

Nehézfémek és fémek vizsgálata
kontrolltetőről és extenzív zöldtetőről
lefolyó csapadékvízben

Gáspár Bernadett

2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Célkitűzések	4
2. Irodalmi áttekintés	5
2.1. Klímaváltozás	5
2.2. A klímaváltozás hatása a csapadék mennyiségére és minőségére, kiváltképpen a vizsgált területen.....	5
2.3. Miért van szükség zöldtetőkre?	6
2.4. A zöldtetők története röviden	6
2.5. A zöldtetők típusai.....	7
2.6. A zöldtetők rétegrendje	8
2.7. Az ideális ültetőközeg	9
2.8. A vizsgált paraméterek (fémek, nehézfémek)	9
2.8.1. Arzén (As)	9
2.8.2. Kadmium (Cd)	9
2.8.3. Réz (Cu)	10
2.8.4. Króm (Cr)	10
2.8.5. Vas (Fe).....	10
2.8.6. Higany (Hg).....	10
2.8.7. Mangán (Mn)	11
2.8.8. Nikkel (Ni)	11
2.8.9. Ólom (Pb)	12
2.8.10. Szilícium (Si).....	12
2.8.11. Cink (Zn).....	12
2.9. A vizsgált paraméterekre (fémek, nehézfémek) vonatkozó szakirodalmi áttekintés.....	12
3. Anyag és módszertan.....	15
3.1. A kutatás alapjául szolgáló zöldtető	15
3.2. Fémek, nehézfémek meghatározása	17
3.1.1. Mérés elve.....	17
3.1.2. Az ICP-OES műszer felépítése.....	17
3.1.3. Mérés az ICP-OES műszerrel.....	18
4. Eredmények	19
4.1. Téli időszak	20
4.2. Tavaszi időszak	22
4.3. Nyári időszak.....	24
4.4. Összesített.....	26

4.5.	Összehasonlítás a korábbi évek mérési eredményeivel	29
5.	Következtetések, megállapítások.....	30
6.	Összefoglalás	31
7.	Irodalomjegyzék	32
8.	Táblázatjegyzék.....	34
9.	Ábrajegyzék	35

1. Bevezetés

Az éghajlatváltozás, és következményei a világ minden táján érzékelhetők. Ezen hatások mérséklése, a természet és a környezet védelme érdekében új technológiák, módszerek és eljárások kidolgozása szükséges. A klímaváltozás okozta problémák közé tartozik a szélsőséges csapadékesemények számának és gyakoriságának növekedése. A rövid idő alatt lezúduló nagy mennyiségű csapadék villámárvizeket okozva a beépített területeket és a természeti területeket egyaránt erodálja. Az esővíz lefolyás késleltetésére, a települések vízgazdálkodásának javítására és a zöldfelületek bővítésére egyaránt alkalmazhatóak a zöldtetők. [7][28]

Tehát a napjainkban zajló változások hatására kialakult éghajlati viszonyok miatt fontos a zöldfelületi rendszerek, különösen a zöldtetők szerepe. A fentebb említett kedvező hatások mellett még számtalan előnnyel bírnak: oxigént termelnek, megkötik a széndioxidot és a port, csökkentik a városi hősziget hatást. Emellett zajcsökkentő és -szigetelő hatásuk is van, illetve esztétikai és ökológiai okokból – élettér – is fontos a jelenlétük. Egyéb hasznos tulajdonságokról azonban még keveset tudunk, ilyen például a pufferező hatásuk, melyet kihasználva a rajtuk átfolyó csapadékvíz más minőséget képviselhet, mint a tetőkről összegyűjtött csapadékvíz. A sok kedvező tulajdonság miatt nagyobb fokú elterjedés várható a jövőben, éppen ezért részletesebben meg kell ismernünk a zöldtetők hatásait.

Munkám során azt vizsgálom, hogy a zöldtető, mint ökológiai rendszer, milyen hatással van a rajta átfolyó csapadékvízre, annak fém- és nehézfém tartalmára vonatkozóan. Ez egy, az egyetemen folyó hosszú távú kutatás része, amelyet már korábban ugyanolyan módszertannal vizsgáltak, így lehetőségem van összevetni több évnyi eredményt a sajátjaimmal, illetve a szakirodalommal.

Fontos megemlíteni, hogy a vizsgált zöldtető egy komplex épület-vízgazdálkodási rendszer eleme, amelyhez csatlakozik egy gyökérszívó szennyvíztisztító telep is. A megépített kutatótelep komplexitását tekintve egyedülállónak számít Magyarországon. A zöldtetőn az egyes csapadékesemények alatt meghatározott időintervallumban történik a mintavételezés. Emellett összehasonlítás céljából közvetlenül a csapadékból, illetve egy, a zöldtető mellett található üres kontroll tetőről is történik mintavétel. A mért és a sokévnnyi visszamenőleges adatok ismeretében pontosabb képet kaphatunk arról, hogy a zöldtető milyen hatással van az átfolyó csapadékvíz nehézfém tartalmára a lehulló csapadék minőségéhez képest. [28]

1.1. Célkitűzések

A dolgozatom témájaként a zöldtetőn és kontroll tetőn áthaladó csapadék, valamint magának az esővíznek a minőségét vizsgálom és hasonlítottam össze, a fémek és nehézfémek tekintetében. A dolgozat olyan kérdésekre keresi a választ, mint:

- hogy a **korábbi évek mérési eredményeihez képest milyen eltéréseket, változásokat** mutatnak a vizsgált paraméterek értékei;
- a vizsgált zöldtető összességében **kibocsátó vagy pufferelő hatással** bír a fémekre, nehézfémekre vonatkozóan;
- illetve a **mért értékek megfelelnek-e a jogszabályban előírt vízminőségi határértékeknek?**

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Klímaváltozás

Az éghajlatváltozás és a globális felmelegedés hatásai, következményei egyre több területen megmutatkoznak. A szélsőséges időjárási jelenségek figyelhetők meg: heves esőzések, szárazság, megnőtt a szélsőséges csapadékmennyiségek gyakorisága és intenzitása; a vegetációs időszak eltolódott, a gleccserek mérete lecsökkent világszerte, változtak a szélirányok, a tengerszintek magassága nőtt és a nagy hőmérsékleti ingadozások számtalan területet és embert sújtanak világszerte. Mindezek szerepelnek az IPCC 4. jelentésében (2007) [18], illetve az azóta elkészült 5. és 6. jelentés (2014 és 2021) romló tendenciákról számol be [10] [17]. Az antropogén eredetű kiváltó okok a globalizáció, a népességnövekedés és a fogyasztói társadalom, amelyek vonzataként megnőtt az úgynevezett üvegházhatású gázok kibocsátása. Ilyen gázok a szén-dioxid (CO_2), vízgőz, dinitrogén-oxid (N_2O), a metán (CH_4), az ózon (O_3) és a fluorozott szénhidrogének (HFC-k) is. Ezek közül néhányan természeti folyamatok eredményeként is jelen vannak a légkörben, hiszen ha nem lenne üvegházhatás, bolygónk átlaghőmérséklete $15\text{ }^\circ\text{C}$ helyett $-18\text{ }^\circ\text{C}$ fok lenne. A jelenség során a napsugárzás energiáját ezek a gázok bent tartják a légkörben, visszaverik az alsóbb rétegekbe, így azok hőmérséklete nő. Az emberiség azonban olyan mennyiségben bocsájt ki ilyen gázokat, hogy azok jelentősen megemelik az átlaghőmérsékletet. Ezzel pedig a fentebb említett hatásokat idézik elő. [32][29]

Hazánkban a klímaváltozás következménye lehet az égővre jellemző vegetáció határainak eltolódása, a társulások és táplálékhálózatok átrendeződése. Továbbá a természetes élővilág fajainak visszaszorulását, hosszú távon a biológiai sokféleség csökkenését, az inváziós fajok elterjedését, illetve újabbak megjelenését és az élőhelyek szárazabbá válását is okozhatja a jövőben. [8]

2.2. A klímaváltozás hatása a csapadék mennyiségére és minőségére, kiváltképpen a vizsgált területen

Pécs Magyarország délnyugati részén található, éghajlata kontinentális erős mediterrán jelleggel.

Az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) adatai alapján (az 1991 és a 2020 közötti vizsgált időszak eredményei alapján) elmondható, hogy Pécsen (az átlagos havi középhőmérsékleteket tekintve) a leghidegebb hónap a január, a legmelegebb pedig a július.

Az évi közepes hőingás 22,9°C; az átlagos évi csapadékmennyiség 673 mm. A legkevesebb csapadék januárban és márciusban hullik, a legcsapadékosabb időszak pedig májustól júniusig tart. A szélsőbesség szempontjából a tavaszi értékek a legmagasabbak (3,09-3,40 m/s), amíg az augusztus-október időszakban volt a legkisebb értéke (2,51-2,61 m/s). A legjellemzőbb szélirány az északnyugati. Az esetek ötödében fúj az uralkodó szélirány felől a szél, illetve nagyjából ilyen mértékben fordul csak elő. A legritkábban pedig dél felől fúj a szél. [27]

2.3. Miért van szükség zöldtetőkre?

A szélsőséges időjárási jelenségeknek köszönhetően megváltozott a vízkörforgás illetve a vizek minősége is. Egyes területeken nőtt az éves csapadékmennyiség, míg máshol (Magyarországon is) csökkent. Nőtt a nagy intenzitású csapadékok gyakorisága, ezáltal a villámárvizeké is, így a csatornarendszerek túlterhelése jelentős.[14] A zöldtetők megfelelő védelmet nyújtanának ezekkel szemben, hiszen késleltetik a csapadékvíz lefolyását, tárolják azt, illetve a vizet közvetlenül visszajuttatják a természetes körforgásba az evaporáció és transzspiráció segítségével. [31]

A városokban úgynevezett *hősziget hatás* alakul ki, amelynek forrásai a mesterséges felszín sugárzás elnyelése, a szennyezett levegőnek és a közlekedésből, ipari tevékenységből, fűtésből származó többlet hő. A városi *hősziget hatás* röviden a város és természeti környezete között kialakult hőmérséklet - különbséget jelenti. [9] A jelenség elsősorban antropogén eredetű. A népességnövekedés következményeként a városok jelentősen terjeszkednek, így a beépítettség hatására csökken a zöldfelületek aránya, ezzel pedig csökken a vízáteresztő területek aránya és a beszivárgás. Ezen okokból kifolyólag nő: a lefolyás, a csapadékvíz-infrastruktúra terhelése, illetve a csatorna áradások. Mindezeket fokozhatja egyes területeken a globális felmelegedés hatására bekövetkező intenzívebb esőzések gyakorisága. Végül pedig a kevesebb zöld terület hatására csökken a transzpiráció és a növényzet árnyékolása – így csökken a páratartalom, a hőmérséklet pedig megnő a városokban. A zöldtető a hőmérséklet-szélsőértékek csökkentésével, a sugárzás nagy részének elnyelésével, a levegő páratartalmának növekedésével és a por megkötésével jelentősen javíthatja a mikroklimát. [7] [31]

2.4. A zöldtetők története röviden

Történetük az ókorig nyúlik vissza, i.e. 600 körül II. Nabukodonozor király építtette meg az ókor hét csodája közé tartozó babiloni függőkertet, felesége honvágyának enyhítésére. [30] [15] A skandináv országokban már évszázadokkal ezelőtt alkalmazták szigetelési célokra [31].

