

Pécsi Tudományegyetem
Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar
Környezetmérnöki Tanszék

**Gyökérfázis víz tisztítás hatékonyságának vizsgálata eltérő
minőségű csapadékvizek esetében**

Készítette: Szili Zsolt
Évfolyam: 4.

Belső konzulens: dr. Somfai Dávid Márton
Beosztása: adjunktus

Pécs
2025

Tartalomjegyzék

1	Irodalmi áttekintés	5
1.1	Csapadékvíz gyűjtése	5
1.2	Csapadékvíz típusa	5
1.3	Hazai fajlagos vízfogyasztás/csapadékvíz felhasználás	6
1.4	Csapadékgyűjtő rendszer felépítése	7
1.4.1	Esővíz gyűjtésre használt tető anyagának, méretének megválasztása	7
1.4.2	Az esővíz szűrése	7
1.4.3	Esővíz tárolás	8
1.4.4	A gyűjtött esővíz háztartáson belüli szállítási lehetőségei	9
1.5	Csapadék minősége	9
1.6	Természetközeli víztisztítás.....	10
1.6.1	Gyökérszónás tisztítórendszer	11
1.6.2	A két bemutatott rendszer összehasonlítása	13
1.6.3	A gyökérszónás rendszerek tisztítási hatásfoka	14
2	Anyag és módszer	15
2.1	Mérési helyszín – PTE MIK.....	15
2.2	Mérési módszerek	17
2.2.1	Konduktometria – vezetőképességmérés	17
2.2.2	Potenciometria – pH mérés	18
2.2.3	Kémiai oxigénigény mérés.....	19
2.2.4	Spektrofotometria – NH ₄ -N mérés	20
2.2.5	Ionkromatográfia – NO ₂ -N, NO ₃ -N mérés.....	21
2.2.6	ICP-OES – Fe, P, Zn mérése	22
3	Eredmények és értékelésük.....	24
3.1	pH változása a rendszer mérési pontjain	24
3.2	Vezetőképesség változás a rendszer mérési pontjain	25
3.3	A különböző típusú műtárgyak és a teljes rendszer tisztítási hatásfokai az egyes szennyezők tekintetében	25
3.3.1	A gyökérszónás rendszerek ammónium-nitrogén (NH ₄ -N) eltávolítási hatékonysága.....	26
3.3.2	A gyökérszónás rendszerek nitrit-ion (NO ₂ ⁻) eltávolítási hatékonysága.....	26
3.3.3	A gyökérszónás rendszerek nitrát-ion (NO ₃ ⁻) eltávolítási hatékonysága.....	27
3.3.4	A gyökérszónás rendszerek kémiai oxigénigény (KOI _{Cr}) csökkentésének hatékonysága.....	29
3.3.5	A gyökérszónás rendszerek összes nitrogén eltávolítási hatékonysága.....	30

3.3.6	A gyökérszénzés rendszerek vas (Fe) eltávolítási hatékonysága	30
3.3.7	A gyökérszénzés rendszerek cink (Zn) eltávolítási hatékonysága	33
3.3.8	A gyökérszénzés rendszerek foszfor (P) eltávolítási hatékonysága	35
4	Értékelés és következtetések	37
5	Összefoglalás	40
6	Mellékletek	41
6.1	Ábrajegyzék	42
6.2	Táblázatjegyzék.....	42
6.3	Képjegyzék.....	42
	Irodalomjegyzék.....	43

Bevezetés

A víz az élet alapvető forrása, bolygónk egyik legfontosabb természeti kincse. Az emberi civilizáció fejlődése során mindig is központi szerepet játszott a víz elérhetősége és annak minősége. A vízkészletek szűkössége, a népességnövekedés és a klímaváltozás nyomán egyre inkább érezhetőek. A csapadékvíz gyűjtés egy olyan lehetőség, amely hozzájárulhat a vízmegőrzéshez és a városok környezetterhelésének csökkentéséhez.

A víz fontossága nem csupán a közvetlen emberi fogyasztásban, hanem az ökoszisztémák működésében, a mezőgazdasági termelésben és az ipari folyamatokban is megmutatkozik. Ugyanakkor a városi területek gyors urbanizációja és a burkolt felületek arányának nagymértékű növekedése megváltoztatja a természetes vízkörforgást. A hagyományos csapadékvíz-elvezetési rendszerek – amelyek célja, hogy a csapadék minél gyorsabban elhagyja a városi területeket – csökkentik a talajvíz utánpótlását, és növelik a szennyvíztisztító telepek terhelését. E problémák kezelése érdekében vált egyre népszerűbbé a csapadékvízgyűjtés és -hasznosítás gyakorlata.

A csapadékvízgyűjtés lényege, hogy az esővizet ne elvezetésre szánjuk, hanem felfogjuk és helyben, a keletkezés helyén használjuk fel különféle célokra. Ez a megközelítés egyszerre kínál környezetvédelmi és gazdasági előnyöket. Városi környezetben a gyűjtött csapadékvíz felhasználható például zöldterületek öntözésére, közterületek tisztítására, illetve akár háztartási felhasználásra, például WC-öblítésre, mosásra, autómosásra. Ezek az intézkedések nemcsak a vízfelhasználás csökkentéséhez járulnak hozzá, hanem a városi mikroklima javításához és a csapadékvíz-elvezetési rendszerek tehermentesítéséhez is. A gyűjtött esővíz segíthet enyhíteni a száraz időszakok vízhiányát (már amennyiben van elegendő csapadék), így kettős funkciót lát el: mérsékli a szélsőséges időjárási események negatív hatásait és javítja a városi vízgazdálkodás rugalmasságát.

A víz tisztítását természetközeli módszerekkel lehet a leggazdaságosabban elvégezni, mivel ezeknek a rendszereknek alacsony az üzemeltetési költségük és nem szükséges a vegyszerek használata sem a tisztítás során, így még több pénzt lehet megspórolni. Emellett a környezettudatos szemlélet és a növekvő energiaárak is közrejátszanak a természetközeli víztisztítás népszerűségének növekedésében. Csapadékvíz tisztításra nagyszerűen alkalmazható e módszer. Városi környezetben meg egészen célszerű a csapadékvizet felhasználás előtt valamilyen szinten megtisztítani, így elkerülhetjük a szennyezők feldúsulását

a felhasználandó helyen. A városi területekről lefolyó csapadékvizek minősége sokkal rosszabb, mint a rurális területeken összegyűjtött esővíznek. Mivel a közlekedés és az ipari tevékenységek nagyfokú szennyezőanyag kibocsátással járnak, amelynek nagy része a csapadékesemények következtében összpontosul a csatornarendszerben.

Dolgozatomban a városi környezetben keletkező csapadékvíz minőségét és annak gyökérezónás víztisztító műtárgyakkal való tisztíthatóságát vizsgáltam. A kutatótelepen két típusú – függőleges és vízszintes átfolyású – műtárgy található. Így lehetőségem volt a műtárgyak külön-külön és egymás után kötve történő tisztítóképességének megállapítására $\text{NH}_4\text{-N}$, NO_2^- , NO_3^- , TN_b , KIOI_{Cr} , Fe, Zn, P szennyezők tekintetében.

Illetve bemutatom egy komplett esőízgyűjtő rendszer felépítését. Ismertetem, hogy mekkora tetőméret szükséges, milyen anyagokat használjunk az esővíz gyűjtése, tárolása során. Rávilágítok arra is, hogy mennyi vizet lehet egy ilyen rendszerrel megspórolni.

1 Irodalmi áttekintés

1.1 Csapadékvíz gyűjtése

A víz olyan korlátozottan rendelkezésre álló természeti erőforrás és közjóság, amely alapvető fontosságú az élethez és az egészség fenntartásához. Még olyan területeken is, ahol van vezetékes vízellátás, sok háztartás gyűjt esővizet tartályokban háztartási körülmények között Ausztráliában, hogy kiegészítsék a vízkészleteiket, vagy alternatív, megújuló vízforrást biztosítsanak. Az esővíztartályok használata mára fontos stratégiává vált a vízmegőrzés elősegítésére, a vízkorlátozások terhének csökkentésére, valamint az aszályok és az éghajlatváltozás egyre drámaibb hatásainak kezelésére. Az esővíz gyűjtése és tárolása viszonylag egyszerű rendszereket igényel. Minimális szintű kezelés elegendő ahhoz, hogy jó minőségű vizet biztosítson, amely széles körű felhasználásra alkalmas, például ivásra, ételkészítésre, fürdésre, mosásra, WC-öblítésre és kertöntözésre. A tartályokban eltárolt esővíz továbbá felhasználható házi medencék feltöltésére, autómosásra, használati melegvíz rendszer ellátásra, hőpufferként házak szigetelésére, épületek szellőztetésére, tűzoltásra. [1]

1.2 Csapadékvíz típusa

Csapadékvíz gyűjtés esetén, amely lakossági hasznosítás alá vonható, elsősorban két típust különböztetünk meg. Létezik a tetőről származó víz, amely elsődlegesen alkalmas a háztartásokban való felhasználásra, illetve a burkolt, valamint a burkolatlan felületekről elfolyó esővíz, amely összegyűjtése és kezelése túlnyúl a háztartási szinten. Az utóbbi csapadékvíz típusnak a kezelését települési szinten érdemes megvalósítani. Teszik is ezt többek között Santa Monica városban, az Egyesült Államokban. Valamint Szingapúrban is, ahol a vízhiány a mozgatórugója annak, hogy az ilyen területekről lefolyó vizek 70%-át fogják fel, tisztítják és helyben, számos célra felhasználják. Nem másra, mint ipari víznek, öntözővíznek, díszkutatak vizének, illetve tűzvíznek egyaránt. A háztartásokban is alkalmazható esővízgyűjtő rendszer az alábbi pontokra bontható működését tekintve ausztrál szakemberek szerint: 1. az esővíz összegyűjtése, 2. a víz kezelése, 3. a tárolás, 4. a túlfolyás kezelése, 5. a felhasználás helyszínére juttatás. [2]

1.3 Hazai fajlagos vízfogyasztás/csapadékvíz felhasználás

	Átlagos fajlagos vízigényfajták l/fő.d										
	Csapadékvízzel kiváltható				Csapadékvízzel nem kiváltható					Összes kiváltható	Összes nem kiváltható
	WC	Kert	Tisztogatás	Mosás	Tisztálkodás	Fürdés	Főzés, ivás	Mosogatás	Egyéb		
MaVíz	47,70			30,20		31,70		24,30	3,80	77,90	59,80
Purator	39,60	5,28		15,84	5,28	46,20	2,64	7,92	9,24	60,72	71,28
Dulovicsné*	24,00	4,00	5,00	12,00						45,00	45,00
Bőse	44,20	6,50		18,20	9,10	40,30	2,60	9,10		68,90	61,10
Dixon***	32,54		27,72	10,17	19,95	17,01		21,48		70,34	58,44

* az értékek takarékos vízfelhasználó szerkezetek esetén érvényesek

** a forrás szűrkeszennyvíz igényre és felhasználásra tér ki, a főzés, ivás, mosogatás és egyéb tényezőket a teljes vízfogyasztás 20%-ában tételezzük fel

*** a forrás táblázat értékeit súlyozott átlagként vettem itt figyelembe

1.1. ábra Összesített vízfogyasztás megoszlás különböző irodalmak szerint [3]

A fenti, Asztalos Tamás által, több irodalomból kinyert adat alapján elkészített táblázat (1.1. ábra) a hazai átlagos fajlagos vízfogyasztást mutatja be az ország különböző területein található háztartások esetében. Összességében kijelenthető, hogy az eredmények nagyjából megegyeznek. Sok tényező állhat az eltérések között, a legszámottevő az eltérő fogyasztási szokás, valamint a háztartási berendezések, gépészet állapotától, nem utolsósorban attól is függ, hogy az ország mely részén lakik az ember. Az összesített táblázat, amely az ország különböző pontjain levő vízfogyasztást mutatja be, alapján egy magyar átlagember 123,71 liter/nap vízfogyasztásának átlagosan 37,6 liter víz WC öblítésre fordítódik. 14-15 liter mosásra, 4-5-6 liter a kertben hasznosul, tisztogatásra 5, maximum 27,72 liter fordítódik. Ezek a tevékenységek csapadékvízzel kiválthatóak lennének, ugyanis nem igényelnek ivóvíz minőségű vizet. Ezen tevékenységek átlagosan 64,57 liter vizet jelentenek egy fő vízfogyasztását tekintve, ami egy kicsivel több, mint a vízfogyasztás felét (52%) teszi ki. A következő tevékenységek, úgy, mint a tisztálkodás, fürdés, főzés, ivás, mosogatás csapadékvízzel nem kiválthatók. Átlagosan a nem kiváltható tevékenységek egy fő napi vízfogyasztását tekintve 59,12 litert tesznek ki, ami a teljes napi vízfogyasztás durván 48%-a. [3]

Tehát belátható, hogy a napi vízfogyasztásunk fele kiváltható lenne csapadékvíz gyűjtéssel és annak felhasználásával, így jelentős mennyiségű vizet lennénk képesek megtakarítani.

1.4 Csapadékgyűjtő rendszer felépítése

1.4.1 Esővíz gyűjtésre használt tető anyagának, méretének megválasztása

Tető anyaga

Az esővízgyűjtés szempontjából fontos a tetőfelület anyaga és minősége is, mivel befolyásolja mind a víz összetételét, mind a mennyiségét. Nagyobb fajlagos felületű anyagú, érdes felületen képes a szennyezőanyag megtapadni, valamint bemohásodhat, emellett zuzmó is telepedhet meg rajta. Az ilyesfajta tetőfelület az eső egy részét képes a pórusaiban megkötni, illetve a tetőn élő moha és zuzmó is felszív belőle valamennyit, így kevesebb vizet vagyunk képesek gyűjteni. Másrészt a tetőről a szennyezőanyagokat magával viszi a csatornába és a gyűjtő egységbe. Emellett az utóbbi tényező miatt a víz minőségére is befolyással lehet a tetőfelület anyaga, elsősorban a pH-t is befolyásolhatja; valamint, ha fém tetőnk van, akkor abból kioldódhatnak az egyes fémek, amelyek kimutathatók a vízből. [4]

A tetőfedő anyagokkal szemben támasztott követelmények a következők: legyen sima felületű, a nedvességet kis mértékben elnyelő, kémiai és fizikai is stabil legyen. Alkalmazhatónak vélt anyagok: cserép, műanyag felületek, fémlemezek (kimosódás előfordulhat). [5] Nem javasolt anyagok: bitumennel borított felület, ólom- akril-tartalmú anyagú felület. [6]

Tető mérete

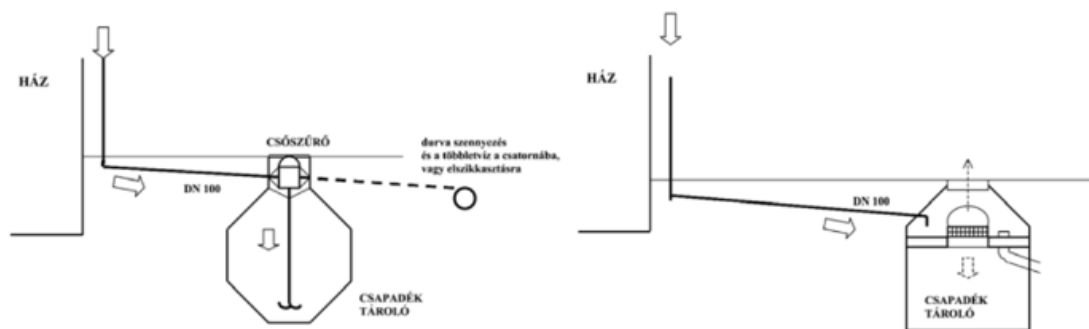
A tető méretének optimális megtervezése új építésű ingatlanok esetén ajánlott, melyet az építés helyszínére jellemző időjárási viszonyok, azaz a csapadék éves mennyisége és a felhasználói igények határoznak meg. Egy 80 m²-es alapterületű tetővel szakemberek konkrét számolásokat végeztek. Arra a következtetésre jutottak, hogy egy ekkora tető képes fedezni egy egyfős háztartás esetén a teljes, egy négy főből álló család esetén pedig a részleges vízigényt. [2]

Egy másik kutatás pedig azt állapította meg, hogy az olyan tevékenységek kielégítéséhez, amelyekhez nem feltétlenül szükséges ivóvíz minőségű víz, egy négytagú háztartás esetén a szükséges tetőméret 150 m². [5]

1.4.2 Az esővíz szűrése

A csapadékvíz gyűjtés után a következő fontos lépés annak szűrése. Ez a folyamat elengedhetetlen része a rendszernek. Szükség van valamilyen mechanikai szűrőre, mivel az esővíz a tetőről az ereszcsonaton át éri el tároló egységet (pl. ciszterna). Ez idő alatt számos szennyezőanyagot összehordhat, mint például a falevél, termés és rovarpetetek. Enélkül a ciszternába bekerülő szennyezőanyagok, anaerob rothadásnak indulnának. Ennek elkerülése

