

**Nehézfém tartalmú szennyvíziszap hatása kosárfonó fűz
(*Salix viminalis* L.) facsemeték egészségi állapotára**

TDK dolgozat
„XXXII. OTDK Biológia Szekció”

Készítette:

Tőzsér Dávid
II. MSc Környezettudomány

Témavezetők:

Dr. Simon Edina
egyetemi adjunktus
Debreceni Egyetem, Ökológiai Tanszék

Dr. Lakatos Gyula
ny. egyetemi docens
Debreceni Egyetem, Ökológiai Tanszék

Debrecen,

2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. Irodalmi áttekintés.....	2
1.2. Célkitűzés.....	4
2. Anyag és módszer.....	5
2.1. A vizsgált terület bemutatása	5
2.2. A növényzet vizsgálata	10
2.3. Az iszapminták elemkoncentrációja	11
2.4. Statisztikai elemzési módszerek.....	12
3. Eredmények.....	13
3.1. A faegyedek állapota.....	13
3.1.1. A fűzfák hosszának alakulása	13
3.1.2. A fűzfák egészségi állapota	14
3.2. A szennyvíziszap nehézfém-tartalma.....	16
4. Összefoglalás.....	19

1. Bevezetés

1.1. Irodalmi áttekintés

A különféle emberi tevékenységek során nehézfémekkel szennyezett talajok és üledékek kezelése a jelenkor egyre inkább előtérbe kerülő kihívása (EPA 2000, Nazir et al. 2011). Az érintett területek szilárd közegének hagyományos eljárásokkal történő ártalmatlanítása sok esetben komoly anyagi terhet jelentene (Dickinson 2000, Sarma 2011), így fokozódó figyelemben részesülnek az alternatív megoldások. Ez utóbbiak körébe tartozik a *fitoremediáció*, mely az adott közeg növényekkel történő helyreállítását, a szennyezők koncentrációinak elfogadható szintre csökkentését célozza (Chaudhry 1998, Salt et al. 1998, Simon 2004, Greipsson 2011, Ismail 2012).

A szennyező anyagok minőségét és sorsát, továbbá a helyreállított területtel szemben támasztott igényeket szem előtt tartva eltérő fitoremediációs technikákat alkalmaznak (French et al. 2005, Lewandowski et al. 2006, Ishikawa et al. 2014). A fontosabb eljárások módszerei között említhető, a nem-kívánt elemek elkülönítésén, illetve vegyületek visszatartásán alapuló *fitostabilizáció*, a növényi felvétellel, majd lebontással jellemezhető *fitodegradáció*, a gyökérzóna intenzifikált mikroba-tevékenysége által kiváltott *rizodegradáció*, az érintett víztest, főként szennyvizek elsősorban növényi gyökerekkel (*rizo*-) végzendő szűrését megvalósító *fitofiltráció*, a szennyezők növénytestbe történő felvételén, illetve azon belüli transzlokációján nyugvó *fitoextrakció*, az utóbbi folyamatot az anyag transzspirációjával lezáró *fitovolatilizáció*, valamint a helyi hidrológiát a felszíni és felszín alatti vizek áramlásának és mennyiségének evapotranszspirációs szabályozásával befolyásoló *hidraulikus kontroll* (EPA 2000, EPA 2001, Cheng 2003, Simon 2004, Gosh & Singh 2005, ITRC 2009, Jadia & Fulekar 2009, Vamerali et al. 2009, Ismail 2012).

Az előírt szennyezőanyag-koncentráció eléréséhez specifikus növényfajokat telepítenek, melyek eltérő mértékben képesek a környezeti kockázat mérséklésére. Az alkalmazás szempontjából előnyös növényi vonások közé sorolható a gyors növekedési ütem, a mélyre hatoló gyökérzet, az érintett fémmel, fémekkel szembeni tolerancia, illetve a tápanyag-ellátottságtól függetlenül bekövetkező fejlődés (Punshon et al. 1996).

A fitoremediáció megvalósulásának egyik alapfeltétele, hogy a kezelni kívánt nehézfémek a vegetáció számára felvehető formában legyenek jelen (James 2001).

Amennyiben ez a kritérium nem, vagy csupán részben teljesül, úgy különféle adalékanyagok, például kelát-képzők (pl. EDTA) kijuttatásával segítik elő a növényi felvételt (Huang et al. 1997, Tack et al. 2005, Ismail 2012). Az eljárás további korlátai közé tartozik, hogy csupán azon területeken válhat eredményessé, ahol az elemek koncentrációban kifejezett toxicitása mérsékelte (Pulford & Watson 2003). Ellenkező esetben a növényi fejlődés elégtelensége, klorózis, a szervek károsodása, végső esetben pedig elhalás következhet be.

A célzott kémiai elem megfelelő eljárással történő kezelésére leghatékonyabb szervezeteket a szakirodalom az ún. hiperakkumulátor jelzővel illeti (Chaney et al. 1997, Brooks et al. 1999, Yang et al. 2005, Padmavathiamma & Li 2007, Nazir et al. 2011, Tangahu et al. 2011). Baker et al. (1994) eredményei azt mutatják, hogy a *Thlaspi caerulescens* a nikkelt és a cinket 1-2 %-ban is képes akkumulálni. Az ártalmatlanítás kellő mértékéről elemanalitikai vizsgálatokkal győződnek meg. Abban az esetben, ha a célzott arányok elérésre kerültek, lehetőség nyílik a zöld növények föld feletti biomasszájának betakarítására, valamint technológia és igény szerint az abban akkumulálódott nehézfémek kinyerésére, hasznosítására (Alkorta et al. 2004, Abhilash & Yunus 2011).

Természetesen az antropogén behatás következtében szennyezett terület remediációjának sikere érdekében a növényi tényező mellett figyelembe kell venni egyéb paramétereket, mint például a szennyezők terjedésének lehetőségeit, az érintett lakosság megfelelő szintű tájékoztatását, vagy éppen a megvalósítás várható költségeit (EPA 2005, Lasat 2010).

A talajok nehézfémek általi szennyezésének meghatározó forrásai a szennyvíztisztító telepek. Földrajzi elhelyezkedésük és lehetőségeik által biztosítva az egyes országok a szennyvíztisztítás mellék- és/vagy végtermékeként keletkező iszapot különböző módon kezelik. A leggyakoribb, bár egyre csökkenő részesedéssel jellemezhető felhasználási eljárás az elhelyezés, azon belül is a mezőgazdasági területre történő kijuttatás (Lester et al. 1983). A technológia fejlődésével a tisztító egységek áthelyezésre kerültek, területigényük csökkent, hatásfokuk nőtt (Kárpáti et al. 2007).

A korábban elő-, illetve utóülepítőként funkcionáló, földmedrű tőegységek felhagyásra kerültek, bennük többnyire a természetes szukcessziós folyamatok bontakoznak ki. Az utóbbi egy-két évtizedben azonban egyre inkább előtérbe kerültek ezeknek a területeknek a hasznosítási törekvései (EPA 2001).