A középkor és a reneszánsz idején a tetőkertek gazdagok és a bencés rendi szerzetesek birtokában voltak. A 20. században a lapostetők elterjedésével Európában is megjelentek a zöldtetők. A modern zöldtető rendszerek Németországból indultak az 1880-as években. A gyors városiasodás és iparosodás következtében sok olcsó lakás épült, amelyek tetőszerkezetéhez gyúlékony kátrányt is használtak. H. Koch tetőfedő jött rá, hogy ha homokos-kavicsos réteget szórnak rá, csökkentik ezen hatást – ebben idővel, a légmozgás segítségével magok telepedtek meg, amelyekből rétek alakultak ki. [23]

Hazánkban nagyjából másfél évtizeddel ezelőtt jelentek meg a modern zöldtető rendszerek, majd egy ideig feledésbe merültek. Napjainkban ismét előtérbe került, de sajnálatos módon nem a környezeti szempontok, hanem gazdasági érdekek és az építésügyi szabályozásoknak való megfelelés miatt. [19]

2.5.A zöldtetők típusai

Extenzív, intenzív és egyszerű intenzív (egyes szakirodalmakban félintenzív) zöldtetőket különböztetnek meg. [7]

Extenzív zöldtetőket vékonyabb talajréteggel alakítják ki, a legkisebb vastagsága 10-15 cm. Ez a típus alkalmazható a lapostetők és 0-25 %-os lejtésű tetők esetében is. Rendszeres emberi tartózkodásra nem alkalmas alacsony terhelhetősége miatt (1,6-2,4 kN/m²). [31] Tágtűrő, kisebb méretű és gyorsan elszaporodó növényekkel ültethető be, amely a teljes borítottságot majd a végső fázisban éri el. Előnyös, ha az adott faj gyökérzete jól átszövi a talajt, mert így védik a termőréteget a deflációtól. A leggyakrabban alkalmazott növényfajok: varjúháj fajok (*Sedum* sp.), kövirózsák (*Sempervivum* sp.), kakukkfűvek (*Thymus* sp.), és a molyhos madárhúr (*Cerastium tomentosum*). [26]Többféle módon is létrehozhatók: előre gyártott növényzetszőnyegekkel, lőtt ültetéssel, magvetéssel és spontán, magától kialakuló növényzettel. Kialakításuk és fenntartásuk gazdaságos, mivel nem igényelnek rendszeres karbantartási munkákat. [7]

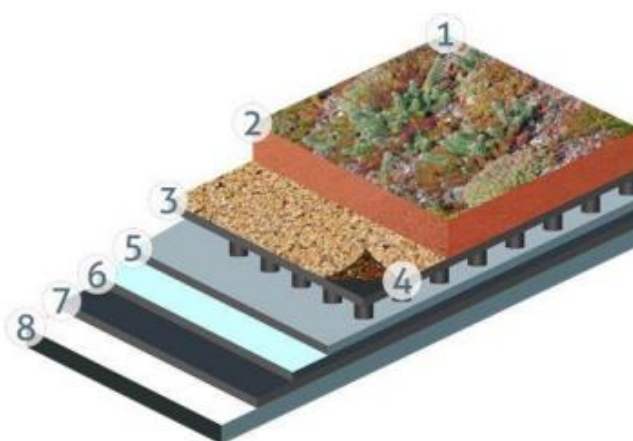
Az *intenzív* zöldtetők – vagy tetőkertek – mélyebb talajréteggel (legalább 15-20 cm, legfeljebb 100 cm) és nagyobb növényzettel (cserjék is) kerülnek kialakításra. A vastagabb termőréteg, az öntöző rendszer kiépítése és ezek megtervezése miatt magasak a beruházási és üzemeltetési költségei. Nagy teherbírású (2,0-15,0 kN/m²), legfeljebb 10%-os tetőlejtésnél alkalmazható. [31] Szinte minden növényfaj telepíthető rá, ezek rendszeres öntözést, tápanyag utánpótlást és gondozást igényelnek (kevésbé gazdaságos). Ezekre a kertekre jellemző a virágágyásokkal,

bokor-, esetleg kisebb facsoportokkal díszített gyep. Kialakítása, használata és ápolása leginkább a díszkertekhez hasonlítható, emberi tartózkodás céljából hozzák létre. [26]

A *félintenzív* zöldtetők egy köztes megoldást kínálnak, kedvezőbb kialakítási és fenntartási költségekkel. A talajréteg vastagság legfeljebb 25-30 cm, 0-15 %-os lejtőjű tetőknél alakítható ki. Az idő előrehaladtával egyre kevesebb öntözési és gondozási igénye – a cél a szárazabb időjáráshoz való szoktatás. Emberi tartózkodásra szintén alkalmatlan, alacsony teherbírású (1,6-2,0 kN/m²). [31] Beültethetők az extenzív tetőknél ismertetett fajokkal, kiegészítve a szárazságtűrő, alacsony vagy elfekvő hajtásrendszerű dísz- és gyógynövényfajokkal. Ilyen lehet például a közönséges levendula (*Lavandula angustifolia*), a kerti rozmaring (*Rosmarinus officinalis*), a madárbirs (*Cotoneaster* sp.) vagy a fürtös fáklyaliliom (*Kniphofia uvaria*). [26]

2.6. A zöldtetők rétegrendje

A zöldtetők rétegrendje típustól függetlenül (alulról haladva felfelé): teherhordó szerkezetre kerülnek a szigetelő- és szűrőrétegek (utóbbi megakadályozza a talajrészecskék elvesztését), végül pedig az ültető közeg a növényzettel. A víz elleni szigetelő és a hőszigetelő rétegek elhelyezkedése alapján megkülönböztetnek egyenes és fordított rétegrendű tetőket. Egyenes rétegrend esetében a vízzáró réteg helyezkedik el legfelül, alatta pedig a hőszigetelés, míg fordított rétegrend esetében ez felcserélődik. [31] Extenzív zöldtetők esetében a következőképpen alakul (fentről lefelé haladva): 1.növényzet, 2. extenzív ültetőközeg, 3. szűrőréteg, 4. szivárgóréteg, 5. vízszigetelés, 6. hőszigetelés, 7. párazáró réteg és legalul a 8. tetőfödém [36].



2.1. ábra. Az extenzív zöldtetők rétegrendje [16].

2.7. Az ideális ültetőközege

A zöldtetők élettartamának szempontjából kulcsfontosságú az ültetőközege minősége. Összetételét a fenntartásra szánt összeg, a beleültetendő növényzet típusa és az építészeti előírások határozzák meg. Nagyon fontos, hogy a felhasznált anyagok ne legyenek mérgezők a növények számára, kis mértékben tartalmazhat kevésbé fagyálló anyagot, illetve a tápanyagtartalom határértékekhez kötött, túlzott tápanyag felhalmozódás kimosódást okozhat, ami fokozza a környezeti terhelést. Szervesanyag-tartalom tekintetében az intenzív zöldtetőknél >12 tömeg %, extenzív zöldtetőknél legfeljebb 8 tömeg % lehet. A megengedett pH érték intenzív zöldtetők esetében 5,5-8,5; míg extenzívéknél 6,5-9,5. Az ültetőközegek oldható sótartalma nem haladhatja meg a vizes kivonatból mért 2,5 g/l-t intenzív zöldtetőknél. Extenzív vegetáció esetén ez az érték elérheti a 3,5 g/l-t. [16] A szubsztrát keverékekben elterjedten alkalmazzák a jó víztartó és vízáteresztő képességű anyagokat: tőzeget, faforgácsot, fűrészport és rizshéjat. Emellett a gyakran alkalmazzák még a különböző szemcseméretű tufaőrleményeket (riolit), téglőrleményeket jó víztartóképességük miatt. [31]

2.8. A vizsgált paraméterek (fémek, nehézfémek)

A következőkben a vizsgált fémek és nehézfémek tulajdonságait, felhasználási módjait ismertetem, a környezetre és az emberi egészségre gyakorolt hatások vonatkozásában.

2.8.1. Arzén (As)

A félfémek közé tartozik, az élő szervezetre mérgező és rákkeltő hatású. Különböző formákban fordul elő, mint „szürke” (vezetőképese, törékeny, kristályos szerkezet), „sárga” (nem fémes, nem vezetőképese, erős, kristályos szerkezet) vagy „fekete” (szilárd, üveges, nem vezetőképese és nem kristályos) arzén. Magyarországon az egyik leggyakrabban előforduló talaj és talajvíz szennyező elem. A talajba például fémbányászat, cementgyártás során, mezőgazdasági növényvédő szerekből kerülhet – a talajból pedig a talajvízbe jut. A környezetbe kerülve az arzén nem bomlik le, csak átalakulhat, vagy reakcióba léphet a körülményeknek megfelelően. Magas pH érték esetén, vagy redukáló körülmények között vízben oldható arzenitté alakul, így megszennyezheti felszíni és felszín alatti vizeket, és megjelenhet az üledékben is. Az erózió és egyéb légköri kibocsátásból a levegőt is szennyezi, illetve az ott lévő részecskékhez tapadva a lehulló csapadékkal a különböző felületekre kiülepszik (mint a zöldtető). [4, 22]

2.8.2. Kadmium (Cd)

A talajokba a foszfor tartalmú műtrágyák használatával kerülhet. A savas közeg kedvez a növények fokozottabb kadmium-felvételének, így az élelmiszerekből az emberi szervezetbe is

be tud jutni, ahol felhalmozódva sejt- és idegméreg („itai-itai” kór, ami kadmium-mérgezés hatására alakul ki) hatású. Minden élő szervezetre toxikus nehézfém. Hozzákötődhet az enzimekhez, így gátolva a működésüket. Ezen túlmenően oxidatív stresszt okozhat és befolyásolja a növények növekedését, vízháztartását, és a létfontosságú elemek felvételét. [22]

2.8.3. Réz (Cu)

Az egyik legelterjedtebb és leggyakrabban használt fém. Döntően vegyületként van jelen (ércek). Felszíni édesvizekben és az ivóvízben is megtalálható. Légköri koncentrációja az iparvidékeken rendszerint magasabb értékű. A talajban rövid idő alatt oldhatatlan sókat, komplex vegyületeket képez. A talajok réztartalma hatással van a növények fejlődésére, általában hiánya okoz problémát ($<5\text{g/t}$) – a növények csak oldott formában tudják felvenni. Nyomelemként az emberi szervezetnek is szükséges, napi 3-5 mg réz az ajánlott beviteli mennyiség. [22]

2.8.4. Króm (Cr)

Nehézfém, az emberi szervezetnek kis mennyiségben szüksége van rá. Fontos megjegyezni, hogy amíg a három vegyértékű króm (Cr(III)) nélkülözhetetlen nyomelem, addig a Cr(VI) mérgező és daganatkeltő hatású. Felhasználása széleskörű, többek között alkalmazzák bevonatként - korrózióálló és saválló tulajdonságai miatt -, színezőanyagok és festékek előállításánál is. A Cr(VI)- kibocsátás antropogén eredetű, ilyen kibocsátók a gépjárműgyártás vagy a kohászati tevékenységek. Így az ipari területeken jellemző a talajok és a talajvíz króm-szennyezettsége. Átlagos koncentrációja esővízben $0,2\text{-}1\text{ }\mu\text{g/l}$, felszíni vizekben $0,5\text{-}2\text{ }\mu\text{g/l}$, felszíni vizekben alacsony ($<0,1\text{ }\mu\text{g/l}$). [22]

