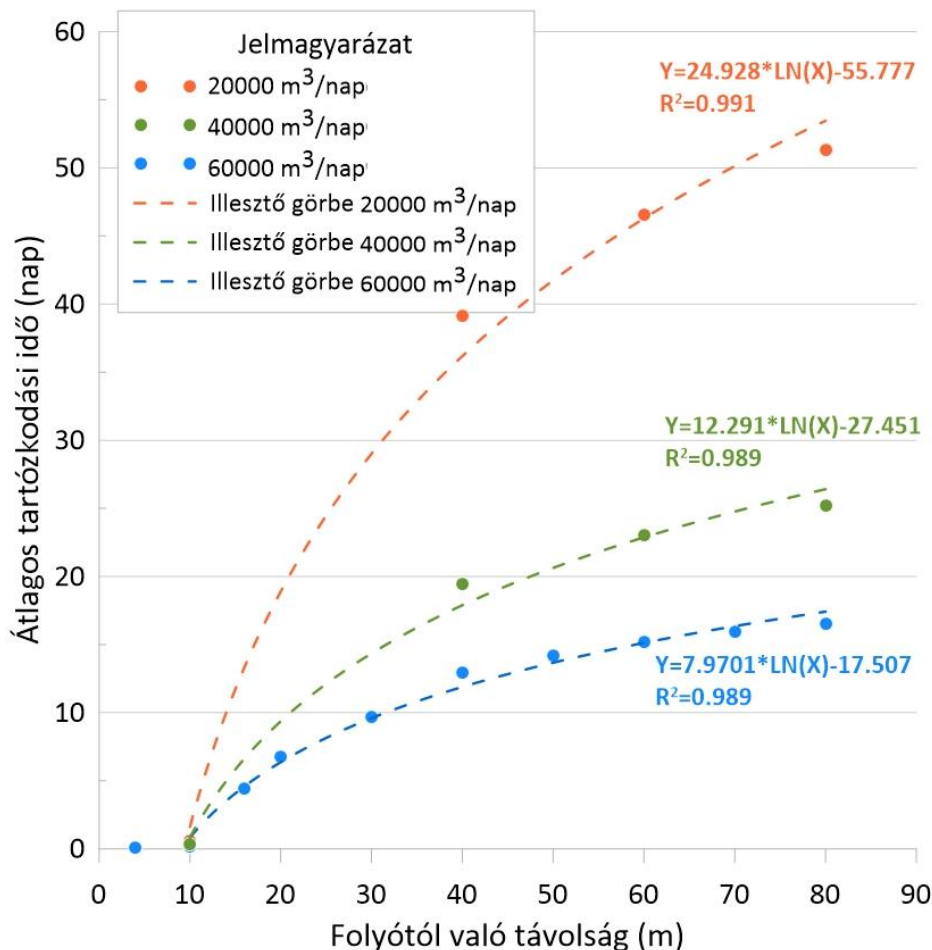


35. ábra: Az A és B paraméterek változása a termelt hozam függvényében 3 csáp esetén.



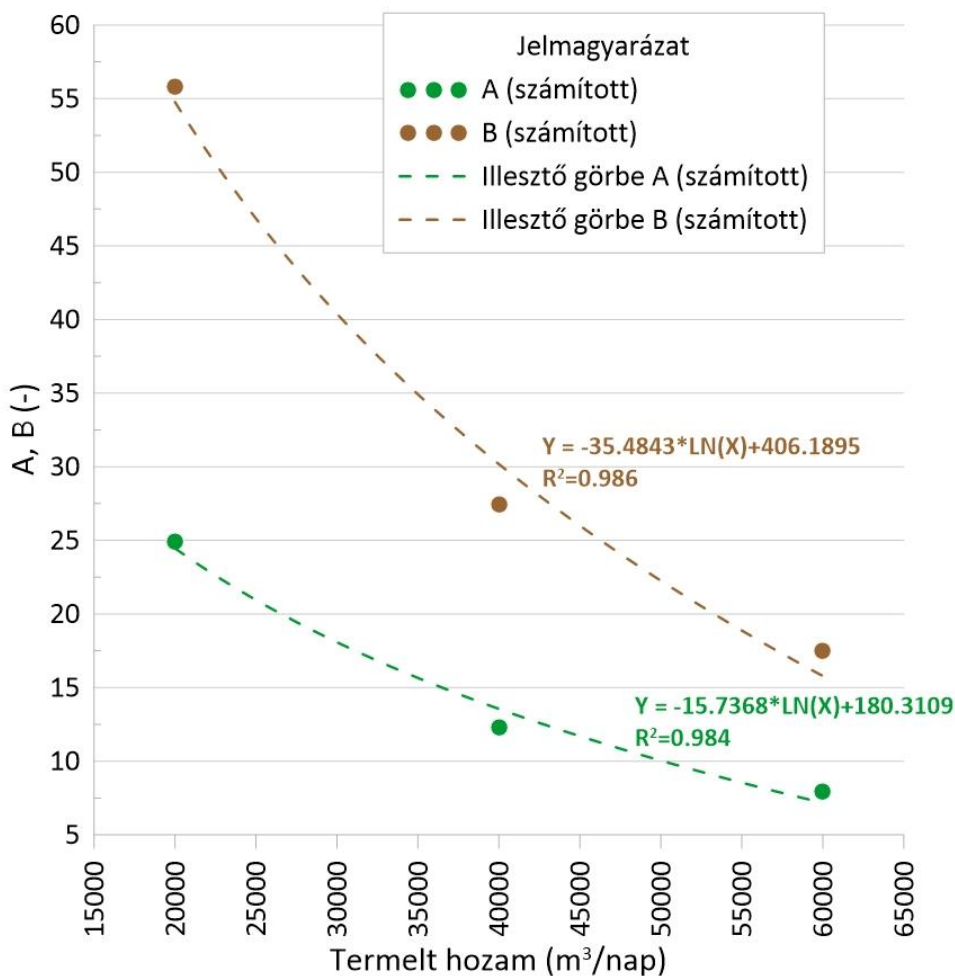
36. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változása az 5 csáppal rendelkező kút esetében különböző hozamokra.

A **36. ábra** pontsorai alapján látható az öt csáppal rendelkező csáposkút átlagos elérési idejének változása a folyótól való távolság függvényében, több hozamértékkel számolva. A trend az előző esethez hasonló. A folyóhoz közel minimumértéket vesz fel az átlagos tartózkodási idő értéke. Az átlagos tartózkodási idő értékének markáns növekedése itt a folyóhoz közelebb következik be, mint az előző, három csáppal rendelkező kút esetében. Ennek oka, hogy a folyó felé több csáp van kialakítva, amelyek a kútakna környezetében nagyobb depressziót okoznak, ezáltal kisebb távolságban is tapasztalható a háttér felőli beáramlás. Ennek következménye, hogy kisebb távolságban érzékelhető az átlagos tartózkodási idő megugrása. Az 5 csáppal rendelkező kút esetében is meghatároztam azokat a görbéket, amelyek az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának függvényét jellemzik. Ezeket a görbéket mutatja a **37. ábra**. A függvények a 9. függvényhez hasonlóan két paraméterrel jellemezhetők, amelyek ugyancsak a termelt hozam függvényei (**38. ábra**).



37. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változásának függvényei 5 csáp esetében, különböző hozamokra vonatkoztatva.





38. ábra: Az A és B paraméterek változása a termelt hozam függvényében 5 csáp esetén.

#### IV. Tézis

Szimulációs vizsgálatokkal meghatároztam a csápos kutak esetében az átlagos tartózkodási idő változásának jelleggörbáját a kútakna folyótól való távolságának függvényében. A csápos kutakat jellemző átlagos tartózkodási idő változása a folyótól való távolság növelésével logaritmikus jellegű növekedést mutat három vagy annál több csáp kialakítása esetén.

A fenti ábrák kapcsán, a csápos kutak termelése során kialakuló áramlási viszonyokat jellemző átlagos tartózkodási időt vizsgáltam. Számításaim során több hozamra, és különböző csápelrendezésű kutakra meghatároztam az átlagos tartózkodási idő változásának függvényét a kútakna folyótól való távolságának függvényében. Elmondható, hogy a 2 csáppal rendelkező kút esetében lineáris, míg a több csáppal rendelkező kutak esetében logaritmikus jelleggel emelkedik az átlagos tartózkodási idő. Ezen függvényeket két

paraméter jellemzi, amelyeket A-val és B-vel jelöltem. Munkám során meghatároztam az A és B paraméterek változását a hozam függvényében. Mindezek alapján sikerült meghatározni egy olyan eljárást, amellyel az általam vizsgált csápos kút típusok termelése során becsülhető az átlagos tartózkodási idő mértéke. Az átlagos tartózkodási idő meghatározásának lépései az általam vizsgált körülmények között az alábbi lépésekből áll.

1. Csápos kút típus kiválasztása.
2. A termelt hozam megválasztása.
3. A **32. ábra**, a **35. ábra** és a **38. ábra** segítségével az átlagos tartózkodási idő függvény A és B paramétereinek meghatározása.
4. A meghatározott A és B paraméterek segítségével átlagos tartózkodási idő függvény definiálása.
5. A megfelelő távolság megválasztása annak érdekében, hogy a csápos kút termelése során a megfelelő mértékű tartózkodási idő rendelkezésre álljon.

Ennek a rendszernek tulajdonsága, hogy permanens állapotban jellemzi az átlagos tartózkodási idő értékének változását a folyótól való távolság függvényében. Ez a tulajdonság alkalmazkodik a kutak védőterületéhez kapcsolódó szabályozáshoz is, hiszen a védőterület meghatározása is permanens állapotban történik. Ennek a rendszernek a hiányossága, hogy vizsgálataim során a vízadó szivárgáshidraulikai paramétereit, a mederkapcsolati hatásfokot nem változtattam, amely kutatásom további irányait is kijelöli.

#### **4. Csápos kutak működésének bemutatása valós környezetben**

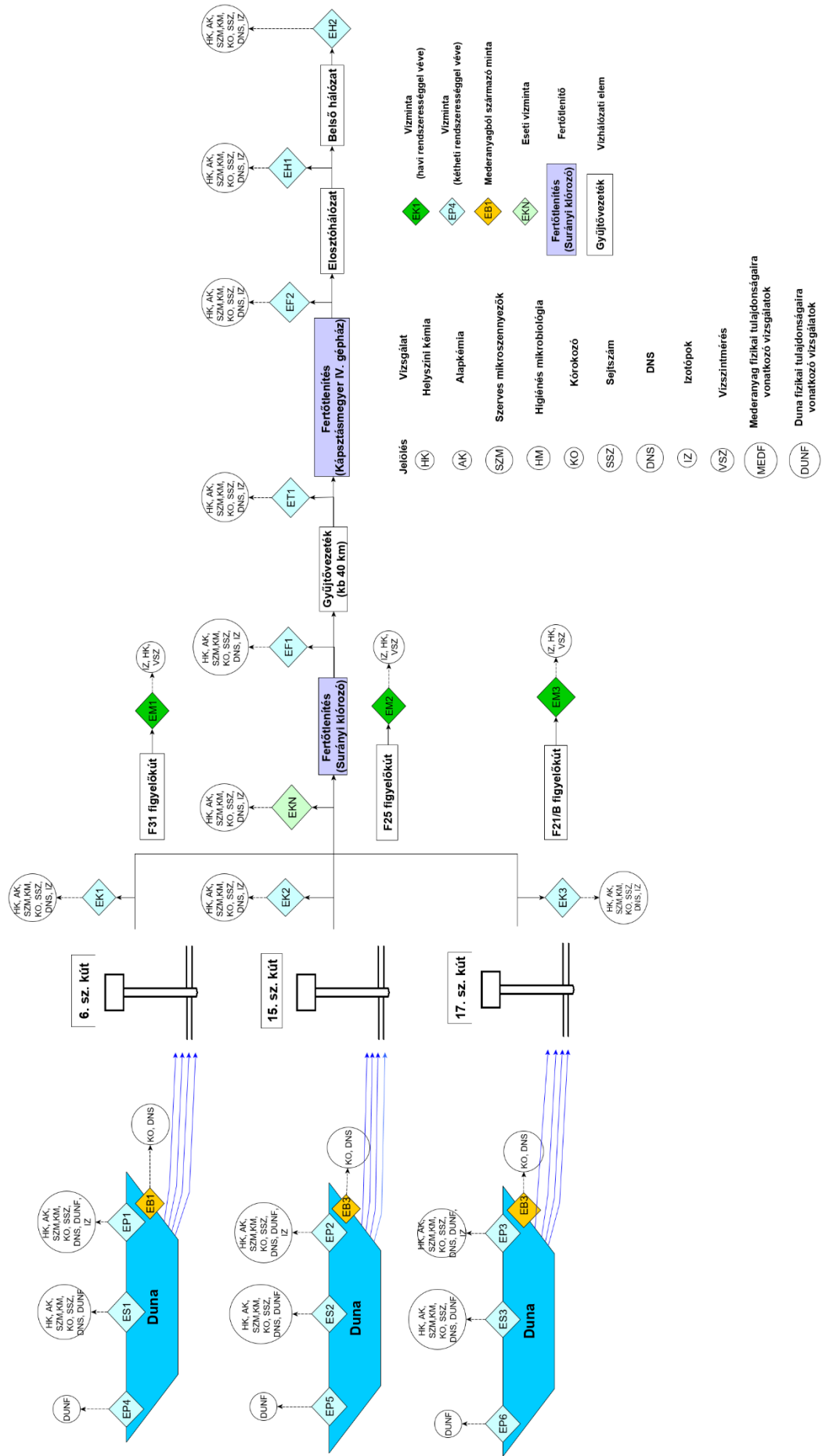
Munkám során a folyó és környezetének kölcsönhatását, a parti szűrés folyamatát olyan területen vizsgáltam, amely ezen helyzet „iskolapéldája” lehet. A parti szűrés tekintetében Budapest vízellátása nagy múltra tekint vissza. Wein János és Kajlinger Mihály mérnökök, a Fővárosi Vízművek első igazgatói voltak azok, akik a Szentendrei-sziget páratlan hidrológiai adottságait felismerték. 1868-ban a Fővárosi Vízművek megalakulásával az első parti szűrésű kutak is kialakításra kerültek. A Szentendrei-szigeten az 1930-as években a csápos kutak használhatóságának megismerésére már kísérletet tettek, azonban az első üzemelő, 5 m aknaátmérővel rendelkező csápos kút a II. Világháború után, 1948-ben épült meg (Tolnai, 2008). Elmondható tehát, hogy a Szentendrei-szigeten kialakított csápos kutak immár több mint fél évszázada szolgálják az ivóvízellátást, nagy tapasztalatot adva számunkra az üzemeltetés és a parti szűrésű rendszerek megismerése terén. Az alábbiakban ezen terület földtani és vízföldtani tulajdonságait ismertetem.

#### 4.1. A Tiszta Ivóvíz projektről röviden

Disszertációm vizsgálatainak kivitelezésében nagy mértékű segítséget adott a „Nemzeti Kiválósági Program, Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” projekt, amelynek részeként Duna – menti parti szűrésű vízbázisokat vizsgált öt konzorciumi partner. A konzorcium tagjai a következő intézmények:

- Ökológiai Kutatóközpont,
- Budapesti Műszaki, és Gazdaságtudományi Egyetem,
- Fővárosi Vízművek ZRt.,
- Nemzeti Népegészségügyi Központ,
- Miskolci Egyetem.

A projekt a Budapest ivóvízellátását is biztosító parti szűrésű rendszerre fókuszál. A projekt célja megvizsgálni azokat a fizikai és kémiai folyamatokat, amelyek az ivóvíz forrásától a termelőkutakon és a vízhálózaton keresztül a fogyasztóig lezajlónak. A kutatás során 12 hónapon keresztül mintavétel történt a Duna vizéből és üledékéből, a parti szűrésű kutak vizéből, a kezeletlen, valamint a technológiailag kezelt vízből, a gerincezetékből és a fogyasztói hálózathoz. A mintavétel és a vízminőségi vizsgálatok célja feltárni, hogy a parti szűrés milyen mértékben járul hozzá, és milyen mértékben képes eltávolítani a potenciálisan veszélyes vegyületeket, szervezeteket. A vízminőségi vizsgálatok kiegészülnek hidraulikai vizsgálatokkal a termelőkutak környezetében, valamint az elosztóhálózaton egyaránt. A Miskolci Egyetem és ezáltal az én feladatom is a felszín alatti hidraulikai folyamatok vizsgálata volt, amely magában foglalja a vízmintavételezés kivitelezését, a terepi mérések lebonyolítását, valamint a modellezési feladatok elvégzését. A surányi vízbázison három csáposkút lett kijelölve a vizsgálatokra, amelyek más-más távolságokban vannak a Duna partjától. A három csápos kút (6., 15. és 17. számú) kijelölte azokat a keresztmetszeteket a Dunán, ahol a mederanyag mintázása és a vízmintavételek is megvalósultak. A projekt mintavételi tematikáját a Szentendrei-szigetre vonatkozóan a **39. ábra** mutatja.