Számos országban – amennyiben a szennyvíziszap kiülepedése vagy elhelyezése mezőgazdasági területet érint – törvényi szabályozás született a térszínre kijuttatható iszap nehézfém-koncentrációját illetően. Magyarországon az 50/2001. (IV.3.) Korm. rendelet (“A szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól”) 5. számú melléklete 11 elem (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn) határértékét írja elő. Az Európai Unió hatályos jogszabályában (86/278/EEC Direktíva) mindösszesen 6 elemre (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) állapítottak meg koncentráció-intervallumokat (EC 2001). Az egyes tagállamokban, a figyelembe vett elemek köre többnyire szélesebb, a határértékek tekintetében pedig jellemzően a közösségi szabályozással átfedő, nem ritkán annál szigorúbbra szabott kereteket alakítottak ki (Koch et al. 2002). A kontinens határain túllépve az Amerikai Egyesült Államokban az EPA 40 CFR Part 503 tartalmazza a mezőgazdasági területre kihelyezhető szennyvíziszap 10 elemre (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn) vonatkozó megengedhető koncentrációit (EPA 1995).

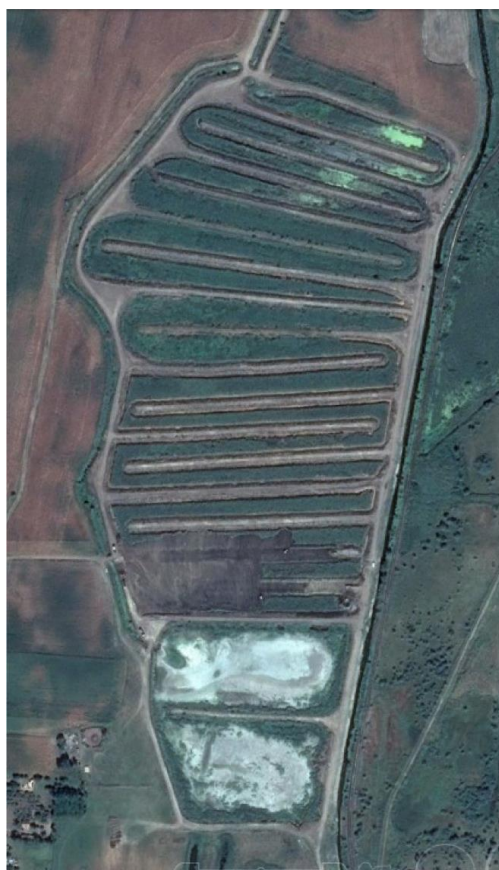
1.2. Célkitűzés

Jelen dolgozat célja egy nagy nehézfém-koncentrációjú szennyvíziszap által tartósan árasztott térszínen a bio-rehabilitáció sikerességének vizsgálata, fás szárú kosárfonó fűz (*Salix viminalis* L.) faj egészségi állapotának felmérése alapján. Vizsgálatainkat a Debrecen délnyugati szélén elhelyezkedő, a Debreceni Vízmű Zrt. kezelésében álló Lovász-zugi tórendszeren végeztük.

2. Anyag és módszer

2.1. A vizsgált terület bemutatása

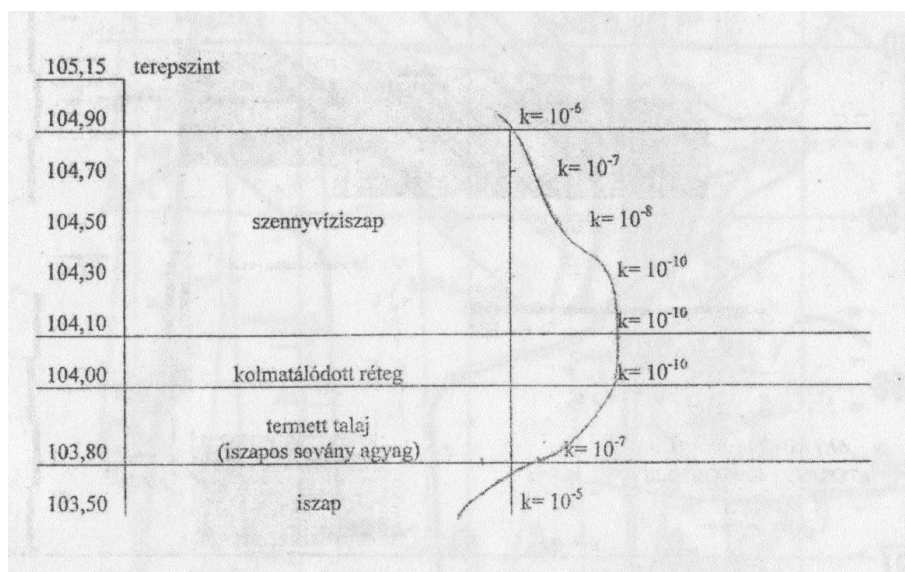
A Lovász-zugi tórendszer egységei az 1930-as évek elejétől szerves részét képezték Debrecen szennyvízkezelési folyamatának. A tavak eleinte $2\text{-}3000\text{ m}^3\text{ nap}^{-1}$ terhelés mellett biológiai tisztítási funkciót töltöttek be, majd a már előtisztított vizet a Tóció-patakba, mint befogadóba bocsátották. A későbbiekben a város népességszámának, s így vízfogyasztásának növekedésével a tavak mechanikai tisztítás elvégzésére is kényszerültek. Mindezek mellett a nehézfémekben gazdag iszap mennyiségi gyarapodása a tavak töltődésével járt, így elengedhetlenné vált azok többszöri kotrása. Az 1970-es évek során megépítésre került az elsődleges tisztítási fokozat igényeihez méretezett műtárgysor, mellyel párhuzamosan az ekkor már tisztán biológiai ártalmatlanítást végző Lovász-zugi tórendszer alapterületét is 25 hektárra bővítették. Benne a szennyezett víz áramlásának és megfelelő hatásfokú kezelésének elősegítése érdekében eleinte terelőfalakat, majd hasonló működésű földgátakat emeltek. A megoldások következtében a folyamatos iszap-kiülepedés a tótestek eltérő részein eltérő iszapjellegzet eredményezett. A szennyvíztisztító telep valamennyi szükséges egységének kiépítése a 2000-es évektől kezdődően lehetőséget biztosított a tőle 1,5-2 km-re fekvő, addig ásott csatornán táplált Lovász-zugi tórendszer rekultivációjának előkészítésére és kivitelezésére.



1. kép. A Lovász-zugi tórendszer (Forrás: Google Earth)

Az észak-déli tájolású tórendszer (1. kép) 2004-es, 2006-os és 2011-es, rekultivációt előkészítő környezetvédelmi felülvizsgálata során meghatározásra kerültek a felszín közeli talajparaméterek. Ezek alapján az északi rész sekély rétegeiben szemcsés talaj jellemző, mely alatt átmeneti talaj és sovány agyag helyezkedik el. Ezzel szemben az egykori ülepítő rendszer déli részén a (meszes) sovány agyag már a felszínen jelentkezik. Ezt ugyancsak átmeneti talaj követi, alatta gyengén kötött, sovány agyagon fekvő iszapréteggel.