2.8.5. Vas (Fe)

A vas az egyik legfontosabb mikroelem az autotróf növények számára. A legelterjedtebb nehézfém a természetben. A növények számára fontos, a fotoszintézis kulcsvegyülete, hiányában lecsökken a növény klorofill tartalma. A növények általi felvételét (nagy mennyiség esetén) gátolja a cink, mangán és a réz jelenléte, illetve a magas kémhatású közeg. [22]

2.8.6. Higany (Hg)

Természetes úton a földkéregből felszabaduló gázok, vulkáni kibocsátása valamint természetes víztestek párolgása révén jut a környezetbe. Emberi szennyező forrása lehet a fosszilis tüzelőanyagok égetése, a fém-szulfid ércek olvasztása, az arany kivonása, a cementgyártás, az égetés, valamint az ipari fémek előállítása. A vetőmagok kezelésére (csávázására) korábban használt szerves higanyvegyületek erősen mérgezők. A higanyvegyületek többségének használata jelenleg tiltott, illetve korlátozott az EU-ban. Minden élő szervezetre toxikus hatású

nehézfém. Hozzákötődhet az enzimekhez, így gátolva a működésüket. Ezen túlmenően oxidatív stresszt okozhat és befolyásolja a növények növekedését, létfontosságú elemek felvételét és különösen a vízháztartását. Környezetre gyakorolt hatásukat jelentősen befolyásolja a közeg pH-értéke, hőmérséklete, az egyéb oldott szerves és szervetlen anyagok, és a mikrobaközösség összetétele. Bioakkumulációs hajlamuk révén a higanyvegyületek vízi szervezetekben felhalmozódhatnak. [11, 22]

2.8.7. *Mangán (Mn)*

A mangán a 14. leggyakrabban előforduló elem. A széles körben elterjedt bányászat, ásványfeldolgozás és további emberi tevékenység súlyos következményekkel járt például a hatalmas mennyiségű bányászati hulladék (meddő) keletkezésében. E hulladékok nem megfelelő felügyelete következtében a Mn-terhelés legvégül a légkört és a vizeket szennyezi el – többségében a talajon keresztül való terjedés után – súlyos ökológiai nehézségeket okozva. Az emberre nagyobb mennyiségben igen ártalmas lehet. A mangán legtöbbször orális úton jut be az emberi szervezetbe, és ha a csontokban halmozódik fel. A krónikus és akut expozíciója halálos következményekkel járhat és az idegmérgezés számos tünete megjelenhet. Ilyen tünetek lehetnek kognitív és pszichiátriai tünetek, egy Parkinson-kórra hasonlító betegség és a manganizmus. A legújabb neurokémiai elemzések és szinkrotron röntgen fluoreszcens képalkotó vizsgálatok a Mn toxicitását dopaminerg diszfunkcióval hozták összefüggésbe. [25]

2.8.8. *Nikkel (Ni)*

A nikkel a földkéregben való előfordulási sorrend szerint a 24. elem. A környezeti nikkelszint különösen a természetes forrásoktól, a nikkelgyártó iparágakból származó szennyezéstől és a fosszilis tüzelőanyagok elégetése során lebegő részecskéktől függ. Egy nikkelgyárhoz közeli, az uralkodó szélirányban fekvő területen súlyos szennyezést okozhat a levegőben terjedő nikkelrészecske és kárt tehet például az állatállományban. Más tanulmányok szerint azonban a légköri nikkel részecskék jelentik a kisebb aggályt. Szerintük a kimosódási, illetve a korróziós folyamatok során keletkezett nikkel tartalmú élelmiszerek, illetve a nikkelt tartalmazó fémekkel való érintkezés a nagyobb probléma. Nagy mennyiségben a nikkel megváltoztatja a növények metabolikus aktivitását, gátolva az enzimaktivitást, a fotoszintetikus elektrontranszportot és a klorofill bioszintézist. A növények szempontjából az esszenciális voltát pedig vitatják. Az ember szempontjából a 0,1 mg-os napi szükséges bevitelnél jóval nagyobb mennyiség válhat ki mérgezéses tüneteket (10 mg/kg felett), a nikkelallergia viszont veszélyes lehet. [5, 35]

2.8.9. Ólom (Pb)

Az ólom az embernek köszönhetően a világ legszélesebb körben elszórt mérgező fémjévé vált. Az antropogén Pb által okozott szennyezés főként bányászatból, olvasztásból, ipari felhasználásból, hulladékégetésből, szénégetésből és ólmozott benzinből származik. Az ólom szennyezett levegőből, vízből, talajból és élelmiszerekből belélegzéssel és lenyeléssel jut be az emberi szervezetbe. Minden élő szervezetre toxikus hatású nehézfém. A felnőttek ólommérgezése hatással lehet a perifériás és központi idegrendszerre, a vesére és a vérnyomásra, valamint visszafordíthatatlanul befolyásolja a gyermekkori kognitív teljesítményt. Szerencsére az 1970-es években az országok jelentős részében betiltották a fő antropogén forrást, az ólmozott benzint. [6]

2.8.10. Szilícium (Si)

A Föld második leggyakoribb eleme. Felhasználása igen sokrétű, elsősorban az elektronikai ipar használja. A növények növekedését fokozhatja, a nehézfémek toxicitását mérsékli, ezáltal csökkenti a növényt érő stresszt. A szilícium szükséges a csont-, porc- és kötőszövet-képzésben, valamint számos más anyagcsere-folyamatban is részt vesz. Toxicitása kicsi, szilícium-dioxid nagy arányú belégzésekor okozhat megbetegedést, amit szilikózisnak neveznek. [22]

2.8.11. Cink (Zn)

Számos enzim felépítő eleme, más enzimek működését pedig aktiválja. A cinkhiány végső soron klorózist és növekedésgátlást okoz a növényeknél. A cink szintén létfontosságú nyomelem az emberi szervezet számára. Számos élettani funkcióban részt vesz, ideértve a DNS-szintézist. [22]

2.9. A vizsgált paraméterekre (fémek, nehézfémek) vonatkozó szakirodalmi áttekintés

Akhter és társai [2] egy hároméves időintervallumban (2015-2018) végeztek méréseket a kanadai Calgary városában kialakított extenzív zöldtetőn, illetve egy referencia tetőn. A csapadékmintákat fémek tekintetében három elemre vizsgálták: réz (Cu), cink (Zn) és ólom (Pb). A méréseket egy Agilent 7900 ICP-MS készülékkel végezték. Az eredmények azt mutatták, hogy a zöldtető a fémek tekintetében elnyelőként működött. Azonban nem ennyire egyértelmű a megállapítás, a kumulatív lefolyás (a zöldtetőn lefolyt csapadékmennyiségek halmozott összege, ami egyenesen aránylik a tető korával) növekedése során a fémek átlagértékei is nőttek a lefolyt csapadékban, ami pedig a fémek időbeli felhalmozódásának okozója. Az akkumuláció történhet részecskékhez kötődéssel, oldott fémek adszorpciójával a

termőközeg felületére vagy akár kicsapódással is. Az akkumulálódás azonban nem mindig egyértelmű. A cikk megemlíti egy kutatócsoportot[24], akik megfigyelték, hogy a korábban felhalmozódott fémek a talaj mélyebb rétegeibe vándoroltak az idővel, ezzel szemben két másik zöldtetős kutatásnál [33, 34] pedig az idővel csökkent a fémkoncentráció a lefolyt csapadékvízben. Akhter és társai [2] cikke még megemlíti összegzésképp, hogy a referenciatető és a zöldtető fémforrása ugyanaz: a légköri lerakódás és a tető anyaga.

Alsup és társai munkája is ugyanezt támasztotta alá, de ők kitérnek rá, hogy a külső forrásból származó szervesetlen szennyezők - mint a nehézfémek - esetében a mélyebb szubsztrátum hosszabb visszatartási idővel jár, ami lehetőséget biztosít arra, hogy az elemek az ültetőközeg rétegeihez kötődjenek, ezáltal pedig csökken mobilitási képességük. Ezzel szemben a mélyebb termőközeg a forrása is lehet ezeknek a szennyezéseknek, mivel a szubsztrátum szabadalmaztatott anyagokból, egyedi keverékekből és újrahasznosított hulladékanyagokból áll, ezek kémiai összetételéről és hatásaikról nem minden esetben áll rendelkezésre elegendő információ. Az imént említett tanulmányban szimulált zöldtető-rendszereken átfolyó csurgalékvizek nehézfémtartalmának (Cd, Fe, Ni, Pb, Zn) kioldását vizsgálták. A vizsgálat célja az volt, hogy az expandált agyagból és fenyőkéregből álló szubsztrát kioldja-e a fémeket, valamint kioldás esetén a mélység, a száraz/nedves kiülepedés és a zöldtető szerkezeti elemei befolyásolják-e ezt. Míg az egyes adatok azt mutatták, hogy a vizsgált szubsztrát nehézfém kioldást eredményezett, más adatok alapján a közeg elnyelőként működött. Mivel a csapadékvizeket nem vizsgálták, így nem lehettek biztosak benne, hogy a szubsztrát fém tartalma kizárólag az expandált agyagból származott. Javaslatot tettek csapadékvíz vizsgálattal kiegészített zöldtető-csurgalékvíz kutatásokra. [3]

Gregoire és Clausen Connecticutban egy 248 m²-es extenzív zöldtető és egy kontrolltető lefolyásának mennyiségét és minőségét vizsgálták. A vizsgált paraméterek közt volt az összes, valamint az oldott Cu, Pb, Zn, Cd, Cr és Hg. A bevezetésben említett vízvisszatartó képességet ezen kutatás is bizonyítja, a lehullott csapadék 51,4 %-át tartotta vissza. A zöldtető a Zn és Pb tekintetében jelentős elnyelőként működött, valamint a Hg és a Cu mennyiségét is csökkentette. A Cu valószínűsített forrása lehetett a felhordott műtrágya. Az oldott Cu, a Zn és az Pb – ezek 90%-a oldva volt – megkötődése a zöldtető magas vízvisszatartó képességének köszönhető. [13]

Berndtsson is azt a megállapítást tette, hogy a zöldtető lefolyását befolyásolhatja többek között a termőközeg típusa, a talajvastagság, a felhasznált anyagok, a karbantartás típusa, az évszakok, a helyi szennyező források és az uralkodó szélirány. Az áttekintő tanulmány az eddigi

eredményeket foglalja össze, valamint felhívja a figyelmet arra, hogy a további kutatásokra lenne szükség a városi környezetben lévő zöldtetők teljesítményével kapcsolatban. [7]

3. Anyag és módszertan

3.1. A kutatás alapjául szolgáló zöldtető

A vizsgált extenzív zöldtető és kontroll tető a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar „C” épületén került kialakításra 2015-ben egy pályázat keretein belül.



3.1. ábra. Extenzív zöldtető és kontrolltető a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar "C" épületének tetején (Készítette: Gáspár Bernadett 2023.11.07.)

Az extenzív zöldtető rétegei a meglévő vízszigetelésre épültek. Elsőként egy mechanikai védőréteget, majd egy 2,5 cm vastag ozmotikus vízelvezető és vízviisszatartó réteget alakítottak ki; ezeket követte egy szűrőréteg és végül a 10 cm vastag, 98 kg/m² nedves tömegű termőközeg. Az attikafal és az összefolyó köré az elválasztás céljából egyaránt egy 20 cm széles folyami kavicsréteg került, valamint a folyami kavicsot és a termőréteget egy alumínium szegélyelem választja el egymástól.