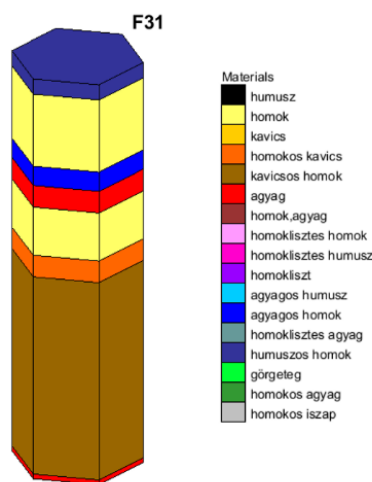
39. ábra: A Tiszta Ivóvíz projekt alatt alkalmazott mintavételi folyamatára (a szerző saját szerkesztése)

## 4.2. A Surányi vízbázis bemutatása

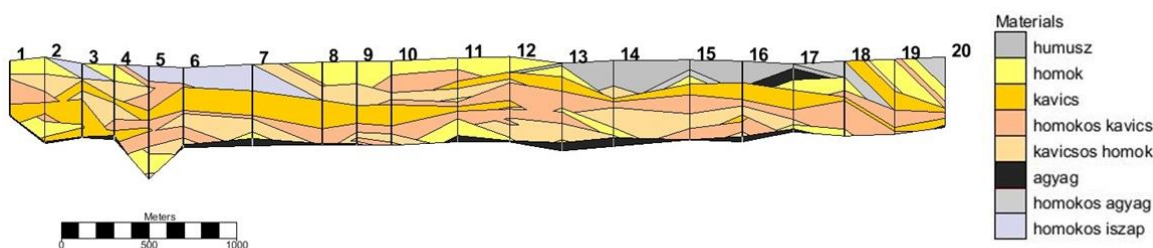
### 4.2.1. A vízbázis geológiai adottságai

Kutatásom során a Tiszta Ivóvíz projekt keretében a Szentendrei-szigeten elhelyezkedő Surányi kútsort vizsgáltam. A projekt célja, hogy meghatározza, és kövesse azokat a hidrológiai, hidrogeológiai, hidraulikai, kémiai és biológiai folyamatokat, amelyek a parti szűrésű rendszert, és a rendszer elosztóhálózatát jellemzik. A vizsgálatok között említhetjük a vízkémiai vizsgálatokat, lebegtetett-, és görgetett hordalékok vizsgálatait, a parti zónából történő speciális medermintavételt, hidraulikai vizsgálatokat, hidrogeológiai és izotóphidrogeológiai vizsgálatokat. A Miskolci Egyetem részéről a Környezetgazdálkodási Intézet a hidrogeológiai és izotóphidrogeológiai kutatásokat vállalta feladatul. Ennek keretében a vízbázison felkutattuk azon figyelőkutakat, amelyek alkalmasak lehetnek a vízbázis megbízható és folyamatos vizsgálatára. A projekt során havi rendszerességgel végeztem vízmintavételt az izotóphidrogeológiai vizsgálatokhoz, valamint alap vízkémiai jellemzők (pH, elektromos vezetőképesség, hőmérséklet, oldott oxigén koncentráció) meghatározását. A projekt keretében vizsgált surányi parti szűrésű kútsor, a Budapesttől északra elhelyezkedő Szentendrei-szigeten található. A Váci Duna-ág jobb partján elhelyezkedő húsz kútból álló csápos kút sor víztermelése igen nagy jelentőséggel bír Budapest vízellátását illetően. Geológiájának, földtani szerkezetének megismerését korábbi publikációk segítik. A Szentendrei-sziget vonatkozásában több olyan szerkezetföldtani, rétegtani, publikáció született, amelyek elősegítik a terület földtani és vízföldtani megismerését (Oláh, 2014; Karátson és társai, 2000; Bence és társai, 1991). A Szentendrei-sziget a Duna Kismarosnál kiszélesedő völgyében kezdődik. ÉNy-DK irányban folytatódik Vácig, ahol Déli irányt véve Csillaghegy magasságában elkeskenyedve ér véget (Góczán, 1955). Hossza 30,85 km, maximális szélessége Tahitótfalu és Vác között nyugat-keleti irányba 30,85 km, területe: 55,73 km<sup>2</sup> (Mari, 2002; Kármán és társai 2014). Az egységes Szentendrei-sziget viszonylag fiatal képződmény, amely több kisebb sziget összeolvadásával keletkezett a holocénben. Geomorfológiailag három fő részre tagolható: az alacsony, illetve a magas ártér, valamint az ármentes szint, amely futóhomok formákkal tarkított (Mari 2002). Földtanára jellemző, hogy alapvetően folyóvízi üledékek alkotják. A sziget északi végétől Alsógöd magasságáig oligocén agyagra települtek ezen folyóvízi üledékek, míg ettől délre homokos agyagos képződmények alkotják a folyóvízi üledékek fekvését (Góczán, 1955). A surányi mintaterület esetében elmondható, hogy a terület

figyelőkutakkal jól ellátott, és viszonylag jól kutatott terület. A Fővárosi Vízművek rendelkezésemre bocsátotta azon információkat, amelyek alapján a földtani és vízföldtani viszonyok körvonalazhatóak. A nyers földtani információk feldolgozásakor a Groundwater Modeling System (GMS) szoftvert alkalmaztam, ahol ábrázoltam azokat a termelő-, és figyelőkutakat, amelyeknél földtani információk rendelkezésünkre álltak. A rétegsorokat ábrázoltam, majd azokból keresztmetszvényeket készítettem. Egy figyelőkútra vonatkozóan a **40. ábra** mutatja a földtani felépítést, valamint a **41. ábra** mutatja a surányi kútsorra vonatkozó hossz szelvényt.



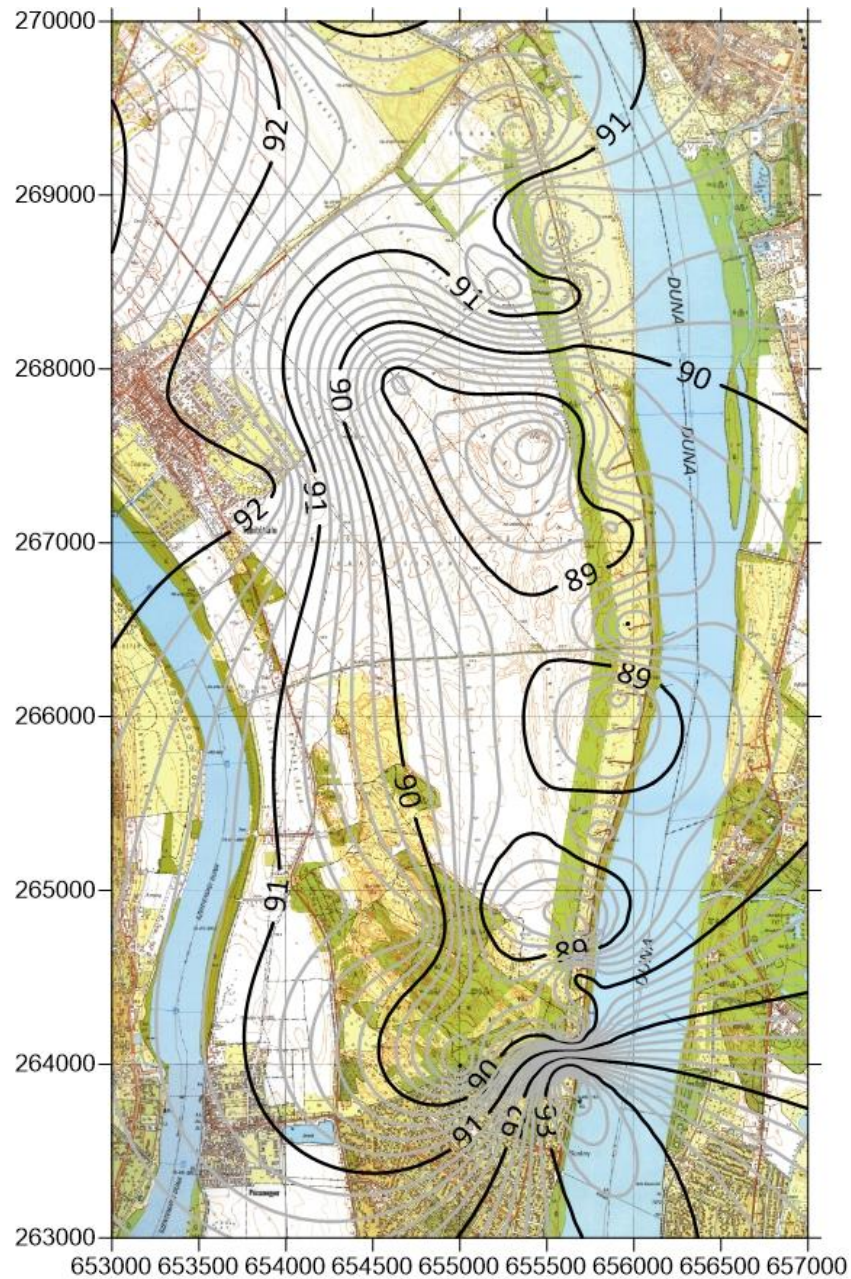
40. ábra: Az F31-es figyelőkút földtani felépítése.



41. ábra: Hossz szelvény a termelőkutak mentén.

A földtanra vonatkozó adatokat látva egy eléggé összetett, és inhomogén szerkezettel találkozhatunk. A földtani inhomogenitást, a rétegek kiékelődését az általam használt MODFLOW program csak bizonyos korlátok között tudja kezelni, valamint minden egyes réteg és lencse hidraulikai paraméterét nem tudjuk meghatározni. Mindezek figyelembevételével egy egyszerűsített földtani modellre van szükség, hogy a program stabilan működjön. A földtani információk alapján alapvetően három fő réteget tudunk elkülöníteni a talajszinttől lefelé haladva:

- fedőréteg, mely alacsonyabb szivárgási paraméterekkel jellemezhető,
- vízáadó réteg, amelyet főként homokos kavics, illetve kavics alkot, amely ezáltal jobb szivárgási tulajdonságokkal rendelkezik
- fekürréteg, amelyet agyag alkot és ezt a vízáadó alsó határának tekinthetünk (42. ábra).



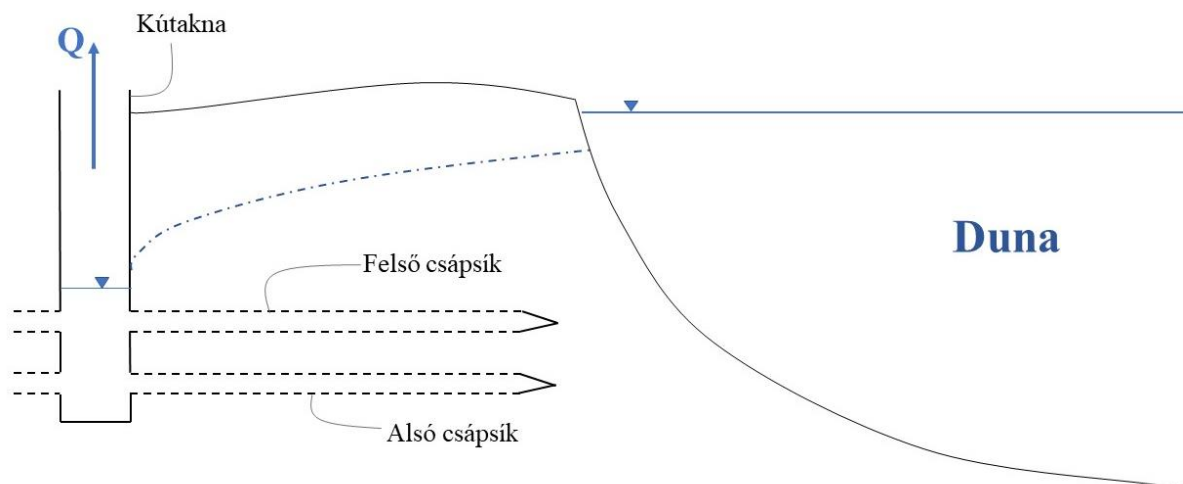
42. ábra: Az oligocén agyag felszíne a vizsgált kútsor környezetében (a térképen szereplő értékek mBf-ben értendők).

A tapasztalat, valamint a terepi viszonyok, és a parti szűrés sajátosságai is azt mutatják, hogy az alsó agyagrétegben a felette lévő rétegekhez képest elhanyagolható mértékű a vertikális és horizontális szivárgás. A felső rétegekben a víztermelés és a Duna hatása miatt

horizontális szivárgás az uralkodó. A földtani információk alapján elmondhatjuk, hogy markáns vízáramlás a felső két rétegben jelentkezhet, míg az agyagfekü egy vízrekesztő szerepet tölt be a rendszerben. A modellépítés során tehát ezt a két réteget, és annak hidraulikai paramétereit kellett definiálnom.

#### 4.2.2. A vizsgált terület termelőkútjainak jellemzése

A területen elhelyezkedő víztermelő műtárgyak, valamint a Duna elevációs viszonyait is megvizsgáltam. A víztermelő rendszerről elmondható, hogy a kutak fenékszintje magasabb helyzetben van, mint a Duna medrének mélyebben fekvő pontjai (**43. ábra**). Ebből arra következtethetünk, hogy a Duna nagy víztömege, és az elevációs viszonyok miatt kicsi a valószínűsége, hogy a Duna túlpártjáról is történhet vízáramlás a kutak felé.

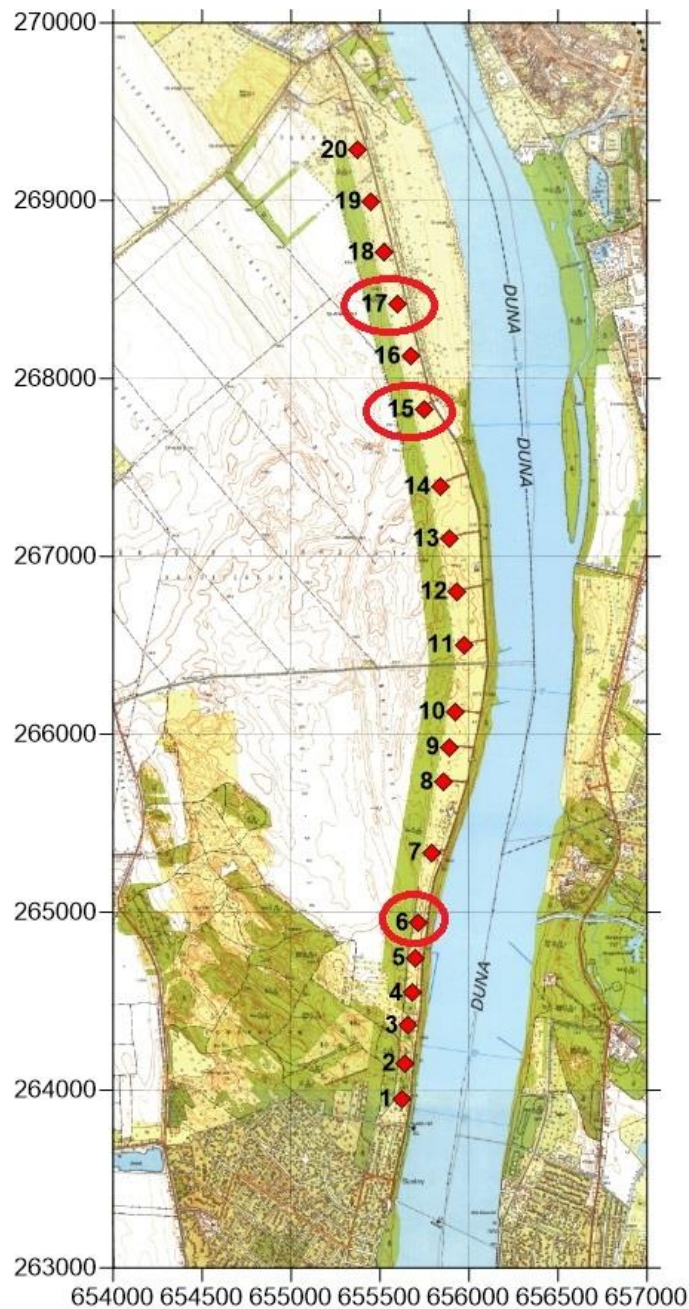


43. ábra: A kutak és a Duna helyzetének viszonya a Szentendrei-sziget Surányi kútsoránál (a szerző saját szerkesztése).