érdekében használhatunk különféle szűrőket. Például egy 2-4 mm-es lyukbőségű műanyagszűrőt vagy közvetlenül az ereszcatornába építhető szűrőbetétet, amely megakadályozza a falevelek csatornába kerülését. [2]



1.2. ábra Csőszűrő (balra) és szűrőkosár (jobbra) felépítése [5]

Emellett alkalmazhatunk még lebegő finomszűrőt, csőszűrőt (1.2. ábra), előszűrő aknát vagy akár szűrőkosarat is. Utóbbi esetén a szűrő egy gyűrűbe van építve, amely lezárja a medence felületét. A víz a kosáron keresztül jut a gyűjtőbe, a kiszűrt anyagot a túlfolyó víz a csatornahálózatba továbbítja. Működését az 1.2. ábra mutatja. A szűrőket bizonyos időközönként ellenőrizni és tisztítani kell. [5]

1.4.3 Esővíz tárolás

A tárolás esetén egy újabb fontos tényező a megfelelő méretű ciszterna meghatározása. Minden egyes háztartás esetén más és más lehet az optimális méret, mivel a gyűjtendő csapadékvíz mennyisége függ a tető méretétől, a vízhasználat jellegétől és a hulló csapadék mennyiségétől is. Egy kutatásban megállapították, hogy egy 3-4 tagú magyar háztartás igényeit 10-20 köbméteres ciszterna nagy eséllyel ki tudja elégíteni, átlagos vízfelhasználást feltételezve. [2]

Az esővíz tárolása nem ajánlott a környezettel közvetlenül érintkező, nem zárt tárolóban, mert a külső elszennyeződéstől nem védett. Nem szerencsés zárt, ellenben olyan anyagból készült tárolók alkalmazása, amelyek a fényt képesek átengedni valamennyire. A legjobb választás az olyan tárolóalkalmatosságok használata, amelyek zárt kialakításúak és fénytől elzártak. Ezen okokból kifolyólag a külső szennyeződésnek nincsenek olyan mértékben kitéve, mint a nyílt kialakításúak, valamint a fény által generált biológiai folyamatokat is megakadályozzák. Ezen felül érdemes olyan helyre telepíteni, vagy a földbe süllyeszteni, hogy a benne tárolt víz ne tudjon megfagyni. A ciszterna anyagát és kialakítását tekintve készülhet betonból, helyben öntve készítve; megfelelően vakolt téglafalból; emellett előre legyártott műanyag, rozsdamentes acél vagy beton tartályból földbe süllyesztve. A ciszternák takarítása történhet 2-3 évente, amennyiben a víz tárolási ideje rövid (1-2 hónap). Ilyenkor a jó vízminőség

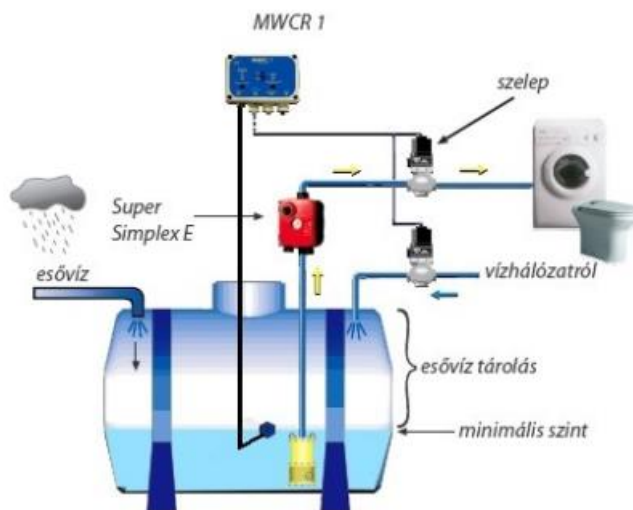
fenntartása érdekében iszapaltalanítani és kitakarítani kell a tárolót. Ha hosszabb ideig áll benne a víz (6-8 hónap), akkor a vizet kezelni érdemes a kellemetlen szagok elkerülése érdekében. [2]

1.4.4 A gyűjtött esővíz háztartáson belüli szállítási lehetőségei

A gyűjtött víz háztartásban történő felhasználásához szükség van szivattyúra. Két fő szivattyútípus jöhet szóba: az egyik magában a tartályban lebeg vagy aljzatához rögzített, a másik pedig tartályon kívül elhelyezett, ezen belül is szívóüzemű. Emellett a szivattyún kívül szükséges kiépíteni egy új csővezeték rendszert, ami kizárólag a gyűjtött esővizet szállítja. Így a háztartás kettős csővezéssel lesz ellátva. [4]

Amennyiben a ciszternából kiürülne a víz, akkor az ivóvízrendszerből kell pótolni a vizet. Ezt a feladatot egy úszókapcsoló láthatja el. Amint egy bizonyos szint alá süllyed a víznek a szintje a ciszternában, akkor az ivóvízvezetékéből pótlódik a vízmennyiség. [2]

Egy konkrét esővízgyűjtő rendszer felépítése (1.3. ábra) [7]:



1.3. ábra Esővízgyűjtő rendszer és annak kialakítása [7]

1.5 Csapadék minősége

A csapadékvíz minőségét számos tényező befolyásolja, elsődlegesen a gyűjtőhely környezete, az ott végzett főként ipari tevékenységek és a levegő minősége. Ebből következik, hogy a víz minősége, ahány hely, annyi féle, tehát térben és időben rendkívül változatos lehet. Emellett függ még a gyűjtő rendszer kialakításától is. A kémiai és mikrobiológia vízminőség a két fő tanulmányozandó paraméter. A víz míg a tároló tartályba kerül többféle anyaggal szennyeződhet beleértve a levegőben és a gyűjtőrendszeren lévő kisebb-nagyobb részecskékkal, szerves anyagokkal, fémekkel, valamint mikroorganizmusokkal is. A mikrobiológiai vízminőséget az előbb felsorolt anyagokkal egyetemben a gyűjtőrendszerbe

került közvetlen szennyeződés befolyásolja. Ilyen szennyeződés lehet a szerves anyagok (falevél), élőlények és azok ürülékének a vízbe kerülése. Emellett az adott helyre jellemző szélirány is befolyásoló hatással lehet a vízminőségre. Az esővíz minősége mikrobiológiai szempontokat figyelembe véve kifogásolt, többségében a benne található vírusok, baktériumok és egysejtűek miatt. A kémiai vízminőség legnagyobb mértékben a szerkezeti anyagoktól, a levegő minőségétől és a környezetben zajló tevékenységektől függ. Ha az esővíz pH-ja alacsony ($<6,5$) a szabad kénsav tartalma miatt, ez elősegíti a szerkezeti anyagokból történő kioldódást. Mindezzel befolyásolja a kémiai vízminőséget, valamint a környezetből bekerült egyéb szennyező anyagok is befolyásoló hatásúak lehetnek. A légszennyezettség is nagy mértékben hatással lehet a különböző vízkémiai paraméterekre a levegő nehézfém tartalma, valamint nitrogén- és kén-oxid tartalma miatt. [8]

Nem találtam konkrétan az esővíz minőségére vonatkozó jogszabályt Magyarországra vonatkozóan. Ezért a hatályban lévő, az ivóvíz minőségi követelményeit meghatározó 5/2023 (I.12.) kormányrendelettel tudjuk összevetni.

1.6 Természetközeli víztisztítás

A természetközeli víztisztítóknál az intenzív technológiákhoz hasonlóan mikroorganizmusok végzik a szervesanyag lebontás legfőbb részét. A lényeges eltérés a két módszer között az, hogy a természetközeli rendszereknél a természetes folyamatokra bízzák a tisztítást és nincs kiépített levegőztető rendszer a működés során. A lebontó folyamatokhoz szükséges oxigén a vízben élő növények fotoszintetizációjából és a környezeti levegőből bediffundálva, illetve a makrofítonok által a gyökérhez szállított oxigénből származik. Mivel ezek a folyamatok sokkal lassabbak a mesterséges levegőztetésnél, így sokkal több idő kell a lebontás végbemeneteléséhez. Ebből következik, hogy egységnyi csapadékvíz/szennyvíz megtisztításához sokkal nagyobb területre van szükség. A nagy helyigény mellett egyéb hátrányai is vannak a természetközeli rendszereknek, mégpedig, hogy az elfolyó szennyvíz minőségében ingadozások léphetnek fel a természeti folyamatokból adódóan és csak alacsony lakos egyenérték terhelés esetén gazdaságos az üzemeltetése. Viszont számos előnnyel is rendelkeznek e rendszerek, többek között üzemeltetési költségük alacsony, mivel nem igényelnek komolyabb gépészetet, ezáltal alacsony az energiaigényük is. Emellett élőhelyet teremt és pozitívan befolyásolják környezetük mikroklímáját. Legutolsósorban pedig esztétikai szempontból is említésre méltók. [9]

1.6.1 Gyökérzónás tisztítórendszer

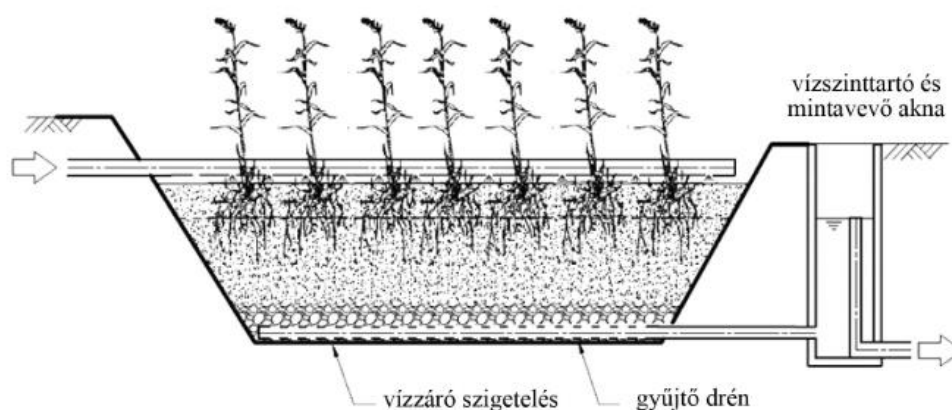
A természetközeli víztisztítási technológiák közül ez az egyik legszélesebb körben elterjedt. A módszer az alábbi módon épül fel: egy előre kialakított földmedencét a lehető legkisebb mennyiségű HDPE fóliával leszigetelnek, majd erre megfelelő vízvezetési tulajdonsággal bíró (homok, sóder, talaj, vagy kő) hordozó kerül, amelyre növényeket ültetnek. A vizet a megfelelően kialakított drénrendszeren keresztül engedik rá a szűrőágyra, majd az átszivárgott, megtisztult vizet összegyűjtik és elvezetik. [9], [10]

Az eltömődés veszélye miatt a gyökérzónás rendszerekre előülepítve érdemes a tisztítandó vizet engedni. Maga a technológia hasonlóan a hagyományoshoz biofilmen élő mikroorganizmusok tevékenységén alapul. Maga a biofilm a növények gyökerén és a hordozó rétegen alakul ki. Amelynek célja a vízben oldott anyagok átalakítása és lebontása a filmfelületeken. [10]

Az víz áramlási irányának szempontjából két csoportra lehet osztani a gyökérzónás tisztítókat: a függőleges és a vízszintes átfolyású rendszerekre.

Függőleges átfolyású rendszerek (1.4. ábra)

Az elnevezés a víz közelítőleges áramlási irányára utal. Általában náddal kerül betelepítésre a porózus hordozó, ami kavics vagy rétegzett homok. A tisztítandó víz egy elosztó drénrendszeren keresztül kerül bevezetésre a töltettest felületén. Az átszivárgó víz pedig egy



1.4. ábra Függőleges átfolyású rendszer felépítése [11]

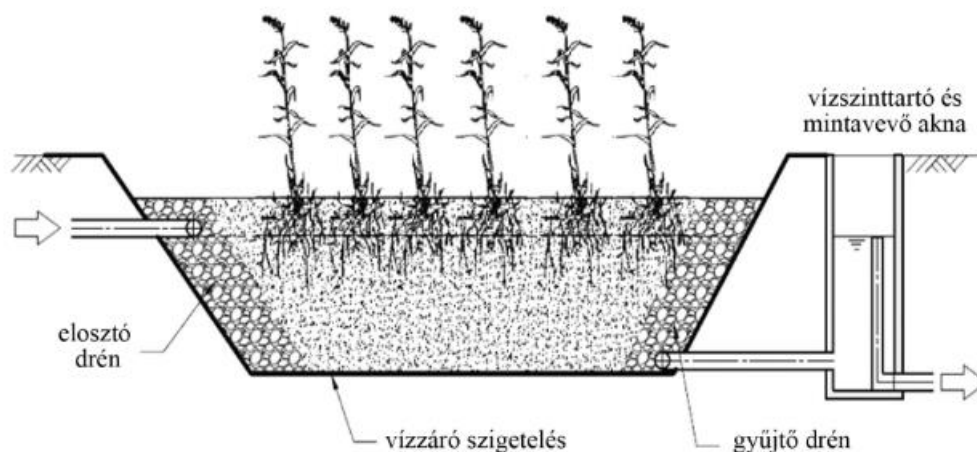
gyűjtő drénhálózat, ami a fenékre van fektetve. Kialakításánál ügyelni kell arra, hogy pangás ne alakulhasson ki. A két réteg között helyezkedik el a növények gyökereivel átszőtt, a tisztítást végző réteg. [10] [11]

Az üzemeltetése szakaszos, a szennyvizet, csapadékvizet kisebb-nagyobb adagokba engedjük rá a műtárgyra. Erre azért van szükség, hogy az efajta rendszerben az aerob viszonyokat fenntartsuk. Ugyanis, amikor a vizet ráengedjük, a pórusokba nyomja a levegőt így teremtve meg a megfelelő környezetet az aerob mikroorganizmusok számára. Illetve az átszűrődő víz

magával ragadja a levegőt és a pórusokon keresztül átlegegőzteti az egész rendszert. Ezért van szükség a szakaszos betáplálásra. [10]

Az így kialakuló környezet a függőleges átfolyású tisztítóban alkalmas az ammónia nitrifikációjára, denitrifikációra viszont korántsem alkalmas. [11]

Vízszintes átfolyású rendszerek (1.5. ábra):



1.5. ábra Vízszintes átfolyású rendszer felépítése [11]

A függőleges átfolyású rendszerhez képest ez a rendszer is az átfolyás irányáról kapta a nevét. A földmeder egyik oldalán kialakított durva szemcsés (kavics, kő) tölteten, elosztódrénen keresztül vagy anélkül bevezetett szennyvíz vagy csapadékvíz hozzávetőlegesen vízszintes irányban áramlik át a porózus hordozó rétegen. Majd a földmeder szemközti oldalán kialakított gyűjtőzónába már megtisztulva kerül. [11]

A rendszerben oxigénellátottság szempontjából 3 zóna alakul ki: aerob, anoxikus és anaerob. Az aerob zóna a felső rétegekben alakul ki, a gyökerek oxigén lejuttatása és a levegőből való bediffundálása miatt. Az anaerob zóna oxigéntől elzárt környezetben az alsó rétegben alakul ki, míg az anoxikus zóna a kettő között. [10]

„Leggyakrabban telepített növényfajok a következők:

- nád (*Phragmites australis*)
- pántlikafű (*Phalaris arundinacea*)
- vízi harmatkása (*Glyceria maxima*)
- gyékény (*Typha sp.*)” [10]

A függőleges átfolyású rendszerhez hasonlóan az aerob viszonyoknak köszönhetően a rendszer alkalmas a nitrifikációra. Emellett az anoxikus környezet lehetővé teszi a nitrifikációs termékek

denitrifikálódását. E két folyamat a nitrogénformák jó részét képes eltávolítani a vízből. Mivel az aerob lebontáshoz nem képződik elég oxigén, így a nitrifikáció nem lehet teljes értékű, ebben a rendszerben. Az anaerob környezetben az aerobbal hasonlóan a szerves anyagok lebontása zajlik. [10]

1.6.2 A két bemutatott rendszer összehasonlítása

	Függőleges átfolyású rendszerek	Vízszintes átfolyású rendszerek
szerves anyag eltávolítás mértéke	kiváló	jó
LA eltávolítás mértéke	közepes	kiváló
NH₄-N eltávolítás mértéke	kiváló	alacsony
NO₃-N eltávolítás mértéke	alacsony	jó
szenyvíz adagolási mód	szakaszos	folyamatos
áramlás jellege	három fázisú	kétfázisú
makrofiták jelentősége az oxigén háztartásban	kismértékű	nagymértékű
makrofiták gyökérzetének áramlástorzító hatása	elhanyagolható	jelentős

1.6. ábra A függőleges és vízszintes átfolyású rendszerek összehasonlítása [12]

