

A SZENNYVÍZISZAP NEHÉZFÉM-TARTALMA ÉS CSÖKKENTÉSÉNEK MÓDSZEREI

NAGY-MEZEI CSENGE – BEZSENYI ANIKÓ – GYARMATI IMRE –
KARDOS LEVENTE

Összefoglalás

A kommunális és ipari szennyvizek tisztításának nagy mennyiségben keletkező mellékterméke a szennyvíziszap, amely makro- és mikroelem-tartalmát illetően széles skálán mozoghat. A folyamat során keletkezett iszapok stabilizálásának technológiája, illetve végfelhasználása is eltérő lehet attól függően, hogy milyen minőségi és mennyiségi paramétereknek kell megfelelnie a kezelt iszapnak.

Gazdasági, illetve környezetvédelmi szempontból vizsgálva a szennyvíziszap legmegfelelőbb ártalmatlanítási módja annak trágyaként történő hasznosítása lenne, azonban egyes toxikus elemek jelenléte korlátozza a szennyvíziszap mezőgazdasági területeken történő elhelyezését, a fém-dús stabilizált iszap fokozhatja a talajok potenciálisan toxikus elem-koncentrációját. A nemkívánatos toxikus fémek szennyvíziszapból történő eltávolítására különböző technológiák állnak rendelkezésre (fizikai, kémiai és biológiai), azonban egyelőre nincs egységes direktíva az elérhető legjobb kezelési lehetőségekről. A fizikai és kémiai módszerek relatíve nagy költsége, valamint a másodlagos szennyezés kialakulásának kockázata miatt a kutatások egyre inkább a biológiai eljárások irányába nyitnak, melyek gazdasági és környezeti szempontból is kedvezőbb eljárások lehetnek a jövőben. A szennyvíziszap vermikomposztálása ígéretes módszer a fémek eltávolításában, mivel kis költségigényű, emellett nem változtatja meg negatív irányba az iszap tápanyag-összetételét.

Kulcsszavak: nehézfém, potenciálisan toxikus elem (PTE), szennyvíziszap, vermikomposztálás, talaj

JEL kód: Q29

HEAVY METAL CONTENT AND METHODS OF REDUCTION IN SEWAGE SLUDGE

Abstract

Sewage sludge is a large by-product of municipal and industrial wastewater treatment, and its composition, macro-, micro-, and trace element content can range widely. The technology and end use of the sludge produced during the process is also varied depending on the quality and quantity parameters of the treated sludge.

From an economic and environmental point of view, the most suitable disposal method for sewage sludge would be its utilization as fertilizer, however, the presence of some toxic elements limits the disposal of sewage sludge in agricultural areas. Various technologies are available for the removal of unwanted toxic metals from sewage sludge (physical, chemical and biological), but there is currently no unified directive on the best available treatment options. Due to the relatively high cost of physical and chemical methods, as well as the risk of secondary pollution, research is increasingly turning to biological processes, which may be

economically and environmentally more favorable processes in the future. Vermicomposting of sewage sludge is a promising method for the removal of metals, as it is low-cost and does not change negatively the nutrient composition of the sludge.

Keywords: *heavy metal, potentially toxic element (PTE), wastewater sludge, vermicomposting, soil*

Bevezetés

A népesség és a gazdasági aktivitás növekedésének egyik következménye az antropogén eredetű hulladékképződés exponenciális növekedése, amely csoportba a szennyvíz és a szennyvíztisztítás során keletkező szennyvíziszap is beletartozik. A szennyvíztisztító rendszerek célja a hatóságok által előírt kibocsátási paramétereknek való megfelelés mellett a szennyvíz által okozott környezeti hatások csökkentése, illetve minimalizálása (CAMARGO et al., 2016).

A potenciálisan toxikus elemek biológiailag nem bonthatóak, perzisztensek, nagyobb koncentrációban káros hatással vannak az ökoszisztémára és az emberi egészségre is (SALAMA et al., 2019). Az elmúlt években egyre átfogóbban tanulmányozzák a toxikus elemek szennyvízből és szennyvíziszapból történő eltávolításának különféle módszereit és azok hatékonyságát, mivel a toxikus elem-szennyezés napjaink egyik legsúlyosabb környezeti problémájává vált, melynek jelentős forrásai lehetnek a (főként ipari eredetű) szennyvizek (FU – WANG, 2011). Mindazonáltal a szennyvíziszapok toxikus elem-koncentrációjának határértékek alá szorításával ezt az igen nagy mennyiségben keletkező mellékterméket értékes adalékanyagként tudja hasznosítani a mezőgazdaság, javítva a talajok minőségét abszolút, illetve relatív tápanyag-ellátottságukban is.