A vízbázison húsz darab, úgynevezett törpe csáposkút segítségével történik a víztermelés (**44. ábra**). A termelőkutak egymástól átlagosan 300 m távolságban helyezkednek el, egyenletesen a part mentén. A parttól való távolságukról elmondható, hogy délről észak felé haladva a kutak és a partél közötti távolság növekszik. A legdélebbi 1-es számú kút Dunától való távolsága vízállástól függően nagyjából 65-70 m, míg a legészakibb 20-as számú kút parttól való távolsága vízállástól függően 410-430 m. A kutak kialakítása a csápok kihajtásának irányát és mélységét leszámítva egységesnek mondható. A felszínen látható felépítmény egy kútaknában folytatódik. Az acél anyagú kútakna 2200 mm palást átmérővel rendelkezik, és az aknafenek az agyagréteget elérve nyeri el végleges

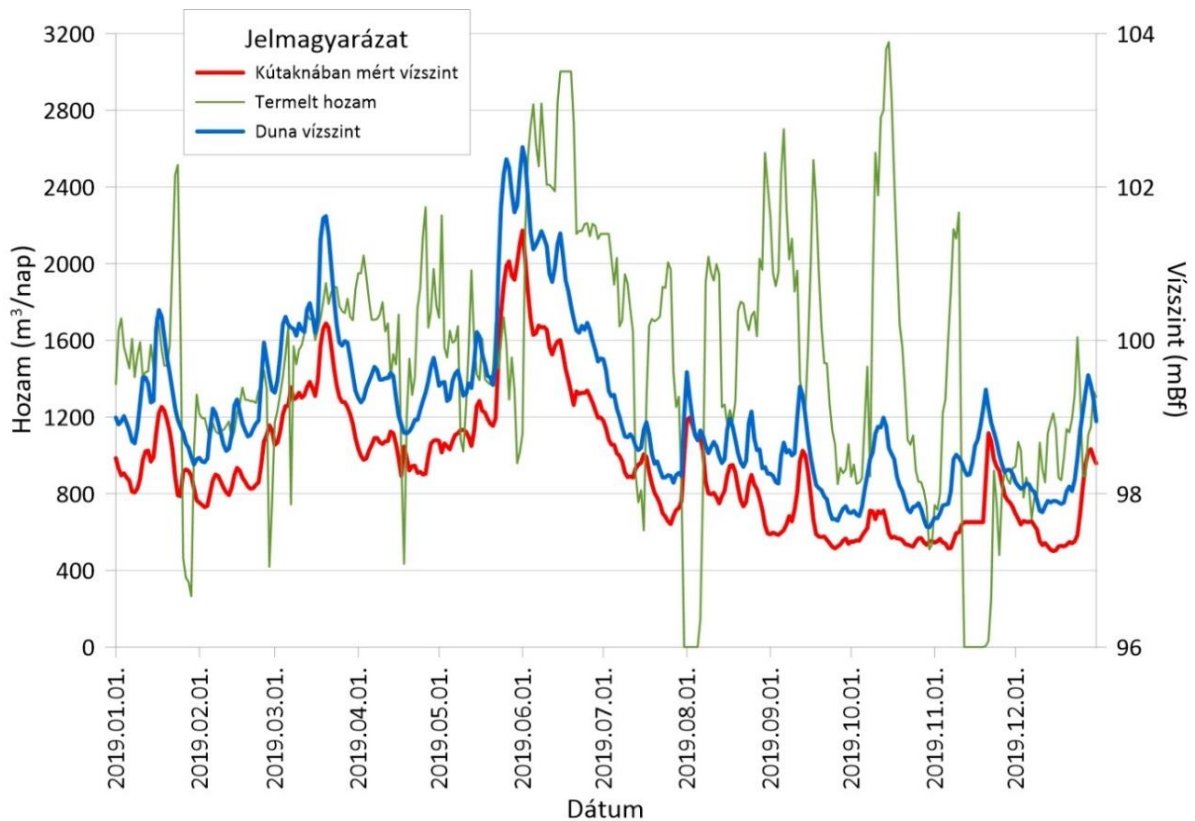


mélységét, átlagosan 15-17 m mélységben. A csápok a 2. számú kutat kivéve két szinten helyezkednek el, két csápsíkot kialakítva. A kutak üzemeltetése szivattyúkkal történik, hozamuk napi változatosságot mutat. A 8-as és 9-es számú kutak üzemen kívül voltak a vizsgált időszakban, ezen kutakból víztermelés nem történt. A Tiszta Ivóvíz projekt keretében három termelőkút került kiválasztásra, amelyek a további vízkémiai vizsgálatok tárgyai voltak. A kutak kiválasztásánál az Szentendrei-szigeten fontos szempont volt, hogy a Dunától különböző távolságokra lévő kutakat jelöljünk ki további vizsgálatok céljából. Így esett a választás a 6. a 15. és a 17. számú kútra.



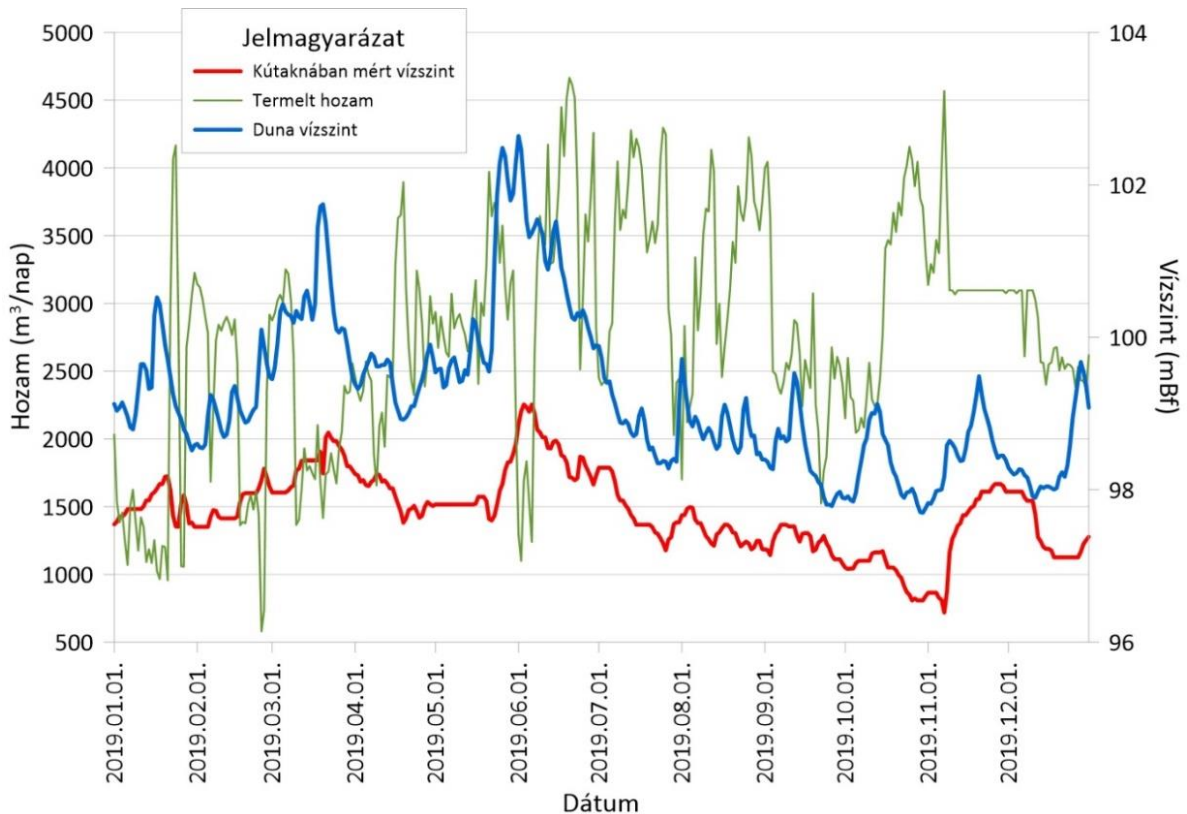
44. ábra: A surányi csáposkút sor termelő kútjainak elhelyezkedése.

A Fővárosi Vízművek a termelőkutak vonatkozásában méri többek között a napi hozamot, valamint a kútaknában kialakult depressziót. Ezen adatokat a Fővárosi Vízművek rendelkezésemre bocsájította. Az adatokat a 2019-es évre vonatkozóan a **45. ábra** szemlélteti. A **45. ábra** jól mutatja, hogy az 1. számú csáposkút kútaknájában mért vízszint elhanyagolható mértékű késleltetéssel követi a Duna vízszintjét. A termelt hozam a nagy ingadozások ellenére kismértékben befolyásolja a kútaknában kialakuló vízszintet.



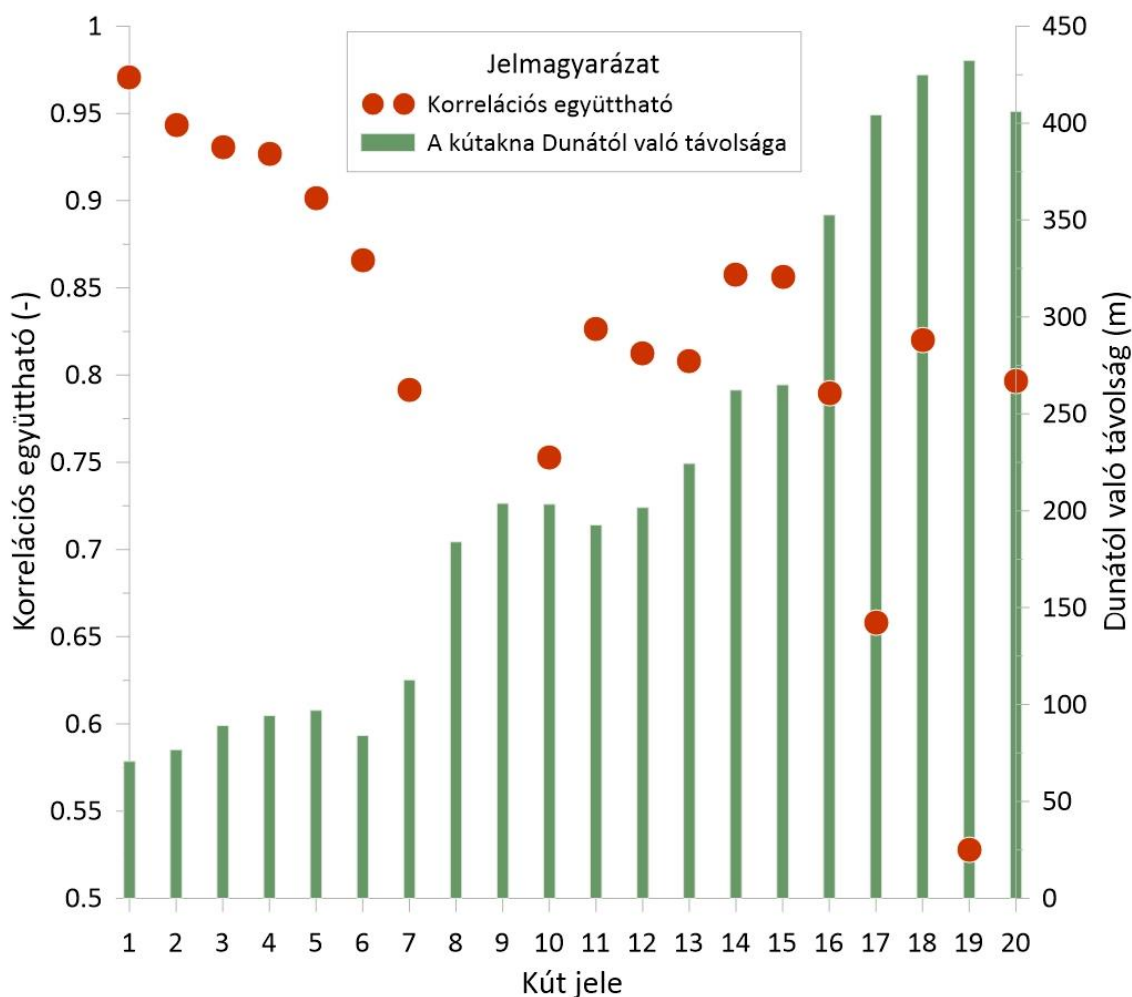
45. ábra: Az 1. számú csáposkút hozamának, kútaknájában mért vízszintjének és a Duna vízszintjének összehasonlítása 2019 évben.

Más helyzetet mutat a **46. ábra**, ahol a 20. számú csáposkúthoz tartozó vízhozam, és vízszint adatokat tüntettem fel. A grafikonon látható, hogy a kútaknában mért vízszint sokkal kisebb mértékben követi a Duna vízszintjét, mint azt az 1-es termelőkútnál látható. Megfigyelhető, hogy a 20. számú kút esetében a Duna, valamint az üzemi vízszint különbsége is nagyobb, mint az 1. számú kút esetében. Ezen kívül láthatóak olyan időintervallumok, amikor a kút hozamváltozásának következményeként a kútaknában mért vízszint markáns változást mutat.



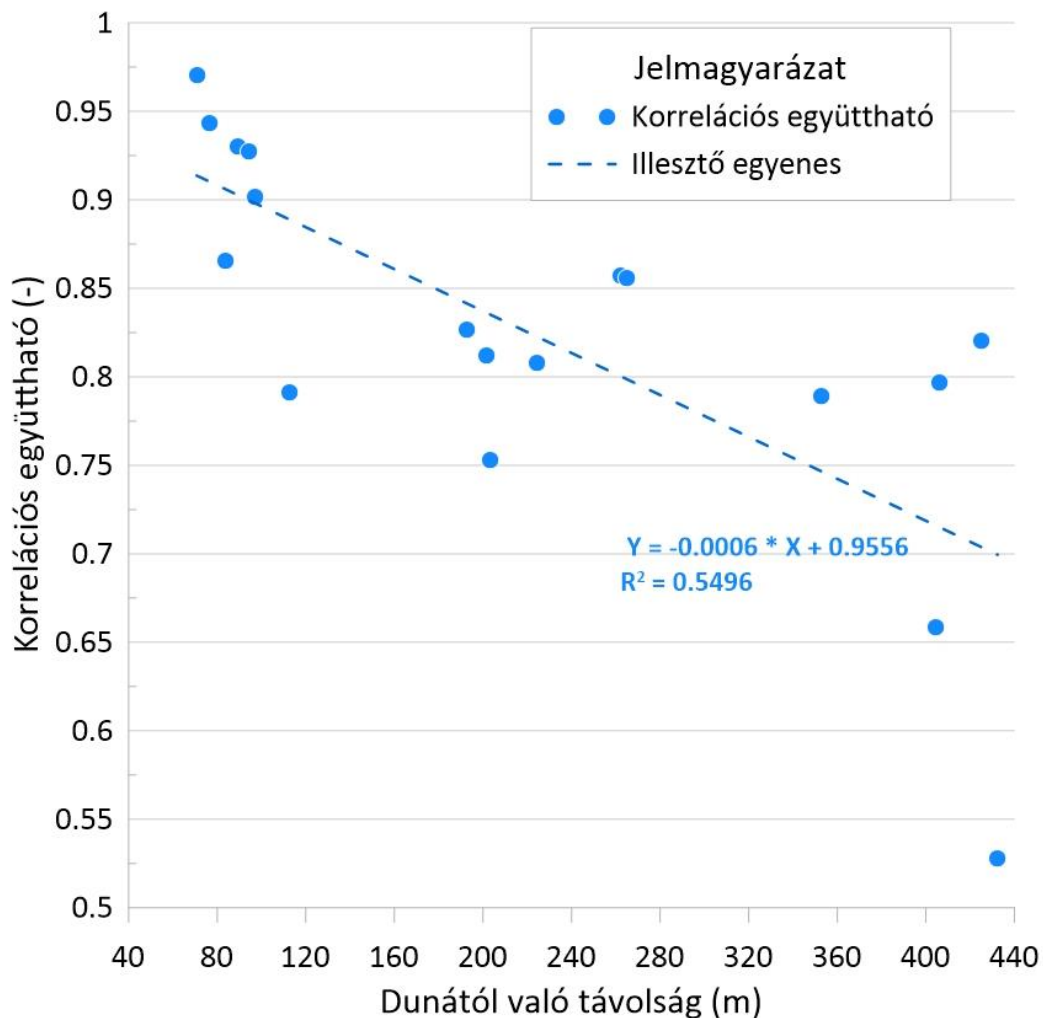
46. ábra: A 20. számú csáposkút hozamának, kútaknájában mért vízszintjének és a Duna vízszintjének összehasonlítása 2019 évben.

A termelőkutak hidraulikai vizsgálatánál fontos összevetnünk az üzemi vízszintet, és a Duna vízszintet. Az összehasonlítás során a hidraulikai kapcsolat mértékét számszerűsítettem. A kapott vízszint-idősor adatok felhasználásával a termelőkutakra kiszámítottam a Duna vízszint, és az üzemi vízszint közötti korrelációs együtthatókat, amelyeket a partéltől való távolsággal együtt a **47. ábra** mutat. A kapott eredmények alapján az alábbi következtetésre jutottam: A **47. ábra** esetében jól látható, hogy a Dunától való távolság növekedésével a korrelációs együttható értéke csökken. A korreláció mértékének csökkenése mutatja a kútsor Dunával való hidraulikai kapcsolatának inhomogenitását. Elmondható, hogy a termelőkútban kialakuló üzemi vízszint Dunától való hidraulikai függősége délről északra csökkenő tendenciát mutat. A hidraulikai kapcsolat változása a kútkialakítás, a mederkapcsolati hatások, valamint a rétegtulajdonságok mellett befolyásolja a tartózkodási időt is, így hatással lehet a vízkémiai paraméterekre.



47. ábra: A surányi kútsor termelőkútjainak Dunától való távolsága, valamint az üzemi vízszintek és a Duna vízszint közötti korreláció.

A **48. ábra** mutatja az üzemi vízszint és a Duna vízszint korrelációs együtthatójának változását Dunától való távolság függvényében. Az ábrából látható, hogy a korrelációs együttható értéke csökkenő tendenciát és nagymértékű inhomogenitást mutat. Az inhomogenitás több okra vezethető vissza. Egyrészt nagy távolságokban már a kitermelt hozam nagyobb szerepet tölt be az üzemi vízszint kialakulásában, másrészt a geológiai inhomogenitás miatt kitüntetett árapályák is kialakulhattak a területen. Ha tendenciát akarunk megállapítani, akkor a **48. ábra** alapján egy csökkenő lineáris tendenciát határozhatunk meg.