Az 1.6. ábra alapján látható, hogy a két rendszer között fellelhetők különbségek, majdhogynem egymás ellentétei. Amit az egyik rendszer kevésbé képes eltávolítani, azt a másik rendszer képes eltávolítani, és fordítva. Tehát ha a két rendszert egymás után kapcsoljuk még jobb tisztítási hatásfok érhető el. A függőleges átfolyású rendszert vizsgálva belátható, hogy az aerob viszonyoknak köszönhetően a szervesanyag és NH₄-N eltávolító képessége kiváló, utóbbi a lezajló nitrifikációnak köszönhető. Ebből következik, hogy a NO₃-N eltávolító képessége alacsony, mivel annak nem kedvez az oxigén jelenléte. A vízszintes átfolyású rendszerénél pedig pont a NO₃-N eltávolítás lesz nagy mértékű, mert megfelelő környezet tud kialakulni a denitrifikáló baktériumok számára. NH₄-N eltávolítás itt is zajlik, de sokkal kisebb mértékben, mint a függőleges átfolyás esetén. Belátható, hogy ha a két rendszert összekapcsoljuk, akkor összességében sokkal jobb tisztítási hatásfok érhető el. Így tettek Dániában, ahol egy vízszintes átfolyású rendszer után kapcsoltak egy függőleges átfolyású rendszert, mindezt a jobb nitrogéneltávolítás érdekében. [10]

1.6.3 A gyökérzónás rendszerek tisztítási hatásfoka

Egy koreai kutatás során horizontális átfolyású rendszereket vizsgáltak városi „runoff” csapadékvíz tisztítására, 4 különböző szűrőközeggel. Így lebegőanyagot tekintve 90% feletti eredményt értek el. KOI eltávolítása a rendszereknek átlagosan 43,4-81,6% környékén volt. Összes nitrogén esetén 21,4-34,9% összes foszfor esetén pedig 55,7-90,7%-ot értek el. [13]

Lee és Scholz Skóciában végzett kutatásuk során városi csapadékvizet vizsgáltak 2 éven keresztül nitrogén formák és BOI eltávolítási képesség meghatározásának céljából vertikális átfolyású gyökérzónás műtárgyakkal. Eredményül azt kapták, hogy az $\text{NH}_4\text{-N}$ eltávolítási hatásfok első évben 78,7% második évben 95,8% volt. $\text{NO}_3\text{-N}$ tisztítási hatásfok első évben 93,7% míg a második évben 95,5% volt. A biológiai oxigénigényét a befolyó csapadékvíznek 76,8%-kal az első évben, 96,5%-kal pedig a második évben volt képes csökkenteni a műtárgy. [14]

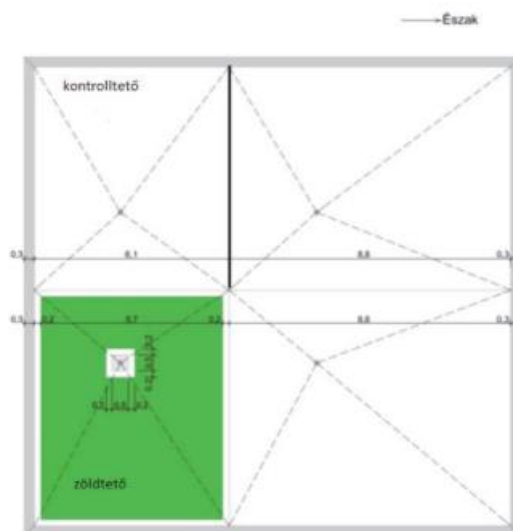
Terzakis és munkatársai autópályáról lefolyó csapadékvizet vizsgáltak többek között különböző kialakítású felszín alatti és felszíni átfolyású műtárgyakkal. A felszín alatti átfolyású műtárgyak esetén összes nitrogén eltávolítás 45-55%-os tisztítási hatásfokkal, összes foszfor eltávolítás pedig 59-61%-os hatásfokkal történt. [15]

Zhou és munkatársai kutatása a függőleges átfolyású rendszerek nehézfémeltávolító hatékonyságára irányult. Melynek eredményeképp azt kapták, hogy a következő elemek koncentrációi, úgymint az ólomé (Pb) közel 100%-kal, a rézé (Cu) 98,2%-kal, a cinkké (Zn) 67%-kal végül a krómé (Cr) 75,1%-kal csökkentek a kifolyó vízben. [16]

2 Anyag és módszer

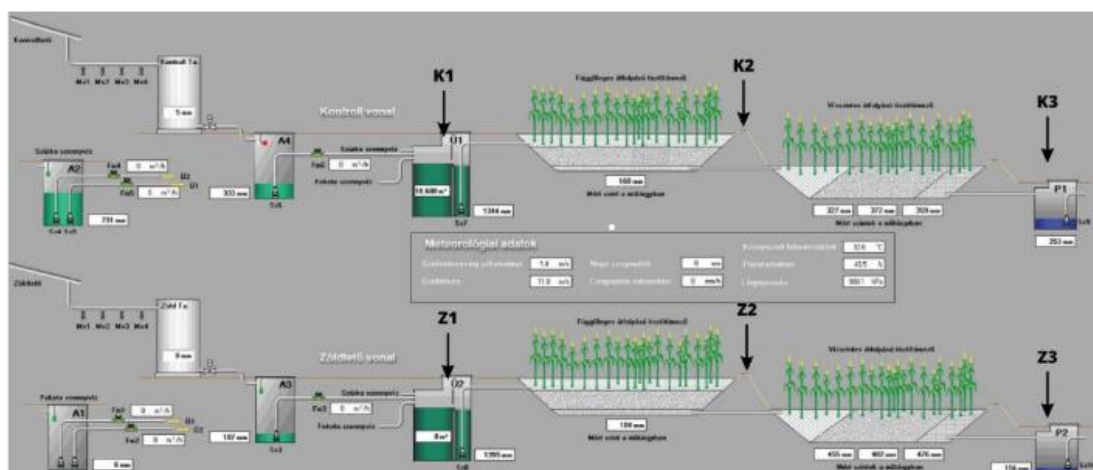
2.1 Mérési helyszín – PTE MIK

A kutatásom alapjául szolgáló gyökérzónás szennyvíztisztító rendszer a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatika Karán lett kialakítva 2015-ben. A műtárgyakra érkező csapadékvíz a szintén ekkor létrehozott, a Kar „C” épületének tetején található (2.1. ábra) kontroll-tetőről és extenzív zöldtetőről származik. [17]



2.1. ábra A kontroll tető és a zöldtető [18]

Mind a zöldtető, mind a kontroll tető körülbelül 45 m² területű. Mindkét tető PVC lemezzel szigetelt, a zöldtető esetében 10 cm vastag termőrétegre szárazságtűrő sedum fajok kerültek telepítésre. A tetők vízelvezetése belső, pontra lejtő módon lett kialakítva a megfelelő lejtéssel a pont irányába. [18]



2.2. ábra A gyökérzónás telep felépítése a Nivision szoftverben [17]

A tetőről érkező csapadék külön-külön 1-1 m³-es tartályba kerül. A tartály előtt találhatóak az automata mintavevők, amelyekkel képesek vagyunk a csapadékból mintát venni a

csapadékeseményt követően tetszőleges időpillanatokban. Egy Nivision nevű szoftverrel (2.2. ábra) lehetőség van a tartályokban lévő víz szintjének monitorozására, illetve a vezérlésre és az adatok rögzítésére is. [17]

A gyökérzónás mérőrendszer részei:

- 1 db szürkeszennyvízgyűjtő akna gépészettel, mérőaknával
- 2 db csapadékvízgyűjtő akna gépészettel, mérőaknával
- 1 db szennyvízátemelő mérőaknával
- 2 db előülepítő műtárgy a szükséges gépészettel
- 2 db függőleges átfolyású gyökérzónás műtárgy megkerülőággal
- 2db vízszintes átfolyású gyökérzónás műtárgy
- 2 db puffertartály a szükséges gépészettel

A műtárgyakra jelen állapotba a zöld- és kontroll tetőről érkező esővizeket vezetik, de lehetőség van emellett a Karon keletkező szürke- és feketeszennyvíz rávezetésére is. [17]



2.1. kép Gyökérzónás kutatótelep (középen a függőleges átfolyású, tőle jobbra pedig a vízszintes átfolyású műtárgyak)

A telep (2.1. kép) működése:

A tetőkről lefolyó csapadékvíz először az előülepítő tartályokba kerül, amelyek térfogata egyenként 4 m³, az első mintavételre itt kerül sor, amely K1, Z1-gyel jelölve látható (2.2. ábra). A K jelzés jelenti a kontroll tető vonalat a Z pedig a zöldtető vonalat, a szám pedig a minták sorszámát jelenti. Ezután egy bizonyos vízszintnél bekapcsolnak a szivattyúk és 500 liter vizet juttatnak a függőleges átfolyású műtárgyra. Ez a folyamat 6 óránként megismétlődik az ülepítőben lévő víz mennyiségétől függően. A műtárgyban a tartózkodási idő 1-2 óra közé tehető, így a 6 óránkénti szakaszos rávezetés biztosan hagy elég időt ahhoz, hogy a következő

adagot fogadni tudja. Ezután lehetőség van a második mintavételre, amely a K2, Z2 jellel van jelölve (2.2. ábra). A víz a vízszintes átfolyású műtárgyba kerül, ahol a tartózkodási ideje több nap, akár egy hét is lehet. Majd legvégül a puffertartályba jut a víz, ami a K3, Z3 jelzéssel látható (2.2. ábra). Itt történik a harmadik mintavétel. A műtárgyakra kétféle növény került telepítésre: a függőleges műtárgy esetében nádra, míg a vízszintes műtárgy esetében sásra esett a választás. A gyökérzónás rendszerek felülete egyenként 6 m². Az elhelyezésüket tekintve szabadtéren találhatóak a „C” épület mellett. Így követlenül ki vannak téve az időjárási folyamatoknak, valamint a levegőben található esetleges szennyezőknek. Ezáltal valódi képet kaphatunk, arról, hogy a városi környezetben egyes szennyezők hogyan változtatják meg a tisztítási hatékonyságát. A telepített meteorológiai állomáson gyűjtött adatok hasznosak lehetnek a mérési eredmények értékelésekor, mivel azok befolyásolhatják a tisztítási hatásfokot. [17]

Tehát összefoglalva, a telepen két párhuzamos műtárgysor van, az egyik a kontrolltetőről, a másik a zöldtetőről érkező csapadékvizet fogadja és tisztítja. Illetve a rendszerben 3 helyen van lehetőség a mintavételre a jelzett helyeken (2.2. ábra). Ezáltal lehetőség nyílik a két csapadékvíz összetételének különbségeiből adódó tisztítási hatékonyságok, valamint a kétfajta műtárgy tisztítási hatásfokainak összehasonlítására.

A következőkben a mintavételi pontokon vett minták elemzéséhez használatos módszereket mutatom be.

2.2 Mérési módszerek

2.2.1 Konduktometria – vezetőképességmérés

A konduktometria más néven vezetőképesség mérés az elektroanalitikai módszerek közé sorolható. Az oldatban, amely az ionokat tartalmazza, az indifferens elektródok között az elektromos térerősség hatására, az ionok vándorlása megindul. A töltéssel rendelkező részecskék mozgása miatt elektromos áram jön létre. Ahol az ionok által történik az áram vezetése, azokat az anyagokat másodrendű vezetőknek hívjuk. Az ellenállás reciproka az elektromos vezető, amelyet az alábbi képlet mutat [19]:

$$G = 1/R$$

Ahol G az elektromos vezetés [mS; μ S]; R az ellenállás [Ω]

Az elektrolit oldatban lévő ionok minőségétől és legfőképpen a mennyiségétől függ az oldatok vezetése, minél több benne az ionok mennyisége annál nagyobb a vezetőképessége. A fajlagos vezetőképességre a hőmérséklet is hatással van, minél nagyobb a hőmérséklet annál nagyobb az érték. A két elektród közé kerülő elektrolit réteg ellenállásának mérésén alapul az elektrolit oldatok vezetőképesség mérése a konduktometriás mérőrendszerrel. Ennek megfelelően a rendszer fő részei a konduktométer vagy vezetőképességmérő, a mintatartó edény és a mérőcella, illetve egyéb kiegészítő eszközök. A vizsgálatok elvégzésekor harangelektrodot alkalmaztam. Ezek a platina elektródok kolloid platínával vannak bevonva és védő üvegharangba vannak rögzítve. A mérőeszköz egy ellenállásmérő eszköznek tekinthető, amely a cella ellenállását határozza meg. A műszerben található egy jelátalakító, egy erősítő és egy jelközlő egység is. A jelközlőről már magát a vezetőképességet tudjuk leolvasni. Az oldatok vezetése az összes oldott sótartalommal van összefüggésben. Adott koncentrációjú oldatsorozat segítségével egy kalibrációs egyenes készíthető a vezetőképességek függvényében. Ez az egyenes a direkt konduktometriás mérés alapjául szolgál. [19]

Mérés menete

A készülékhez a megfelelő elektródot (vezetőképességmérő elektród) csatlakoztatom. Ezután ellenőrzöm a készülék pontosságát a megfelelő standard oldatokkal. Ezt úgy végzem, hogy előtte az oldattal leöblítem az elektródot, majd belemerítem az oldatba. Ezután az elektródot desztillált vízzel leöblítem és papírtörülkövel szárazra törölöm, ezt a folyamatot minden mérés előtt elvégzem. Majd a vízmintákkal végzem el ugyanezt a mérést. A készülékről leolvashatóak a fajlagos vezetőképesség értékek.

2.2.2 Potenciometria – pH mérés

A potenciometria az elektroanalitika olyan módszere közé tartozik, ami az elektromotoros erő és az elektródpotenciálok mérésén alapul. A pH mérésnél a direkt potenciometrikus módszert alkalmazzák elsősorban. A méréshez elektrokémiai cellát kell kialakítani, amelyben a fémes vezető, az elektród, az elektromosan vezető oldattal, az elektrolittal kerül kapcsolatba. Az elektród és az elektrolit határfelületén az elektródreakciókor kialakul az úgynevezett elektródpotenciál, ami a potenciálkülönbséget jelenti a két töltésréteg között. Ez az, amit mérni tudunk. A mérés során kombinált üvegelektrodot alkalmaznak, amelyben az indikátor elektród az üvegelektrod, a viszonyító, másodfajú elektród (amihez képest viszonyítjuk az elektródpotenciált), pedig ezüst-klorid (AgCl) vagy kalomel (Hg_2Cl_2) alapú. Ennek a kombinált

elektródnak az előnye az, hogy az indikátor és a viszonyító elektród egy testbe van építve, így mérés során csak egy elektródot kell a mérendő oldatba helyezni. Az oldatba helyezve kapjuk a mérőcellát. A méréskor a vizsgálandó oldat hidrogénion koncentrációját érzékeli a mérőcella, amely a koncentrációval arányos feszültség jelet ad, végül a készülék a feszültséggel arányos pH értéket jelez. Nagyon fontos, mivel a hőmérséklettől erősen függ a pH, ezért mindig kell hőmérséklet kompenzációt végezni. [20]

Az alábbi képlet alapján számítható a pH: [19]

$$\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$$

Mérés menete

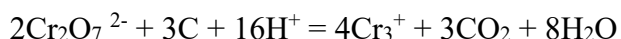
A minta mérése előtt szükség van a készülék kalibrálására, amit úgy végzek el, hogy a pH mérő elektród csatlakoztatása után megfelelő pufferoldatba merítjük az elektródot, így kalibrálva azt. A kalibráció után az elektródot desztillált vízzel leöblítem, majd papírtörülővel szárazra törölöm. Majd megmérem a mintaoldatok pH-ját, a mérés addig tart, amíg a mért érték állandó nem lesz. A hőmérsékletet minden mérésnél fel kell jegyezni, az erős hőmérsékletfüggés miatt. Az öblítést és a szárazra törlést minden mérés előtt elvégzem.

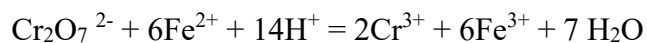
2.2.3 Kémiai oxigénigény mérés

A kémiai oxigénigény meghatározás elvét tekintve a redox reakción alapuló titrimetria közé sorolható. Az elv az, hogy olyan ismert koncentrációjú redukáló vagy oxidáló hatású mérőoldatot adunk a meghatározandó komponenshez, amely azt redukálni vagy oxidálni képes. A vizsgálandó komponens mennyisége kiszámítható a mérőoldat olyan mennyiségű fogyásából, amennyi a reakció végpontjának eléréséhez szükséges. A kémiai oxigénigény (KOI) alatt azt a szükséges oxigén mennyiséget értjük mg/dm^3 koncentrációban kifejezve, amely a vízben lévő lebegő és oldott anyagok kémiai oxidációjához szükséges. A szervesanyagok képezik a vízben lévő oxidálható anyagok legnagyobb részét, azonban mellettük egyéb szervesetlen ionoknak is van oxidálószer igénye. A meghatározási mód a minta szervesanyag tartalmától függ, így az kétféleképpen történhet; az egyik a permanganometriás (KOI_{ps}), míg a másik a kromátos (KOI_{Cr} vagy KOI_{k}) módszer. Mindkét módszer esetében savas közegben történik a meghatározás. [19]

A kémiai oxigénigényt kromátos módszerrel határoztam meg.