A szennyező anyagok terjedésének szempontjából kitüntetett figyelmet érdemelnek az egyes talaj- és iszaprétegre jellemző szivárgási tényező értékei (1. ábra), amelyek a Mélyépterv CE Kft. által végzett 2011-es felülvizsgálat laboratóriumi munkafázisa során váltak ismeretessé.



1. ábra. Az egyes talajrétegek szivárgási tényezői (m s^{-1})

A szilárd közeg vízáteresztő képességének meghatározása az iszapszinttől egészen a termett talajok szintjéig terjedt. A szennyvíziszap terepszinthez közeli mélységeiben a szivárgási tényező (k) 10^{-6} m s^{-1} értéket vett fel. Az iszap mélyebb régiói felé a vízviisszatartó-képesség növekedett, és annak alsó 70-80 cm-ében elérte a $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$, már egyértelműen vízzárónak minősíthető kategóriát. Ez alatt egy vékony, mindösszesen 10 cm-es beiszapolódott, vízáteresztő képességében gátolt talajréteg került mintázásra, mely ugyancsak $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ -os vízvezető-képességgel rendelkezett. Az utóbbi egységnek mintegy fekéjét képező termett talaj szivárgási tényezője magasabb értéket (10^{-7} m s^{-1}) produkált, míg a legmélyebben harántolt iszapréteg már 10^{-5} m s^{-1} vízviisszatartást mutatott. Ezeknek a tényezőknek a figyelembe vételével kijelenthető, hogy a talajvíz szintje és áramlása nem képes az iszapban akkumulálódott nehézfémek továbbszállítására, a szennyező anyagok a szivárgási paraméterek alapján természetes mobilizálódásra nem hajlamosak.

Ezeket a kijelentéseket alátámasztják a talajvíz áramlásának és minőségének ellenőrzése céljából létesített, tőrendszerrel szomszédos monitoring-kutak eredményei, melyekben a szennyező anyag terjedésére utaló nyomokat a kivitelező szerint nem lehetett felfedezni.

Az általános felszín alatti vonások feltárása után igény mutatkozott a szennyvíziszap minőségi és mennyiségi ismérveinek pontosabb megismerésére. Ennek érdekében a felmérést végző Investchem Kft. 2005-ben iszap-mintavételt, majd -analízist végzett a területet reprezentatívan jellemző pontokban. Ezt követően jelentésükben 13 kiválasztott mintavételi hely adatait hasonlították össze. Dolgozatunk következő fejezeteiben többek között ezen eredményekre kívánunk támaszkodni.

A szervesanyag- és szárazanyag-tartalomra vonatkozóan a Lovász-zugi tőrendszert három, egymástól az említett paraméterek tekintetében jól elkülönülő részre lehet osztani (1. táblázat).

1. táblázat. A kiválasztott iszapminták száraz- és szerves anyag-tartalma

Minta jele	Szárazanyag-tartalom (105°C)	Izzítási maradék (600°C)
	(%)	(szárazanyag-tartalom m/m%) 100-I.m. $\approx$ Szervesanyag-tartalom
1A	50,8	91,6
3F	64,3	96,2
6F	50,2	97,5
9F	32,7	79,9
12F	48,4	87,8
13F	22,3	63,8
15F	18,0	57,2
18F	20,6	60,9
21F	20,2	60,7
24F	15,8	55,4
26F	12,6	56,6
27A	31,4	19,2
27F	34,5	24,0

Az első, északi, líraszerű kialakítású töegység szervesanyag-tartalma 20% alatt marad, míg szárazanyag-tartalma megközelíti, illetve meg is haladja az 50%-ot. A második, középső, ugyancsak csőreaktorszerű szakasz szerves anyagának részaránya átlagosan 40% körüli értékre növekszik, míg a szárazanyag-tartalma 20%-ra csökken.

A harmadik, legdélebbi, tószzerű rész iszapja szerves anyagban kiugróan gazdag, míg szárazanyag-tartalma a középső terület arculatát tükrözi.

Megjegyzendő, hogy a fenti adatok alapján, a Szepes településhez közelebb eső rész is tovább bontható lenne.

Az iszapminőséget illető tulajdonságok által behatárolható három terület szennyvíziszapjának mennyiségi jellemzőit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. Az egyes tóegységek főbb mennyiségi ismérvei

	1. tóegység	2. tóegység	3. tóegység	Összesen
Munkagödör felülete (m ²)	64 762	94 850	43 615	203 287
Iszap vastagsága (cm)	70-90	40-55	110-120	40-120
Iszap térfogata (m ³)	37 120	32 033	46 942	116 095

Az előzőek alapján leírható, hogy a területen felhalmozódott iszap összes mennyiségének (116 000 m³) több mint egyharmada az összterület alig egyötöd részén koncentrálódik, mely az iszap jelentős vastagságban történő ülepedésével magyarázható. Ezzel szemben a tórendszer középső tartományában, a terület közel felén az iszapnak csupán, mintegy negyede található. Az aránytalan megoszlásért elsősorban az ülepítő tó mesterségesen kialakított domborzati és áramlási viszonyai tehetők felelőssé.

A terepi és laboratóriumi munkálatok során szerzett tapasztalatok birtokában sor került a tórendszer víztelenítésére, az ott megtelepedő növényzet eltávolítására, s műszaki szakvéleményekhez igazodó tereprendezésére. A rekultivációs térszín kivitelezése után az előzetes tervek alapján 2013-ban megvalósulhatott a fitoremediációs növényzettel történő felszínborítás kialakítása.

2.2. A növényzet vizsgálata

Az egykori ülepítő tórendszer nehézfém-koncentrációjának megfelelő szintre (50/2001. (IV.3.) Korm. rendelet) csökkentése céljából a fitoremediációs szakvélemény a kosárfonó fűz (*Salix viminalis* L.) telepítését tartotta a legoptimálisabbnak. A faj magyarországi alkalmazásának sikereit korábbi kutatási eredmények is igazolják (Máthé & Anton 2005, Vashegyi et al. 2005).

A fűzfélék (Salicaceae) családjába tartozó fajok fitoremediációs célú alkalmazásuk tekintetében különösen jó potenciállal rendelkeznek (Mleczek et al. 2010, Olejniczak et al. 2011). Meers et al. (2007) szerint, ez az előnyös vonás a faj egyedeinek gyors növekedésében, kiemelkedő biomassa-hozamában és magas fokú fémtolerancia-képességében testesül meg. Remediációs és energetikai hasznosítási elképzelések együttes figyelembe vétele mellett, megfelelő sűrűségű ($12-14\ 000\ ha^{-1}$) állományméret esetén, szárazanyagra számítva akár évi 2-3 m hossz-gyarapodás és $12-14\ t\ ha^{-1}$ hozam is elérhető (Kahnt et al. 1995, Elowson 1999), mely különböző klónok létrehozásával tovább fokozható (Mleczek et al. 2010).

A Lovász-zugi tórendszer megközelítőleg 26 ha-os területén a fűzek telepítése 5×8 m-es osztásban, 20 cm-es dugványok földbe helyezésével történt. Ez összességében 5800 db egyed kihelyezését jelentette.