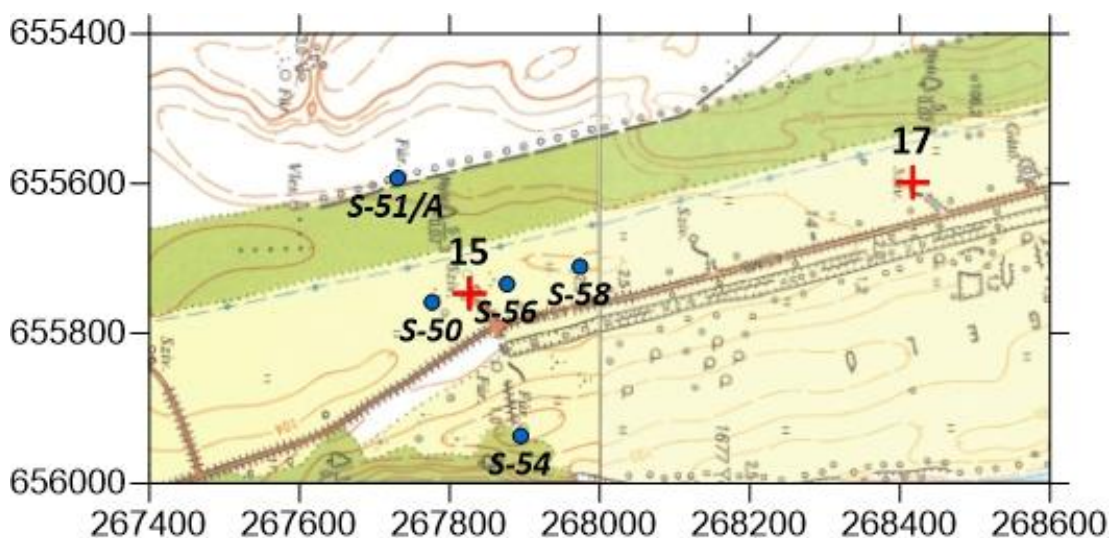
48. ábra: A korrelációs együttható változása a Dunától való távolság függvényében.

#### 4.2.3. A terepi vizsgálatok ismertetése

A Tiszta Ivóvíz Program keretében terepi vizsgálatokra is sor került. A termelőkutak vonalában több figyelőkút is kialakításra került. A Duna felé és a háttér, vagyis a Szentendrei-sziget belseje felé is figyelőkutakkal jól ellátott területről beszélhetünk. A figyelőkutak a vízadó rétegre lettek szűrőzve, így segítségükkel jól követhető a potenciálszintek változása. A terepi mérések a mérési gyakoriság szempontjából három csoportra oszthatóak:

- óránkénti mérések,
- havi rendszerességű mérések,
- kéthavi rendszerességű mérések.

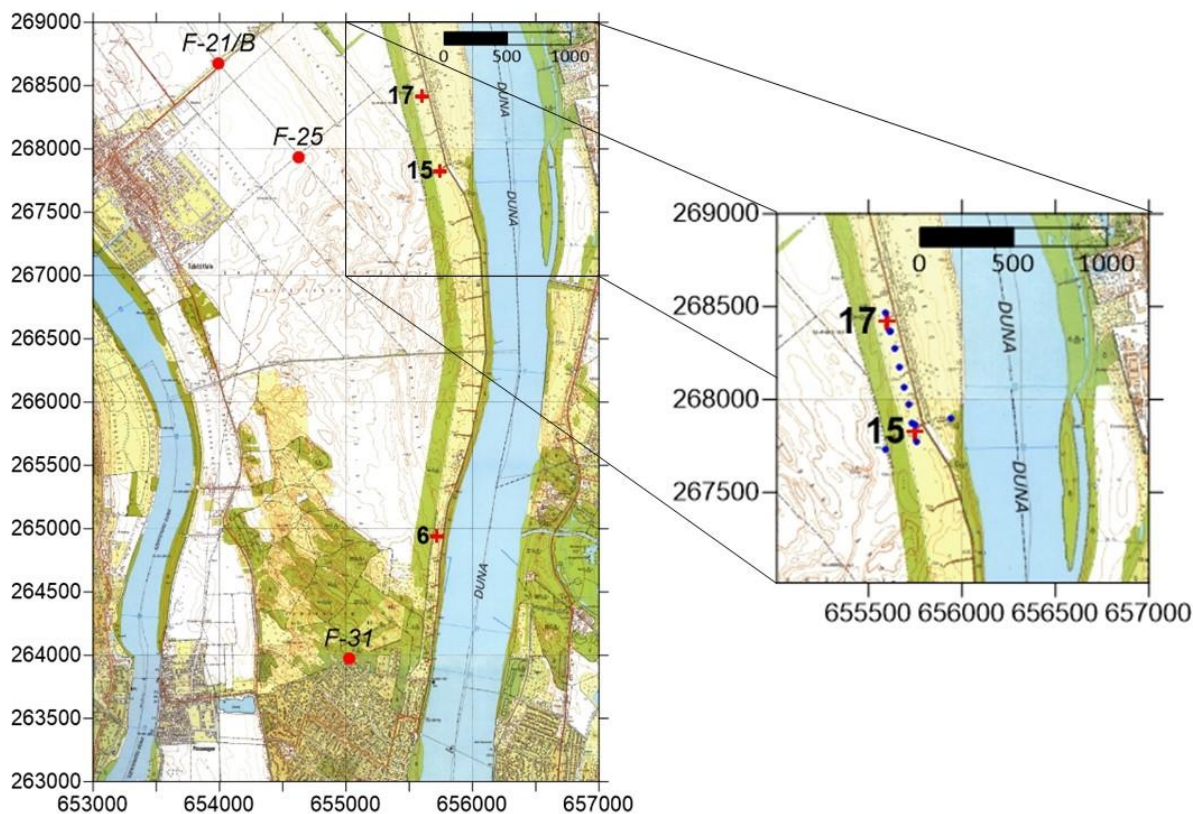
Az óránkénti méréseket Dataqua műszerek segítségével valósítottam meg. Öt kútban történt folyamatos mérés és adatregisztrálás ezen műszerek segítségével. Az öt figyelőkút a 15. számú termelőkút környezetében helyezkedik el (**49. ábra**). A rendelkezésre álló Dataqua műszerek számának megfelelően igyekeztem úgy elhelyezni a műszereket, hogy a Deák és társai (1992), Völgyesi (1993), valamint a KHVM (1999) javaslatainak megfelelően, vagyis a termelőkút tengelyben a Duna partvonalára merőlegesen és a Duna partvonalával párhuzamosan is legyenek vízszintregisztráló műszerek. A műszerek az alábbi paramétereket mérték: vízszint, hőmérséklet, elektromos vezetőképesség.



49. ábra: Figyelőkutak elhelyezkedése, amelyekben folyamatos mérés és regisztrálás történt (a szerző saját szerkesztése).

A havi rendszerességű mérések a háttér vizsgálatára és a következő paraméterek mérésére irányultak: vízszint, oldott oxigén koncentráció, elektromos vezetőképesség, pH. A mérések mellett vízmintavételre is sor került, amely az izotóp hidrológiai vizsgálatok és további vízkémiai vizsgálatra terjedtek ki. A havi rendszerességű mérésekre szolgáló figyelőkutak termelőkutakhoz képest való elhelyezkedését a **50. ábra** mutatja.

A kéthavi rendszerességű mérések a termelőkutak közötti figyelőkút-soron, valamint a 15. termelőkút környékén valósultak meg (**50. ábra**). A mérések a vízszint, az oldott oxigén, a hőmérséklet, valamint az elektromos vezetőképesség vizsgálatára terjedtek ki.



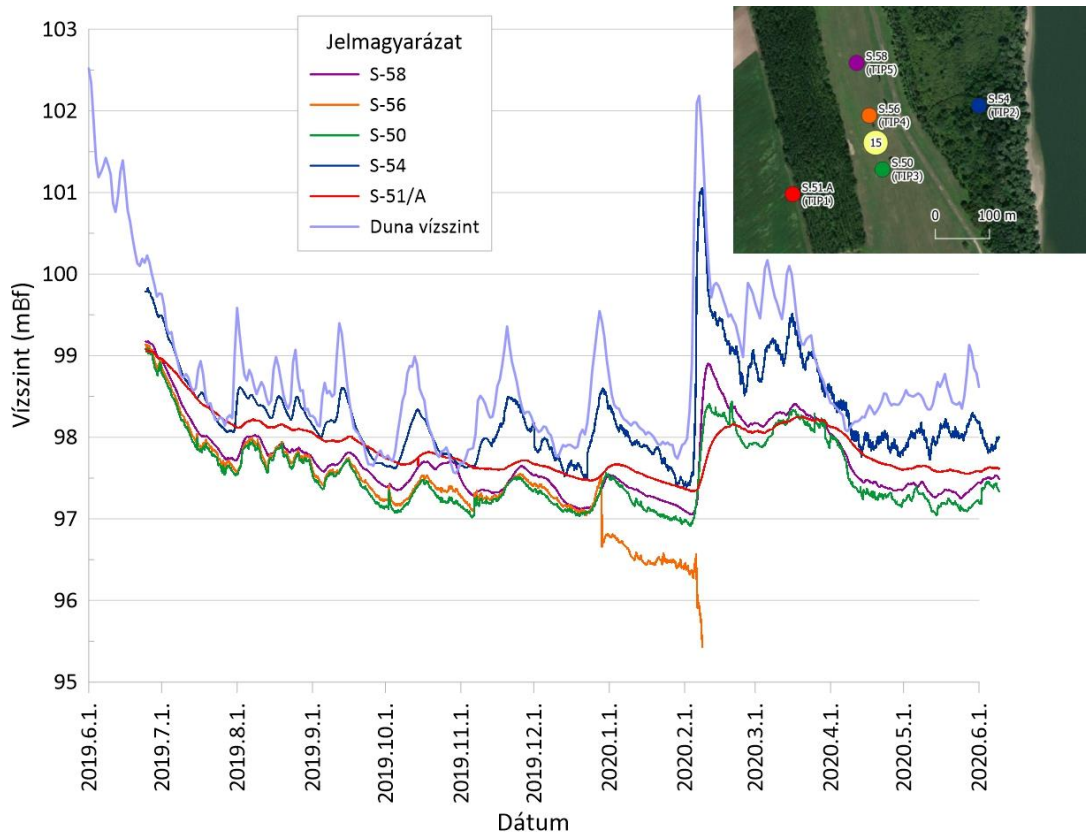
50. ábra: A havi rendszerességgel mintázott figyelőkutak (piros pont), a vizsgált termelőkutak (piros kereszt), és a kéthavi rendszerességgel vizsgált figyelőkutak (kék pont) elhelyezkedése a Szentendrei-szigeten.

Fontos megjegyezni, hogy habár a projektben nagy hangsúly kerül a víz minőségének vizsgálatára, a disszertációnak ez nem célja. Értekezésemben kizárólag mennyiségi kérdésekkel, valamint a víz útjának és tartózkodási idejének vizsgálatával foglalkozok. Az alábbiakban a terepi mérési eredmények bemutatására, és a további vizsgálati irányok kijelölésére szorítok. A vízminőségi paraméterek mérési eredményeiből értekezésemben nem vonok le nagyobb következtetéseket, mivel azokhoz további vizsgálati eszközök szükségesek.

### Vízszint

A figyelőkutakban mért vízszint változásról elmondható, hogy a parti szűrésű reendszerekre jellemző három egység (parti zóna, termelőkutak körüli zóna, termelőkutak háttérben lévő zóna) vízszintjének viselkedése jól megfogható (51. ábra). A Duna vízszintje alatti görbe a Dunához legközelebb eső figyelőkút vízszintjének változását mutatja. A görbéből látható, hogy az S54-es figyelőkút vízszintje leköveti a Duna vízszintjének változását, természetesen alacsonyabb vízszinttel. A termelőkutak háttérét

jellemző S51/A jelű kút esetében a mért vízszint a Duna vízszintváltozását már csak tompítva követi le. Néhol a monitoring kútban mért vízszint meg is haladja a Duna vízszintjét mutatva azt, hogy ha rövid ideig is, de előáll az a helyzet, hogy a Duna megcsapolja a vízadó réteg vizét. Mindezen görbék alatt figyelhető meg a termelőkutak vonalában kialakított figyelőkutak vízszintjének változása. Az S56 jelű kút esetében a vízszintregisztrálás 2020. februárjában megszakadt műszerhiba miatt, amelyet a 51. ábra is mutat. A görbék helyzete mutatja azt a depressziós sávot, amelyet a termelőkutak víztermelése okoz. Ennek ellenére azonban itt is megfigyelhető a Duna vízszintváltozásának hatása. A figyelőkutakban mért vízszint változások regisztrálása nagymértékben segített a hidrodinamikai modell kalibrálásában.



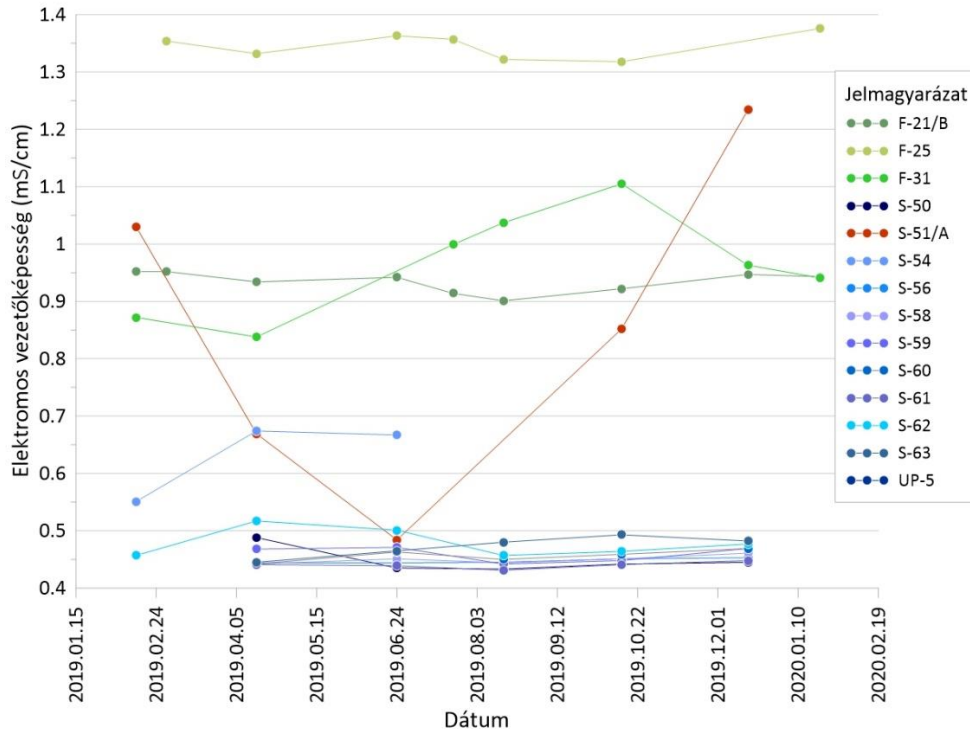
51. ábra: A Duna és a 15. számú termelőkút körüli figyelőkutak vízszintjének változása a vizsgált időszakban.

### Elektromos vezetőképesség

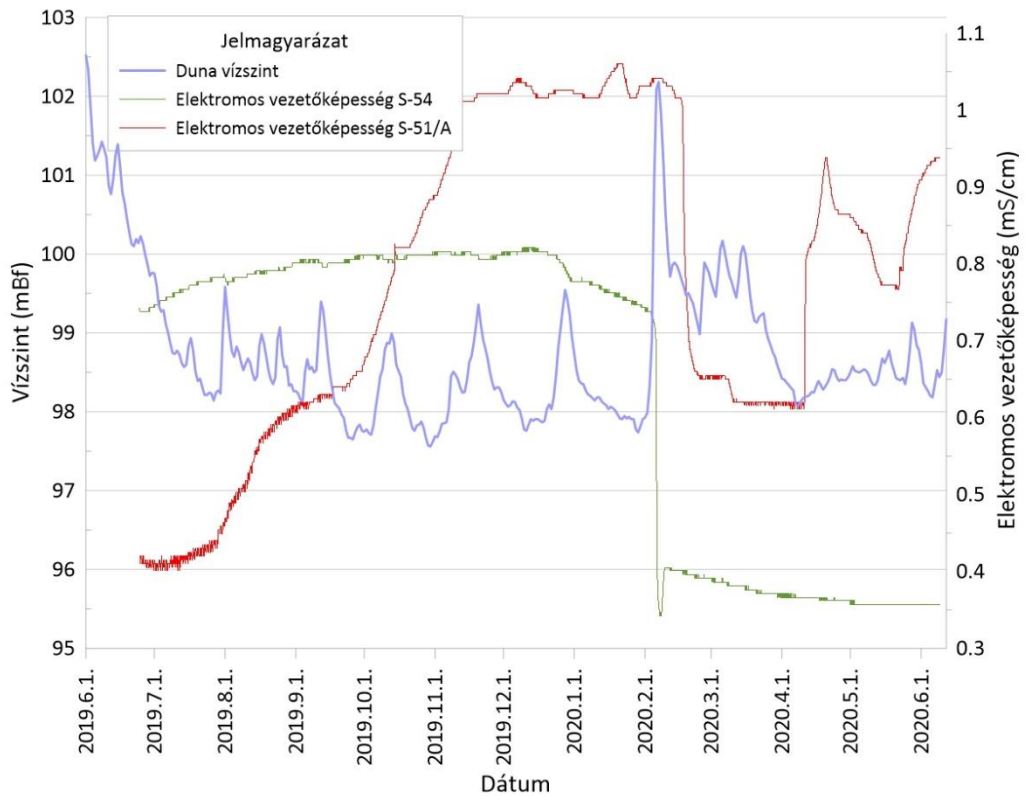
Az elektromos vezetőképesség adatokat két mérési típus szolgáltatta. Elsőként a kézi mérések eredményeit mutatnám be, amelyeket terepi mérőeszközökkel valósítottam meg. A mérések eredményeit a **52. ábra** mutatja. Elmondható, hogy az elektromos vezetőképesség értékek összhangban vannak a figyelőkutak elhelyezkedésével. A 52. ábra alján kék