Az alábbi két reakcióegyenlet a meghatározás kémiai hátterét mutatja be [19]:





Mérés menete

Macherey-Nagel Nanocolor típusú tesztcsöves eljárással határoztam meg a kémiai oxigénigényt. A vegyszereket (kálium-dikromát oldat és koncentrált kénsav) alapból tartalmazó csőbe a vízmintából 2 ml-t mérek bele, majd jól összekeverem átforgatással. Ezután 30 percre, 160 °C-ra a blokkroncsolóba helyezem. A fél óra letelte után 10 percet pihentetem a mintákat, ezután ismét összerázom és szobahőmérsékleten kihűtöm. Kihűlés után a PF-12 hordozható fotométerbe helyezem a tesztcsöveket, azoknak a kódjuknak megadása során megmérjem az oldatoknak az abszorbanciáját egy vak csővel szemben. Mivel a kódot megadtam a készülék közvetlenül oxigénigényt írja ki, a két oldat koncentráció különbségéből meghatározva.

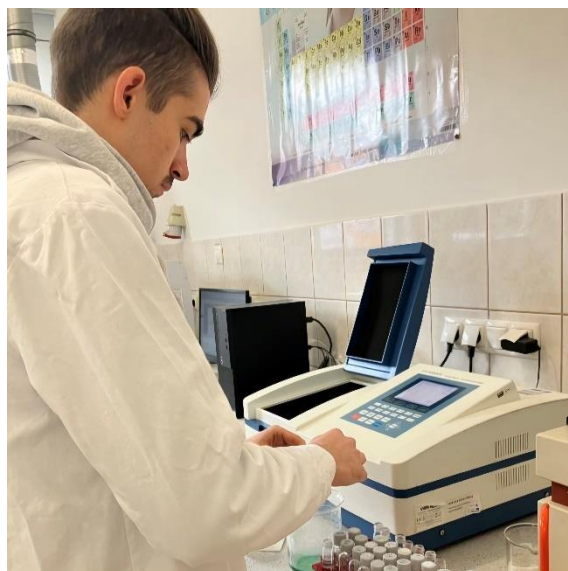
2.2.4 Spektrofotometria – NH₄-N mérés

Az UV-VIS spektrofotometria elve az, hogy ha a fény, mint elektromágneses sugárzás valamilyen fényelnyelő anyagba ütközik, akkor annak az anyag anyagi tulajdonságaitól függően egy része visszaverődik, elnyelődik, illetve átmegy az adott közegen. Az elnyelés mértéke az anyagi minőségtől függ. Hasonlóképpen, az ammónium ion mérés során a vizsgált mintából felszabadított ammónia a szaliciláttal és az (izocianurát) oxidálószerrel kék színű indofenol származék képződés közben reagál. Ennek mennyiségétől függ a színintenzitás, ami arányos az ammóniumion koncentrációval. A Lambert-Beer a fényelnyelést tárgyalja: [20]

$$A = \lg I_0/I = \varepsilon \cdot c \cdot l$$

„Ahol:

- A: abszorbancia
- I₀, I: beeső és a kimenő fény intenzitása
- ε: moláris abszorpciós koefficiens (dm³/mol·cm)
- c: molkoncentráció (mol/dm³)
- l: rétegvastagság (cm)” [20]



2.2. kép Mérés eszköze: UV-6300PC kétfényutas spektrofotométer

Mérés menete

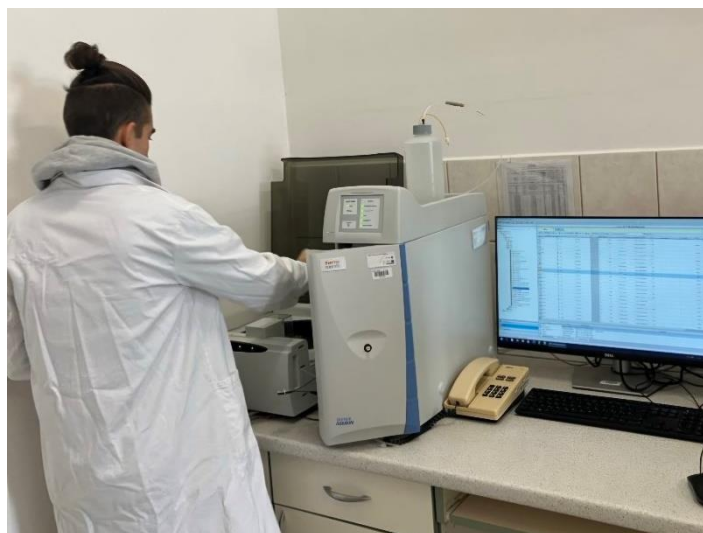
Minimum 5 tagból álló kalibráló oldatsorozatot készítünk 0-2 mg/l koncentrációk között. Kimérek 5 cm³-t mind a mintákból, mind a kalibráló oldatsorozat tagjaiból egy kémcsőbe. Majd először 0,5 cm³ szalicilát reagenst végül 0,5 cm³ oxidáló reagenst adok hozzájuk. Ezt követően jól elegyítem a kémcsövek tartalmát. 40 perc várakozási idő után megmérem az oldatok abszorbanciáját 670 nm-en egy vakoldattal szemben. A mérés előtt az mérendő oldatot küvettaiba töltöm és ügyelek arra, hogy megfelelő állásban kerüljenek a helyükre.

2.2.5 Ionkromatográfia – NO₂-N, NO₃-N mérés

Az ionok nagy hatékonyságú mérésére alkalmas az ionkromatográfia, amely egy folyadékkromatográfias módszer. Alapja a kialakuló ioncsere-egyensúly, amely a két fázis -az álló és mozgó- között alakul ki. A készülékben található állófázis a mozgófázisba adagolt, a mintában található ionokat, azok anyagi minőségük és méretüktől függően elválasztja. Az elválasztás alapja az ellentétes töltésen alapuló kölcsönhatás, a vonzás, amely az ellentétes töltésű funkciós csoportoktól eredeztethető. Egy mérés során az állófázisban lévő töltet, vagy csak pozitív, vagy csak negatív töltésű lehet. A detektálás előtt egy ionelnyomón halad keresztül a vívfolyadék, ahol megtörténik a vívfolyadék elektrolitikus módon történő elbontása, hogy a mintában található, kis mennyiségben jelen lévő ionokat detektálni tudjuk. A detektálás egy vezetőképességmérő detektorral történik, ahol az elválasztás során az anyagi minőségüknek megfelelően visszatartott ionok időben eltolódva jelennek meg a detektorban. A mérés végén

egy kromatogrammot kapunk, amiből meg lehet határozni a mintában lévő ionokat és azok koncentrációját. A készülék részei: eluens tároló, pumpa, adagoló, kolonna, detektor. [21]

Mérés menete:



2.3. kép Ionkromatográf készülék és a hozzá tartozó számítógép

A vízmintákat a mintatartókba töltöm, majd lezárom őket a hozzá tartozó kupakkal, végül a mintaadagolóba helyezem őket. Megszűrni azért nem szükséges, mivel a kupakokban található szűrőn keresztül történik a minták adagolása. A készüléket elindítom majd a végeredményt a számítógépen leolvasom. Átnézem az automatikus kiértékelést, amennyiben szükséges, manuálisan korrigálom.

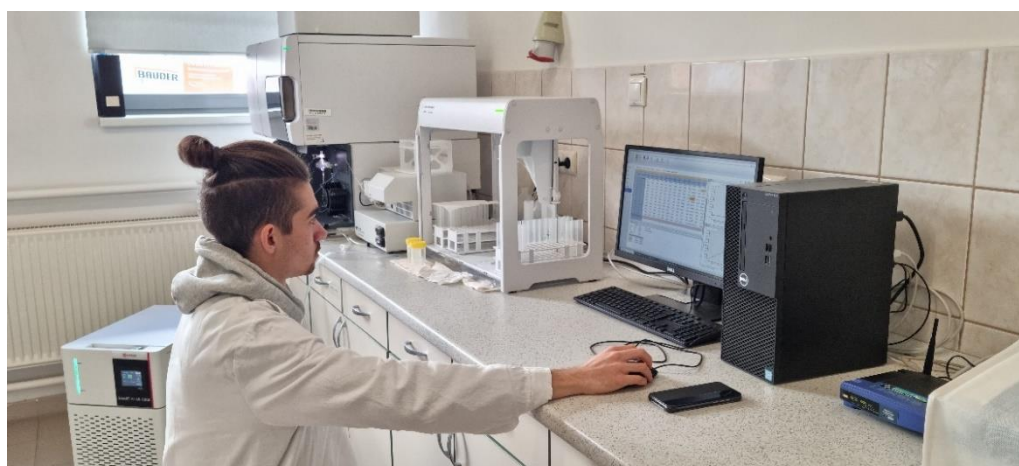
2.2.6 ICP-OES – Fe, P, Zn mérése

Elemek meghatározására használatos műszeres analitikai módszer az úgynevezett induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES). A módszer számos területen, sok elem (akár 50 vagy több) vizsgálatára is alkalmazható. Előnyei közé sorolható a nagyon alacsony kimutatási határ (ppb – milliárdod rész), sok elem párhuzamos vizsgálata és az 5-6 nagyságrendű mérési tartomány. A készülék 2 fő részre osztható, amelyek a következők: plazma előállító, optikai spektrométer, valamint része még a detektor és hozzá kapcsolódó jel- és adatfeldolgozó egység. Ahhoz, hogy a mintában található mérendő fémek, nehézfémek minőségét és mennyiségét meg tudjuk határozni, aeroszollá kell alakítanunk. Mindezt az automatizált mintaadagoló és beviteli egység rész egy perisztaltikus pumpa segítségével, ködkamrába juttatás útján éri el, ahol a minta porlasztódik. A plazma létrehozása argon (Ar) gáz segítségével történik. A plazmát egy szikrakisülés gyújtja be, azáltal, hogy az ionizálódott argon gáz egy nagyfrekvenciás generátor által létrehozott erős mágneses térben, a semleges argon atomokkal ütközik, ezáltal stabil, magas hőmérsékletű (6-8000 K) plazma keletkezik. A

ködkamrából a minta a nagyon magas hőmérsékletű plazmába kerül, ahol a szabad atomos, szabad ionos formába kerül a hőmérséklet okozta gerjesztés következtében. Ezáltal a mintában található elemek a rájuk jellemző optikai sugárzást bocsátják ki. A spektrométer a minta elemeinek az emissziós fénykibocsátását érzékeli. Emellett ezt a fényt spektrálisan felbontja egy poli- vagy monokromátor segítségével és az elemek spektrumvonalait elkülöníti. Az egyes elemek adott hullámhosszágú spektrumvonalainak intenzitását optikai detektorokkal elektromos jelként mérjük. Az elemek kibocsátott fényintenzitásával és koncentráció között egyenes arányosság van. Ezért a mennyiségi meghatározás ismert koncentrációjú oldatokkal kalibrálva a készüléket elvégezhető. [22]

Mérés menete:

A vízmintákat fecskendőszűrőn átszűröm, hogy a benne található esetleges



2.4. kép ICP-OES készülék és a segédberendezések

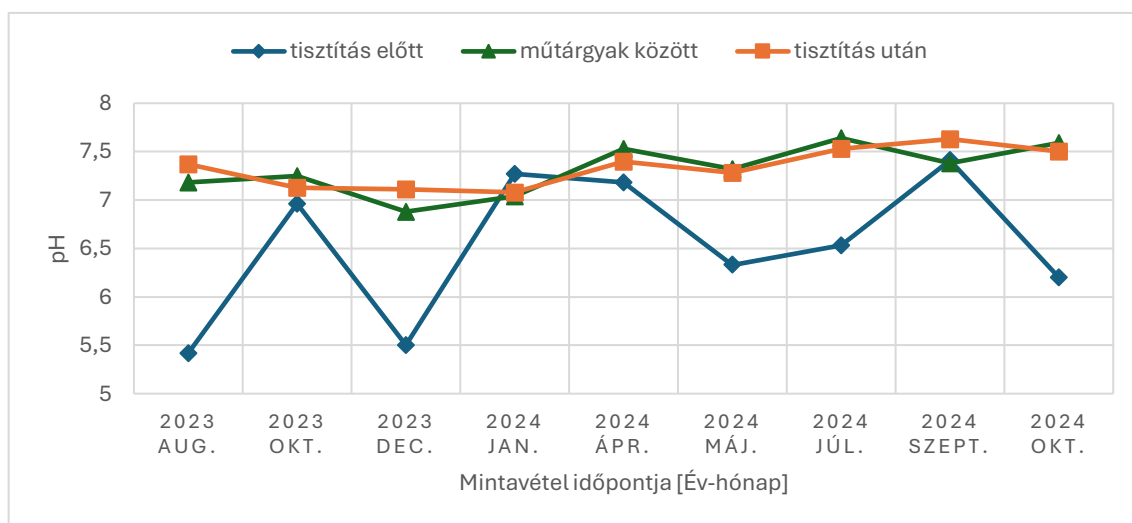
szennyeződések a készülék egyes elemeit ne tömítsék el. Majd az átszűrte mintákat a mintatartó edényekbe teszem és az automata mintaadagolóba helyezem. Ezt követően bekapcsolom a készüléket, megnyitom az argon gázpalackot, bekapcsolom a hűtőberendezést, az elszívórendszert, a mintaadagolót és a számítógépet. A számítógépes programon keresztül begyűjtöm a plazmát, a mintaadagoló csövét átöblíttetem majd beállítom a mérési adatokat és elindítom a mérést. A tényleges mérés előtt a készüléket kalibrálom a megfelelő kalibrációs standardekkel, ezután mérhetőek a minták. A mérés végezetével manuálisan korrigálom a mérési eredményeket, majd leolvasom az értékeket.

3 Eredmények és értékelésük

Nem került sor sajnos minden évszak minden hónapjában mintavételezésre, mert nem volt miből mintát venni a kevés csapadék miatt. Azért minden évszakban legalább egy mintavétel történt, tehát évszakonként már lehet vizsgálni az összefüggéseket. A legjobb nyilván az lett volna, ha minden hónapban van minta, így átfogóbb és pontosabb képet kaptam volna a műtárgysor működésével kapcsolatban. A vizsgált időszak 2023. augusztustól 2024 októberig tartott. Ez idő alatt összesen csak 9 alkalommal történt mintavétel. A mintákat a jelzett (2.2. ábra) mintavételi helyekről, tehát a függőleges átfolyású műtárgy előtt, a két műtárgy között és a vízszintes átfolyású után vettem.

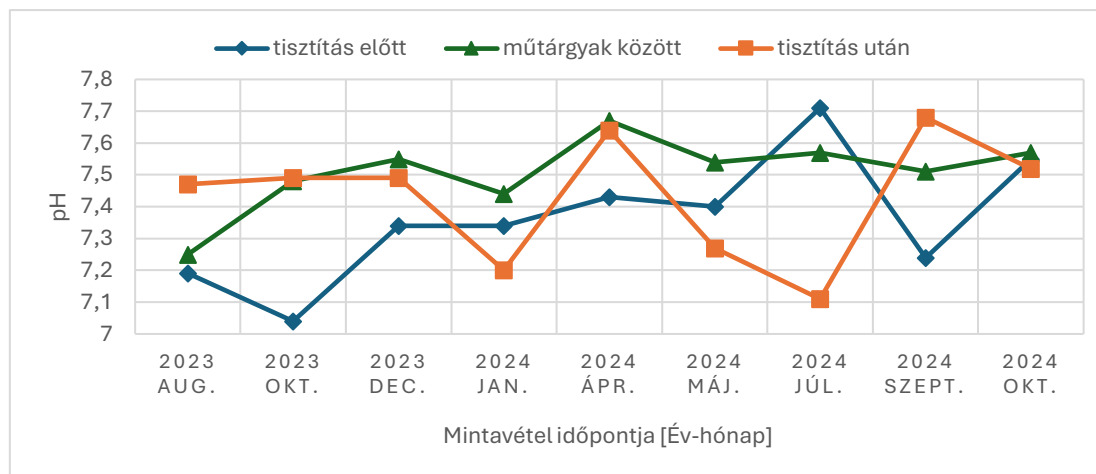
3.1 pH változása a rendszer mérési pontjain

A pH mérés eredményeiből látható, hogy a beérkező csapadékvíz tisztítás előtt, a legtöbb esetben a legalacsonyabb kémhatású. Ám ez a tisztítást követően megváltozik, mivel mind a kontroll tető, mind a zárttető esetében közel semleges, enyhén lúgos irányba tolódik el. Az látszik, hogy 7,5 körüli pH-ra áll be a víz kémhatása a műtárgyon való áthaladást követően. Kontroll tető vonalon (3.1. ábra) a tartomány 5,42-7,64 között váltakozik, míg a zárttető vonalán (3.2. ábra) 7,04-7,71 között ingadozik. Látható, hogy az utóbbi vonalon magasabb a pH értéke a vízmintáknak. A tisztítás utáni értékek szintén egy kicsivel magasabbak ezen a vonalon. Az is megfigyelhető, a kontroll tető esetében jobban, hogy az őszi-téli időszak alatt kicsit alacsonyabb a rendszer pH-ja a műtárgyak között és tisztítás után, mint a tavaszi-nyári időszakban.