Terepi adatgyűjtésemre 2014. július 8. és szeptember 1. között került sor. Ennek keretein belül a tórendszer már korábban megismert hármas felosztását tekintettük alapként. Valamennyi tóegységen belül véletlenszerű mintázatot követve, a lehetőségek által biztosított számú egyedet vizsgáltunk. Így az északi részen 500, a középsőn 250, déli szakaszon pedig 200 db példány felmérése történt. Egy-egy fiatal egyed tanulmányozása során feljegyzésre került annak sorszáma, fatestének hossza, illetve egy utómunkálatokat megkönnyítő, 1 és 5 közé eső szubjektív érték adása, melynél 5 a legkedvezőbb kondíciójú fás szárúak pontszáma. A dokumentáció részeként valamennyi fűzfához fényképet rendeltünk (2. és 3. kép), melyek alapján az utólagos objektív állapotértékelést végeztük.

A begyűjtött információ rendszerezése után egy olyan faértékelési szempontrendszert kerestünk, mely alkalmas csemete korú fák kondíciójának több paramétert figyelembe vevő jellemzésére. Webster (1978) munkássága során kidolgozott egy olyan besorolási eljárást, mely számításba veszi a törzs állapotát (1-5-ig értékelés, ahol 5 az egészséges, kifogástalan törzs pontszáma), a növekedési ütemet (1-3), a fa test struktúráját, teljességét (1-5), a kórokozók és betegségek meglétét (1-3), a korona és levelek fejlettségét (1-5), illetve a várható élettartamot (1-5). A magasabb érték mindig a kedvezőbb állapotot jelöli. Az így megállapított pontszámokat összesítve kondíciójukat illetően a fák az alábbi 5 kategória valamelyikébe helyezhetők: Nagyon rossz (6-9), Rossz (10-13), Elfogadható (14-18), Jó (19-22) és Kiváló (23-26).



2. és 3. kép. Különböző egészségi állapotú *Salix viminalis* egyedek

2.3. Az iszapminták elemkoncentrációja

A Lovász-zugi tórendszer szennyvíziszapjának elemösszetételéhez tartozó eredményeket az Investchem Kft. 2005-ben készült jelentése szolgáltatta.

2.4. Statisztikai elemzési módszerek

Az eredmények statisztikai kiértékelésére az IBM SPSS Statistics 21 programot, illetve a Microsoft Excel 2003, valamint 2007 szoftvereket vettük igénybe.

Az adatok feldolgozása során az SPSS programban kanonikus diszkriminancia-analízist, leíró táblázatot, a varianciák homogenitását elemző statisztikát, ANOVA-táblát, továbbá utólagos tesztet végeztünk.

A kanonikus diszkriminancia-analízis (CDA) arra szolgál, hogy megvizsgáljuk, az elemkoncentrációk tekintetében vannak-e területi eltérések a három töegység között. Amennyiben különbségek állnak fenn, úgy területünk pontos jellemzése céljából további statisztikákat vehetünk igénybe.

Az ANOVA-tábla elkészítése és értelmezése során egyik alapfeltevésünk, hogy a mintánkban szereplő varianciák homogének. Ennek igazolására a Levene-tesztet alkalmaztuk. A deviancia megítélésének fokmérője az elemkoncentrációk szignifikanciájának a kijelölt szignifikancia szinthez ($\alpha=0,05$) viszonyított értéke.

A varianciák különbözőségének Levene-teszttel történő igazolása után érdemes továbblépni, s megvizsgálni, hogy az ANOVA-tábla milyen mértékben támasztja alá, illetve módosítja a fent említett állításokat. A varianciák becslésének elemzése során a négyzetek várható értékeinek hányadosát vesszük úgy, hogy a csoportok közötti átlagokat osztjuk a csoporton belüli átlagokkal. Így kapjuk az F értéket, melyre szignifikanciát (p) számolva megállapítható, hogy tapasztalható-e eltérés az elemek között.

Azon elemek esetében, melyeknél az imént említett p érték szignifikáns, úgy a különbségek eredetének meghatározása céljából tanácsos utólagos (*post hoc*) analízist végezni. Ez esetünkben azt hivatott megválaszolni, hogy a kiválasztott kémiai elem adott terület iszapjában mért koncentrációja eltér-e az elem másik két területegységen észlelt koncentrációjától. A Tukey HSD-teszt így egyértelműen rávilágít a különbségek forrására.

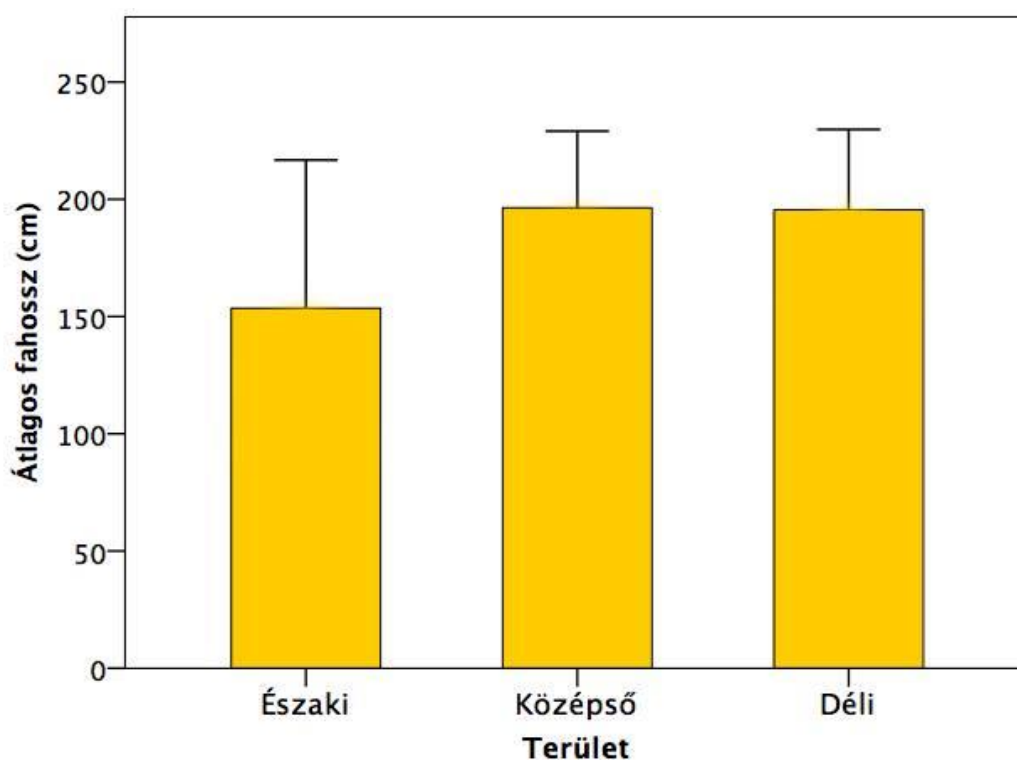
Azoknak az elemeknek az esetében, melyeknél a variancia homogenitást nem tapasztaltunk, az ANOVA helyett Kruskal-Wallis nem parametrikus tesztet alkalmaztunk az iszapminták elemösszetételére, a területek összehasonlítása céljából.