színárnyalatokkal láthatóak azok az értékek, amelyeket a Dunával párhuzamosan telepített figyelőkút sorban mértem. Az elektromos vezetőképesség értékek 0,4- 0,5 mS/cm értékek között változnak, ezekből egyértelmű tendenciát nem lehet meghatározni, gyakorlatilag állandónak tekinthetők. Ettől kismértékben térnek el az S-54 jelű figyelőkút adatai, azonban nem számottevő módon. Ezen értékektől markánsan elkülönül a háttérrel jellemző figyelőkutak elektromos vezetőképesség értékei, amelyeket zöld színárnyalatokkal mutat az **52. ábra**. Az F-21/B jelű figyelőkút 0,9 és 1 mS/cm érték közötti értékeket, míg az F-25 jelű kút esetében 1,3-1,4 mS/cm értékeket láthatunk, amelyek nem mutatnak nagy ingadozásokat. Az F-31 jelű figyelőkút esetében láthatunk egy emelkedést 2019 áprilistól októberig, ennek okának meghatározása azonban további vizsgálatokat igényel. Ezen háttérben lévő kutak esetében elmondható, hogy elektromos vezetőképesség értékeik markánsan elkülönülnek a termelőkutak közötti figyelőkutak értékeitől. Mivel a háttérben lévő figyelőkutak szántóföld, illetve üdülőövezet mellett találhatóak, az értékek különbségét okozhatja az eltérő területhasználat is. Az S-51/A jelű figyelőkút az elektromos vezetőképesség szempontjából „kakukktójásnak” mondható, mivel itt egy markáns csökkenés, majd június végétől egy markáns növekedés tapasztalható, amelynek okát további vizsgálatok magyarázhatják meg. A mérési és mintavételi kampány során lehetőség nyílt olyan regisztráló műszerek telepítésére, amelyek az elektromos vezetőképesség mérésére és regisztrálására is alkalmasak. A Dunához legközelebb eső S-54 jelű, és a háttérben lévő S-51/A jelű figyelőkutakba kerültek ezek a műszerek. A mért értékek időbeli változását mutatja az **53. ábra**. Megfigyelhető, hogy az S-54 jelű, a Dunához legközelebb eső figyelőkúthoz tartozó értékek a mérés kezdetétől január végéig nem mutatnak markáns változást. Az elektromos vezetőképesség értékek 0,7 és 0,8 mS/cm között mozognak ebben az időszakban. Január végén egy markáns lezökkenés figyelhető meg az elektromos vezetőképesség változásában, amelyet egy újabb, viszonylag egyenletes időszak követ. Ezzel a lezökkenéssel egyidőben megfigyelhető a Duna vízszintjének hirtelen megugrása, amely okozója lehet az elektromos vezetőképesség hirtelen nagymértékű változásának. A háttérben lévő S-51/A jelű figyelőkútról elmondható, hogy a mérés kezdetétől egészen november elejéig folyamatos növekedés tapasztalható, majd egy viszonylag kiegyenlített időszak után itt is megjelenik az a lezökkenés, amelyet az S-54 jelű kútnál már bemutattam. A hirtelen csökkenés időben eltolva jelentkezik, azonban hasonlóképpen a Duna árhullámának tulajdonítható. Ezt követően markáns ingadozás jellemzi az elektromos vezetőképességet, aminek okát további vizsgálatok magyarázhatják meg.



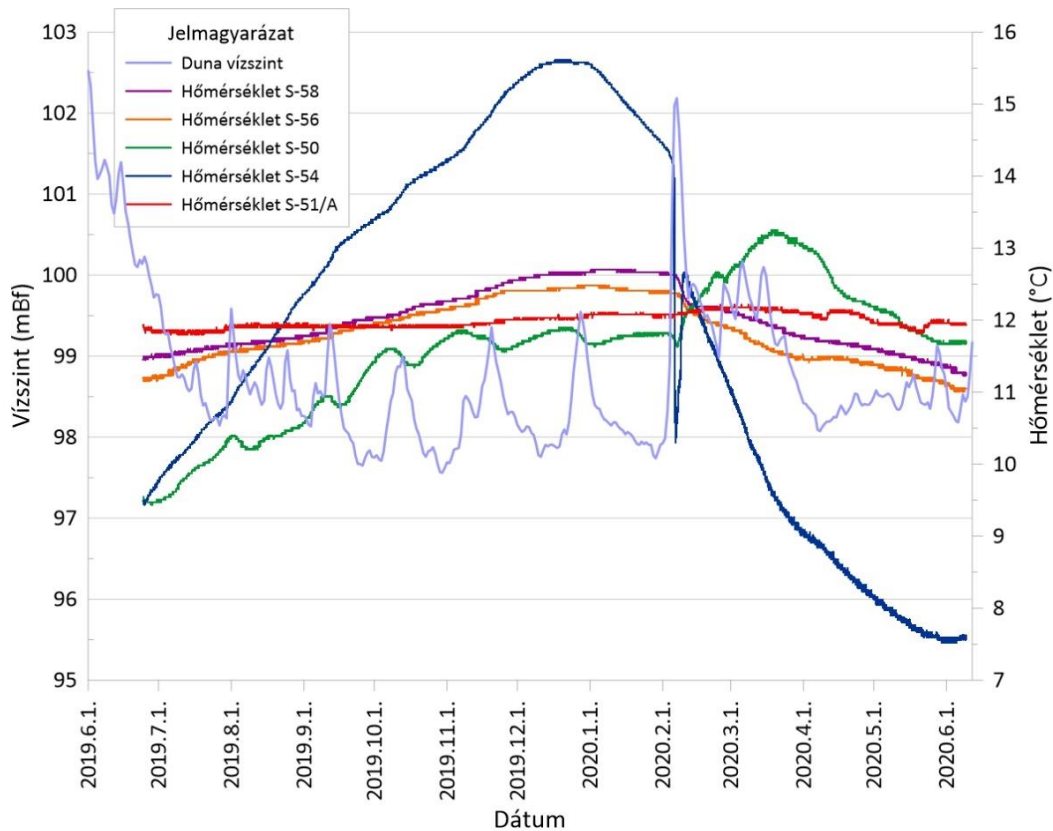
52. ábra: A Szentendrei-szigeten végzett kézi elektromos vezetőképesség mérés eredményei.



53. ábra: Az elektromos vezetőképesség alakulása a Dataqua műszer által mért értékek alapján.

## Hőmérséklet

A már előzőekben említett Dataqua mérőműszerek a **43. ábrán** látható figyelőkutakban mérték, és regisztrálták a hőmérséklet változását. A mérés eredményeit az **54. ábra** szemlélteti. Az **54. ábra** vonalai közül legszembetűnőbb lehet az S-54 jelű figyelőkút hőmérséklet adatai. Itt látható, hogy a hőmérséklet a mérési időtartam alatt egy hullámszerű, nagymértékű növekedést, majd egy nagymértékű csökkenést mutat. Ezt a tendenciát törí meg a február eleji hirtelen hőmérséklet csökkenés és növekedés, ami az ez időben lezajló Dunai árhullámnak tulajdonítható. Ezen kívül az S-54 jelű figyelőkút hőmérsékleti tendenciáját további vizsgálatok magyarázhatják. Az S-51/A, az S-56, valamint az S-58 jelű kutak esetében a hőmérséklet viszonylag egyenletesnek mondható, 11 °C és 13 °C között mozog. A zöld színnel jelzett S-50 jelű kút hőmérsékletgörbéjének hullámzó tendenciáját indukálhatja a Duna vízszintjének változása, azonban a Duna hőmérsékletének változása számomra nem ismert, így komolyabb következtetéseket nem tudok levonni belőle. Érdekes megfigyelni, hogy az S-50, és az S-56 jelű figyelőkút ugyanolyan távolságra van a termelőkúttól és a Dunától is, mégis a hőmérséklet változásában különböző tendenciát mutatnak.



54. ábra: A Dataqua műszerek által mért és regisztrált hőmérséklet adatok a vizsgált területen.

A terepi mérések célja volt, hogy a Tiszta Ivóvíz projekt céljait megvalósítva képet kapjunk a Szentendrei-szigeten elhelyezkedő surányi kútsor hidraulikai viselkedéséről. A mérésekkel kapcsolatos további statisztikai vizsgálatok elvégzése még folyamatban van, azonban a mérési eredmények bemutatása során is megfigyelhetőek olyan jelenségek, amelyek további vizsgálatra érdemesek. Két olyan jelenséget említenék meg, ami ugyanarra a körülményre utalhat.

Az egyik a **47. ábra**, és a **48. ábra** korrelációs együttható értékeinél figyelhető meg. Látható az ábrákon, hogy a Duna vízszint és az üzemi vízszint közötti korrelációs együttható értéke csökkenő tendenciát mutat a Dunától való távolság növekedésével, azonban vannak köztük kiugró értékek. Ilyen kiugró értéket mutat a 18. számú csáposkút, ahol a nagy Dunától való távolság ellenére viszonylag nagy 0,82 körüli korrelációs együttható érték jelentkezik.

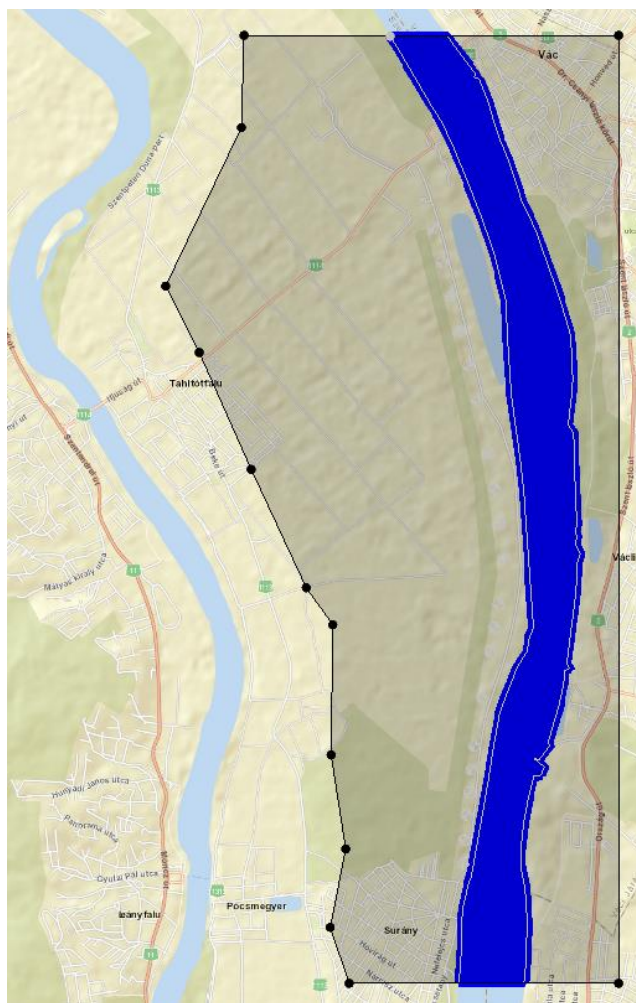
A másik ilyen jelenség a hőmérséklet idősnál figyelhető meg. Az **54. ábra** S-50 jelű kúthoz tartozó zöld görbéjén felfedezhetőek olyan ingadozások, amelyek a Duna vízszintjének változásával hozhatók összefüggésbe. Az S-56 jelű figyelőkút esetében ilyen változások nem tapasztalhatóak, holott ugyanolyan távolságra van a termelőkúttól, valamint a Dunától is.

Ezen két jelenség felveti annak a lehetőségét, hogy habár a vízáadó réteg regionális léptékben homogénnek tekinthető, ennek ellenére lokálisan valószínűsíthetőek kitüntetett áramlási pályák, amik mentén a Duna és a termelőkút jobb hidraulikai kapcsolatban van. Ezen feltételezés bizonyítása további vizsgálatokat igényel annak érdekében, hogy ezen kitüntetett áramlási pályák helyzete meghatározásra kerülhessen.

### 4.3. A surányi vízbázis hidrodinamikai vizsgálata

Munkám során a csápos kutak MNW2 modullal történő hidraulikai szimulációinak elméleti eredményeit a gyakorlatban is alkalmazom. A csápos kutak valós földtani szituációban történő hidrodinamikai modellezésére a Szentendrei-szigeten elhelyezkedő surányi vízbázison elhelyezkedő kútsort választottam. Célom volt, hogy az MNW2 modult alkalmazzam egy ivóvízbázis hidrodinamikai viszonyainak megismerésére. A modellezés során első lépésként a modell határait kellett definiálnom. A lehatárolás során olyan szempontokat kell figyelembe venni, amelyek segítenek abban, hogy a kútsor, a Duna, valamint a háttér hidraulikai kölcsönhatásait vizsgálni tudjuk. Az északi, déli, keleti, illetve nyugati irányban történő lehatárolást az alábbiakban ismertetem (**55. ábra**):

- Az északi, és a déli határt a kútsor legszélső (1-es és 20-as) kútjai és a következő kútsor közötti távolság felénél vettem fel. Ezzel a szomszédos kútsorok hatását nem veszem figyelembe.
- A nyugati határt a Szentendrei-sziget magas topográfiai viszonyokkal jellemezhető pontjait összekötő szakaszok határozzák meg. Ebben az esetben a Szentendrei-sziget Szentendrei Duna-ágán lévő víztermelő létesítmények surányi vízbázisra gyakorolt hatása is elhanyagolható mértékű.
- A modell keleti határának kijelölésében több szempont is szerepet játszott. Először is nem megfelelő mederkapcsolat esetén előállhat olyan helyzet, amikor a folyó túlpártjáról is érkezhetsz víz. Ennek kivizsgálására a keleti határt a Duna túlpártjára is ki kellett terjeszteni. A később megismert információk alapján, valamint az első futtatási eredmények alapján elmondható, hogy a túlpárttól nem érkeznek vízrészecskék.



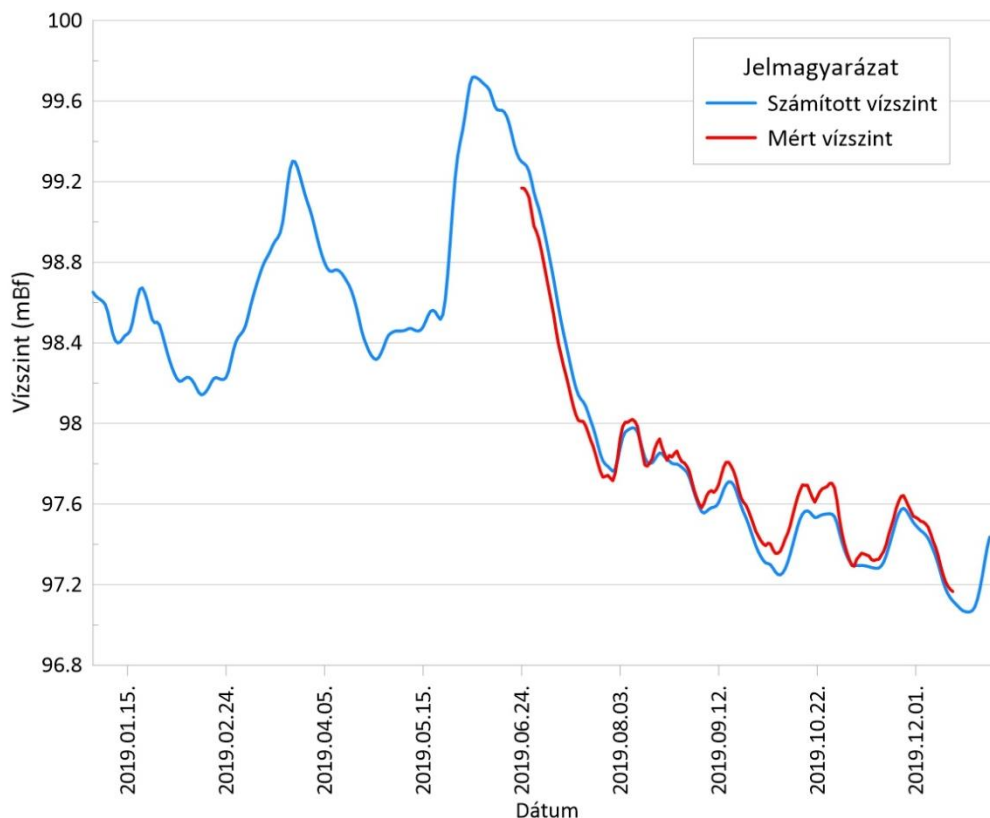
55. ábra: A surányi vízbázis hidrodinamikai modelljének határai.

Peremfeltételként az úgynevezett „no-flow” peremeket használtam, a terület sajátosságai miatt. A modellben a Dunát folyó cellákkal definiáltam. A termelőkutak, mint a vízkivételt szolgáló eszközöket az MNW2 modul segítségével építettem be a modellbe. Ezzel kettő célom volt: egyrészt, hogy a csápos kutak geometriáját minél pontosabban tudjam reprodukálni a modellben, másrészt pedig, hogy a pontosabb geometria segítségével az áramlási viszonyok és az elérési idők is pontosabban meghatározhatóbbak legyenek. Az ehhez szükséges koordinátákat a Fővárosi Vízművek bocsájtotta rendelkezésemre. A csápok iránya és hossza a kialakítás után meghatározásra kerültek, így a modellben felvett geometria a ténylegesen megvalósult állapotot mutatja. Az MNW2 modulban a kutak definiálása során a THIEM veszteségi korrekciót alkalmaztam.