A termőközegbe tágtűrésű fajokat ültettek: *Sedum album* 'Micranthum', *Sedum album* 'Roseum', *Sedum reflexum* 'Glaucum Compactum', *Sedum sediforme* és *Sedum floriferum* 'Weihenstephaner Gold'. Ezeket a csapadékviszonyoktól függően öntözték másfél hónapon keresztül, amíg gyökeret eresztettek. [28][21]

Mielőtt a kontroll tetőről és zöldtetőről lefolyó csapadékvíz az 1 m³-es gyűjtő tartályokban kerülne, automata mintavevők vesznek mintát a lefolyó vizekből. A kontroll tetőről és zöldtetőről egyaránt 4-4 mintavételi ponton vesz mintát az automata mintavevő, meghatározott időközönként a csapadékesemény 0., a 10., a 20. és 40. percében. A csapok 5 percig vannak kinyitva. A levett mintákat ezután hűtve tárolják, és néhány napon belül megtörténik a vízminőségi paraméterek vizsgálata. Minden mintavételről értesítés érkezik a



3.2. ábra. Automata mintavevő a kontroll- és zöldtető alatt (Készítette: Gáspár Bernadett 2023.11.07.)

Környezetmérnök Tanszékre. Az adatok rögzítését és a vezérlést egy Nivision nevű szoftver végzi. A tartályokba gyűlt vízmennyiség pontos meghatározása nyomástávadók segítségével történik.[28]

A zöldtetőnek és kontroll tetőnek helyet adó „C” épület mellett található a gyökérzónás szennyvíztisztító telep. A gyökérzónás szennyvíztisztító felépítése: 1 db szürke szennyvízgyűjtő akna és 2 db csapadékvízgyűjtő akna a szükséges gépészettel, mérőaknával; 1 db szennyvízátemelő mérőaknával, 2 db előülepítő műtárgy gépészettel; 2 db függőleges átfolyású gyökérzónás műtárgy megkerülőággal; 2 db

hosszanti átfolyású gyökérzónás műtárgy; illetve 2 db puffertartály a szükséges gépészettel. A műtárgyakat többféle minőségű vízzel lehet táplálni: a zöldtetőről és a kontroll tetőről lefolyó csapadékvízzel, a PTE Műszaki és Informatikai Kar egyes épületeiből származó szürke és fekete szennyvízzel, illetve ezek tetszőlegesen előállított keverékével. A függőleges műtárgyakra nádat, míg a vízszintes műtárgyakra sást telepítettek. A gyökérzónás szennyvíztisztítóra érkező vizek először az ülepítő műtárgyra kerülnek, ahonnan szivattyúk segítségével lehet szakaszosan feltermelni a szennyvizet a függőleges átfolyású műtárgyakba, ami ezután a vízszintes átfolyású műtárgyakba folyik. Utolsó lépésként a tisztított szennyvíz a tisztítóaknába kerül.

A függőleges átfolyású műtárgyak közé meteorológiai állomást telepítettek, hiszen az időjárási viszonyok befolyással lehetnek a mérésekre. A rendszer méri a lehulló csapadék mennyiségét és intenzitását, a légnyomást, a hőmérsékletet, a szélesebséget, valamint a páratartalmat. A telepített növények megfigyelésére kamerarendszert is telepítettek, amely a növényi felületek meghatározásában játszik fontos szerepet. [28][21]

3.2. Fémek, nehézfémek meghatározása

3.1.1. Mérés elve

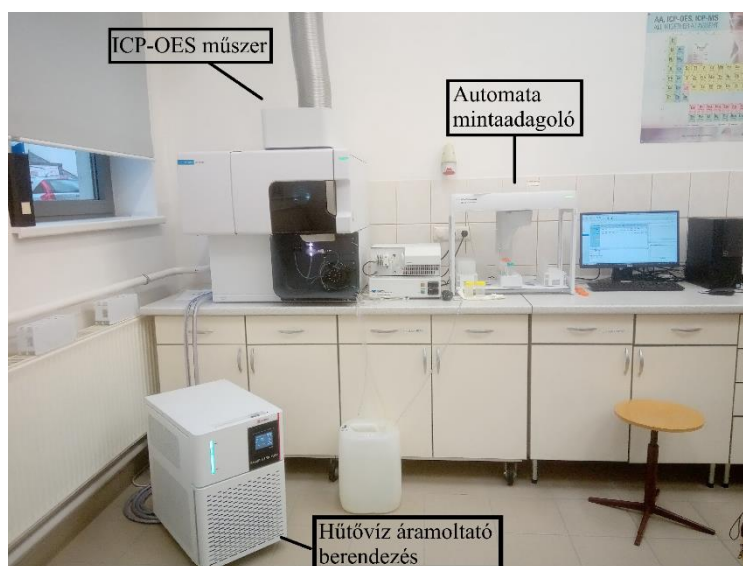
Az **induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES)** olyan műszeres analitikai módszer, amely a kémiai elemek mennyiségi és minőségi meghatározására alkalmas. A műszer 70-80 komponens meghatározását teszi lehetővé; a kimutatási határok alacsonyak, jellemzően a ppm és ppb tartományba esnek. A berendezés teljesítőképessége nagyfokú, mivel rövid idő alatt nagyszámú minta vizsgálatát teszi lehetővé, illetve egyszerre több elem vizsgálata lehetséges. Előnyei közé sorolható még az alacsony mintaigény (néhány ml), az automatizáltság és a számítógép vezérelte rendszer.

Az ICP-OES műszer sokoldalúságának köszönhetően a nyomelemanalitikai laboratóriumok fő használati eszköze. Alkalmazhatósága széleskörű, többek között élelmiszerek, talajminták, környezetvédelmi mérések és elemzések többségét is ezzel a műszerrel végzik.

3.1.2. Az ICP-OES műszer felépítése

- Mintavevő- és adagoló egység

Automatizált, a szoftverben beállított szekvencia alapján választja ki a mintaoldatot. Ezt követően egy perisztaltikus pumpával a porlasztó kamrába jut a minta, ahol aeroszollá alakul, majd ezt a kis cseppméretű aeroszol frakciót juttatja be az induktív csatolású plazmába.



3.3. ábra. ICP-OES műszer (Fotó: Gáspár Bernadett 2023.10.31.).

- Plazma

Szabad atomos és ionos állapotba jut a minta, majd gerjesztődik és a minta elemire jellemző optikai sugárzást bocsát ki. Amikor az égőt bekapcsolják, a (RF) generátor erős mágneses teret hoz létre. A plazma begyűjtása úgy történik, hogy a plazmában áramló argongázban egy Tesla-

tekercs segítségével szikrakisülést hoznak létre. Így az argon gáz ionizálódik, és sajátos forgásszimmetriájú áramlási mintázat szerint áramlik az RF tekercs mágneses mezeje felé, ahol a töltött részecskék és a semleges argonatomok közötti rugalmatlan ütközések által stabil, magas hőmérsékletű (6000–8000 K) plazma keletkezik

- Spektrométer

A poli- vagy monokromátorral ellátott optika, ami a plazma fényemisszióját spektrálisan felbontja, és elkülöníti az egyes elemekre jellemző spektrumvonalakat egymástól. A rövid hullámhosszúságú (200 nm alatti) színeképvonalak levegőben történő elnyelődésének elkerülése miatt a fényút is argongáz öblítésű.

- Detektor, adat- és jelfeldolgozó egység

A detektorral az egyes elemek adott hullámhosszúságú spektrumvonalának intenzitását elektromos jelként mérjük, melyet digitális jellé alakítva a számítógép dolgoz fel. A kibocsátott fény intenzitása és a koncentráció közt lineáris kapcsolat van.

3.1.3. Mérés az ICP-OES műszerrel

Dolgozatomban a zöldségtetőről, kontroll tetőről valamint a csapadékból vett mintákban a következő **11 elemet** vizsgáltam: **arzén (As), vas (Fe), mangán (Mn), szilícium (Si), nikkel (Ni), kadmium (Cd), réz (Cu), higany (Hg), króm (Cr), ólom (Pb) és cink (Zn).**

A mérések során csapadékvíz fém- és nehézfém tartalmának meghatározására a Pécsi Tudományegyetem C006-as laboratóriumában található ICP-OES Agilent 5110-es analitikai nagyműszert használtam.

A mérés megkezdése előtt a készülék indításához megnyitjuk az argon palackot, bekapcsoljuk a mintavevőt, a számítógépet és a monitort. A számítógépen elindítjuk a szoftvert, azaz bekapcsoljuk a plazmát. Ezután 10-20 perc bemelegedési idő szükséges az optimális teljesítmény eléréséhez – ez idő alatt megtörténik a rendszer átöblítése is.

A minták közvetlenül mérhetők, előkészítésként a mintákat fecskendővel egy 45 µm pórusátmérőjű szűrőn kell átnyomni. A mérés megkezdése előtt kalibráció elvégzése szükséges standard oldatokkal. A minták és a standard oldatok sorrendje a szoftverben kerül beállításra. A sorrend ellenőrzése után indítható a mérés, amely 3.2.2.-es fejezet részben ismertetett módon automatikusan lefut.

4. Eredmények

A kutatás során három évszak: tél, tavasz és nyár csapadékeseményeit vizsgáltam a 2022. december 2 és 2023. augusztus 31 közötti időszakban. A kontrolltetőről és zöldtetőről 24-24 mintavétel történt 4 mintavételi pontban (0., 10., 20. és 40. percknél); a csapadék mintavevőről pedig 23 alkalommal volt mintavétel. Az adatok kiértékelését Microsoft Excel segítségével végeztem, melyeket táblázatos formában fogok a következőkben bemutatni évszakokra lebontva, illetve összesített formában is. Ezek a táblázatok tartalmazzák a 11 vizsgált elem zöldtető és kontrolltető mintákban mért átlagát, minimum és maximum értékeit külön vizsgálva az egyes mintavételi pontokon (0., 10., 20. és 40. perc), illetve a csapadék mintában mért átlag, minimum és maximum értékeket. Az egyes fémek átlag értékeit az adott évszak mérési napjain mért értékek átlagolásával kaptam, a maximum és minimum értékek pedig a legkisebb és legnagyobb mérési eredményeket mutatják.

A zöldtető és kontrolltető 4 mintavételi pontjában mért átlag értékeket a 10/2010-es VM rendelet határértékeivel hasonlítottam össze, hiszen a településekről elfolyó vizek leggyakrabban valamely település menti élővízbe kerülnek, ahol a határértékek betartása szükséges a jó kémiai és jó ökológiai állapot eléréséhez illetve fenntartásához.[1] Az egyes táblázatoknál a határérték túllépések, valamint a legalacsonyabb és legmagasabb átlag koncentrációk különböző színekkel kiemelve láthatók.