3.1. ábra pH változás kontroll vonalon

A pH semlegesítő hatás kedvező, ha az esővizet öntözésre vagy mosásra használjuk fel. A savanyú talajokat semlegesíteni képes ezáltal, a növényeknek pedig sokkal jobb, ha nem enyhén savas kémhatású vízzel locsolják őket, illetve a ruháknak is kedvező a semleges pH.



3.2. ábra pH változás zöldtető vonalon

3.2 Vezetőképesség változás a rendszer mérési pontjain

A vezetőképességet vizsgálva jelentős különbség nem figyelhető meg a két vonal működésében. Mivel mindegyik vonalon, az áthaladás során az esetek legnagyobb részében növekszik az érték. Kontroll vonalon a befolyó víz vezetőképessége körülbelül 20-25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, míg a kifolyó (a tisztított) vize $155 \pm 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ körül mozog. Ezzel szemben a zöldtetőről érkező víz már jóval nagyobb mennyiségben tartalmaz ionokat, amelyek a vezetőképességet okozzák. Itt a befolyó érték trendvonal alapján 150-175 $\mu\text{S}/\text{cm}$ között, míg a kifolyó 250-260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ között adódott. Tehát a befolyó víz vezetőképesség különbsége több mint 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a két vonal között. Illetve a kontroll vonal esetében a kezdeti érték 5-8 szorosra nő az áthaladás során, ezzel ellentétben a zöldtető vonalon csak 2-3 szoros a különbség a befolyó és a kifolyó koncentráció között.

3.3 A különböző típusú műtárgyak és a teljes rendszer tisztítási hatásfokai az egyes szennyvezetők tekintetében

A tisztítási hatásfokok meghatározásával viszonylag pontos képet lehet kapni a műtárgysor szennyvezető eltávolítási képességeiről. Külön vizsgáltam a függőleges és vízszintes műtárgyak hatásfokát, illetve a két műtárgy sorba kötésével kialakított rendszer hatásfokát. Így pontosabb következtetéseket lehet levonni a különböző kialakítású műtárgyak között. Az átlagos tisztítási hatásfok meghatározást az adott évszakban mért vízmintáknál (ott, ahol több minta volt, mint 1) a tisztítási hatásfokok átlagolásával végeztem.

Összességében elmondható, hogy vannak olyan paraméterek, amelyek esetében olyan kis koncentrációban volt már a befolyó vízben is az adott szennyező, hogy egy kisebb mértékű külső szennyezés vagy a műtárgyra száraz/nedves kiülepedés hatására az adott elem koncentrációjának növekedése történt a kifolyó vízben. Emiatt a következtetések és észrevételek levonása egy kissé nehézkes.

3.3.1 A gyökérzónás rendszerek ammónium-nitrogén ($\text{NH}_4\text{-N}$) eltávolítási hatékonysága

Az ammónium-nitrogén szennyezőt vizsgálva azt tapasztaltam, hogy rendkívül változékony a rendszernek a tisztítási hatása. Hol 100% volt a tisztítási hatásfok, hol pedig kibocsátóként viselkedett a rendszer. A két típusú műtárgy között nem tudok érdemi összefüggéseket felfedezni, hogy melyik tisztít jobban, mert hol az egyik, hol a másik a hatékonyabb. Az esetek többségében a kiindulási mennyiséghez képest többet mértem a rendszer végén a vízben a kontroll vonalon, tehát itt tisztítás nem történt. A zöldtető vonalon ez a jelenség kisebb mértékű, de a tisztítás összességében csekély mértékű. Mindkét vonalon mindig volt beérkező mennyiség.

Összességében a rendszer a számított hatásfokok alapján nem volt képes tisztításra 2023. és 2024. nyarán, itt mindkét vonalon kibocsátóként viselkedtek a rendszerek. A kontroll vonalon 2023-24 telén és 2024. őszén is hasonló tapasztaltam. Mindkét vonalon őszi évszakban volt a legjobb hatásfokú tisztítás, kontroll vonal esetén 100%, zöldtető vonalon pedig kicsivel több, mint 63%. Zöldtető vonalon, ahol értelmezhető tisztítási hatásfokokat kaptam, ott 42,5%, a kontroll vonalon pedig 76,4% volt átlagosan a tisztítás mértéke.

3.3.2 A gyökérzónás rendszerek nitrit-ion (NO_2^-) eltávolítási hatékonysága

A nitrit koncentrációknak az alakulását vizsgálva azt tapasztaltam, hogy a kontroll vonalon egy évszak, a 2023-24 tele, kivételével (ugyanis 80%-os hatásfokot ért el itt) a függőleges átfolyású műtárgy rosszul teljesített a tisztítás terén. Ezen kívül a 2023-ban nyáron és ősszel nagyon alacsony volt a tisztítás mértéke mind a két típusú műtárgynál. Emellett 2024-ben a tavaszi, nyári és őszi évszakban nem érkezett a kontroll tetőről nitrit a rendszerre, és a rendszer egyik pontján sem mértem kimutatható mennyiségben.

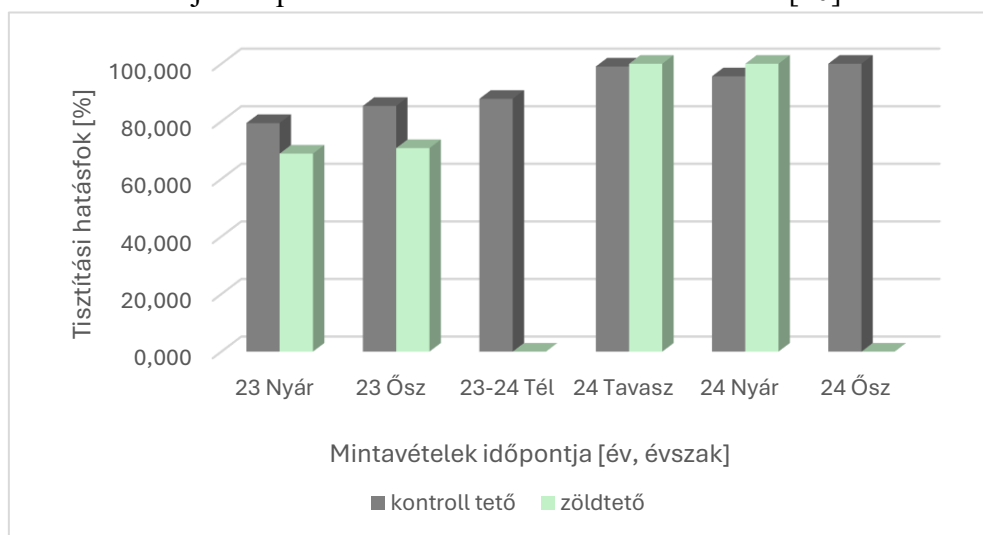
A zöldtető vonalon egy kicsit más a helyzet. Itt több esetben tudtam értelmezhető hatásfokot kiszámítani. 2024. tavaszán itt sem volt az egész rendszerben és a befolyó vízben sem mérhető mennyiségben a szennyező. 2023. őszén pedig végig feldúsult a szennyező az egyes mérési pontokon, így értelmezhetetlen hatásfokok adódtak. Nem tudok levonni összefüggést a két típusú műtárgy tisztítási hatékonyságáról, mivel hol az egyik, hol a másik teljesít jobban. 2024. nyarán mindkét műtárgy minimum 75%-os tisztításra volt képes.

Összességében az egymás után kötött műtárgyak alkotta rendszert vizsgálva azt látom, hogy 2024. tavaszán nem volt a rendszerben a szennyező, 2023. nyarán pedig mindkét vonalon kibocsátóként működtek a rendszerek. A kontroll vonal 2023. ősz, 2024. nyár és ősz évszakban

is kibocsátóként viselkedett, míg a zöldtető vonal képes volt a tisztításra. 2023. őszi évszakában pár %-osra, míg 2024. nyarán és őszén 100%-osra.

3.3.3 A gyökérzónás rendszerek nitrát-ion (NO_3^-) eltávolítási hatékonysága

A nitrát ionok eltávolítására legnagyobb részt a vízszintes átfolyású műtárgy képes a szakirodalom szerint, mivel itt található anoxikus környezet, amely a denitrifikáló baktériumoknak biztosítja az optimális működésükhöz való feltételek. [10]

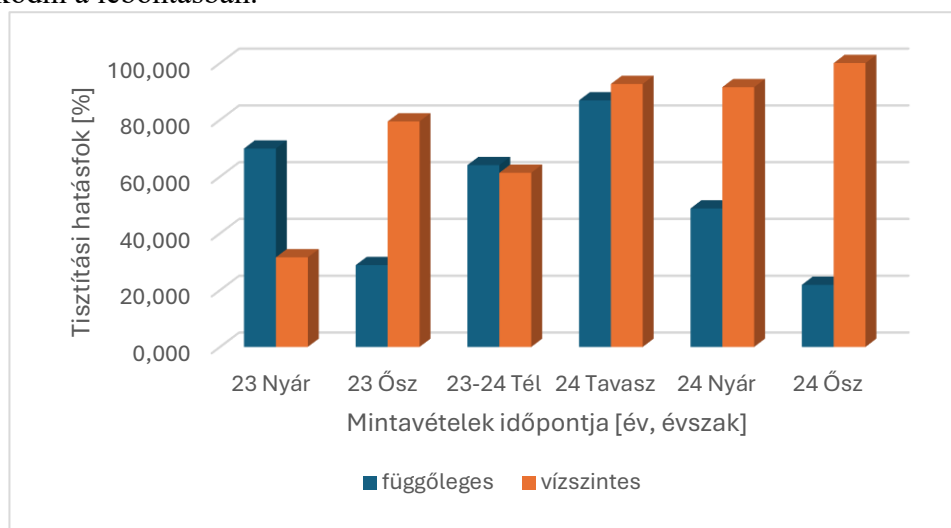


3.3. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka NO_3^- esetében

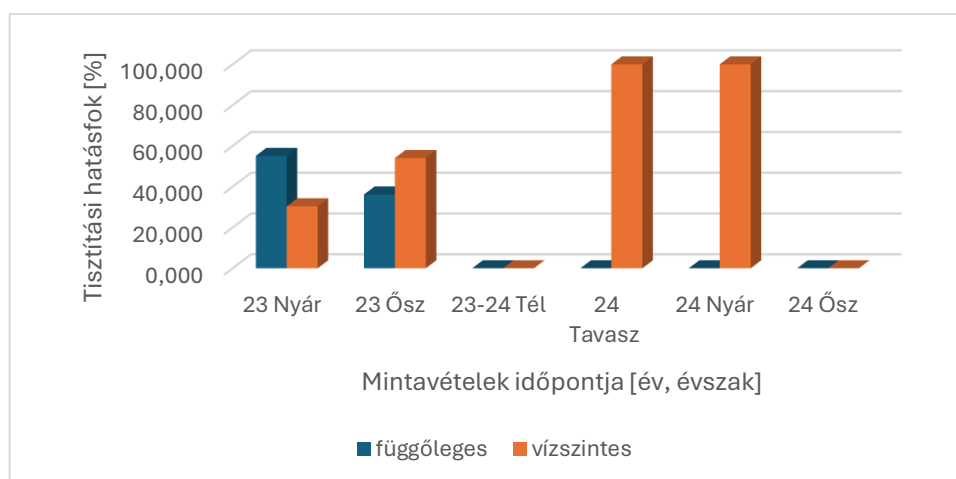
Összességében a műtárgysor (3.3. ábra) nagymértékben, egyes esetekben 75% körül, míg más esetekben 100%-ban képes a nitrát eltávolítására a csapadékvízből. Ez azért is lehet, mivel a növények képesek a nitrátot felvenni a vízből [14]. 2023-24 tél esetében a zöldtető hatásfoka azért nincs feltüntetve, mivel mind a befolyó, mind a műtárgyak között és mind a kifolyó koncentráció 0 mg/l volt. 2024. ősz esetében pedig méréshatár feletti értékeket mértem októberben, szeptemberben pedig az egész soron 0-át, emiatt nincs konkrét adat, amivel számolni lehetne.

Mindkét vonalon (3.4. ábra, 3.5. ábra) a számított tisztítási hatásfokok alapján ahogy az várható volt, a vízszintes műtárgy a hatékonyabb a legtöbb esetben. Az is látszik viszont, hogy a várakozásaimmal ellentétben a függőleges átfolyású műtárgy is helyenként jelentős mértékben képes a nitrát eltávolítására jelen eredmények alapján. A hőmérséklet hatása is látszik a hatásfokokon, mivel ősszel és télen viszonylag alacsonyabb a tisztítási képessége a

műtárgyaknak, mivel a hidegben a mikroorganizmusok nem képesek megfelelően közreműködni a lebontásban.



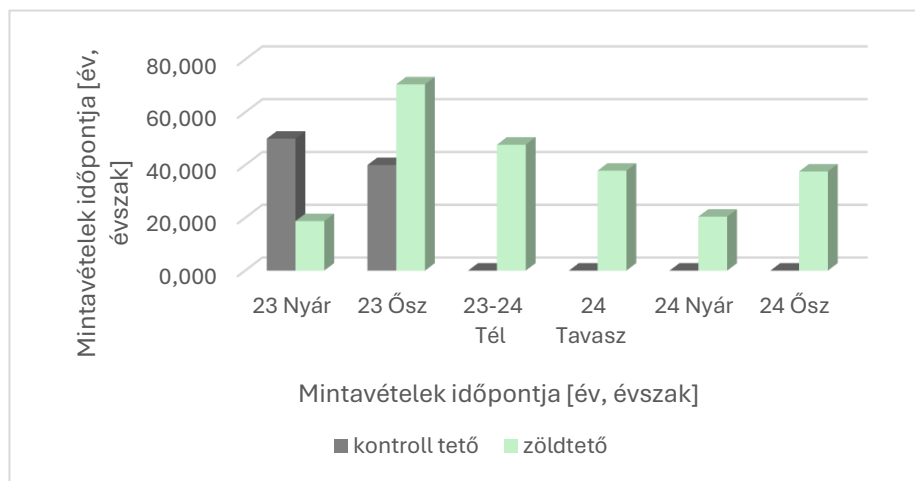
3.4. ábra NO_3^- tisztítási hatások kontroll vonalon



3.5. ábra NO_3^- tisztítási hatások zöldtető vonalon

2023-24. tél esetén, ahogy azt fentebb kifejtettem, nem volt a vízmintákban nitrát. 2024. tavasz és nyár esetében a függőleges műtárgynál nitrát tartalom növekedést tapasztaltam az átfolyás után. A 2024. őszi eredmények pedig a méréshatár feletti érték miatt nem állapíthatóak meg.

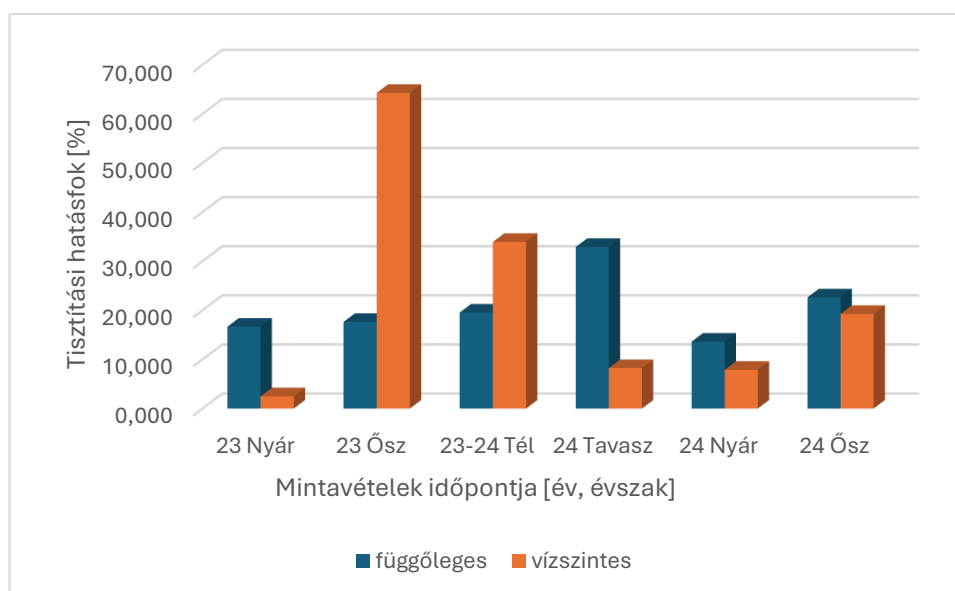
3.3.4 A gyökérzónás rendszerek kémiai oxigénigény (KOI_{Cr}) csökkentésének hatékonysága



3.6. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka KOI_{Cr} esetében

Amint az látszik a kémiai oxigénigény csökkenése a zöldtető vonalon valósult meg a leghatékonyabban a műtárgysorokat vizsgálva (3.6. ábra). A kontroll tető esetében a 2023. nyári és őszi eredményeken kívül nem értelmezhető a tisztítási hatásfok, mert megemelkedett a kémiai oxigénigény értéke a tisztítás után mért mintákban a kiindulásihoz képest. Ez attól lehet, mivel az egész műtárgysor közvetlenül érintkezik a környezettel és külső forrásból kerülhet bele szervesanyag, ami befolyásolhatja ezt az értékeket.