A kalibrálás céljából a Duna vízjárásának, valamint a kutak termelésének rendkívüli változékonysága miatt tranziens modell elkészítésére volt szükség. A termelőkutak vízkivételeit, a hozzájuk tartozó üzemi, valamint Duna vízszinttel a Fővárosi Vízművek napi gyakorisággal regisztrálja. Ezen adatokat a Fővárosi Vízművek rendelkezésemre bocsájtotta. A kalibrálásban a területen lévő figyelőkutak voltak segítségemre. A 15. számú kút környezetében a Duna partjával párhuzamosan, valamint merőleges irányban lévő figyelőkutakban Dataqua műszereket helyeztem el, amelyek óránként regisztrálták a kútban kialakuló vízszintet. A tranziens modell kalibrációjában ezen vízszintadatokhoz viszonyítottam a modell által számolt vízszint értékeket. A kalibráció során a vízföldtani paraméterek változtatásával elfogadható mértékű az egyezés a mért és a számított adatok között. A két adathalmaz korrelációs együtthatóját kiszámoltam, amely értékeket a 8. táblázat szemlélteti. A 8. táblázat valamint az **56. ábra** alapján látható, hogy a mért és számított vízszintek jól korrelálnak egymással, így a modellezés kalibrálása sikeresnek mondható.

8. táblázat: A korrelációs együttható értékei a mért és a számított adatok között az öt figyelőkút tekintetében.

Kút jele	Korrelációs együttható (-)
S-58	0.9923
S-56	0.9943
S-54	0.9964
S-50	0.9928
S-51/A	0.9965



56. ábra: Az S-58-as figyelőkútban mért, és számított vízszintek összehasonlítása.

A kalibráció során a vízföldtani paramétereket változtatva értem el a számított és a mért vízszintek közti nagymértékű hasonlóságot. A paraméterezés kulcs eleme a szivárgási tényező volt. Az alkalmazott modellparamétereket a 9. táblázat mutatja.

9. táblázat: A kalibrált tranziens modellben alkalmazott szivárgáshidraulikai paraméterek.

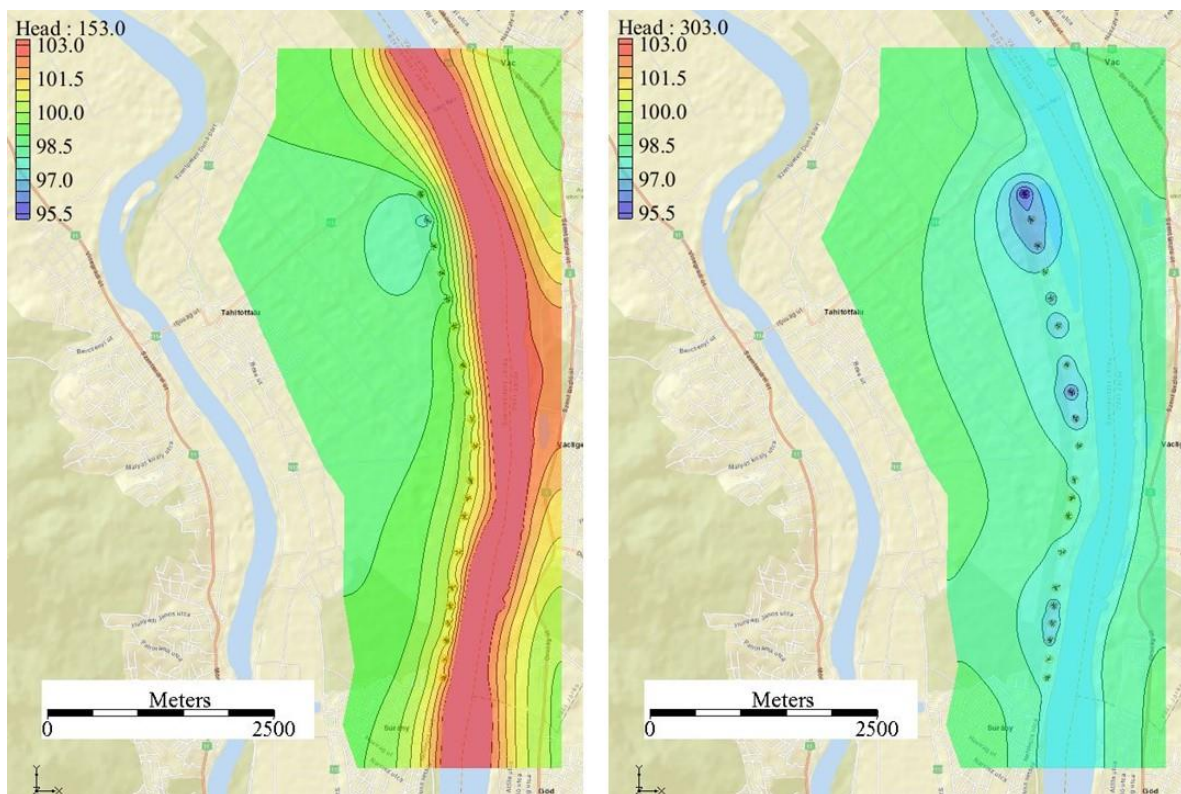
	Horizontális szivárgási tényező (m/nap)	Vertikális anizotrópia (-)	Tárolási tényező (1/m)	Fajlagos hozam (-)	Mederkapcsolati hatásfok ((m <sup>2</sup> /d)/(m <sup>2</sup> ))
1. réteg	25	1	0.0003	0.15	170
2. réteg	160	1	0.0005	0.2	

A Surányi vízbázis hidraulikai modellezésének több célja volt, amelyeket az alábbiakban foglalok össze:

- a víztermelés, valamint a Duna vízszintváltozásának hatására kialakuló vízszinteloszlás meghatározása,
- a vízadóban kialakuló vízszint változásának nyomon követése,

- a Tiszta Ivóvíz Program során a termelőkutakból vett minták elérési idejének meghatározása,
- a folyóhányad meghatározása,
- a tartózkodási idő meghatározása.

A modell kalibrálása során elértem, hogy a vizsgált területen viszonylag nagy pontossággal meghatározható a vízáadó rétegben kialakuló vízszinteloszlás. Ha a Duna oldaláról két extrémítást, az adott év legalacsonyabb és az adott év legmagasabb vízszintjét vesszük figyelembe akkor a következők mondhatók el: A legmagasabb Duna vízállás esetében a Dunának vízáadó potenciálszintjére gyakorolt hatása olyan nagymértékű, hogy a kutak termelése gyakorlatilag elhanyagolható mértékű depressziót okoz a vízáadó rétegben (57. *ábra* bal oldal). A legalacsonyabb Duna vízállást figyelembe véve azt láthatjuk, hogy itt is jelentékeny mértékben hat a Duna víztömege a vízáadó réteg vízforgalmára, azonban a terület északi részén, a Dunától távolabb eső kutak okozta depresszió jelentős mértékben megmutatkozik, valamint megfigyelhető annak lokális kiterjedése (57. *ábra* jobb oldal).



57. ábra: A legmagasabb (102,52 mBf), és legalacsonyabb (97,56 mBf) Duna vízálláskor kialakuló potenciálszintek a 2019-es évben.

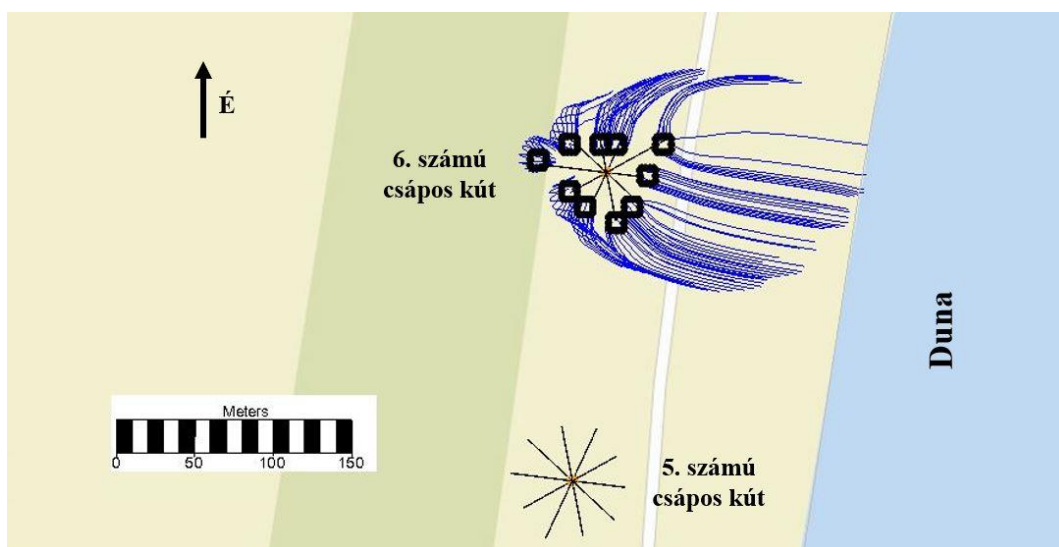


A 3.3 fejezetben bemutattam azokat az elérési idő értékeket, amelyek fontos szerepet játszanak a csápos kutak üzemelése során. Megállapítható azonban, hogy a nagyléptékű, egész kútsorokra kiterjedő modellezések esetében ezek megállapítása nehézségekbe ütközik a következők miatt:

- a nagyobb modellek nagyobb rácshálóosztást, és ezáltal nagyobb cellákat igényelnek, mint az egy kútra alkalmazott modellek esetében,
- a nagyobb méretű modellek esetében a rétegek vastagsága és a csápok átmérője között nagyságrendi különbségek vannak.

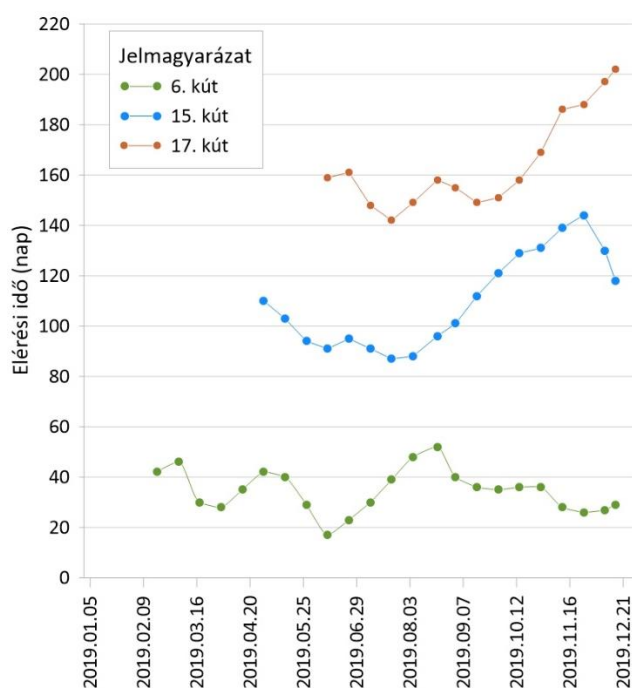
Egyszóval elmondható, hogy a nagyobb léptékű modelleknél nem tudunk olyan finom rácshálóosztást alkalmazni, hogy az átlagos tartózkodási idő számítható legyen. A nagyléptékű modellek esetében nem lehetséges a tartózkodási idő aprólékos meghatározására. Ezen okból kifolyólag a surányi kútsor vizsgálatok a legrövidebb tartózkodási idő mértékét határoztam meg. A legkisebb tartózkodási idő meghatározásánál még egy közelítéssel kellett élnem. A cellák mérete miatt a csápok mentén nem tudtam nagy felbontással megvizsgálni a tartózkodási idő változását a csáp mentén. Éppen ezért a tartózkodási időt a legnagyobb hozammal rendelkező csáp végekhez számoltam (58. ábra).

Vízminőségi oldalról megközelítve a fogalmat könnyen belátható, hogy ha egy kémiai stabil nyomjelző koncentrációjának változását vizsgáljuk a Dunában, akkor a koncentráció változása az általam meghatározott tartózkodási idő elteltétől észlelhető a termelőkút vizében. A termelt víz tulajdonképpen különböző korú, tehát különböző tartózkodási idővel rendelkező vizek keveréke.



58. ábra: Az elérési idő értelmezése a 6. számú csápos kút példáján (a szerző saját szerkesztése).

A tartózkodási idő mellett a háttérvíz fogalmához is a klasszikustól eltérő módon kellett viszonyulnom a surányi kútsor modellezése során. Klasszikus értelemben háttérvíznek nevezzük azt a vizet, ami nem a folyóból származik és így eltérő vízkémiai tulajdonságokkal jellemezhető. A surányi kútsor esetében más helyzetről beszélhetünk, hiszen a kútsor egy szigeten helyezkedik el. A Szentendrei-szigetet mindkét oldalról az a Duna folyó határolja, ami alapvetően meghatározza a terület vízháztartását. A surányi kútsor esetében, vizsgálataim alapján elmondható, hogy a termelt víz 100 %-ban a Dunából jön, viszont különböző úton és különböző tartózkodási idővel. A további modellezési feladatokat három víztermelő létesítmény - a 6., a 15., és a 17. számú kút - vizsgálatára szűkítettem, mivel a Tiszta Ivóvíz projekt során ezen kutakból történt rendszeres vízmintavétel. Az elérési idő meghatározása azért volt kulcsfontosságú ezeknél a kutaknál, mivel a későbbi vízkémiai vizsgálatok alapján meghatározhatóak a területen lejátszódó transzportfolyamatok, valamint a szűrőréteg hatékonysága. A kutak jellemzői, hogy kialakításuk hasonló, viszont Dunától való távolságuk különböző. Minden egyes megvett mintára kiszámítottam az elérési időt, vagyis meghatároztam azt az időtartamot, amikor a Duna esetleges stabil nyomjelzőinek mennyiségi változása először megjelenhet a termelőkútban. Az elérési időket a 10. táblázat, valamint a **59. ábra** szemlélteti. A 15. és 17. kútnál látható adathiány azért állt elő, mert a vizsgált évben azokhoz a mintákhoz nagyobb elérési idő tartozik, mint az addigi szimulált időlépcsők száma.



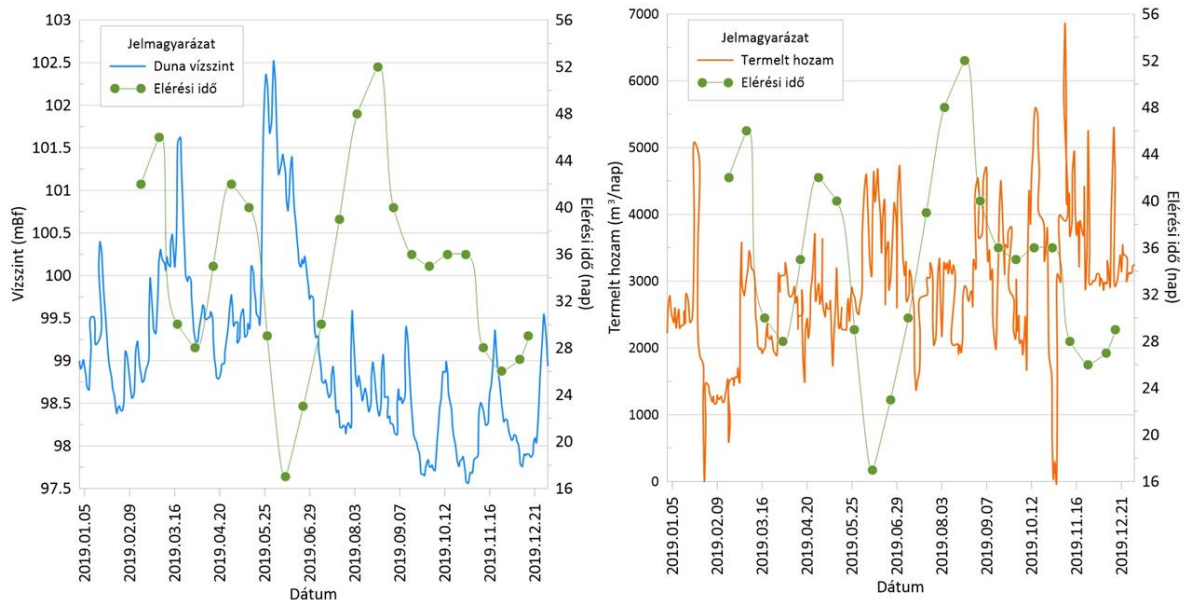
59. ábra: A vizsgált termelőkutakból vett mintákhoz tartozó elérési idők változása.

10. táblázat: A vizsgált három kútban vett minták elérési ideje.