3. Eredmények

3.1. A faegyedek állapota

3.1.1. A fűzfák hosszának alakulása

A fák hosszát illető vizsgálat során elkészített statisztikai értékelés az egyedek növekedésbeli különbségeit mutatja az egyes területek között.



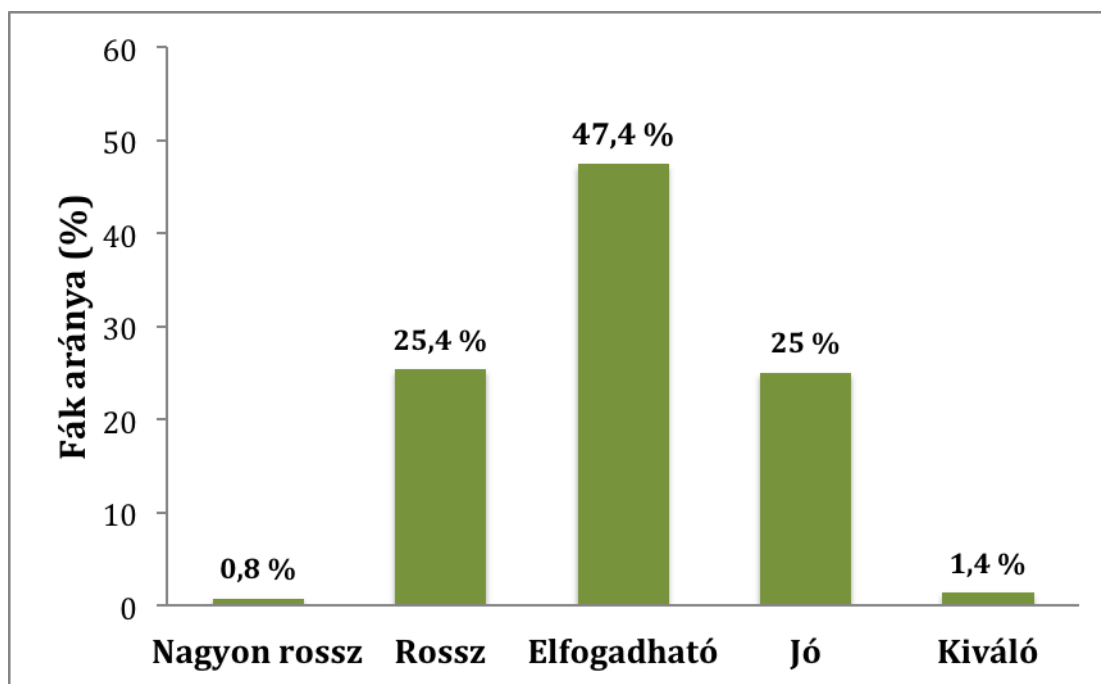
2. ábra. A fűzfák átlagos hosszának tégegyeségek szerinti változása (átlag $\pm$ szórás).

A leíró statisztika által megjelenített leglényegesebb adatok az 2. ábrán láthatóak. Az első területen felmért 500 db fűzfa átlagos hossza $153,5 \pm 63,2$ cm volt.

Ezzel szemben a második (250 db fa) és a harmadik terület (200 db fa) egymáshoz nagyon hasonló ($196,4 \pm 32,7$ és $195,5 \pm 34,3$ cm) értékekkel jellemezhető a facsemeték hossza alapján. Az ANOVA-elemzés kimutatta, hogy a fák átlagos hosszai között szignifikáns különbségek ($p < 0,050$) vannak az egyes területek között. A Tukey-teszt pedig megerősítette a 2. ábra alapján tett megállapításainkat, miszerint az első és a második töegység egyedeinek átlaghossza között szignifikáns eltérés ($p = 0,000$) tapasztalható, míg a második és harmadik terület között szignifikáns különbség nem található ($p = 0,983$).

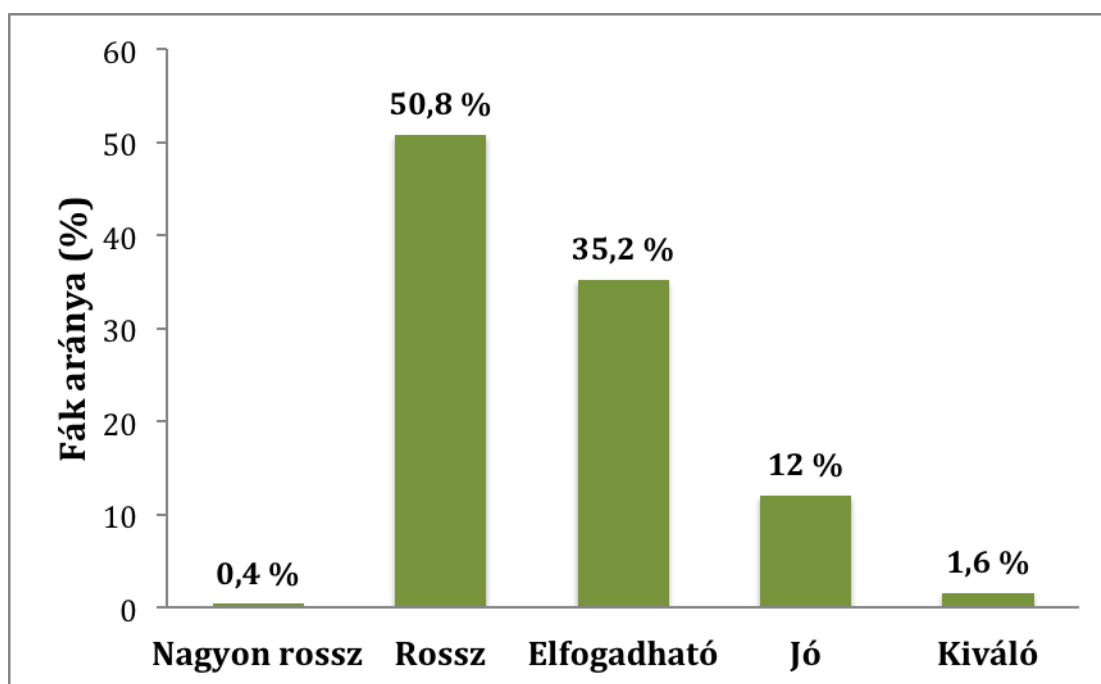
3.1.2. A fűzfák egészségi állapota

Az összesen telepített 5800 db fűzfa közül 950 egyed kondícióját rögzítettük, illetve kategorizáltuk az előbbieken említett szempontrendszer szerint (3-5. ábra).