A kontroll vonalat elemeiben vizsgálva csak néhány helyen értelmezhető a tisztítási hatásfok és többségében a vízszintes műtárgyhoz köthető. Itt is emelkedést tapasztaltam sok esetben a tisztítást követően, emiatt tisztítási hatásfok értéket nem kaptam.

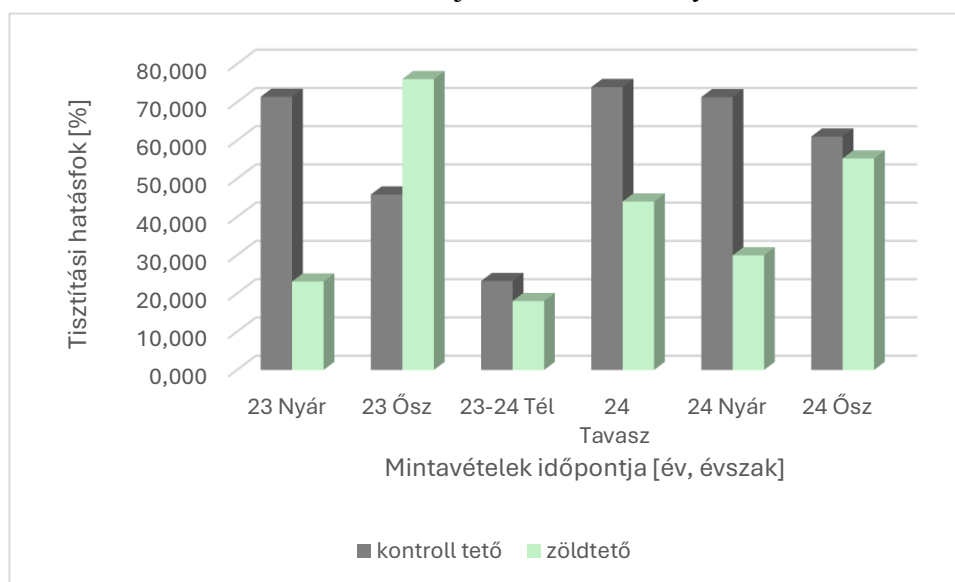


3.7. ábra KOI_{Cr} tisztítási hatásfoka zöldtető vonalon

A zöldtető vonal esetében az összes ponton értelmezhető hatásfok értékek adódtak, ahogy azt a 3.7. ábra is mutatja. Azt állapítom meg ezek alapján, hogy a függőleges műtárgynak van nagyobb tisztítási képessége, mivel a 6 évszából 4-ben annak van a nagyobb tisztítási hatásfoka a vízszintes műtárggyal szemben. Emellett az is észlelhető, hogy a hatásfok átlagosan nagyjából 15-20% körül mozog.

3.3.5 A gyökérzónás rendszerek összes nitrogén eltávolítási hatékonysága

Az összes nitrogén tisztítása a kontroll vonalon lévő soron 23,24%-73,95% (átlagosan 57,58%) között, míg a zöldtető vonalon lévő műtárgysoron 18,01%-76,05% (átlagosan 41,08%) között adódott (3.8. ábra). Tehát látszik, hogy ez a vonal nagyobb fokú tisztításra volt képes. 6-ból 5 évszakon a kontroll tető vonala tisztította jobban ezt a szennyezőt.



3.8. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka TN_b esetében

Külön vizsgálva a két vonalon lévő különböző típusú műtárgyakat arra jutottam, hogy a két típus tisztítási hatékonysága között nincs nagy eltérés összességében, kivéve egy két évszakot, ahol az egyik műtárgy jóval nagyobb, mint a másiké. De ez nem mutat semmiféle mintázatot a vizsgált időszakban. A tisztításban a növények is szerepet játszanak, mivel a nitrogén növényi tápanyag, így fel tudják venni a vízből különböző formában.

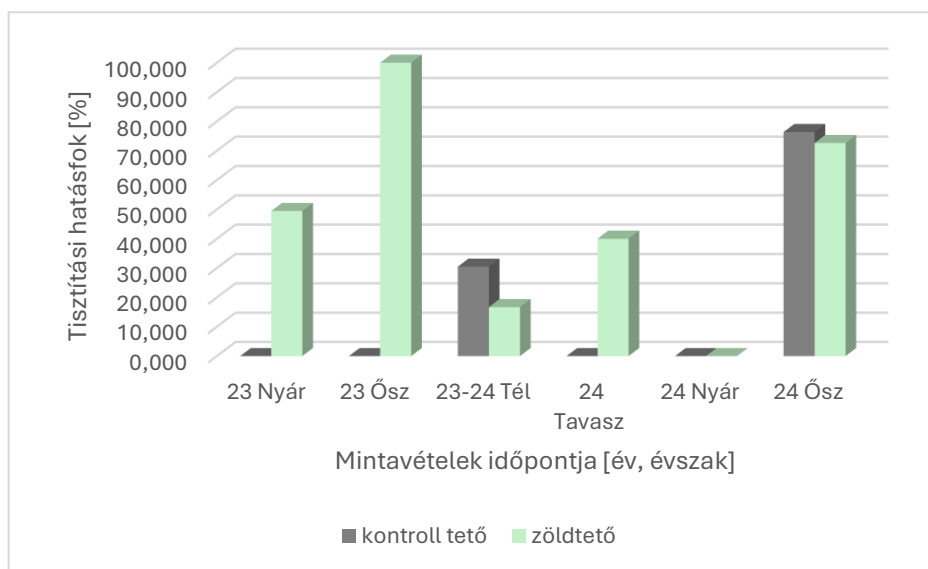
3.3.6 A gyökérzónás rendszerek vas (Fe) eltávolítási hatékonysága

A tetőről lefolyó csapadékvizek fém, nemfém tartalmának vizsgálata a nehézfém, nemfém tartalom mennyiségének változására irányult. Összesen 13 szennyezőt vizsgáltam kutatásom során, köztük nehézfémeket, félfémeket, nemfémeket egyaránt. Ezek közül bemutatom a vas és a cink, valamint a nemfém foszfor szennyezőt (6.1. táblázat, 6.2. táblázat).

A fémek, nehézfémek esetében a növényzet felveheti ezeket a szennyezőket, a mikroorganizmusokban pedig akumulálódhatnak ezen elemek. Az egyes elemek akár fitotoxicitást, illetve mikrobiológiai aktivitást is okozhatnak, ha nagy koncentrációban vannak jelen. [23] Ez magyarázhatja a műtárgyak tisztítási hatékonyságát ezen szennyezők esetében.

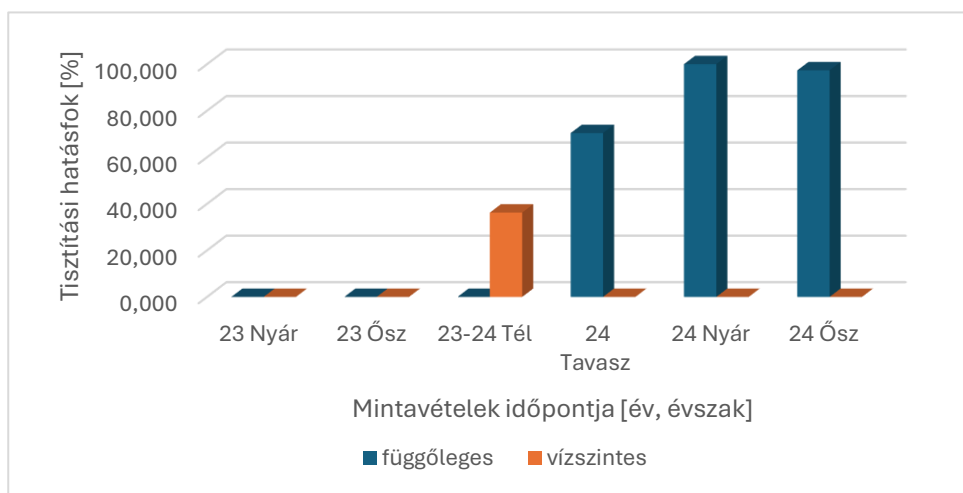
Másrészt a magasabb pH pozitívan befolyásolja a fémek és nehézfémek eltávolítási hatásfokát azért, mert a töltet adszorpciója megnő. Mivel a közeg pH-ja folyamatosan változik, ez azt eredményezheti, hogy alacsonyabb pH esetében az addig adszorbeálódott szennyezőanyagok bekerülnek az elfolyó vízbe. Emiatt is lehetséges az, hogy egyes anyagok esetében koncentráció növekedés következhet be a kiindulási értékhez képest. [23]

A teljes rendszer tisztítási hatásfokait (3.9. ábra) vizsgálva az látszik, hogy a zöldtető vonalon képes volt viszonylag nagyfokú tisztításra, míg a kontroll vonalon a tisztítást követően koncentráció növekedést tapasztaltam. A növekedés minden esetben a vízszintes műtárgyat követően volt. A kontroll vonalra érkező csapadék egy nagyságrenddel alacsonyabb koncentrációban tartalmazott vasat.

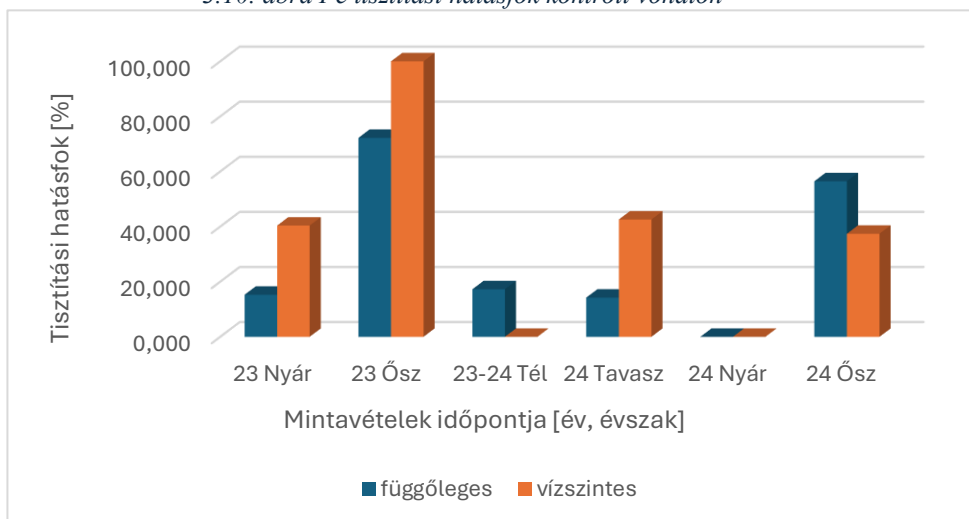


3.9. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka Fe esetében

Külön vizsgálva a függőleges és a vízszintes műtárgyat hasonló következtetésre jutottam. Kontroll vonalon (3.10. ábra) a függőleges műtárgynak volt nagyobb hatásfoka, ez előbb említett indok miatt. 2023. nyarán és őszén nem mértem vasat egyik mintavételi ponton sem. A téli évszakba a decemberi mérések szintén nem mutattak vastartalmat a vízben, ezért ott a januári eredményekkel számoltam. A további 2024-es évszakok esetében a vízszintes átfolyású műtárgynál feldúsult a műtárgy után a vas a vízben, így nem értelmezhető a hatásfok.



3.10. ábra Fe tisztítási hatásfok kontroll vonalon

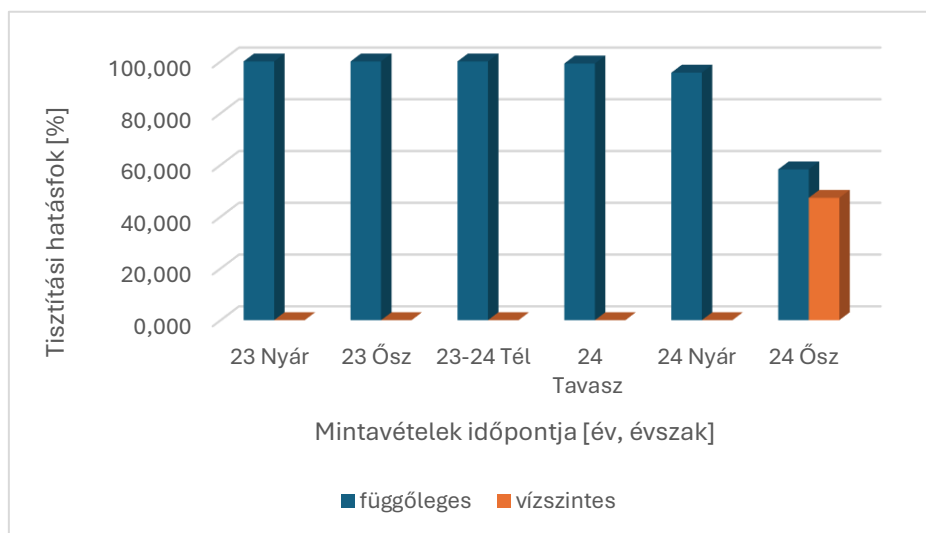


3.11. ábra Fe tisztítási hatásfok zöldtető vonalon

Zöldtető vonalon (3.11. ábra) ezzel ellentétben pedig a vízszintes átfolyású műtárgy bizonyult jobbnak. Szintén a téli évszakban a decemberi mintákban nem volt vas, ezért a januári mintákkal számoltam, itt pedig csak a függőleges átfolyású műtárgynál van csak értelmezhető hatásfok. Az esetek többségében itt értelmezhető volt a hatásfok, kivéve 2024. nyarat, ahol végig negatív értéket kaptam a koncentráció növekedés miatt. Ezen a vonalon a legnagyobb befolyó koncentrációt 408,6 $\mu\text{g/l}$ volt, ezt 48,47 $\mu\text{g/l}$ -re tudta csökkenteni a két műtárgy sorbakötve. Míg a legkisebb befolyó koncentráció 19,1 $\mu\text{g/l}$, majdnem 1 mg/l -rel kevesebb, mint a kontroll vonalon befolyó maximum érték.

3.3.7 A gyökérzónás rendszerek cink (Zn) eltávolítási hatékonysága

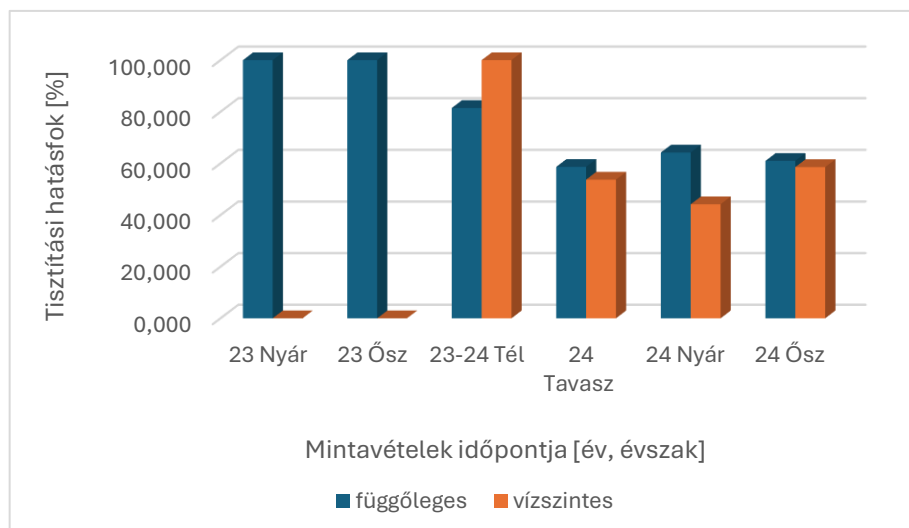
A cink koncentrációkat vizsgálva a rendszer pontjain arra a megállapításra jutottam, hogy ezen szennyezőt képes a legnagyobb hatásfokkal az év minden évszakában stabilan tisztítani. A



3.12. ábra Zn tisztítási hatásfok kontroll vonalon

kontroll vonalon (3.12. ábra) 2024. őszt kivéve minden vizsgált évszakban 100% körüli tisztításra volt képes a függőleges átfolyású műtárgy. A vízszintes műtárgynál azért nem tapasztalható tisztítás, mivel az előtte lévő függőleges műtárgy teljesen megtisztította a vizet a cinktől. 2024 őszen van csak egy hatásfok adatom, ami egy kicsit több, mint 47 %.