Mintavétel dátuma	Időlépcső	Elérési idő (nap)		
		6. kút	15. kút	17. kút
2019.02.18	49	42		
2019.03.04	63	46		
2019.03.18	77	30		
2019.04.01	91	28		
2019.04.15	105	35		
2019.04.29	119	42	110	
2019.05.13	133	40	103	
2019.05.27	147	29	94	
2019.06.10	161	17	91	159
2019.06.24	175	23	95	161
2019.07.08	189	30	91	148
2019.07.22	203	39	87	142
2019.08.05	217	48	88	149
2019.08.21	233	52	96	158
2019.09.02	245	40	101	155
2019.09.16	259	36	112	149
2019.09.30	273	35	121	151
2019.10.14	287	36	129	158
2019.10.28	301	36	131	169
2019.11.11	315	28	139	186
2019.11.25	329	26	144	188
2019.12.09	343	27	130	197
2019.12.16	350	29	118	202
Minimum		17	87	142
Maximum		52	144	202
Átlag		35	110	165

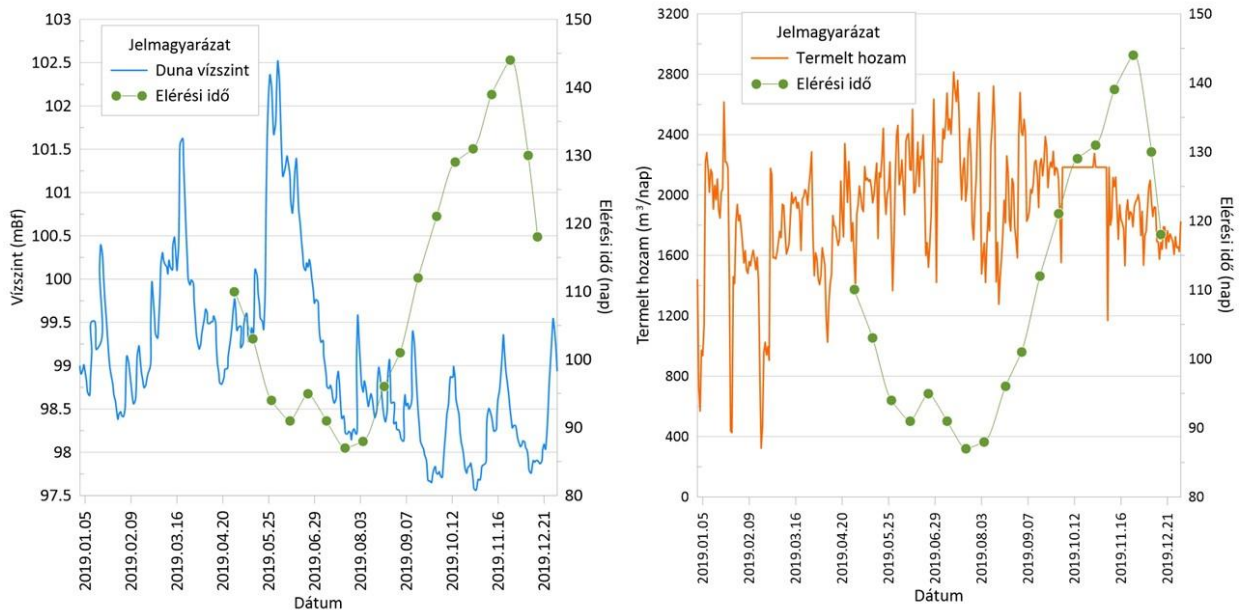
Az elérési időkről elmondható, hogy mértékük nagy változatosságot mutat. A Dunához a három vizsgált csápos kút közül a legközelebb eső 6. számú kút átlagosan 35 napos elérési idővel rendelkezik, míg a legtávolabb eső 17. kút már 165 nap átlagos elérési idővel jellemezhető. Látható tehát a Duna és a termelés változásának hatása, valamint az, hogy az elérési időt a Dunától való távolság nagymértékben befolyásolja. Az eredmények azt mutatják, hogy a surányi kútsorhoz tartozó elérési idő értékek széles intervallumban mozognak. A maximum és minimum értékek különbségét megfigyelve megállapítható, hogy akár 60 napos eltérés is tapasztalható egy adott kút esetében. Az egyes kutak esetében megvizsgáltam az elérési idők változását is. Az elérési időt két hatás befolyásolhatja markánsan a termelt hozam, valamint a Duna vízállásának változása. A három vizsgált kút

esetében összehasonlítottam az elérési idő változását, valamint a termelt hozamot és a Duna vízállását az idő függvényében. A 6. számú kúthoz tartozó adatokat és eredményeket a **60. ábra** szemlélteti.



60. ábra: Az elérési idő változásának összehasonlítása a Duna vízszintváltozásával (bal oldal), valamint a termelt hozammal (jobb oldal) a 6. számú csápos kút esetében.

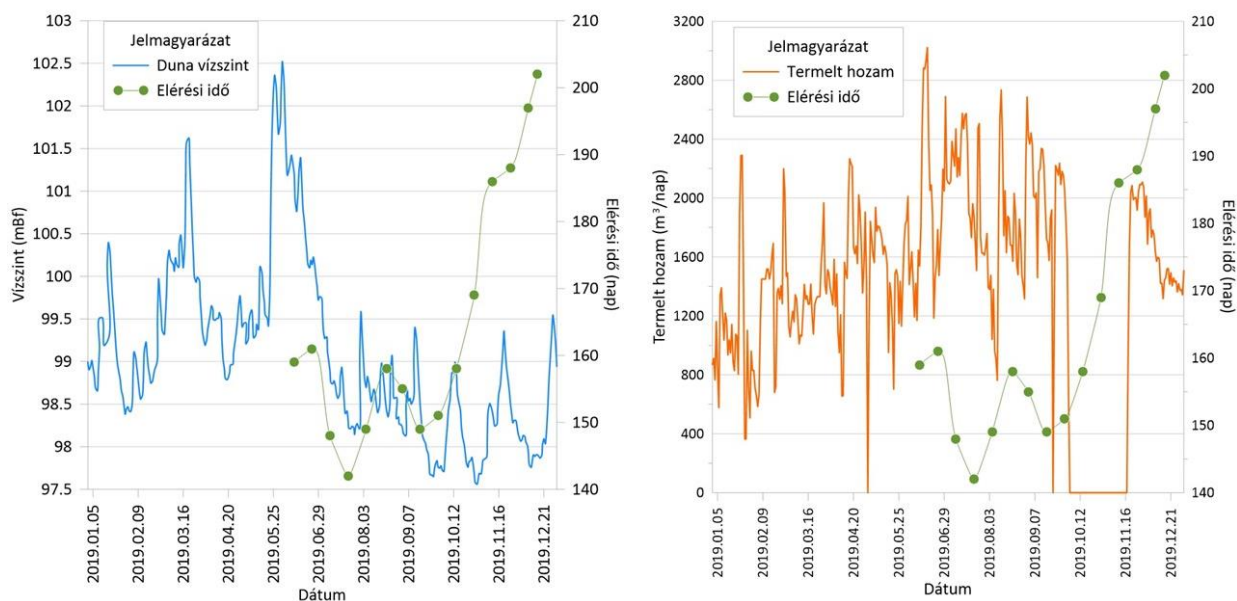
A 6. számú termelőkútról az **60. ábra** alapján a következők mondhatók el. A Duna vízszintjének emelkedésével a hidraulikus gradiens is emelkedik a vízadó rétegben. A gradiens emelkedése magával vonzza az áramlási sebesség növekedését, így az elérési idő csökken. A Duna vízszintjének növekedése tehát az elérési idő csökkenését indukálja. A 6. számú csápos kút esetében ez az ellentétesen mozgó tendencia jól lekövethető, amelyet az **60. ábra** bal oldala mutat. A késleltetés minimális, így megállapítható a kút Dunával való nagyfokú hidraulikai kapcsolata. A termelt hozam is hatással van ebben az esetben az elérési időre, azonban ennek hatása kisebb mértékű, mint a Dunáé. A 2019-es év október hónapjában extrém mértékben megugrott a termelés a 6. számú csáposkútnál. A változás mértéke nagyjából 6 000 m<sup>3</sup>/nap egy-két hét leforgása alatt. Ez után a nagymértékű változás után az elérési idő csökkenése figyelhető meg, amelyet a hozam hirtelen megugrásának tulajdonítok. Ebben az időszakban a Duna vízszintje ugyanis nem mutat nagymértékű ingadozásokat.



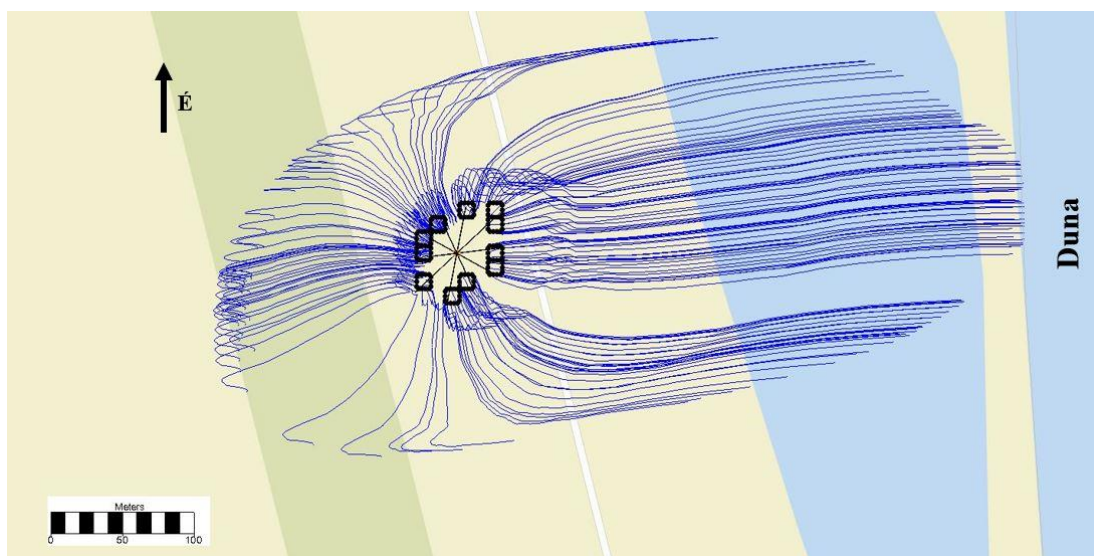
61. ábra: Az elérési idő változásának összehasonlítása a Duna vízszintváltozásával (bal oldal), valamint a termelt hozammal (jobb oldal) a 15. számú csápos kút esetében.

Az **61. ábra** mutatja a 15. számú csápos kút jellemző elérési időket, hozamértékeket, valamint a Duna vízállást. Az ábra bal oldalán lévő összehasonlítást megfigyelve láthatjuk, hogy az elérési idő változása ellentétes mozgást végez a Duna vízszintjének változásával. A 6. kúthoz hasonlóan itt is meghatározhatóak azok az ellentétesen mozgó tendenciák, amik a parti szűrésű rendszereket jellemzik. Például a május-június tájékán a Duna vízszintjében bekövetkező nagymértékű csökkenés megmutatkozik az elérési idő növekedésében ugyanúgy, mint a 6. számú termelőkútnál. A különbséget az időbeni eltolódás adja. Ebben az esetben a Duna vízszintjének változása az elérési időben bekövetkező változásokat időben eltolva indukálja. A termelt hozamot megvizsgálva láthatunk kiugró, illetve változó értékeket, azonban ezek a hozamváltozások viszonylag szűk intervallumban mozognak. A hozam tehát szignifikáns változásokat nem okoz az elérési idő tekintetében. A hozam főként a kút környezetében kialakuló áramképet, az áramvonalak irányát befolyásolja, amelyet a 17. számú kút vizsgálata mutat a leghatározottabban. A 17. számú termelőkút vizsgálatához tartozó adatokat mutatja a **62. ábra**. A 17. számú csápos kút esetében is megfigyelhető az előzőekben ismertetett ellentétes tendencia a Duna vízszintet, valamint az elérési idő változását illetően. Megfigyelhető az **62. ábra** bal oldalán, hogy a Duna vízszintjének markáns csökkenése által okozott elérési idő növekedés időben még inkább eltoltan jelenik meg. A hozamot illetően elmondható, hogy az elérési időben a vizsgált időszakban nem okozott szignifikáns eltérést. A kút környezetében kialakuló áram pályákat megfigyelve

láthatjuk, hogy a kút termelésének ingadozása befolyásolja az árapályák alakját, valamint a vízrészecske által megtett úthosszt. Ezen változásokat a **63. ábra** mutatja.



62. ábra: Az elérési idő változásának összehasonlítása a Duna vízszintváltozásával (bal oldal), valamint a termelt hozammal (jobb oldal) a 17. számú csápos kút esetében.



63. ábra: Az árapályák változása a 17. csápos kút környezetében.

## V. tézis:

A MODFLOW programcsomag MNW2 moduljának alkalmazásával a surányi csáposkút sor vizsgálatának segítségével bebizonyítottam, hogy a folyó vízállásának változása az elérési idő változásában lekövethető, azonban annak időbeli késleltetése az adott termelőkút folyótól való távolságának függvénye.

Az tartózkodási idők kiszámítása a Tiszta Ivóvíz projekthez kapcsolódó további vízkémiai vizsgálatokhoz elengedhetetlen volt. A projekt további vizsgálatai érintik a felszín alatti közegben lejátszódó vízkémiai folyamatok kérdéseit is. Ezen folyamatok megértéséhez fontos ismerni a tartózkodási idő mértékét. A tranziens modellben számított tartózkodási idők sokkal pontosabb képet mutatnak a vízrészecskék mozgásáról és ezáltal a lejátszódó transzportfolyamatokról. Az MNW2 modul használatával a csápos kutak kialakítására jellemző geometriával pontosabb képet kapunk a parti szűrésű rendszerek áramlási jellegzetességeiről.

## 5. Összefoglalás

Értekezésemben az ivóvízellátás egyik fontos forrásával, az úgynevezett parti szűrésű vízbázisokkal foglalkoztam. Áttekintettem a parti szűrésű rendszerek működését, valamint főbb hidrogeológiai jellemzőit. Munkám során kitértem a parti szűrésű rendszerek jellemző műtárgyaira, valamint egy speciális vízkivételi mű, az úgynevezett csápos kút geometriai és hidraulikai sajátosságaira. Munkám új tudományos eredményeit öt tézisben foglaltam össze, amelyeket dolgozatomban külön kiemeltem.

Az értekezés elkészítése során a Groundwater Modeling System programcsomag volt segítségemre a modellezési feladatok elvégzésében. Munkám során terepi mérések is segítettek a csápos kutak, valamint a parti szűrésű rendszerek hidraulikai sajátosságainak megismerését.

A parti szűrésű vízbázisok gyakran alkalmazott vízkivételi műtárgya a csápos kutak. Ezen kúttípusok sajátos geometriával és hidraulikai viszonyokkal jellemezhetőek. A Modflow Revised Multi-Node Well (MNW2) csomagja egy olyan véges differencia módszert alkalmazó program, amely alkalmas ferdén, valamint horizontálisan fúrt, és több szinten szűrőzött kutak hidrodinamikai vizsgálatára. Szimulációs vizsgálataim elsősorban arra irányultak, hogy az MNW2 modul csápos kutak hidraulikai szimulációjára való alkalmasságát megállapítsam. Az MNW2 modul által számított a kútkörnyezetben kialakult vízszint-, illetve vízszint különbség értékeket összehasonlítottam más független módszerekkel számított értékekkel. Munkámban kitértem a csáp menti hozameloszlás összehasonlító vizsgálatára is. Mindezen eredmények alapján bizonyítottam az MNW2 modul csápos kutak hidraulikai szimulációjára való alkalmasságát.

Értekezésemben vizsgáltam a csápos kutak kialakításának, valamint folyótól való távolságának hatását a kialakuló depresszióra, a hozamarányokra, valamint a tartózkodási időre. Meghatároztam a tartózkodási idő értelmezését csápos kutak esetében, valamint az átlagos tartózkodási idő változásának jellegét a csápos kút folyótól való távolságának függvényében.

Az MNW2 modul használata nem csak elméleti, hanem gyakorlati síkon is megtörtént. A Szentendrei-szigeten lévő surányi ivóvízbázis a Fővárosi Vízművek olyan parti szűrésű vízbázisa, ahol a víztermelés csápos kutakkal történik. A húsz kútból álló kútsor olyan kiváló hidrogeológiai adottságok között működik, amelyre Budapest vízellátása nagymértékben támaszkodik. A Fővárosi Vízművektől kapott adatok, valamint terepi bejárások, mérései



kampányok alapján, az MNW2 modul használatával elkészítettem a surányi ivóvízbázis hidrodinamikai modelljét. A Szentendrei-sziget hidrogeológiai sajátosságai, valamint a kutak kialakítása és geometriája miatt a parti szűrésű rendszerek alapvető fogalmait, ezen specifikus helyzethez kellett igazítanom. A terepbejárások, terepi mérések, valamint a szimulációs vizsgálatok alapján elmondható, hogy a vízbázis 100 % mértékben a Dunából táplálkozik, viszont a termelt víz vízadóban való tartózkodási ideje különböző. Ennek eredményeképpen a termelt víz, különböző korú vizek keverékeként jellemezhető. A surányi vízbázis modellezésének eredményeként a Tiszta Ivóvíz projektben vizsgált termelőkutakhoz tartozó elérési időket meghatároztam. Mivel a Duna vízszintje, és a víztermelés mértéke nagyfokú változatosságot mutat, minden egyes minta más elérési idővel jellemezhető. Ezen elérési időket minden vízmintához tartozóan kiszámítottam.

Fontosnak tartom, hogy a jövőben munkám során a folyó és környezetének kapcsolatával foglalkozzak. A csápos kutak hidraulikai vizsgálatát a jövőben is tervezem folytatni, hiszen ezen műtárgytípus nagy számban alkalmazott a parti szűrésű víztermelésben. Kutatásommal szeretnék hozzájárulni ahhoz, hogy a csápos kutak hidraulikai viszonyait más földtani környezetben is jobban megismerhessem.

## **6. Summary**

In my PhD thesis work, I dealt with one of the most important sources of drinking water supply, called riverbank filtrated system. I reviewed the operation, and main characteristics of riverbank filtration (RBF) systems. During my work I explained the typical well types of RBF systems, as well as the geometrical and hydraulic characteristics of a special water abstraction equipment, so called horizontal collector well, or Ranney-well. I show my new scientific results in five theses.