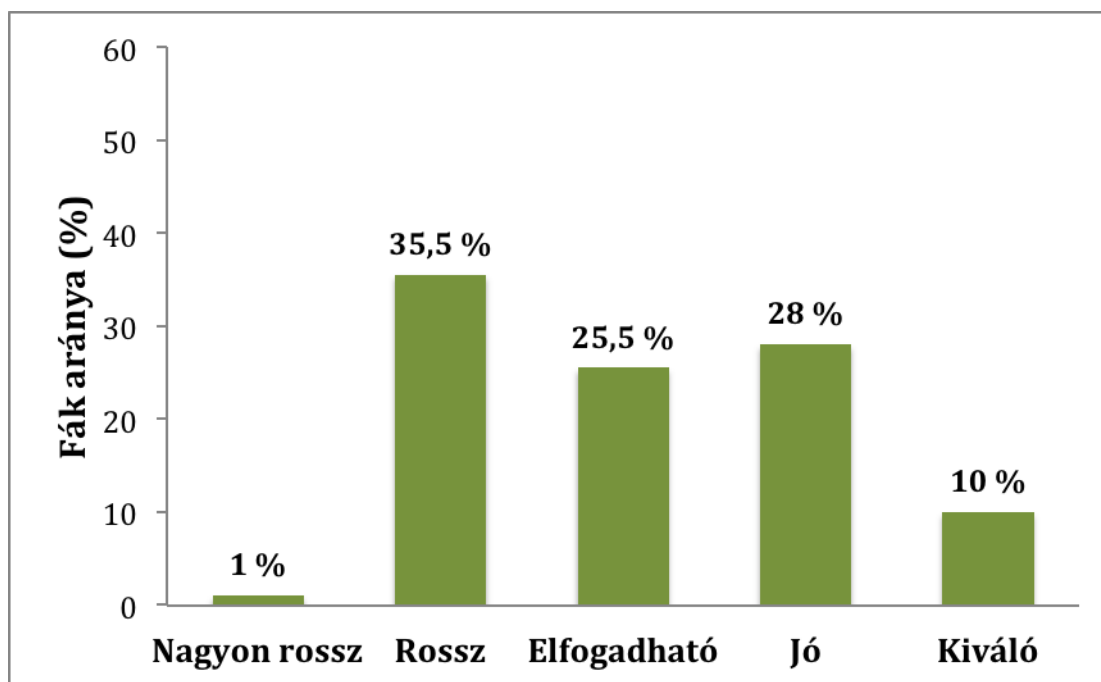
3. ábra. Az északi területegységen felmért fűzfák egészségi állapota

Az északi egységben – a 2014 nyarán végzett felmérés szerint – a vizsgálat részét képező 500 egyed 0,8 %-a, azaz 4 db *nagyon rossz* állapotú. A fák némileg több, mint negyedét (127 db fa) *rossznak*, míg közel felét, 237 példányt *elfogadhatónak* határoztuk. Átlagosan minden negyedik fa *jó* egészségi állapotban van, s mindössze 7 fa érdemelt *kiváló* minősítést. Az értékeket összesítve kijelenthető, hogy az északi töegység egy átlagos egyedét 16,23-as pontszámmal az *elfogadható* besorolás illeti (3. ábra).



4. ábra. A középső területegységen felmért fűzfák egészségi állapota

A középső részen vizsgált fa-csemeték csupán egyetlen egyede tartozik a leggyengébb kategóriába. Az ennél egy fokozattal kedvezőbb, *rossz* besorolást azonban a 250 növény felét is meghaladó, 127 db fűz kapott. Ezt követően, a minőségi javulással az egyes csoportokban egyre kevesebb fát jegyeztünk; közülük 88 *elfogadható*, 30 *jó*, illetve 4 *kiváló* kondíciójú. Az itt tanulmányozott fűzeknek Webster (1978) rendszere alapján átlagosan 14,56 pontot adtunk, mely az *elfogadható* szint rosszba hajló felét jelenti (4. ábra).

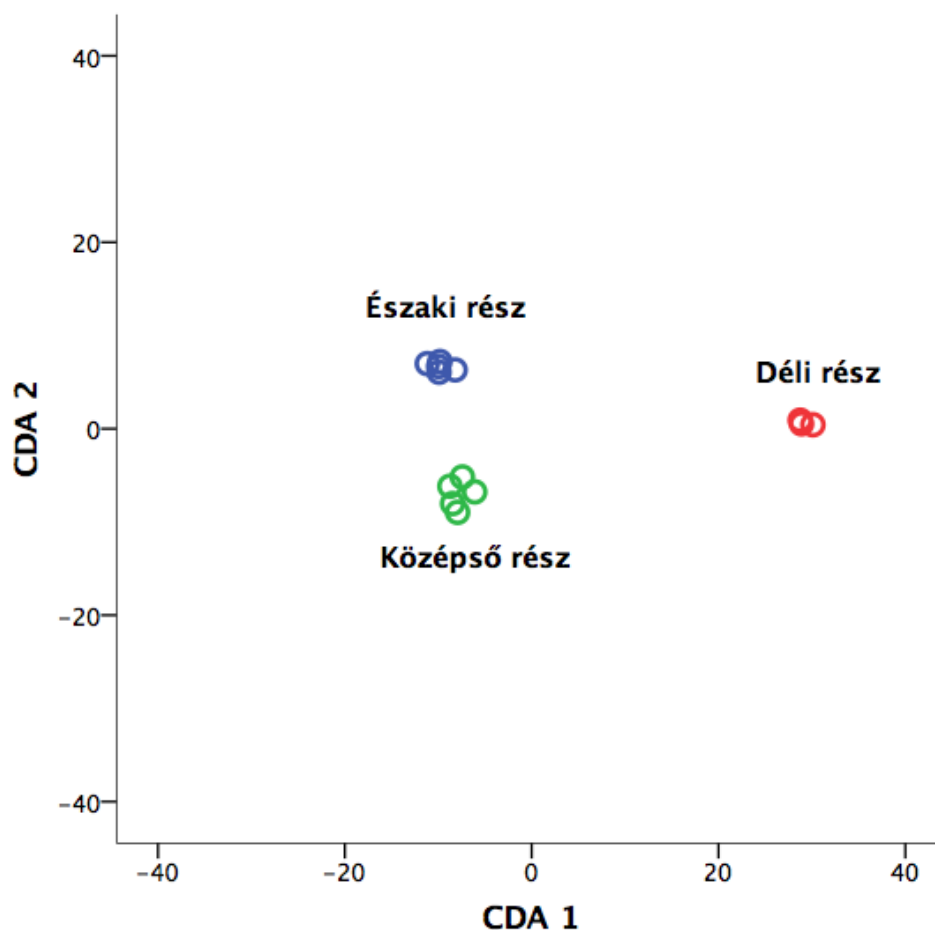


5. ábra. A déli területegységen felmért fűzfák egészségi állapota

A déli, tószzerű kialakítású szakaszon az előzőekhez hasonlóan kedvező, hogy alacsony számban és arányban képviseltetik magukat a *nagyon rossz* állapotú egyedek (2 db, 1 %). Az egyes további kategóriákba tartozó fűzek száma és eloszlása azonban jóval egyenletesebb, mint a Lovász-zugi tőrendszer előbb taglalt két egységében. A 200 fából 71 *rossz*, 51 *elfogadható*, 56 *jó*, és 20 db *kiváló* kondíciójú, mely utóbbi 10 %-kal egyenértékű részesedésével kiemelkedő jelenségnek számít. Mindez ahhoz vezet, hogy 16,55-ös átlagpontoszámával, a fás szárúak vonatkozásában ezt a területet találtuk a legjobb egészségi állapotúnak (5. ábra).