4.1. Téli időszak

1. táblázat: Télen a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető	Kontrolltető	Csapadék	10/2010. (VIII.18.) VM rendelet
As	ppb	6,80 (0,91-13,39)	0,46 (0,00-4,41)	0,09 (0,00-0,88)	20 [µg/l]
Cd	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,2 [µg/l]
Cu	ppb	76,43 (31,42-172,99)	27,16 (9,02-49,84)	2,87 (0,00-9,96)	10 [µg/l]
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	20 [µg/l]
Fe	ppb	15,80 (9,65-22,68)	1,50 (0,00-7,51)	3,78 (0,00-20,65)	-
Hg	ppb	0,10 (0,00-0,93)	0,48 (0,00-3,63)	0,40 (0,00-2,23)	0,05 [µg/l]
Mn	ppb	0,28 (0,00-1,53)	8,30 (2,29-18,86)	1,26 (0,04-4,33)	-
Ni	ppb	1,61 (0,00-5,84)	7,19 (0,20-17,59)	0,27 (0,00-1,05)	20 [µg/l]
Pb	ppb	1,96 (0,00-5,88)	0,43 (0,00-2,16)	0,25 (0,00-2,53)	7,2 [µg/l]
Si	ppb	10709,58 (3817,49-18137,08)	291,47 (0,00-3064,10)	0,00 (0,00-0,00)	-
Zn	ppb	161,65 (76,48-358,14)	825,52 (369,73-1546,03)	44,40 (11,62-194,47)	75 [µg/l]

A kontrolltetőn és zöldtetőn mért eredményeket a felszíni víz vízszennyezettségi határértégeiről szóló 10/2010 (VIII.18) VM rendeletben meghatározott határértékekkel összehasonlítva elmondható, hogy ebben az időszakban a Cu, Zn és Hg esetében a zöldtetőn és kontrolltetőn egyaránt határérték túllépés figyelhető meg. Hg származhat levegőből történő kiülepedésből, a kontrolltető anyagából és a csapadékból is, mivel utóbbiban is meghaladja a határértéket. Zn esetében a zöldtető tisztító hatású, hiszen az itt mért 161,6 ppb-hez képest a kontrolltetőn 825,5 ppb volt ez az érték; ezzel szemben Cu forrásként szolgált, mivel az itt mért mennyiség háromszorosa volt a kontrolltetőn mértékhez képest. Cd és Cr esetében méréshatár alattiak voltak az értékek. A legnagyobb koncentráció átlagok többségében a zöldtetőn jelentek meg, viszont a Cu kivételével a határérték túllépés a mindig a kontrolltetőn volt nagyobb. As, Fe, Pb és Si a zöldtetőn többszöröse volt a csapadéknak, illetve kontrolltetőn mértékhez képest. Mindkét tető esetében a szennyezés forrása a száraz és nedves kiülepedés, a zöldtetőn kisebb mennyiségű csapadék nem tud áthatolni, ellenben kontrolltetőről már le tud mosódni.

2. táblázat: Téli, a zöldtetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető MV1 (0 perc)	Zöldtető MV2 (10 perc)	Zöldtető MV3 (20 perc)	Zöldtető MV4 (40 perc)
As	ppb	7,72 (0,00-16,20)	6,76 (0,00-13,80)	6,52 (0,000-12,79)	6,19 (0,00-13,91)
Cd	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,000-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Cu	ppb	55,27 (24,14-95,11)	72,79 (28,30-130,82)	89,76 (37,06-203,01)	87,91 (2,09-265,29)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,000-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	20,39 (13,07-31,41)	15,10 (9,63-23,09)	14,24 (7,14-22,00)	13,48 (0,76-21,94)
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,07 (0,00-0,75)	0,34 (0,00-3,71)
Mn	ppb	0,41 (0,00-1,72)	0,07 (0,00-0,34)	0,07 (0,00-0,44)	0,58 (0,00-5,71)
Ni	ppb	2,70 (0,00-8,31)	1,04 (0,00-3,29)	1,03 (0,00-3,87)	1,67 (0,00-10,38)
Pb	ppb	1,49 (0,00-6,66)	2,90 (0,00-7,87)	2,21 (0,00-10,03)	1,23 (0,00-8,11)
Si	ppb	10812,71 (2189,80-18572,64)	10652,37 (2699,76-18231,14)	10803,95 (3217,47-18092,55)	10569,29 (111,13-17652,01)
Zn	ppb	179,68 (82,82-383,98)	160,96 (77,35-340,38)	150,83 (68,62-345,75)	155,13 (70,55-372,90)

3. táblázat: Téli időszakban a kontrolltetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Kontrolltető MV1 (0 perc)	Kontrolltető MV2 (10 perc)	Kontrolltető MV3 (20 perc)	Kontrolltető MV4 (40 perc)
As	ppb	0,03 (0,00-0,36)	0,00 (0,00-0,04)	0,00 (0,00-0,00)	1,80 (0,00 17,65)
Cd	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Cu	ppb	21,11 (4,49-58,37)	33,30 (8,15-65,72)	29,11 (16,67-59,61)	29,24 (9,36-89,26)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	0,79 (0,00-4,77)	0,16 (0,00-1,73)	1,35 (0,00-10,93)	3,71 (0,00-30,05)
Hg	ppb	0,12 (0,00-0,72)	0,12 (0,00-0,75)	0,19 (0,00-2,06)	1,49 (0,00-14,51)
Mn	ppb	12,27 (1,80-35,01)	10,06 (2,46-30,58)	8,53 (2,53-27,97)	6,53 (1,38-22,54)
Ni	ppb	6,87 (0,00-22,06)	0,95 (0,00-2,33)	14,54 (0,35-32,80)	7,77 (0,00-32,18)
Pb	ppb	0,46 (0,00-2,90)	0,18 (0,00-2,03)	0,18 (0,00-1,25)	0,99 (0,00-6,61)
Si	ppb	26,94 (0,00-178,39)	11,14 (0,00-76,11)	8,92 (0,00-89,78)	1118,89 (0,00-12256,41)
Zn	ppb	1397,17 (622,30-3310,10)	709,63 (452,50-1105,82)	712,43 (348,86-1122,97)	592,50 (305,30-1122,97)

Az összehasonlító táblázatok (2. és 3. táblázat) alapján a zöldtetőnél mért maximum koncentrációk nagyobb hányada a 0. percnél volt, melynek oka az lehet, hogy egy ideig pufferek a növényzet és az ültetőközeg, de egy intenzívebb csapadékesemény hatására hamarabb bekövetkezik a kimosódás. A kontrolltetőn a 40. percnél töményedés látszik, ezt okozhatta egy

hevesebb esőzés, melynek következtében akár a zöldtetőn lévő szennyezőanyagok átmosódhattak a másik tetőre – ennek igazolása további kutatást igényel. Ezt alátámasztják a 40. percben kontrolltetőn mért Si, Pb, As és Fe megemelkedett értékei, amelyekből ugyanebben a mérési pontban a zöldtetőn a legalacsonyabb volt a koncentráció. Mn esetében ez fordítva történt, Hg viszont mindkét esetben egy-két nagyságrenddel nőtt. Zn mindkét tető esetében nagyobb koncentrációban mosódott ki a 0. percben, de csökkenő tendencia figyelhető meg az idő előre haladtával – míg zöldtetőn alig, kontrolltetőn kevesebb, mint felére csökkent.

4.2. Tavaszi időszak

4. táblázat: Tavasszal a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető	Kontroll tető	Csapadék	10/2010. (VIII.18.) VM rendelet
As	ppb	3,25 (0,00-9,18)	0,06 (0,00-0,51)	0,16 (0,00-1,48)	20 [µg/l]
Cd	ppb	0,01 (0,00-0,05)	0,02 (0,00-0,09)	0,02 (0,00-0,12)	0,2 [µg/l]
Cu	ppb	95,19 (38,76-204,12)	47,51 (20,32-87,98)	2,76 (0,00-11,71)	10 [µg/l]
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	20 [µg/l]
Fe	ppb	12,80 (3,74-26,36)	0,20 (0,00-1,81)	1,14 (0,00-7,58)	-
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,05 [µg/l]
Mn	ppb	0,52 (0,00-1,46)	7,48 (2,19-15,28)	3,43 (0,13-14,28)	-
Ni	ppb	0,07 (0,00-0,65)	4,02 (0,00-15,87)	0,00 (0,00-0,00)	20 [µg/l]
Pb	ppb	4,85 (1,96-11,74)	0,71 (0,00-2,26)	1,76 (0,00-6,80)	7,2 [µg/l]
Si	ppb	7732,68 (1489,62-21119,74)	0,19 (0,00-1,69)	0,00 (0,00-0,00)	-
Zn	ppb	217,09 (96,33-414,31)	1038,42 (509,48-1579,98)	9,36 (0,00-19,39)	75 [µg/l]

A téli szezonhoz hasonlóan itt is Cu és Zn esetében történt határérték túllépés, zöldtetőn és kontrolltetőn egyaránt, amely a mintavételezéssel magyarázható – a mintavételhez a csapadéknak át kell törnie az ültetőközeget, ellenben a kontrolltetőn hamarabb átjuthat. Cu és Zn koncentrációt illetően mindkét tető esetében egy-két nagyságrenddel nagyobb érték figyelhető meg a csapadékban mérthez képest, amelynek lehetséges oka a légköri kiülepedés. Hg és Cr ebben az időszakban nem volt kimutatható, viszont változás az előző évszakhoz képest a Cd kimutathatósága (igen kismértékű). A maximum értékek jelentősebb része a zöldtetőn volt; melyek közül az As, Fe és Pb elemek a csapadékban is nagyobb mértékben fordultak elő.

5. táblázat: A zöldtetőn tavasszal mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető MV1 (0 perc)	Zöldtető MV2 (10 perc)	Zöldtető MV3 (20 perc)	Zöldtető MV4 (40 perc)
As	ppb	4,25 (0,00-12,67)	2,33 (0,00-5,59)	2,68 (0,00-8,52)	3,74 (0,00-10,22)
Cd	ppb	0,02 (0,00-0,11)	0,01 (0,00-0,06)	0,00 (0,00-0,00)	0,01 (0,00-0,05)
Cu	ppb	80,18 (30,65-190,30)	72,49 (31,19-161,19)	121,72 (32,45-264,58)	106,36 (32,83-261,44)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	22,72 (7,11-61,03)	9,52 (2,92-18,60)	9,09 (2,61-20,80)	9,86 (2,32-24,47)
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Mn	ppb	0,80 (0,00-1,97)	0,34 (0,00-1,35)	0,47 (0,00-1,63)	0,48 (0,00-1,56)
Ni	ppb	0,29 (0,00-2,59)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Pb	ppb	4,19 (0,00-8,39)	4,13 (0,00-9,64)	4,65 (0,00-13,80)	6,44 (1,93-17,58)
Si	ppb	8514,13 (1240,26-21919,25)	6774,95 (1197,32-17233,52)	7384,15 (1470,08-20328,85)	8257,48 (1431,62-24997,35)
Zn	ppb	266,37 (127,41-643,71)	184,85 (83,98-321,78)	219,97 (80,03-398,79)	197,15 (93,83-476,91)

6. táblázat: A kontrolltetőn tavasszal mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Kontrolltető MV1 (0 perc)	Kontrolltető MV2 (10 perc)	Kontrolltető MV3 (20 perc)	Kontrolltető MV4 (40 perc)
As	ppb	0,17 (0,00-1,57)	0,05 (0,00-0,47)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Cd	ppb	0,03 (0,00-0,09)	0,01 (0,00-0,06)	0,03 (0,00-0,14)	0,01 (0,00-0,08)
Cu	ppb	47,97 (10,86-117,77)	48,73 (14,26-84,83)	55,21 (25,10-94,22)	38,13 (18,83-72,14)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	0,69 (0,00-6,23)	0,11 (0,00-1,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Mn	ppb	12,71 (3,29-30,10)	6,69 (1,34-15,14)	5,56 (1,82-11,48)	4,98 (1,41-13,54)
Ni	ppb	1,71 (0,00-9,18)	0,00 (0,00-0,00)	11,40 (0,00-45,45)	2,97 (0,00-17,86)
Pb	ppb	1,32 (0,00-4,15)	0,43 (0,00-3,88)	0,55 (0,00-4,43)	0,53 (0,00-1,48)
Si	ppb	0,75 (0,00-6,77)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Zn	ppb	1563,83 (894,06-2588,54)	753,63 (364,79-1119,49)	999,49 (385,64-1657,28)	836,74 (380,77-1281,54)

Az összehasonlító táblázat alapján az előző időszakhoz hasonlóan itt is a 0. percnél volt a legtöbb paraméter maximuma a zöldtetőn, viszont a kontrolltetőn is. Utóbbi esetében ez várható volt, hiszen már a csapadékesemény elején megkezdődik a szennyezőanyagok lemosódása. A zöldtetőn kezdeti időpontban mért magas koncentrációkra magyarázatot adhat, hogy a kiültetett növények akkumulációs képességüktől függően veszik fel a szennyezőket, ami elemenként eltérő lehet; telítődés után pedig egy intenzívebb csapadékkal kimosódhatnak a növényi részekből és az aljzatból. A kezdeti időpontban lezúduló csapadékmennyiség nagyságára utal

az is, hogy a két tetőn a 10. percnél volt a legtöbb minimum érték a mintákban. Zn mindkét esetben nagy koncentrációban fordult elő, a csapadékban pedig 2-3 nagyságrenddel kisebb volt, tehát külső szennyező forrásra, légköri kiülepedésre gyanakodhatunk.