Ezen szennyező tisztítása a zöldtető vonalon (3.13. ábra) kicsit kisebb mértékű, mint a kontroll vonalon. Hasonlóan a másik vonalhoz, itt is a függőleges átfolyású műtárgynak volt jobb tisztítási hatásfoka a vizsgált időszakban. Kivéve 2023-24. tele esetében, ahol a vízszintes átfolyású műtárgy bizonyult hatékonyabbnak, mivel az 100%-os hatásfokot ért el a függőleges pedig csak a 4/5-ét. 2023. nyarat és őszt vizsgálva, hasonlóan tapasztalok, mint a kontroll

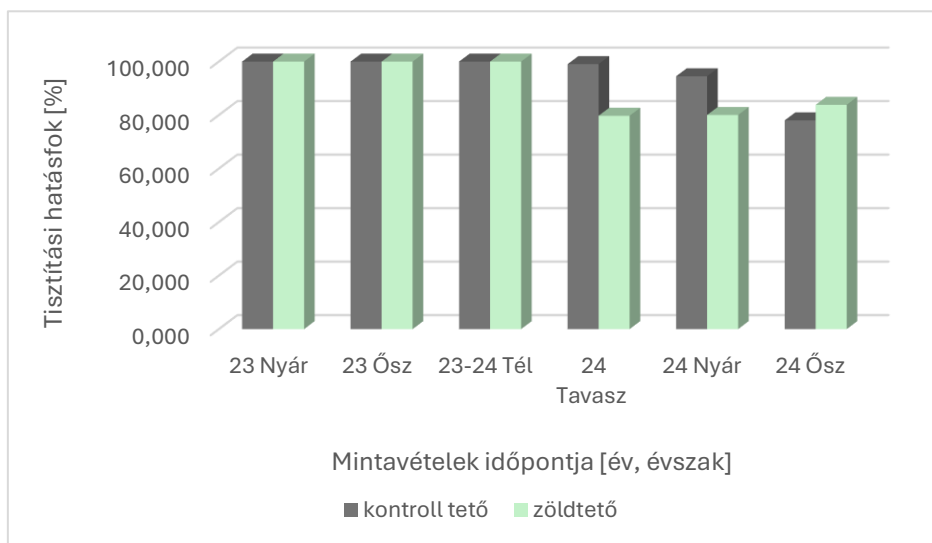


3.13. ábra Zn tisztítási hatásfok zöldtető vonalon

vonalnál, hogy a függőleges átfolyású műtárgy teljes tisztítást végzett, így a vízszintesre nem kaptam tisztítási eredményt. Egyébként nem sokkal jobb a függőleges műtárgy tisztítási képessége ott, ahol mindkét műtárgy képes volt tisztításra. 2024. tavasz, nyár, ősz esetében minimális különbség adódik a függőleges javára. Ebben az időszakban körülbelül 61%-os hatásfokkal rendelkezett átlagosan a függőleges, 52%-os hatásfokkal pedig a vízszintes műtárgy. Tehát nagyjából 10% különbség van közöttük, de csak ebben az időszakban.

A teljes műtárgysort (3.14. ábra) vizsgálva kiváló eredmények születtek a kontroll vonalon. 100%-os hatásfokkal volt képes tisztítani a rendszer 2023. nyarán, őszén és 2023-24 telén is. A 2024-es év többi évszakán fokozatos hatásfok csökkenést tapasztaltam. 2024. tavaszán és nyarán 90% feletti, míg őszén 78%-os hatásfokot számoltam.

Ezen szennyezőt képes az egész rendszer tisztítani a befolyó vízből a legnagyobb hatásfokkal. A teljes rendszer az első három évszakban teljes mértékű tisztításra volt képes, tehát nem volt

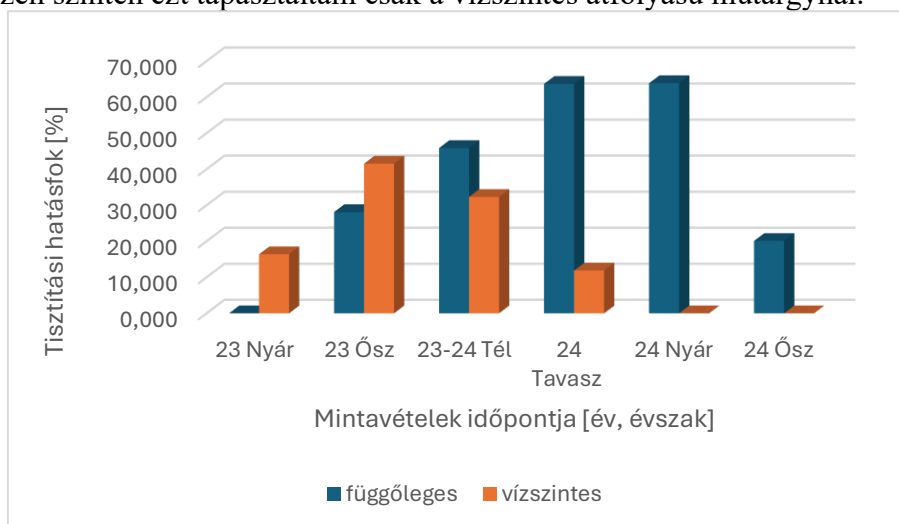


3.14. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka Zn esetében

az elfolyó vízben mérhető cink koncentráció a zöldtető vonalon. A maradék 3 évszakban 80% körüli szennyezőanyag eltávolításra volt képes a rendszer itt. Hasonlóan a kontroll vonalhoz, itt is elmondható, hogy ezt a szennyezőt képes a legnagyobb hatékonysággal, stabilan tisztítani a rendszer a vizsgált periódusban. Átlagosan 90,6% a hatásfoka a 2023. nyártól a 2024. őszig tartó időszakban.

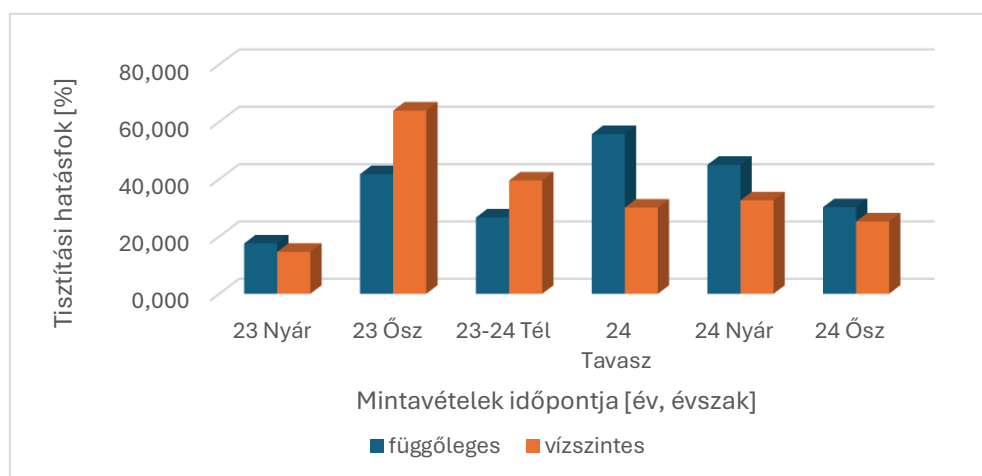
3.3.8 A gyökérzónás rendszerek foszfor (P) eltávolítási hatékonysága

A rendszerre ráfolyó foszfor koncentrációk a kontroll vonalon (3.15. ábra) minden alkalommal meghaladták a 20 µg/l-t, az 50 µg/l-t nem érték el egyszer sem. A zöldtetőre ráfolyó koncentrációkhoz képest ezek a mennyiségek 2 nagyságrenddel kisebbek. Minden évszakban volt értelmezhető tisztítási hatások, de hol csak a függőleges, hol csak a vízszintes átfolyású műtárgynál. A vizsgált évszakok több mint felében a függőleges átfolyású műtárgy volt a hatékonyabb a foszfor eltávolításában. Habár 2023. nyarán feldúsult a vízben a foszfor mennyisége a függőleges műtárgy után, így ott nem értelmezhető a tisztítási hatások. 2024. nyarán és őszén szinten ezt tapasztaltam csak a vízszintes átfolyású műtárgynál.



3.15. ábra P tisztítási hatások kontroll vonalon

A befolyó koncentrációk ezres nagyságrendben mérhetők a zöldtető vonalon (3.16. ábra), 1800 µg/l-t az összes mintánál meghaladta, a 2900 µg/l-t nem érte el. A két műtárgytípust vizsgálva

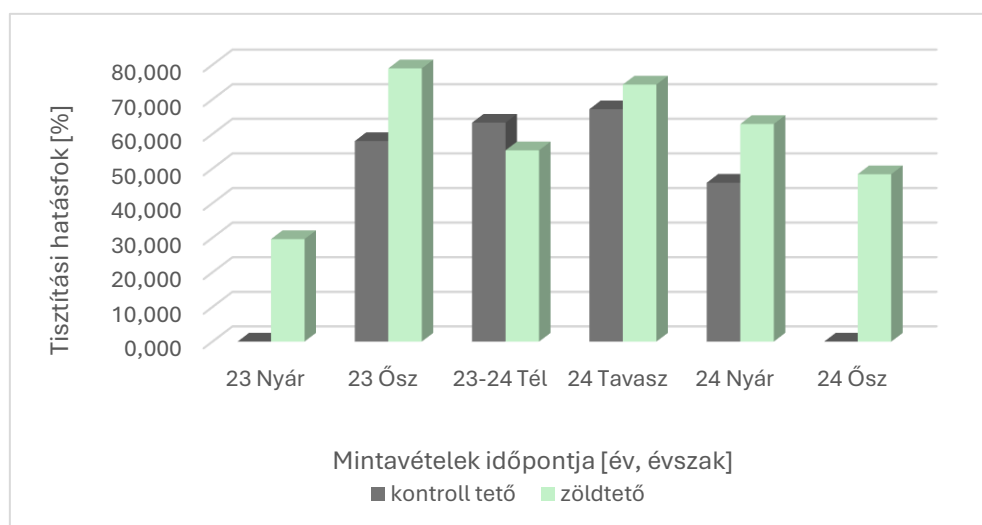


3.16. ábra P tisztítási hatások zöldtető vonalon

arra a következtetésre jutottam, hogy az összes vizsgált évszakban mindkét műtárgy esetében értelmezhető hatásokokat kaptam, tehát a foszfor koncentrációjának megnövekedése a műtárgyak után nem történt egyszer sem, nem úgy, mint a kontroll tető vonalon. Itt is az esetek

többségében a függőleges átfolyású műtárgynak van magasabb tisztítási képessége. Viszont a legmagasabb tisztítási hatásfokot a vízszintes átfolyású műtárgy produkálta 2023. őszén. A függőleges átfolyású műtárgy hatásfokainak átlaga az egész vizsgálati időszakot tekintve kicsit több, mint 36%-ra adódott. A vízszintes átfolyású műtárgyé pedig több, mint 34%-ra. Tehát a két műtárgy között nincs nagy különbség a hatásfokot tekintve. Ezt a teljesítményt nem stabilan hozzák, hanem ahogy említettem, hol az egyik tisztít jobban, hol a másik és az értékek közt viszonylag nagy az eltérés az évszakok nagy részében.

Összességében a rendszer, amikor értelmezhető hatásfokokat kaptam eredményül, akkor nagyjából 60% körüli tisztításra volt képes ezen a kontroll vonalon. A műtárgysorok tisztítási képességét (3.17. ábra) vizsgálva ezen a vonalon azt látom, hogy jobban teljesít a zöldtető után kialakított rendszer. Itt az összes vizsgált évszakban történt tényleges tisztítás, átlagosan több, mint 58% a tisztítási hatásfoka a rendszernek.



3.17. ábra Műtárgysorok tisztítási hatásfoka P esetében

4 Értékelés és következtetések

A kutatásom során kapott eredmények a legtöbb esetben alulmaradnak (pl. $\text{NH}_4\text{-N}$) más szakirodalmi eredményekhez [14] képest. Nitrát tisztítási képessége egy kicsivel volt csak rosszabb az irodalmi [14] értékekhez képest, viszont volt olyan évszak is, ahol meg jobb eredményeket ért el a telep. Összes nitrogén, valamint foszfor esetében a szakirodalmi értékekhez [13], [15] hasonló eredményeket kaptam én is. A cink tisztítási hatásfoka a vizsgált rendszereken például meghaladta a szakirodalomban [16] talált értéket. Ennek oka lehet az, hogy az utóbbi egy és negyed évben szélsőséges volt a csapadék eloszlása, aszály volt, majd hirtelen sok csapadék. Mindez befolyásolhatta a rendszerre kerülő szennyezők mennyiségét és a rendszerekben lezajló folyamatokat is. Emellett viszonylag frekvenciált helyen található a kutatótelep, nagyfokú külső ipari és közlekedésből származó szennyezés nem kerül a rendszerbe, kivéve falevelek.

A függőleges és a vízszintes műtárgyak kialakításból adódó különbség a tisztítási hatásfokok mértékében megfigyelhető, amelyet a szakirodalom [10] is állít, a legjobban az összes nitrogén esetében figyelhető meg. De több helyen az ellenkezője valósul meg, vagy azt tapasztaltam, hogy nem adódott különbség sem a kialakítás, sem az évszakok miatt, ahogy azt vártam volna ($\text{NH}_4\text{-N}$, NO_2^-).

A két típusú műtárgyat tisztítási hatásfok növelés céljából érdemes összekapcsolni, illetve beruházni mindkét típusú műtárgyra, ha egy újat alakítana ki az ember. Mivel az egyik a másiknak a kiegészítője e téren, amit az egyik típus rosszabbul képes tisztítani, a másik típus meg jobban.

A száraz, illetve nedves kiülepedés szintén befolyásolja a műtárgyban lévő koncentrációkat ezért lehetséges dúsulás is. Másrészt a csapadék, ami a műtárgyra zúdul hígítja a műtárgyban a koncentrációját az egyes elemeknek, de a töltet adszorpcióját negatívan befolyásolja, mivel csökkenni fog a pH a befolyó csapadékvíz savas kémhatása miatt.

Az irodalmak mellett még az 5/2023 kormányrendelet [24] ivóvízhatárértékeivel is össze tudom hasonlítani a kapott eredményeimet. Azért ezekkel az értékekkel, mert Magyarországon jelenleg nincsen olyan törvény, amely a csapadékvizek minőségére vonatkozna háztartási felhasználás esetén. A kapott eredmények és azok határértékekkel történő összehasonlítását a 4.1. táblázat és a 4.2. táblázat segítségével mutatom be. Minden esetben a rendszerekről kifolyó vízben található szennyezőanyag mennyisége van feltüntetve a táblázatban. Határértéktúllépés (narancssárgával jelölve) kizárólag a KOI esetén történt. Itt megjegyezném, hogy a mérést ezen szennyező esetében nem permanganátos (KOI_{ps}), hanem a kromátos módszerrel végeztem,

amely erősebb oxidálószer, így lehetséges, hogy alacsonyabb értékeket kaptam volna a permanganátos módszerrel. A többi szennyező mennyisége sokkal a határértékek alatt található. Cinkre, foszforra és összes nitrogénre nem ad meg határértéket a kormányrendelet.

Ezen eredmények alapján háztartási felhasználásra, többek között WC öblítésre, mosásra, autómosásra, öntözésre kiválóan alkalmas a tisztított csapadékvíz, így egy esővízgyűjtő és tisztító rendszer kiépítésével a vízfogyasztásunk több, mint felét ki tudnánk váltani, ezzel rengeteg vizet lennénk képesek megtakarítani.

Továbbá a több fém, nemfém, félfém szennyezőt is érdemes lenne vizsgálni és szakirodalmi adatokkal összehasonlítani. Valamint ugyanezen telepen elvégzett kutatások korábbi évek kutatási eredményeivel is össze lehetne hasonlítani a kapott eredményeket.