3.2. A szennyvíziszap nehézfém-tartalma

A CDA-vizsgálat egyértelműen bizonyította, hogy az északi, a középső és a déli tőegységek elemkoncentrációjuk szempontjából egymástól elkülönülnek (6. ábra).



6. ábra. Kanonikus diszkriminancia-analízis a tőegységek elemtartalmát illetően

Az ezt követő statisztikai értékelés kimutatta, hogy a 33 elem közül 19 elem (Ba, Bi, Ca, Co, Cu, Fe, Ga, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Rb, Se, Sr, Te, Tl, V) varianciája volt homogén ($p < 0,05$). Ezen eredmények tudatában a próba nullhipotézise elvetésre került, ugyanis a varianciák között szignifikáns eltérés mutatkozik. A nem homogén varianciájú elemek esetében a Kruskal-Wallis-tesztet használtuk.

Az ANOVA-tábla alapján 22 elem (Ag, As, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Tl, U, Zn) kapcsán szignifikáns ($p < 0,05$) eltérést tapasztaltunk.

3. táblázat. Az egyes kémiai elemek koncentrációinak átlagos értékei
(átlag $\pm$ szórás, szárazanyag mg kg⁻¹)

Elem	Északi terület	Középső terület	Déli terület
Ag	6,3 $\pm$ 5,7	29,0 $\pm$ 3,0	46,1 $\pm$ 9,7
Al	24228 $\pm$ 9075	38302 $\pm$ 5090	31007 $\pm$ 13724
As	26,3 $\pm$ 24,3	166 $\pm$ 34,1	114,3 $\pm$ 39,6
B	93,2 $\pm$ 44,9	105 $\pm$ 14,8	49,1 $\pm$ 28,9
Ba	176 $\pm$ 136	53,3 $\pm$ 10,8	47,4 $\pm$ 29,3
Be	0,7 $\pm$ 0,3	1,0 $\pm$ 0,03	0,8 $\pm$ 0,2
Bi	0,9 $\pm$ 1,0	5,5 $\pm$ 0,8	7,8 $\pm$ 3,5
Ca	23333 $\pm$ 14454	46562 $\pm$ 4274	36993 $\pm$ 3647
Cd	2,5 $\pm$ 3,3	8,2 $\pm$ 1,2	5,1 $\pm$ 0,9
Co	8,9 $\pm$ 3,4	15,3 $\pm$ 1,4	8,8 $\pm$ 0,8
Cr	709 $\pm$ 841	1969 $\pm$ 490	599 $\pm$ 298
Cu	122 $\pm$ 94,7	725 $\pm$ 214	625 $\pm$ 102
Fe	19920 $\pm$ 7377	32198 $\pm$ 589	22487 $\pm$ 4178
Ga	6,4 $\pm$ 3,2	12,6 $\pm$ 0,6	9,4 $\pm$ 3,3
Hg	2,0 $\pm$ 1,9	5,7 $\pm$ 0,5	4,4 $\pm$ 0,2
K	3777 $\pm$ 1669	5236 $\pm$ 298	5148 $\pm$ 882
Li	21,9 $\pm$ 8,0	26,6 $\pm$ 1,6	18,7 $\pm$ 6,5
Mg	9659 $\pm$ 5515	9954 $\pm$ 972	6496 $\pm$ 2454
Mn	389 $\pm$ 190	358 $\pm$ 24,3	375 $\pm$ 36,7
Mo	2,7 $\pm$ 0,9	15,6 $\pm$ 4,4	16 $\pm$ 3,5
Na	1224 $\pm$ 490	3319 $\pm$ 193	2347 $\pm$ 944
Ni	74,6 $\pm$ 67,2	175 $\pm$ 14,7	73,2 $\pm$ 8,4
Pb	103 $\pm$ 98,4	415 $\pm$ 76,7	196 $\pm$ 28,1
Rb	30,5 $\pm$ 18,9	55,7 $\pm$ 4,3	41,3 $\pm$ 17,8
Sb	1,6 $\pm$ 1,2	5,5 $\pm$ 0,5	5,1 $\pm$ 0,4
Se	0,3 $\pm$ 0,4	1,9 $\pm$ 0,4	1,3 $\pm$ 1,3
Sn	6,3 $\pm$ 7,3	27,5 $\pm$ 1,8	25,7 $\pm$ 3,3
Sr	119 $\pm$ 106	300 $\pm$ 20,1	198 $\pm$ 77,1
Te	0,02 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01	9,3 $\pm$ 16,0
Tl	0,1 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,02	0,1 $\pm$ 0,1
U	1,0 $\pm$ 0,9	3,5 $\pm$ 0,2	2,6 $\pm$ 0,2
V	18,7 $\pm$ 13,7	15,3 $\pm$ 8,6	41,5 $\pm$
Zn	952 $\pm$ 875	5744 $\pm$ 643	3497 $\pm$ 1028

A Tukey-teszt alapján megállapíthatjuk, hogy a vizsgált elemek koncentráció-mintázatuk szerint hat eltérő eloszlási típusba sorolhatók.

A leíró statisztika, a Tukey-teszt, illetve az átlagkoncentrációkat tartalmazó 3. táblázat együttes áttekintésekor kiderül, hogy az Ag tekintetében az egyes területek koncentrációi szignifikánsan különböznek egymástól, az értékek az északitól a déli tőegység irányába növekednek. A legnagyobb koncentrációt a déli tőegység esetében tapasztaltuk.

Az As, Bi, Cu, Mo, Na, Sb és Sn esetében az északi és középső terület között szignifikáns eltérést mutattunk ki, míg a középső és déli egység elemtartalma között szignifikáns különbséget nem tapasztaltunk. A koncentráció-maximum a további csoportokkal megegyezően a középső tőegységben jelentkezik.

A Ca, Cd, Fe, Ga, Hg, Se, illetve Sr eloszlás-mintázata az előbb felsorolt hét eleméhez igen hasonló, velük ellentétben azonban itt az északi és déli tőegység esetében szignifikáns különbséget nem tapasztaltunk.

A negyedik csoportba a Co, Cr, Ni, Pb és Tl elemek sorolhatóak. Esetükben az északi és középső, illetve a középső és déli terület között szignifikáns különbség alakult ki, míg az északi és déli szakasz p értékeit összevetve statisztikai különbségről nem beszélhetünk.

Az U tekintetében ugyancsak fennállnak az előbbi csoport jellegzetes vonásai, melyek annyiban módosulnak, hogy a koncentrációk szignifikáns eltérése nem az északi és a déli, hanem a középső és a déli terület között figyelhető meg.

A Zn esetében ugyancsak a középső terület rendelkezik a legmagasabb várható koncentráció-értékkel, mindemellett valamennyi terület elemtartalma szignifikánsan különböző.

4. Összefoglalás

A Lovász-zugi tőrendszer rehabilitációjának vizsgálata során arra kerestük a választ, hogy a területre fitoremediációs céllal telepített *Salix viminalis* L. facsemeték fejlődésük első évének végére milyen fejlődésbeli, illetve egészségi állapotban találhatók.