4.3. Nyári időszak

7. táblázat: Nyári szezonban a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető	Kontrolltető	Csapadék	10/2010. (VIII.18.) VM rendelet
As	ppb	2,70 (0,00-5,93)	0,28 (0,00-0,57)	0,13 (0,00-0,51)	20 [µg/l]
Cd	ppb	0,04 (0,00-0,08)	0,05 (0,00-0,16)	0,02 (0,00-0,08)	0,2 [µg/l]
Cu	ppb	130,13 (15,03-304,05)	22,20 (2,05-58,98)	1,53 (0,06-3,84)	10 [µg/l]
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	20 [µg/l]
Fe	ppb	12,20 (0,00-17,75)	0,01 (0,00-0,04)	0,00 (0,00-0,00)	-
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,05 [µg/l]
Mn	ppb	1,27 (0,21-2,10)	7,19 (0,32-19,79)	2,38 (0,00-5,33)	-
Ni	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	20 [µg/l]
Pb	ppb	4,97 (0,63-11,23)	0,44 (0,00-1,55)	1,12 (0,00-2,26)	7,2 [µg/l]
Si	ppb	6103,94 (0,00-11230,53)	5,03 (0,00-20,12)	0,00 (0,00-0,00)	-
Zn	ppb	217,06 (94,21-375,86)	563,07 (68,63-1495,20)	5,21 (0,00-13,83)	75 [µg/l]

A nyári szezon meglehetősen hasonlít a tavaszihoz, határérték túllépés itt is ugyanazt a két paramétert (Cu, Zn) érinti, szintén mindkét tetőre vonatkozóan. Cu a kontrolltetőn 22,2 ppb értékű volt, míg a zöldtetőn ennek a hatszorosa (130,13 ppb) figyelhető meg, tehát ez utóbbi rézforrásként szolgált. Zn ezzel szemben a kontrolltetőn volt nagyobb értékű (536,07 ppb), míg a másik tetőn már csak 217,06 ppb volt a lefolyó csapadékvízben, ami 2,5-szeres hígulást jelent, tehát a zöldtető pufferező hatású ennél az elemnél. Cd jelenléte kimutatható volt, valamivel nagyobb mértékben az előző évszakhoz képest; a Hg és Cr mennyisége mérés határ alatti volt. Mn-ra nézve a zöldtető tisztító hatású volt, mert mennyisége a csapadékban mért 2,38 ppb-hez képest közel a felére csökkent, míg a kontrolltetőn háromszorosára nőtt. A maximum értékek is leginkább ugyanazoknál az elemeknél fordultak elő, mint tavasszal. A nyári hónapokban a magasabb koncentrációk egyik kiváltó oka lehet a kevesebb csapadékesemény – ebben az évszakban csupán 4 alkalommal sikerült kiértékelhető mennyiségű mintát venni –, amely töményedéshez vezet.

8. táblázat: Zöldtetőn a nyáron mért koncentrációk átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető MV1 (0 perc)	Zöldtető MV2 (10 perc)	Zöldtető MV3 (20 perc)	Zöldtető MV4 (40 perc)
As	ppb	1,97 (0,00-5,69)	3,15 (0,00-6,88)	2,56 (0,00-7,18)	3,12 (0,00-8,10)
Cd	ppb	0,03 (0,00-0,11)	0,04 (0,00-0,09)	0,07 (0,00-0,19)	0,01 (0,00-0,03)
Cu	ppb	42,17 (3,95-68,22)	131,30 (17,60-328,88)	144,26 (15,63-288,04)	202,80 (22,96-531,08)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	10,53 (0,001-17,22)	11,31 (0,00-18,73)	12,24 (0,00-20,92)	14,73 (0,00-24,40)
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Mn	ppb	1,22 (0,21-1,97)	1,11 (0,13-1,89)	1,28 (0,17-2,16)	1,47 (0,352-2,70)
Ni	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Pb	ppb	3,52 (0,46-9,43)	5,27 (0,85-14,00)	4,69 (0,46-7,77)	6,41 (0,75-13,71)
Si	ppb	3340,21 (0,00-9955,94)	6172,38 (0,00-11300,39)	6630,68 (0,00-10355,68)	8272,48 (0,00-13310,11)
Zn	ppb	155,70 (16,79-242,08)	243,04 (163,51-422,81)	215,83 (72,55-353,85)	253,66 (123,98-484,71)

9. táblázat: A nyári időszakban kontrolltetőn mért koncentrációk átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Kontrolltető MV1 (0 perc)	Kontrolltető MV2 (10 perc)	Kontrolltető MV3 (20 perc)	Kontrolltető MV4 (40 perc)
As	ppb	0,93 (0,00-2,29)	0,14 (0,00-0,42)	0,14 (0,00-0,42)	0,00 (0,00-0,00)
Cd	ppb	0,01 (0,00-0,03)	0,10 (0,00-0,20)	0,08 (0,00-0,15)	0,06 (0,00-0,26)
Cu	ppb	22,01 (1,02-56,16)	17,74 (2,35-44,59)	26,23 (3,29-61,69)	25,23 (1,54-73,46)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	0,04 (0,00-0,15)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,42)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Mn	ppb	8,36 (0,73-20,07)	6,86 (0,28-16,03)	8,88 (0,20-19,97)	7,26 (0,07-23,10)
Ni	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Pb	ppb	0,88 (0,00-2,72)	0,27 (0,00-0,82)	0,01 (0,00-0,02)	0,66 (0,00-2,65)
Si	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	12,36 (0,00-37,07)	10,85 (0,00-43,40)
Zn	ppb	783,17 (79,14-2022,60)	316,09 (56,41-825,34)	537,24 (88,20-1346,43)	569,89 (50,75-1786,44)

Az összehasonlító táblázatokban (8. és 9. táblázat) megfigyelhető, hogy amíg a zöldtetőn a 4 mintavételi ponton az elemek döntő hányadának maximuma a 40. percben jelenik meg, addig ez a kontrolltetőn a 0. és 20. percnél vett mintákban észlelhető. Valószínűleg ez azért van így, mert a kontrolltetőn már a csapadékesemény kezdetekor megtörténik a levegőből kiülepedett

anyagok csapadékvízzel történő kimosódása, ami azonban a zöldtetőknél időigényesebb folyamat és csak később tud végbe menni. Ezt jól szemlélteti a 8. táblázat, melyet vizsgálva kiderül, hogy mind 11 elem nagyobb töménységben volt kimutatható a 0. percnél vett mintákhoz képest. A kontrolltetőre kapott eredményeket némileg befolyásolhatja, hogy az egyik mérési napon (06.08.) ismeretlen okokból a 10. és 20. percnél nem történt mintavétel.

4.4. Összesített

10. táblázat: A 3 évszakra vonatkozóan a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető	Kontrolltető	Csapadék	10/2010. (VIII.18.) VM rendelet
As	ppb	4,79 (0,00-13,39)	0,28 (0,00-4,41)	0,12 (0,00-1,48)	20 [µg/l]
Cd	ppb	0,01 (0,00-0,08)	0,01 (0,00-0,16)	0,01 (0,00-0,12)	0,2 [µg/l]
Cu	ppb	92,41 (15,03-304,05)	33,96 (2,05-87,98)	2,59 (0,00-11,71)	10 [µg/l]
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	20 [µg/l]
Fe	ppb	14,07 (0,00-26,36)	0,77 (0,00-7,51)	2,09 (0,00-20,65)	-
Hg	ppb	0,05 (0,00-0,93)	0,22 (0,00-3,63)	0,17 (0,00-2,23)	0,05 [µg/l]
Mn	ppb	0,54 (0,00-2,10)	7,81 (0,32-19,79)	2,30 (0,00-14,28)	-
Ni	ppb	0,77 (0,00-5,84)	4,80 (0,00-17,59)	0,12 (0,00-1,05)	20 [µg/l]
Pb	ppb	3,55 (0,00-11,74)	0,54 (0,00-2,26)	1,00 (0,00-6,80)	7,2 [µg/l]
Si	ppb	8825,63 (0,00-21119,74)	134,50 (0,00-3064,10)	0,00 (0,00-0,00)	-
Zn	ppb	191,67 (76,48-414,31)	861,61 (68,63-1579,98)	23,87 (0,00-194,47)	75 [µg/l]

A vizsgált 9 hónapot összefoglaló táblázat azt mutatja, hogy Cu, Hg és Zn elemek esetében haladták meg a határértékek a vonatkozó jogszabályban előírtakat. Ebből az látszik, hogy az adott elemek mért koncentrációja nem évszakfüggő, hiszen mindhárom évszakban hasonló módon alakultak az értékek. Cu és Zn paraméterek értékei a kontroll- és zöldtetőn is egy-egy nagyságrenddel nagyobbak, mint a csapadékban, így külső szennyezőforrást feltételezhetünk.

A Hg a három vizsgált évszak közül csak télen volt kimutatható. A télen mért magas érték légköri kiülepedésből, illetve csapadékból származhat, mivel az utóbbiban is határértéket meghaladó koncentrációkat mértem; viszont a zöldtetőn hígulás megy végbe, aminek köszönhetően az onnan vett mintában már határérték alatti a koncentráció, tehát pufferező hatású. Cr a vizsgált 9 hónap során nem volt kimutatható a mintákban. A maximumok a 4 vizsgált mintavételi pont esetében a zöldtetőnél a 0. és a 40. percben, míg kontrolltető esetén a 20-40. percben figyelhetők meg. As, Si és Pb esetében a zöldtetőn kapott eredmények egy-két nagyságrenddel nagyobbak, mint a kontrolltetőről és csapadékból vett mintákban, ennek oka

lehet telítődött növényzet és szubsztrátum, amelyekből egy hirtelen esőzés kimosta ezeket az elemeket. Az összes vizsgált elem közül a Si zöldtetőn mért koncentrációja volt a legnagyobb értékű.