During the preparation of my work the Groundwater Modeling System software package was used to help me to perform the modelling tasks. During my work field measurements, also helped to understand the hydraulic characteristics of the Ranney wells, and RBF systems. Horizontal collector wells are often used well types to extract water from RBF systems. These well types can be characterized by specific geometry and hydraulics. The Revised Multi-Node Well (MNW2) module of Groundwater Modeling System is a program which use finite difference method. The MNW2 is developed to simulate the hydraulic conditions of horizontal wells, and slanted wells. My simulations were mainly aimed at determining the suitability of the MNW2 module for hydraulic simulation of horizontal collector wells. The water level and water level difference values calculated by the MNW2 module in the well environment were compared with the values calculated by other independent methods. In my work, I also covered the comparative study of the yield distribution along the arm. Based on all these results, I proved the suitability of the MNW2 module for hydraulic simulation of horizontal collector wells.

In my dissertation, I examined the effect of the formation of horizontal collector wells and their distance from the river on the resulting depression, yield rates, and access time. I determined the interpretation of the access time in the case of horizontal collector wells and the nature of the change in the access time as a function of the distance of the horizontal collector well from the river.

The use of the MNW2 module has taken place not only on a theoretical but also on a practical level. The well group of Surány is a RBF system, which is located on the Szentendre-island, where the drinking water is produced by horizontal collector wells. The series of twenty wells operates among such excellent hydrogeological conditions, on which Budapest's water supply relies to a large extent. Based on the data received from Budapest Waterworks, as well as on field trips and measurement campaigns, I prepared the

hydrodynamic model of the Surányi drinking water base using the MNW2 module. Due to the hydrogeological features of Szentendre island, as well as the design and geometry of the wells, I had to adapt the basic concepts of RBF systems to this specific situation. Based on the field trips and the simulation studies, it can be said that the water base feeds 100% from the Danube, but the access time of the produced water in the aquifer is different. As a result, the water produced can be characterized as a mixture of waters with different residence time. As a result of the modeling, I determined the access times belonging to the production wells examined in our project called “Drinking water: multidisciplinary assessment of secure supply from the source to the consumers”. As the water level of the Danube and the extent of water production show a high degree of variability, each sample can be characterized by a different access time. These access times were calculated for each water sample. With the help of the MNW2 module, the geometry of horizontal collector wells can also be taken into account in the hydrodynamic modeling of RBF water bodies.

I consider it important to address the relationship between the river and its environment in my future work. I plan to continue the hydraulic testing of horizontal collector wells in the future, as this type of structure has been used in large numbers in RBF water production. I would like to contribute my research to better understand the hydraulic conditions of horizontal collector wells in other geological environments.

## 7. Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti tudományos témavezetőmet, **Prof. Dr. Szűcs Pétert** a szakmai támogatásért, értekezésem elkészítésében való segítségéért.

Köszönettel tartozom **Dr. Zákányi Balázs** társ-témavezetőmnek a szakmai segítségért, valamint a hasznos tanácsokrért.

Szeretném megköszönni **Dr. Kovács Baláznak** a hasznos észrevételeket, és az iránymutatást, amit dolgozatom elkészítése során kaptam Tőle.

Köszönettel tartozom a **Környezetgazdálkodási Intézet Munkatársainak**, akik biztosították számomra azt a szakmai háttérrel, amelyben megfelelően dolgozhattam, észrevételeikkel segítették a dolgozat fejlődését. Külön köszönet illeti **Kolencsikné Dr. Tóth Andreát**, és **Fekete Zsombort**, akiktől a Tiszta Ivóvíz Program keretében végzett munka során hasznos tanácsokat és segítséget kaptam.

Köszönet illeti **Dr. Székely Ferencet**, aki a csápos kutakkal kapcsolatos modellezési munkáimat segítette, és biztatott a minél pontosabb munkavégzésre.

Köszönöm Családomnak és Barátaimnak, akik munkám során támogattak, és erőt adtak a nehéz időszakokban.

Az értekezés a **2018-1.2.1-NKP-2018-00011** azonosító számú „**Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig**” című projekt támogatásával valósult meg. Köszönet illeti a projektben részt vevő konzorciumi partnereket is.

*Ad maiorem Dei gloriam.*

## 8. Irodalomjegyzék

- 123/1997. (VII. 18) Korm. rendelet a vízbázisok, a távlati vízbázisok, valamint az ivóvízellátást szolgáló vízilétesítmények védelméről
- Andrásfalvy B. (2007): A Duna mente népének ártéri gazdálkodása, Ekvilibrium Kiadó, ISBN: 9789630617420.
- Babac, D.; Babac, P. (2009): Wells with horizontal drains, Theory, practice, calculation examples, Belgrade
- Bakker M., Kelson V. A., Luther K. H. (2005): Multilayer analytic element modeling of radial collector wells. *Ground Water* 43(6), 926-934.
- Balassa G., Gondár K., Gondárné Siregi K., Horváth A. és Pethő S. (2003): Partiszűrészű ivóvízbázisok diagnosztikájának tapasztalatai. – X. Felszín alatti vizek konferenciája, Jubileumi kötet, Balatonfüred-Budapest, pp. 1-14.
- Beljin M.S., Losonsky G. (1992): HWELL: a horizontal well model. In: Solving groundwater problems with models. International Groundwater Modeling Center and the Association of Groundwater Scientists and Engineers, Golden, CO, pp. 45–54
- Bence G., Császár G., Darida-Tichy M., Dudko A., Gálos M., Gangl G., Kertész P., Korpás L. & Zier C. (1991): Geologische und ingenieurgeologische Beschreibung der Donaustufe bei Nagymaros. — In: Lobitzer, H. és Császár, G. (eds): Jubiläumsschrift 20 Jahre geologische Zusammenarbeit Österreich-Ungarn, Geologisches Bundesanstalt, Wien, 385–400.
- Birch S., Donahue R., Biggar K., Sego D. (2007): Prediction of flow rates for potable water supply from directionally drilled horizontal wells in river sediments. *J Environ Eng ASCE* 6. 683–688
- Bischoff H. (1981): An integral equation method to solve threedimensional flow to drainage systems. *Appl Mathem Modell* 5. 399–404
- Bloetscher F., Muniz A., Largey J. (2007): Sitng, drilling and construction of water supply wells, American Waterworks Association, ISBN 978- 1-58321-5 16-6
- Chen C., Wan J., Zhan H. (2003): Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well. *J Hydrol* 281(1–2). 159–171.
- Collins S. L., Houben G. J. (2020): Horizontal and radial collector wells: simple tools for a complex problem, *Hydrogeology Journal*, 28. 1925-1935.
- Citrini D. (1951): Drenaggi a raggiera e sistemi di pozzi in una falda artesiiana; *l' Energia elettrica*, 1.

- Cunningham W.L., Bair E.S., Yost W.P. (1995): Hydrogeology and simulation of ground-water flow at the south well field, Columbus, Ohio. US Geological Survey Water Resources Investigation reports 95-4279
- Deák J., Hertelendi E., Süveges M. és Barkóczi Zs. (1992): Partiszűrészű kutak vizének eredete trícium koncentrációjuk és oxigén izotóparányaik felhasználásával. – Hidrológiai Közlöny 72(4). 204-210.
- Debrine B.E. (1970): Electrolytic model study for collector wells under river beds. Water Resour Res 6(3). 971–978.
- Dimkić M., Pušić M., Vidović D., Isailović V., Majkić B., Filipovic N. (2011): Numerical model assessment of radial-well aging. J Comput Civ Eng 25(1). 43–49
- Eberts S.M., Bair E.S. (1990): Simulated effects of quarry dewatering near a municipal well field. Ground Water 28(1). 37–47
- Falcke (1962): Modellversuche an Brunnen mit horizontalen Fassungsträngen unter besonderer Berücksichtigung der geometrischen und physikalischen Veränderlichen [Model experiments on wells with horizontal intakes with special emphasis on geometric and physical variables]. PhD Thesis. TH Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- Góczán L. (1955): A Szentendrei sziget geomorfológiai fejlődéstörténete. - Földrajzi Értesítő, 4. 301-316.
- Haefeli R., Zeller J. (1953): Three - dimensional Seepage - tests with viscous fluids. -eme Congres International de Mechanique des Sols, 1, 137-141
- Haitjema H., Kuzin S., Kelson V., Abrams D. (2010): Modeling flow into horizontal wells in a Dupuit-Forchheimer model. Ground Water 48(6). 878–883.
- Halford K. J., Hanson R. T. (2002): User guide for the drawdown-limited Multi-Node Well (MNW) Package for the U.S. Geological Survey’s modular three-dimensional ground-water flow model, versions MODFLOW-96 and MODFLOW-2000: US Geological Survey Open-file Report 02-293 33p.
- Hantush M. S. (1964): “Hydraulics of wells.” Advances in hydrosciences, V. T. Chow, ed., Academic, New York, 281–432.
- Hiscock K. M., and Grischek T. (2002): “Attenuation of groundwater pollution by bank filtration.” J. Hydrol., 266.139–144.
- Houben G. J., Collins S., Bakker M., Daffner T., Triller F., Kacimov A. (2021): Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells, Hydrogeology Journal, <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02425-w>

- Hunt H., Schubert J. és Ray C. (2003): Conceptual design of riverbank filtration systems. – in: (Eds.) Ray C., Melin G. és Linsky B.R. (2003), Kluwer Academic Publishers, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands, 19-27.
- Istok J. (1989): Groundwater modeling by the finite element method, American Geophysical Union, ISBN 0-87590-317-7.
- Karátson D., Márton E., Harangi Sz., Józsa S., Balogh K., Pécskay Z., Kovácsvölgyi S., Szakmány Gy., Dulai A. (2000): Volcanic evolution and stratigraphy of the Miocene Börzsöny Mts., Hungary. An integrated study. — *Geologica Carpathica* 51. 325–343.
- Kelson V. (2012): Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water* 50(6). 918–926.
- KHVM, Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium (1999): A sérülékeny földtani környezetben lévő távlati ivóvízbázisok biztonságba helyezésének módszertana és tervtartalmi következményei, Kézirat, Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium, Budapest, 20p.
- Kármán K. (2013): A parti szűrésű vízbázisok és jelentőségük, *Magyar Tudomány*, 174(3) pp. 1300-1307
- Kármán K., Maloszewski P., Deák J., Fórizs I., Szabó Cs. (2014): Transit time determination for a riverbank filtration system using oxygen isotope data and the lumped-parameter model, *Hydrological Sciences Journal* 59(6) pp. 1109-1116.
- Kim S. H., Ahn K. H., Ray C. (2008) Distribution of discharge intensity along small diameter collector well laterals in a model riverbed filtration. *J Irrig Drain E ASCE* 134(4) pp. 493–500.
- Kolencsikné Tóth A. (2017): Folyó és talajvíz kapcsolatának vizsgálata, Doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Mikovinyi Sámuel Földtudományi Doktori Iskola, Miskolc
- Konikow L.F., Hornberger G.Z., Halford K.J., Hanson R.T. and Harbaugh A.W. (2009): Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model. *Techniques and Methods* 6–A30. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 67 p.
- Kordas B. (1960): Calcul débit des puits a drains rayonnants placés dans la nappe artésienne, *Conf. d’Hydraulique, Assoc. d’Hydraulique*, Budapest, Hungary.
- Kordas B. (1961): Contribution à l’étude des puits à drains rayonnants [Contribution to the study of shaft wells with radial drains]. *Ninth Conference Int. Assoc. Hydraul Res (IAHR)*, Dubrovnik, Croatia, 581–590.

- Kotowski A. (1985): Modellversuche über Horizontalfilterbrunnen bei geringer Grundwassermächtigkeit [Model experiments on radial collector wells at small groundwater thickness]. *GWF Wasser/Abwasser* 129(12).804–810
- Kotowski A. (1988): Modellversuche mit einem Horizontalfilterbrunnen, dessen Filterrohre unter einem Infiltrationsbecken liegen [Model experiments with a horizontal well with laterals underneath the bottom of an infiltration pond]. *GWF Wasser/Abwasser* 129(12). 804–810
- Kovács B. (2004) Hidrodinamikai és transzportmodellezés I. (Processing Modflow környezetben), Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, GÁMA-GEO Kft. ISBN 963 661 636 1
- Léczfalvy S. (1971): Kútépítés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Léczfalvy S. (2004): Felszín alatti vizeink 1-2. Elte Eötvös Kiadó, p. 819.
- Lee E., Hyun Y., Lee K.K. (2010): Numerical modeling of groundwater flow into a radial collector well with horizontal arms. *Geosci J* 14(4).403– 414
- Luther K.H., Haitjema H.M. (1999): An analytic element solution to unconfined flow near partially penetrating wells. *J Hydrol* 226.197–203
- Mari L. (2002): A Szentendrei-sziget kialakulása és felszínének változása a holocénban, *Földtani Közlemény* 132(különszám). 185-192.
- McWhorter D. B., and Sunada D. K. (1977): *Groundwater hydrology and hydraulics*, Water Resources Publication, Englewood, Colorado.
- Mikels F.C., Klaer F.H. (1956): Application of ground water hydraulics to the development of water supplies by induced infiltration. In: *Symposia Darcy*, 2. 232–242, International Association of Hydrological Sciences, Dijon, France
- Milojevic M. (1961): Interference of radial collector wells adjacent to the river bank. *Symposium International Association of Scientific Hydrology “Groundwater in the arid zones”*, Athens, October 11– 21.
- Milojevic M. (1963): “Discussion on flow of groundwater to collector wells.” *J. Hydr. Div.*, 89(2). 193–194.
- Mohamed A., Rushton K. (2006): Horizontal wells in shallow aquifers: field experiment and numerical model. *J Hydrol* 329. 98–109
- Moore R., Kelson V., Wittman J., Vern R. (2011): A modeling framework for the design of collector wells, *Ground Water*, 50(3) 355-366.



- Nyíri G., Székely, F., Zákányi B., Szűcs P. (2019): Horizontális és csápos kutak hidraulikai modellezése különböző számítási eljárások segítségével, *Hidrológiai Közlöny*, 99(4). 35-41.
- Oláh P., Fodor L., Tóth T., Deák A., Guy D., Horváth F. (2014): A Szentendrei-sziget környéki folyóvízi szeizmikus szelvényezések földtani eredményei, *Földtani Közlöny*, 144(4). 359-380.
- Ophori D.U., Farvolden R.N. (1985): A hydraulic trap for preventing collector well contamination: a case study. *Ground Water* 23(5). 600– 610.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (2021): Magyarország Vízyűjtő-gazdálkodási Terve (VGT3), II. Vitaanyag.
- Patel H. M., Eldho T. I., Rastogi A. K. (2010): Simulation of Radial Collector Well in Shallow Alluvial Riverbed Aquifer Using Analytic Element Method, *Journal of Irrigation and Drainage*, 136 (2).
- Pethő S. (2008): Parti szűrésű vízterelés hidraulikai vizsgálata a Duna mentén, Egy új kutatási megközelítés. Doktori értekezés, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Budapest
- Petrovic S. (1956): *Snabdevanje naselja vodom*, Water Supplies, Beograd, Serbia.
- Putarich Dr. Ivánszky V. (2006) *Hidrológia*. VERZAL, Újvidék, p. 299.
- Ray C., Grischek T., Schubert J., Wang J., and Speth T. F. (2002): “A perspective of riverbank filtration.” *J. Am. Water Works Assoc.*, 94(4), 149–160.
- Rózsa A. (2000): Beszivárgás vizsgálatok a Szentendrei-Duna medrében, *Hidrológiai Közlöny*, 80(2). 119-125.
- Sterrett R. J. (2007): *Groundwater and wells*, 3rd edition, Johnson screens, New Brighton. 676-680.
- Székely F. (1998): Windowed spatial zooming in finite difference ground water flow models. *Groundwater*, 36(5). 718–721
- Székely F. (2011): Hidrogeológiai határok, kútrendszerek és csápos kutak analitikus modellezése, Elméleti háttér, Szoftverek, Validációs tesztek, Alkalmazások, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, (Előadás) Budapest
- Székely F. (2015): *Integrated well flow modeling*. LAMBERT Academic Publishing, 132 p.
- Székely F. (2020): *Manual of the software package WELLSD v. 1.21*. Manuscript, 30 p.

- Székely F., Nyíri G., Szűcs P., Zákányi B. (2021): Analytically supported numerical modeling of horizontal and radial collector wells, *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(12).
- Thiem G. (1906): *Hydrologische Methoden*; Gebhardt, Leipzig.
- Tolnai B. (szerk.) (2008): *Vízellátás, Mátyus Sándor nyomán, A Fővárosi Vízművek ZRt. üzemeltetői ismeretanyaga*, Budapest
- Van Tonder G., Bardenhagen I., Riemann K., Van Bosch J., Dzanga P., Xu Y. (2002): *Manula on pumping test analysis in fractured-rock aquifers*, WRC Report No 1116/1/02, ISBN No 1 86845861.
- Völgyesi I. (1993): Mederkapcsolati hatások: a parti szűrésű víztermelés fontos paramétere *Hidrológiai Közlöny* 73(5). 261-264.
- Walton W. C. (1992): *Groundwater modeling utilities*, Lewis, Boca Raton, Fla.
- Wegenstein M., (1954): La recharge de nappes souterraines au moyen de puits centraux et galeries d'alimentation horizontales [Recharge of aquifers by means of horizontal collector wells] [in French with English summ.] : *Internat. Assoc. Sci. Hydrology Pub.* 37, 232-237.
- Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L., Alley W.M., (1998): *Ground water and surface water, a single resource*. US Geological Survey Circular 1139, p. 79.
- Zhan H., Wang L.V., Park E. (2001): On the horizontal-well pumping tests in anisotropic confined aquifers. *J Hydrol* 252(1-4). 37-50.