A helyszíni felmérés, valamint a nehézfémekkel terhelt szennyvíziszap elemanalitikai eredményeinek felhasználásával célunk volt becsléssel szolgálni arra vonatkozóan, hogy a növényi paraméterekben milyen mértékig tükröződnek az egyes tőegységek eltérő elemösszetételbeli vonásai. A terület hosszú távú hasznosításának alapfeltétele a nehézfémek koncentrációjának megfelelő szintre csökkentése. Jelen vizsgálat már a telepítés első évét követően támpontot adhat, hogy érdemes-e a remediációt a kosárfonó fűz fitostabilizációs és fitoextrakciós képességére alapozva folytatni, esetleg célravezetőbb lenne alternatív megoldást alkalmazni.

A fák állapotának felmérése 3 tőegységre tagolva történt. Az északi, középső és déli területeken vizsgált egyedek száma rendre 500, 250 és 200 db. Fatestük hosszát illetően a fűzeket az északi részen találtuk a legrövidebbnek ($153,5 \pm 63,2$ cm), míg a középső és déli szakaszon nagyobb, egymáshoz hasonló átlaghosszakat ($196,4 \pm 32,7$ és $195,5 \pm 34,3$ cm) tapasztaltunk. Egészségi állapotuk szempontjából valamennyi terület növényeinek átlagkondíciója az *elfogadható* minősítést kapta. Ezen 14 és 18 pont közé eső kategórián belül azonban a középső terület egyedeit gyengébb (14,56), míg az északi és déli egység fáit kedvezőbb (16,23 és 16,55) állapotúnak határoztuk. Az egyes területeket, különböző kondíciójú egyedeinek arányát tekintve eltérőnek tapasztaltuk. Az északi részen az eloszlás mintegy haranggörbe-szerűen az *elfogadható* kategóriánál érte el maximumát (47,4 %). A középső tőegységben az 1 db *nagyon rossz* fa mellett a növények abszolút többsége (50,8 %) *rossz* állapotú, míg a *kiváló* szint felé egyre kevesebb fajt jegyeztünk. A déli terület fűzfáinak állapota a legváltozatosabb, ahol már csupán relatív többséget (35,5 %) képviselnek a *rossz* egyedek. A *kiváló* fák korábbiakban észlelt, 1 %-ot alig meghaladó aránya itt kedvező módon 10 %-ra emelkedett.

A nehézfémek vizsgálata során 22 elem területi különbségeiben találtunk szignifikáns eltérést. A statisztikai értékelés alapján megállapítható, hogy az átlagos koncentráció-értékek ismeretében a kiválasztott elemek – az Ag kivételével – a középső területen vannak jelen a legnagyobb átlagos koncentrációban. Az egyes elemek mennyiségének tőegységek közötti eltéréseit több esetben is szignifikánsnak találtuk.

Az 50/2001. (IV.3.) Korm. rendelet ("A szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól") 5. számú melléklete értelmében szabályozott 11 elem határértékét és az egyes mintavételi pontok elemkoncentrációit a 4. táblázat foglalja magában.

4. táblázat. Az egyes iszapminták elemtartalmának koncentrációi és határértékeik
(kiemelve: határérték-túllépések, szárazanyag mg kg⁻¹)

	Északi terület					Középső terület					Déli terület			Határ- érték
	1A	3F	6F	9F	12F	13F	15F	18F	21F	24F	26F	27F	27A	
Hg	4,7	0,46	0,23	3,09	1,61	5,07	5,62	5,95	5,31	6,37	4,23	4,65	4,3	10
Cd	1,12	0,55	0,17	8,23	2,44	6,91	7,93	9,54	7,45	9,36	4,34	6,09	4,85	10
Mo	2,15	2,6	1,66	3,99	2,9	9,09	18,3	16,7	13,3	20,5	19	17,8	12,5	20
Co	4,13	10,5	6,63	12,2	11,1	15,7	14,4	15,8	17	13,4	9,46	9,17	7,88	50
As	15,1	7,44	4,04	54,2	50,9	127	198	165	139	203	157	107	78,8	75
Se	0	0	0	0,92	0,38	1,96	1,53	1,69	1,79	2,45	2,78	0,86	0,28	100
Ni	28,1	49,9	25,7	188	81,1	167	171	157	194	185	67,8	82,8	68,9	200
Pb	79,1	32,4	11,4	257	136	426	305	415	521	406	193	225	169	750
Cu	94,6	62,5	38,3	278	137	539	951	646	532	958	716	644	514	1000
Cr	213	249	67	2092	926	1680	1275	2106	2295	2488	449	943	406	1000
Zn	715	343	160	2349	1195	4817	6032	5761	5546	6565	4590	3350	2550	2500

Az északi terület mindössze egyetlen mintájában, méghozzá a Cr esetében következett be határérték-túllépés. Ezzel szemben a középső részen a Mo egy mintában, míg az As, Cr, Zn valamennyi vételi pontban meghaladja a rendeletben foglalt értéket. A déli rész három fúrásponkjában az As és a Zn koncentrációja szorul mérséklésre. Ezen megállapítások összhangban vannak az általunk elvégzett statisztikai vizsgálatok eredményeivel.

A három terület nehézfém-koncentrációinak ismeretében azt várnánk, hogy a fűzfák egészségi állapotának átlagos pontszáma a középső területen alakul a legkedvezőtlenebbül, míg a déli magasabb, az északi rész pedig még kedvezőbb pontszámokban tükrözi a kémiai elemek mérsékeltebb jelenlétét. Ezen elvárásokból kiindulva megállapíthatjuk, a legalacsonyabb átlagos kondíció-értékek valóban az egykori ülepítő középső szakaszán figyelhetőek meg, mely elsősorban a rossz fák kiugróan magas arányával magyarázható.

A másik két tőegység esetében azonban a vizsgálatok megcáfolták az előre jósolt feltevéseket. A déli részen a statisztikákban számított szennyezettség és a határértékek gyakoribb túllépése ellenére is a legkedvezőbb állapotú fűzfákat találtuk, 0,32 ponttal felülmúlva az északi tőegység átlagát. A kijelentésekből megállapítható, hogy a Lovász-zugi tőrendszerben a fák egészségi állapota és az iszap nehézfém-tartalma között egyértelmű összefüggés nem bizonyítható.

Összességében elmondható, hogy a *Salix viminalis* L. egyedek 2014 július-szeptemberi egészségi állapotuk alapján a faj fitoremediációs célú telepítése nem tekinthető eredményesnek. Természetesen, ahogyan a faj sikeres magyarországi telepítésének példája (Vashegyi et al. 2005) során, jelen esetben is szükség mutatkozna az iszapminták ismételt, illetve a fás szárúak első ízben történő elemánalitikai vizsgálatára. Mindezek alapján határozottabb kijelentést tehetnénk a Lovász-zugi tőrendszer remediációjának sikerességét illetően, valamint az eredmények tudatában meghatározásra kerülhetnének rehabilitációjának további lépései.

(Utolsó módosítás: 2015 01. 07. 20 ⁴⁵)