Cd minhárom mintában egyforma mértékben fordult elő, és tekintettel arra, hogy a vizsgált évszakok közül csak kettőben (tavasz, nyár) volt kimutatható és ezen esetekben a csapadékban is jelen volt, arra lehet következtetni, hogy a csapadék volt a forrása. A Mn koncentrációja háromszor nagyobb volt a kontrolltetőn a csapadékvízhez képest, viszont a zöldtetőn már csak töredéke, így kijelenthető, hogy ez esetben pufferelő hatású volt a zöldtető. Ni a kontrolltetőn vett fel magas értéket, ehhez képest a csapadékban és a kontrolltetőn töredéke volt a mért töménysége. Erre magyarázat lehet a kontrolltetőn kiülepedett nagyobb koncentráció, amelynek egy része átmosódhatott a csapadékkal a zöldtetőre.

11. táblázat: A 3 évszakra vonatkozóan a zöldtetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Zöldtető MV1 (0 perc)	Zöldtető MV2 (10 perc)	Zöldtető MV3 (20 perc)	Zöldtető MV4 (40 perc)
As	ppb	5,46 (0,00-16,20)	4,50 (0,00-13,80)	4,42 (0,00-12,79)	4,76 (0,00-13,91)
Cd	ppb	0,01 (0,00-0,11)	0,01 (0,00-0,09)	0,01 (0,00-0,19)	0,00 (0,00-0,05)
Cu	ppb	62,43 (3,95-190,30)	85,43 (17,60-328,88)	110,83 (15,63-288,04)	113,97 (2,09-531,08)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	19,62 (0,00-61,03)	12,37 (0,00-23,09)	11,98 (0,00-22,00)	12,33 (0,00-24,47)
Hg	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,03 (0,00-0,75)	0,15 (0,00-3,71)
Mn	ppb	0,70 (0,00-1,97)	0,35 (0,00-1,89)	0,42 (0,00-2,16)	0,69 (0,00-5,71)
Ni	ppb	1,35 (0,00-8,31)	0,48 (0,00-3,29)	0,47 (0,00-3,87)	0,76 (0,00-10,38)
Pb	ppb	2,84 (0,00-9,43)	3,76 (0,00-14,00)	3,54 (0,00-13,80)	4,05 (0,00-17,58)
Si	ppb	8705,33 (0,00-21919,25)	8451,67 (0,00-18231,14)	8825,98 (0,00-20328,85)	9319,56 (0,00-24997,35)
Zn	ppb	208,19 (16,79-643,71)	183,60 (77,35-422,81)	187,59 (68,62-398,79)	187,31 (70,55-484,71)

12. táblázat: A 3 évszakra vonatkozóan a kontrolltetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban, a 3 évszakra vonatkozóan. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.

Paraméter	Mértékegység	Kontrolltető MV1 (0 perc)	Kontrolltető MV2 (10 perc)	Kontrolltető MV3 (20 perc)	Kontrolltető MV4 (40 perc)
As	ppb	0,23 (0,00-2,29)	0,04 (0,00-0,47)	0,02 (0,00-0,42)	0,83 (0,00-17,65)
Cd	ppb	0,01 (0,00-0,09)	0,01 (0,00-0,20)	0,02 (0,00-0,15)	0,01 (0,00-0,26)
Cu	ppb	31,33 (1,02-117,77)	37,31 (2,35-84,83)	38,95 (3,29-94,22)	31,91 (1,54-89,26)
Cr	ppb	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)
Fe	ppb	0,63 (0,00-6,23)	0,12 (0,00-1,73)	0,64 (0,00-10,93)	1,70 (0,00-30,05)
Hg	ppb	0,06 (0,00-0,72)	0,06 (0,00-0,75)	0,09 (0,00-2,06)	0,68 (0,00-14,51)
Mn	ppb	11,78 (0,73-35,01)	8,32 (0,28-30,58)	7,41 (0,20-27,97)	6,07 (0,07-23,10)
Ni	ppb	3,79 (0,00-22,06)	0,46 (0,00-2,33)	11,41 (0,00-45,45)	4,67 (0,00-32,18)
Pb	ppb	0,85 (0,00-4,15)	0,29 (0,00-3,88)	0,30 (0,00-4,43)	0,76 (0,00-6,61)
Si	ppb	12,63 (0,00-178,39)	5,33 (0,00-76,11)	5,88 (0,00-89,78)	514,63 (0,00-12256,41)
Zn	ppb	1357,33 (79,14-3310,10)	675,52 (56,41-1119,49)	801,91 (88,20-1657,28)	680,32 (50,75-1786,44)

A 12. táblázat azt mutatja, hogy a 3 szezon mérési eredményeit átlagolva a legnagyobb számban a 40. percnél vannak a maximumok, míg a zöldtető maximumai a 0. és 40. perceknél találhatók.

A vártakkal ellentétben a kontrolltetőn a 40. percen volt a legtöbb maximum érték As, Fe, Hg, Si elemeknél. Az elem - koncentrációk maximumának 40. percre való kitolódása a várt időponttal szemben egy érdekes kérdés, melynek megválaszolása további vizsgálatot igényel. Azonban az egyik lehetséges oka lehet, hogy a kontrolltető kibocsátóként viselkedik a négy felsorolt elem esetében. Ezt igazolja, hogy a 10. táblázatban a kontrolltetőről származó átlagértékek mind a négy elem esetében magasabbak, mint a csapadékban mérték. Vélhetően száraz ülepedéssel a tetőre került anyagok feloldódása a csapadékvízben éppen annyit késleltetheti ezen anyagok lemosódását, hogy a legnagyobb értékek a 40. perce tolnak. A téli szárazabb időjárás és a fűtési időszak kedvezhet ezen anyagok száraz kiülepedéséhez és felhalmozódásához, melyet – a tavaszi hosszú és sűrűbb csapadékeseményekkel ellentétben – az egyes ritkább csapadékesemények feloldanak és lemosnak. Fontos hangsúlyozni, hogy mindez csupán felvetés, a valódi ok feltárásához további kutatás szükséges!

A 3 évszakot összesítő zöldtetőt vizsgáló táblázatban (11. táblázat) a maximumok nagyobb hányada a 0. és a 40. percekben jelenik meg; ezt az eredményt nagyban befolyásolták a télen, illetve tavasszal mért értékek. Előbbi nem szokványos, hiszen azt vártuk, hogy a szennyező

elemek átjutását lassítja az aljzat, és emiatt csak későbbi időpontban kezdődik meg az elemek nagyobb arányú kimosódása. Erre magyarázat adhat egy kezdeti intenzívebb csapadékesemény, illetve a már említett akkumulációs képesség határának elérése az egyes elemeknél.

4.5.Összehasonlítás a korábbi évek mérési eredményeivel

A korábbi években az általam vizsgált paramétereket többen is elemezték ugyanazon az extenzív zöldtetőn, a célkitűzésben megfogalmazottak alapján az ő eredményeiket összegzem és vetem össze a sajátjaimmal ebben a fejezetrészen.

Fischer Eszter [12] 2020-ban, a nyártól ősziig végzett kutatásokat a zöldtető lefolyó csapadékra gyakorolt hatását illetően. Az általam is vizsgált fémek és nehézfémek, az eredményei alapján, a zöldtetőn nagyobb mértékben fordultak elő. A csapadékhoz képest a zöldtetőről lefolyó csapadékvízben magas volt a Zn és Cu koncentrációja, valamint a Zn, Cu és Ni többszörösen meghaladják a jogszabályban előírt határértékeket. A Hg és Pb mennyisége kis mértékben, de határérték feletti volt. A kapott eredmények nem minden esetben egyeznek a szakirodalmi adatokkal.

Hidász Ágnes Glória [14] 2020 december 3 és 2021 november 8 közti időszakban tanulmányozta a zöld- és kontrolltetőn átfolyó csapadék összetételét. Arra az eredményre jutott, hogy a zöldtető Cd, Mn és Zn esetében tisztító hatású. Hg, Cu, Fe és Si tekintetében jelentősebb mértékben kibocsátó hatású volt, utóbbi kettőre nincs jogszabályi határérték, viszont a Cu tízszerese az előírtaknak. As, Cr, Ni és Pb elemekre nézve is inkább kibocsátóként működött, de elhanyagolható mennyiségben voltak jelen és nem volt határérték túllépés.

Király Bence Dávid [20] 2021 november 22-től 2022 november 22-ig terjedően vizsgálta a fémeket és nehézfémeket a zöldtetőről lefolyó csapadékvízben. A kapott eredmények esetenként eltértek a szakirodalomban olvasottaktól. A zöldtető Hg, Mn és Zn tekintetében puffert, a többi elemnél esetében kibocsátó hatású volt Cd és Cr kivételével – ezek a legtöbb mintában nem voltak kimutathatók. As, Hg, Ni és Pb elemek a vizsgált egy év időtartamban legalább egy évszakban, míg Cu és Zn koncentráció állandó jelleggel meghaladták a határértékeket.

Az előző vizsgált évhez hasonlóan, az én mérési eredményeim alapján is a Hg, Mn és Zn tekintetében puffertő hatású volt a zöldtető, illetve Cd és Cr nagyon kis koncentrációban vagy egyáltalán nem volt kimutatható. A korábbi évektől eltérően esetemben a Hg csak egy évszakban volt jelen (télen); illetve határérték túllépéssel legalább egy évszak időtartamban

csak 3 elem volt érintett (Zn, Hg, Cu); a korábbi évekhez képest a Ni, Pb és As a méréseim során a vizsgált időszakban egyszer sem fordult elő határérték felett. Si és Fe elemek is mindegyik esetben több nagyságrenddel meghaladták a kontrolltetőn és csapadékvízben mért értékeket.

5. Következtetések, megállapítások

Összességében elmondható, hogy a vizsgált időszak eredményei változatos képet mutatnak, amelyekből az derül ki, hogy egyes esetekben tisztítóként, míg máskor „kibocsátóként” működik az extenzív zöldtető. A szakirodalom eltérő eredményekről számol be. A lefolyásban mért nagyobb értékek oka lehet a fémek időbeli felhalmozódása, mint ahogy Akhter és társai [2] is megállapították kutatásukban. Ezzel szemben két másik zöldtetős kutatásban [33] [34] azt figyelték meg, hogy idővel csökkent a fémkoncentráció a lefolyt csapadékvízben. Alsop és munkatársai [3] azt az eredményt kapták, hogy az általuk vizsgált szubsztrát egyes esetekben nehézfém kioldást eredményezett, más esetben pedig elnyelőként működött. Gregoire és Clausen [13] mérései alapján a vizsgált zöldtető csökkentette a lefolyás Zn, Pb, Hg, és Cu tartalmát. Az általam vizsgált zöldtetőn az említett négy elem közül csak kettőre (Hg, Zn) volt ez igaz.

A kontrolltetőn a 40. percnél mért nagyszámú maximum értékre magyarázat lehet egy intenzívebb csapadékesemény, melynek hatására a kontroll- és zöldtetőn lévő szennyeződések összemosódhatnak. Ezen jelenség okának feltárása és bizonyítása további kutatásokat igényel.

A zöldtetőn 0. percben mért jelentős számú maximum érték kiváltó oka valószínűleg a növények akkumulációs képessége, melynek van egy határa, ami elemenként eltérő, amelyek a telítődési érték elérése után pedig egy hevesebb esőzés alkalmával kimosódnak a növényekből és az ültető közegből.