4.1. táblázat Ivóvíz határértékekkel való összehasonlítása a bemutatott szennyezőknek a kontroll vonalon

			pH	vezető- képessé g [μS/cm]	NH ₄ -N [mg/l]	NO ₂ ⁻ [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	KOI _{ps} [mg O ₂ /l]	Fe [μg/lg]
Dátum		Határérték [24]:	6,5- 9,5	2500 μS/cm	0,5 mg/l	0,5 mg/l	50 mg/l	5 mg O ₂ /l	200 μg/l
2023 aug.	Kontroll vonal tisztítás után		7,37	154,7	0,038	0,017	0,961	2	0,00
2023 okt.	Kontroll vonal tisztítás után		7,13	131,9	0	0,034	0,674	3	0
2023 dec.	Kontroll vonal tisztítás után		7,11	118,1	0,034	0,092	0,045	2	0,00
2024 jan.	Kontroll vonal tisztítás után		7,08	201,3	0,007	0,002	0,622	7	1,60
2024 ápr.	Kontroll vonal tisztítás után		7,4	209,7	0,021	0	0	9	3,61
2024 máj.	Kontroll vonal tisztítás után		7,28	168,9	0,023	0	0,1	9	11,48
2024 júl.	Kontroll vonal tisztítás után		7,53	178,2	0,026	0	0,176	16	9,11
2024 szept.	Kontroll vonal tisztítás után		7,63	116,9	0,012	0	0	13	1,84
2024 okt.	Kontroll vonal tisztítás után		7,5	145,2	0,008	0	0	11	0,53

4.2. táblázat Ivóvíz határértékekkel való összehasonlítás zöldtető vonalon

		pH	vezető- képessé g [μS/cm]	NH ₄ -N [mg/l]	NO ₂ ⁻ [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	KOI _{ps} [mg O ₂ /l]	Fe [μg/lg]
Dátum	Határérték [24]:	6,5- 9,5	2500 μS/cm	0,5 mg/l	0,5 mg/l	50 mg/l	5 mg O ₂ /l	200 μg/l
2023 aug.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,47	236,6	0,029	0,019	0,643	39	9,65
2023 okt.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,49	230	0,013	0,027	0,383	15	0
2023 dec.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,49	194,6	0,037	0,091	0	15	0,00
2024 jan.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,2	259,5	0,016	0,004	0	39	34,77
2024 ápr.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,64	348,3	0,02	0	0,45	19	19,97
2024 máj.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,27	319,2	0,059	0	0	34	42,30
2024 júl.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,11	339,1	0,031	0	0	35	110,4 1
2024 szept.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,68	203,7	0,048	0	0	63	48,47
2024 okt.	Zöldtető vonal tisztítás után	7,52	221,7	0,02	0	3,309	86	54,64

5 Összefoglalás

Az esővíz gyűjtése és a felhasználás és tárolás megkönnyítése érdekében annak megtisztítása fontos feladat városi, települési környezetben. Erre alkalmas módszer az esővízgyűjtő rendszerek és a természetközeli tisztítók kombinációjának beillesztése az urbanizálódott településekre, amelyek a gyűjtésen és a tisztításon felül a mikroklímára és a talajvíz viszonyokra is hatással vannak, ha a helyszínen használják fel a gyűjtött vizet. Dolgozatomban a gyökérzónás tisztító rendszerek csapadékvíz tisztítási hatékonyságát vizsgáltam $\text{NH}_4\text{-N}$, NO_2^- , NO_3^- , KOI_{Cr} , TN_b , Fe, Zn, P szennyezők tekintetében. Lehetőségem volt a két típusú műtárgy közötti különbségek vizsgálatára is a telep kialakításának köszönhetően. Szakirodalmi eredményekhez képest az általam kapott eredmények hol megegyeznek, hol jobbak, illetve van olyan is, ahol rosszabbak. $\text{NH}_4\text{-N}$ [14] és KOI_{Cr} [13] esetében alulmaradtak az eredményeim, NO_3^- esetében a szakirodalmi [14] eredményekhez hasonló eredményeket is kaptam, illetve volt, ahol magasabb és volt, ahol alacsonyabb értékeket kaptam, de az eltérés kis mértékű az irodalmakétól. TN_b és P eltávolítási képessége a rendszernek az irodalmakban [13], [15] taglaltakkal megegyezik; Zn esetében pedig messze felülmúlta azt [16].

A két típusú műtárgy közötti különbségek felfedezhetők voltak az eredmények alapján is, ahogyan az várható volt. A két vonalon található műtárgysor tisztítási hatékonysága sok esetben eltér egymástól, amely betudható a beérkező csapadékvizek minőségének különbségének.

A vizsgált időszakban az ivóvízhatárértéket csak a kémiai oxigénigény értékek haladták meg, 3 mintavételi alkalom kivételével mindig; a többi szennyező esetében bőven a határértékek alatti mennyiségben lépett ki a rendszerekből; tehát a víz a KOI-tól eltekintve ivóvíz minőségű. Ennek fényében kiválóan alkalmazható a háztartáson belül mosásra, WC öblítésre, autómosásra és kertöntözésre is. Csapadékgyűjtő és tisztító rendszert kialakítva tehát a vízfogyasztásunk körülbelül 50%-át ki tudnánk váltani, így sokkal kevesebb ténylegesen ivóvíz minőségű víz kerülne elpazarlásra.

Több fém, félfém, nemfém szennyező vizsgálata és a korábbi évek eredményeivel való összehasonlítás még pontosabb képet adna a telep ezen szennyezők eltávolítási hatékonyságáról, valamint arról, hogy az évek során hogyan változik a telep szennyezőanyag eltávolítási képessége. Illetve statisztikát lehetne készíteni hosszabb időtáv eredményeiről.

6 Mellékletek

0,0: nem volt befolyó koncentráció; [-] jelölés: a koncentrációja a szennyezőnek megemelkedett a befolyóhoz képest az elfolyó vízben; sárga jelölés: tényleges 0% hatásfok.

6.1. táblázat Kontroll tető vonal (szürke) és zöldtetővonal (zöld) tisztítási hatásfokai Fe, P, Zn szennyező esetében

		P	Fe	Zn	P	Fe	Zn
23 Nyár	Függőleges	-	0,0	100,00	17,55	15,265	100,00
	Vízszintes	16,40	0,0	-	14,64	40,375	-
	Teljes	-	0,0	100,00	29,62	49,476	100,00
23 Ősz	Függőleges	28,11	0,0	100,00	41,75	72,228	100,00
	Vízszintes	41,55	0,0	-	63,91	100,000	-
	Teljes	57,98	0,0	100,00	78,97	100,000	100,00
23-24 Tél	Függőleges	45,88	-	100,00	26,63	17,261	81,48
	Vízszintes	32,31	36,226	-	39,51	-	100,00
	Teljes	63,29	30,471	100,00	55,29	16,679	100,00
24 Tavasz	Függőleges	63,68	70,401	99,20	55,71	14,222	58,67
	Vízszintes	11,88	-	-	30,08	42,584	53,71
	Teljes	67,18	-	99,04	74,30	40,012	79,75
24 Nyár	Függőleges	63,88	100,000	95,65	44,99	-	64,22
	Vízszintes	-	-	-	32,57	-	44,18
	Teljes	45,92	-	94,51	62,91	-	80,02
24 Ősz	Függőleges	20,10	97,341	58,29	30,21	56,458	61,00
	Vízszintes	-	-	47,29	25,23	37,409	58,58
	Teljes	-	76,378	78,01	48,38	72,636	83,85

6.2. táblázat Kontroll tető vonal (szürke) és zöldtetővonal (zöld) tisztítási hatásfokai $\text{NH}_4\text{-N}$, NO_2^- , NO_3^- esetében

		$\text{NH}_4\text{-N}$	NO_2^-	TN_b	$\text{NH}_4\text{-N}$	NO_2^-	TN_b
23 Nyár	Függőleges	-	-	60,563	-	-	20,281
	Vízszintes	-	15,000	27,463	-	-	3,558
	Teljes	-	-	71,394	-	-	23,117
23 Ősz	Függőleges	100,000	3,571	25,518	-	-	58,311
	Vízszintes	-	-	27,323	70,455	12,903	42,539
	Teljes	100,000	-	45,869	48,000	3,571	76,045
23-24 Tél	Függőleges	-	80,000	15,363	13,333	50,000	7,642
	Vízszintes	0,000	16,667	10,584	2,564	0,000	11,614
	Teljes	-	86,667	23,241	17,778	33,333	18,014
24 Tavasz	Függőleges	48,571	0	68,178	38,235	0	24,436
	Vízszintes	46,886	0	32,851	4,762	0	22,039
	Teljes	52,841	0	73,955	41,176	0	44,040
24 Nyár	Függőleges	-	0	44,771	-	75,000	12,694
	Vízszintes	43,478	0	48,062	16,216	100,000	19,782
	Teljes	-	0	71,315	-	100,000	29,965
24 Ősz	Függőleges	-	0	12,493	76,639	100,000	21,320
	Vízszintes	29,469	0	55,573	39,713	-	42,855
	Teljes	-	0	61,010	63,137	100,000	55,278

6.1 Ábrajegyzék

1.1. ábra Összesített vízfogyasztás megoszlás különböző irodalmak szerint [3]	6
1.2. ábra Csőszűrő (balra) és szűrőkosár (jobbra) felépítése [5]	8
1.3. ábra Esővízgyűjtő rendszer és annak kialakítása [7]	9
1.4. ábra Függőleges átfolyású rendszer felépítése [11]	11
1.5. ábra Vízszintes átfolyású rendszer felépítése [11]	12
1.6. ábra A függőleges és vízszintes átfolyású rendszerek összehasonlítása [12]	13
2.1. ábra A kontroll tető és a zöldtető [18]	15
2.2. ábra A gyökérszónás telep felépítése a Nivision szoftverben [17]	15
3.1. ábra pH változás kontroll vonalon	24
3.2. ábra pH változás zöldtető vonalon	25
3.3. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka NO_3^- esetében	27
3.4. ábra NO_3^- tisztítási hatásfok kontroll vonalon	28
3.5. ábra NO_3^- tisztítási hatásfok zöldtető vonalon	28
3.6. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka KIO_3 esetében	29
3.7. ábra KIO_3 tisztítási hatásfok zöldtető vonalon	29
3.8. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka TN_b esetében	30
3.9. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka Fe esetében	31
3.10. ábra Fe tisztítási hatásfok kontroll vonalon	32
3.11. ábra Fe tisztítási hatásfok zöldtető vonalon	32
3.12. ábra Zn tisztítási hatásfok kontroll vonalon	33
3.13. ábra Zn tisztítási hatásfok zöldtető vonalon	33
3.14. ábra Műtárgysor tisztítási hatásfoka Zn esetében	34
3.15. ábra P tisztítási hatásfok kontroll vonalon	35
3.16. ábra P tisztítási hatásfok zöldtető vonalon	35
3.17. ábra Műtárgysorok tisztítási hatásfoka P esetében	36

6.2 Táblázatjegyzék

4.1. táblázat Ivóvíz határértékekkel való összehasonlítása a bemutatott szennyezőknek a kontroll vonalon	38
4.2. táblázat Ivóvíz határértékekkel való összehasonlítás zöldtető vonalon	39
6.1. táblázat Kontroll tető vonal (szürke) és zöldtetővonallal (zöld) tisztítási hatásfokai Fe, P, Zn szennyező esetében	41
6.2. táblázat Kontroll tető vonal (szürke) és zöldtetővonallal (zöld) tisztítási hatásfokai $\text{NH}_4\text{-N}$, NO_2^- , NO_3^- esetében	41

6.3 Képjegyzék

2.1. kép Gyökérszónás kutatótelep (középen a függőleges átfolyású, tőle jobbra pedig a vízszintes átfolyású műtárgyak)	16
2.2. kép Mérés eszköze: UV-6300PC kétfényutas spektrofotométer	21
2.3. kép Ionkromatográf készülék és a hozzá tartozó számítógép	22
2.4. kép ICP-OES készülék és a segédberendezések	23

Irodalomjegyzék

- [1] ENHEALTH (2010): Guidance on use of rainwater tanks, Australia: Commonwealth of Australia, 2010. ISBN: 978-1-74241-325-9
- [2] A. CSAPÁK (2009): „Települési vízgazdálkodás, lakossági csapadékvíz-gyűjtés és -felhasználás; Doktori értekezés,” in *Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar*, Budapest.
- [3] T. ASZTALOS (2011): „A csapadékvíz használatának vizsgálata a kommunális vízellátásban és az ivóvízigény csökkentésében,” *MaSzSz Hírcsatorna*, pp. 3-16, május-június.
- [4] J. HÁDINGER (2013): „Az esővíz hasznosítás lehetőségei és szerepe a vízgazdálkodásban,” in *Óbudai Egyetem RS Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar Környezetmérnöki Intézet*.
- [5] D. DULOVICS (2003): „Csapadékvízgazdálkodás a környezetterhelés csökkentésének egyik eszköze,” *MaSzSz Hírcsatorna*, (11-12): pp. 15-21.
- [6] ENHEALTH (2004): Guidance on use of rainwater tanks, Canberra: Australian Government. ISBN: 0 642 82443 6
- [7] M. GYÉCSEK ÉS D. HALÁSZ (2015): „Csapadékvíz-hasznosítás, A vízgazdálkodásban betöltött szerepe,” Széchenyi István Egyetem, Győr.
- [8] K. L. F. NEMZETI NÉPEGÉSZSÉGÜGYI KÖZPONT (2023): „Csapadékvíz gyűjtésének és felhasználásának lehetőségei”.
- [9] K. ÁRPÁD ÉS V. LÁSZLÓ (2011): *Vízgazdálkodás - szennyvíztisztítás*, 3. bővített kiadás, Veszprém: Pannon Egyetem - Környezetmérnöki Intézet. HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0, ISBN: ISBN: 978-615-5044-35-9
- [10] PÁSZTOR ISTVÁN (2004): „Gyökérmezős szennyvíztisztítás 1.rész,” *Vízgazdálkodás és szennyvizek*.
- [11] T. KARCHES, F. BOGNÁR, I. DALKÓ, P. ORGOVÁNYI, T. PAPP, L. TÖRÖK ÉS E. VADKERTI (2020): *Kis kapacitású szennyvíztisztító létesítmények*, T. Karches, Szerk., Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó Nonprofit Kft. ISBN: 978-963-531-356-3
- [12] D. M. SOMFAI (2022): „Konzervatív nyomjelzőanyag transzport- és evapotranszpirációvizsgálata a hosszanti átfolyású kavicsöltetű gyökérzónás műtárgyban. Doktori (PhD) értekezés,” in *Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem Környezettudományi*, Gödöllő.
- [13] J. CHOI, M. MANQUIZ, F. GERONIMO, S. LEE, B. LEE ÉS L. KIM (2012): „Development of a horizontal subsurface flow modular constructed wetland for urban runoff treatment,” *Water Science & Technology*, pp. 1950-1957. doi: 10.2166/wst.2012.306

- [14] B.-H. LEE ÉS M. SCHOLZ (2007): „What is the role of *Phragmites australis* in experimental constructed wetland filters treating urban runoff?,” *Ecological Engineering*, (29): pp. 87-95. doi:10.1016/j.ecoleng.2006.08.001
- [15] S. TERZAKIS, M. FOUNTOULAKIS, I. GEORGAKIS, D. ALBANTAKIS, I. SABATHIANAKIS, A. KARATHANASIS, N. KALOGERAKIS ÉS T. MANIOS (2008): „Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region,” *Chemosphere*, 72 (2): pp. 141-149. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.02.044
- [16] YONGCHAO ZHOU, TIANFENG GU, WENTAO YI, TUQIAO ZHANG ÉS YIPING ZHANG (2019): „The release mechanism of heavy metals from lab-scale vertical flow constructed wetlands treating road runoff,” *Environmental Science and Pollution Research*. doi: 10.1007/s11356-019-05097-y
- [17] D. SOMFAI, A. DOLGOSNÉ KOVÁCS ÉS E. DITTRICH (2020): „Innovatív szennyvíztisztító kutatótelep Pécssett,” *Dunakavics*, pp. 53-62.
- [18] L. LENKOVICS (2016): „Zöldtető építése és monitoring rendszere a PTE Műszaki Informatikai Karon,” *Magyar Épületgépészet*, (1-2): pp. 14-15.
- [19] A. DOLGOSNÉ KOVÁCS (2015): Bevezetés a környezetvédelmi analitikába II., Debrecen: TAMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0012, Zöld Energia Felsőoktatási Együttműködés (ZENFE) projekt.
- [20] A. DOLGOSNÉ KOVÁCS (2004): Bevezetés a környezetvédelmi analitikába I., PHARE ERFP-DD2002-HU-B-01 projekt, elektronikus jegyzet.
- [21] I. ILISZ (2013): „Elválasztástechnikai módszerek,” in *Illusztrált segédanyag a modern műszeres analitikai kémia oktatásához*, Szegedi Tudományegyetem, Pécsi Tudományegyetem, 5.2. fejezet.
- [22] B. NÉMET (2010): „Szervetlen anyagok atomemissziós színekének meghatározása,” in *Környezeti spektroszkópia, 4. Atomemisszió*, PTE Fizikai Intézet.
- [23] G. YU, P. LI, G. WANG, J. WANG, Y. ZHANG, S. WANG, K. YANG, C. DU ÉS H. CHEN (2021): A review on the removal of heavy metals and metalloids by constructed wetlands: bibliometric, removal pathways, and key factors, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. doi: 10.1007/s11274-021-03123-1
- [24] „5/2023 (I.12.) Kormányrendelet az ivóvíz minőségi követelményeiről és az ellenőrzés rendjéről,” <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a2300005.kor>, 2023.