6. Összefoglalás

Az éghajlatváltozás következtében megnőtt a szélsőséges csapadékesemények száma és intenzitása. A hirtelen lezúduló nagy mennyiségű csapadék jelentősen terheli a csapadékvíz hálózatokat, erodálja a természetes és beépített felületeket egyaránt. A csapadékvizek lefolyásának késleltetése, a település vízgazdálkodásának javítása, a hősziget hatás csökkentése – csak néhány a kedvező hatások közül, melyekkel a zöldtető létesítés jár. TMDK munkám során azt vizsgáltam, hogy a téli, tavaszi és nyári időszakban, az extenzív zöldtetőről lefolyó csapadékokban hogyan alakul a fémek és nehézfémek koncentrációja. A vizsgált elemek a következők voltak: As, Cr, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si és Zn. A vizsgált zöldtető a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai karának „C” épülettömbjén található, mellette egy kontrolltetővel. Komplexitását tekintve egyedülálló hazánkban, hiszen egy gyökérszónás szennyvíztisztítóval összekapcsolt rendszer részét képezi.

A mintavételezés automata mintavevő segítségével történt, amelyek a 0., 10., 20. és 40. percekben a kontroll- és zöldtetőről vett mintát. Ezen kívül csapadékból is történt közvetlenül mintavétel. A mintákat ICP-OES Agilent 5110-es műszer segítségével elemeztem. Az adatokat Microsoft Excel segítségével dolgoztam fel, és táblázatos formában mutattam be. Ezekben a táblázatokban szerepelnek a vizsgált elemek zöldtető és kontrolltető mintákban mért átlagai, minimum és maximum értékei, külön vizsgálva az egyes mintavételi pontokon (0., 10., 20. és 40. perc), illetve a csapadék mintában. Ezeket a 10/2010-es VM rendelet vízminőségi határértékeivel vettem össze.

A mérési eredmények elvértve egyeztek a szakirodalommal. Télen a várt eredmények ellenkezőjét tapasztaltam, a zöldtetőn a 0., a kontrolltetőn pedig a 40. percnél volt jelentősebb a kimosódás. Előbbi oka a növényzet és ültetőközegek túltelítődése, míg az utóbbié egy intenzívebb esőzés lehet. Tavasszal a zöldtető hasonlóan viselkedett az előző vizsgált évszakhoz képest, míg a kontrolltetőről a vártaknak megfelelően a csapadékesemény kezdetekor elkezdtek már lemosódni a szennyezőanyagok. A nyári szezonban mind a zöldtető, mind a kontrolltető igazolta a vártakat – zöldtetőről a csapadékesemény végén, míg a kontrolltetőről a csapadékesemény kezdetekor kezdtek lemosódni a vizsgált elemek. Tehát összességében a zöldtető egyes elemekre nézve pufferelő (Cd, Hg, Mn, Ni, Zn), míg másokra kibocsátó hatású (As, Cu, Pb, Si, Fe) volt.

7. Irodalomjegyzék

- [1] 10/2010. (VIII. 18.) VM rendelet a felszíni víz vízszennyezettségi határértékeiről és azok alkalmazásának szabályairól: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1000010.vm>.
- [2] Akther, M. et al. 2020. Chemical leaching behaviour of a full-scale green roof in a cold and semi-arid climate. *Ecological Engineering*. 147, May 2019 (2020), 105768. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105768>.
- [3] Alsup, S.E. et al. 2011. Heavy metals in leachate from simulated green roof systems. *Ecological Engineering*. 37, 11 (2011), 1709–1717. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.045>.
- [4] Arzén | KÖRnyezetvédelmi INFOrmáció: <https://www.enfo.hu/node/4802>. Accessed: 2023-05-13.
- [5] Ashton, W.M. 1972. Nickel Pollution. *Nature* 1972 237:5349. 237, 5349 (1972), 46–47. DOI:<https://doi.org/10.1038/237046a0>.
- [6] Cheng, H. and Hu, Y. 2010. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: A review. *Environmental Pollution*. 158, 5 (May 2010), 1134–1146. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2009.12.028>.
- [7] Czemieli Berndtsson, J. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*. 36, 4 (Apr. 2010), 351–360. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2009.12.014>.
- [8] Dénes, K. and Kovács, Z. 2021. A klímaváltozás hatásai a vízgazdálkodásra. *Műszaki Katonai Közöny*. 31, 1 (2021), 41–50. DOI:<https://doi.org/10.32562/mkk.2021.1.3>.
- [9] Dobó, E. 2014. A BEÉPÍTETTSÉG ÉS A VÁROSI HŐSZIGET KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA, BUDAPEST XI. KERÜLETÉNEK PÉLDÁJÁN. (2014).
- [10] Douville, H. et al. 2021. *Water Cycle Changes*.
- [11] Elemental Mercury and Inorganic Mercury Compounds: Human Health Aspects (Cicads 50, 2003): <https://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad50.htm#6.1.1>. Accessed: 2023-05-15.
- [12] Fischer, E. A zöldtetők hatása a csapadékvíz minőségére.
- [13] Gregoire, B.G. and Clausen, J.C. 2011. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*. 37, 6 (Jun. 2011), 963–969. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2011.02.004>.
- [14] Hidász, G. 2022. Az extenzív zöldtetőről és kontrolltetőről lefolyó csapadékvíz minőségének vizsgálata. (2022), 5.
- [15] Hirmann, A. and Lenkovics, L. 2021. Zöldtetők szakirodalmi áttekintése Overview of green roof literature , recensions and researches. *Zöldtetők Szakirodalmi áttekintése Overview of green roof literature, recensions and researches* (2021), 114–118.
- [16] Ideális zöldtető ültetőközeg ismérvei - Zöldtető Guru: <https://zoldtetoguru.hu/milyen-az-idealis-ultetokozeg/>. Accessed: 2023-04-27.
- [17] IPCC 2014. Fifth Assessment Report Synthesis Report 16 th Annual Symposium of the French Renewable Energy Association. (2014).
- [18] IPCC 2007 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change: Fourth Assessment Report: Findings on the Physical Basis of Climate Change and Adaptation, Impacts and Vulnerability. November (2007).
- [19] Kényszer vagy lehetőség: kell-e nekünk zöldtető? 2017. <https://epiteszforum.hu/kenyszer-vagy->

- lehetoseg-kell-e-nekunk-zoldteto. Accessed: 2023-04-25.
- [20] Király, B.D. 2023. Különböző kémiai elemek vizsgálata kontrolltetőről és extenzív zöldtetőről lefolyó csapadékvízben. (2023).
 - [21] Kovacs, A.D. 2017. The application opportunities of green roof, as an interactive educational space. *8th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2017 - Proceedings*. 2018-Janua, CogInfoCom (2017), 389–394. DOI:<https://doi.org/10.1109/CogInfoCom.2017.8268277>.
 - [22] Kumar, V. et al. 2021. *Heavy metals in the Environment Impact, Assessment and Remediation*. Candice Janco.
 - [23] Magill, J.D. et al. 2011. A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. *Department of Plant, Soil, and Agricultural Systems in the Graduate School*. Master of, (2011), 62.
 - [24] Mason, Y. et al. 1999. Behavior of Heavy Metals, Nutrients, and Major Components during Roof Runoff Infiltration. *Environmental Science and Technology*. 33, 10 (May 1999), 1588–1597. DOI:<https://doi.org/10.1021/ES980922Q>.
 - [25] O’Neal, S.L. and Zheng, W. 2015. Manganese Toxicity Upon Overexposure: a Decade in Review. *Current environmental health reports*. 2, 3 (Sep. 2015), 315–328. DOI:<https://doi.org/10.1007/S40572-015-0056-X/TABLES/2>.
 - [26] Pál, J. 2016. *Növényekkel borított épületek*.
 - [27] Pécs - Városok éghajlati jellemzői - met.hu: https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/varosok_jellemzoi/Pecs/. Accessed: 2023-05-13.
 - [28] Somfai, D. et al. 2020. Innovatív szennyvíztisztító kutatótelep Pécssett. *Dunakavics*. VIII, 10 (2020), 53–62.
 - [29] Szabó, A.I. 2019. Mit nevezünk üvegházhatású gázoknak és hogy kerülnek a légkörbe? | Másfélfok. *Másfélfok*.
 - [30] Szemiramisz függőkertje – Wikipédia: https://hu.wikipedia.org/wiki/Szemiramisz_fuggokertje. Accessed: 2023-04-25.
 - [31] Szőke, A. 2015. Extenzív zöldtetők, és azokon alkalmazott egyes Sedum fajok komplex értékelése. *Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Kar Dísznövénytermesztési és Dendrológia Tanszék*. (2015).
 - [32] Üvegházhatású gázok – Wikipédia: https://hu.wikipedia.org/wiki/Üvegházhatású_gázok. Accessed: 2023-04-26.
 - [33] Vijayaraghavan, K. et al. 2012. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Research*. 46, 4 (Mar. 2012), 1337–1345. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2011.12.050>.
 - [34] Vijayaraghavan, K. and Raja, F.D. 2015. Pilot-scale evaluation of green roofs with Sargassum biomass as an additive to improve runoff quality. *Ecological Engineering*. 75, (Feb. 2015), 70–78. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2014.11.029>.
 - [35] Ward, M. and András, S.S. 1118. A nikkell esszencialitásának vizsgálata. *Élelmiszerfizika Közhasznú Alapítvány*. (1118), 14–16.
 - [36] ZÖLDTETŐK TÍPUSAI - ZÖLDTETŐ ÉPÍTÉS és KIVITELZÉS: <https://zoldtetoepites.hu/zoldteto-tipusai/>. Accessed: 2023-04-27.

8. Táblázatjegyzék

1. táblázat: Télen a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.	20
2. táblázat: Télen, a zöldtetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	21
3. táblázat: Téli időszakban a kontrolltetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	21
4. táblázat: Tavasszal a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.	22
5. táblázat: A zöldtetőn tavasszal mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	23
6. táblázat: A kontrolltetőn tavasszal mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	23
7. táblázat: Nyári szezonban a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.	24
8. táblázat: Zöldtetőn a nyáron mért koncentrációk átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	25
9. táblázat: A nyári időszakban kontrolltetőn mért koncentrációk átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	25
10. táblázat: A 3 évszakra vonatkozóan a kontroll- és zöldtetőn mért, valamint a csapadékból vett minták átlag, maximum és minimum értékei összehasonlítva a vonatkozó jogszabállyal. A piros szín a határérték túllépést jelöli, míg a sárga a legmagasabb átlagot.	26
11. táblázat: A 3 évszakra vonatkozóan a zöldtetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	27
12. táblázat: A 3 évszakra vonatkozóan a kontrolltetőn mért értékek átlag, minimum és maximum értékei a 4 mintavételi pontban, a 3 évszakra vonatkozóan. A zöld szín a legalacsonyabb, míg a barackszín a legmagasabb átlag értékeket jelöli.	28

9. Ábrajegyzék

2.1. ábra. Az extenzív zöldtetők rétegrendje [16].	8
3.1. ábra. Extenzív zöldtető és kontrolltető a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar "C" épületének tetején (Készítette: Gáspár Bernadett 2023.11.07.).....	15
3.2. ábra. Automata mintavevő a kontroll- és zöldtető alatt (Készítette: Gáspár Bernadett 2023.11.07.)	16
3.3. ábra. ICP-OES műszer (Fotó: Gáspár Bernadett 2023.10.31.).	17