A potenciálisan toxikus elemek (PTE) jelenléte

A „nehézfém” kifejezés egy fizikai-kémiai tulajdonságok alapján nem egyértelműen definiált csoportra utal, melybe általánosságban sűrűségük és toxikusságuk alapján sorolják be a fémeket, ennek megfelelően a „nehézfém” és a „toxikus fém” kifejezés kéz a kézben együtt jár, gyakorta alkalmazzák helytelenül egymás szinonimájaként. Általában az 5 g/cm³-nél nagyobb sűrűségű átmenetifémeket, egyes félfémeket, lantanoidákat és aktinoidákat szokás ide sorolni, azonban kisebb sűrűségű fémek (pl. alumínium), illetve nem-fémes elemek (pl. radon) is lehetnek toxikusak az élőlények számára. Ennek feloldásaként minden olyan elemet, mely káros hatást fejthet ki az élő szervezetekre, potenciálisan toxikus elemnek (PTE) nevezünk.

Környezet- és élő szervezet károsító hatása szerint a higany (Hg), az ólom (Pb), a kadmium (Cd) és az arzén (As) adja a potenciálisan toxikus elemek bázisát. Ezekon kívül egyes esszenciális elemek (pl. Cu, Zn) nagyobb koncentrációban enzimmkárosító hatásúak az élő szervezet számára, ezért a PTE-k közé szokás sorolni a réz (Cu), a cinket (Zn), a krómot (Cr), illetve a nikkelt (Ni) is (SALAMA et al., 2019; TCHOUNWOU et al., 2012).

Fontos megjegyezni, hogy a különböző élőlénycsoportok esetében más és más elemek, más és más formában és koncentrációban toxikusak, pl. a bór a növények számára mikrotápelem, az ízeltlábúak számára azonban kis mennyiségben is erősen mérgező (FODOR, 2013).

Az emberi szervezet számára esszenciális és toxikus elemeket mutatja be az 1. ábra a periódusos rendszerben.

A természetben igen változatos formában és koncentrációban fordulnak elő a toxikus elemek, nagymértékű eltérés lehet a természeti szférákban, az élő szervezetekben és az élettelen környezetben mérhető koncentrációk között (KABATA-PENDIAS, 2011). A modern kori civilizációs berendezkedés velejárója, hogy a fokozott mértékű ipari tevékenység révén egyre nagyobb mennyiségű antropogén eredetű toxikus fém-szennyeződés terheli a környezetet.

Az élővizekben és a talajban található többlet PTE-k számos forrásból származhatnak, pl. az ipari eredetű szennyvizek nem megfelelő kezelésével, a légköri kiülepedéssel, a hulladékok nem megfelelő gyűjtésével, tárolásával, lerakásával, a nehézipari (pl. kohászat) és bányászati tevékenységgel, illetve a növényvédő szerek és műtrágyák használatával (MALIK et al., 2014; SU et al., 2014; SIPOS, 2011). Természetes eredetű szennyezés is okozhatja a PTE-k nagy koncentrációját, pl. a Tiszántúl egyes területeinek rétegvizei igen gazdagok arzénban.

A talajok szennyezetté válása mellett számos tevékenység elősegíti a hasznos tápanyagok kimosódását, illetve előfordulhat, hogy a talaj tartalmazza a szükséges makro- és mikroelemeket, azonban nem felvehető formában (ezt relatív tápanyaghiánynak nevezzük). A környezeti körülmények optimumtól való eltérése okozhatja a tápanyagok felvételének nehézségét, pl. cink-hiány esetében a talaj jellemzően tartalmazza ezt az elemet, csak nem oldott, felvehető formában, illetve a foszfor felvehetősege erősen függ az optimális talajhőmérséklettől (FODOR, 2013; KALOCSAI – SCHMIDT, 2011).

2. táblázat: A PTE-k határértékei ivóvízben és az emberi szervezetre gyakorolt egészségügyi hatásai / Table 2. Limit values of PTE-s in drinking water and their health effects on the human body

| PTE-k | EPA szabályozás szerinti határérték (ppm) ivóvízre | Az emberi szervezetre kifejtett hatás |
|-----------|--|---|
| Pb | 15,00 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nagymértékben károsítja az idegrendszert, agyi károsodást, bénulást, termékenységi zavart idézhet elő ▪ A gyermekek túlzott expozíciója esetén a fejlődési zavar és csökkent intelligencia ▪ Rövid távú memóriavesztés ▪ Tanulási zavarok és koordinációs problémák ▪ Szív- és érrendszeri betegségek kockázata |
| Hg | 2,00 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tüdőgyulladást, száj-és légúti nyálkahártya-irritációt okoz, károsítja az idegrendszert ▪ Emlékezet kiesés ▪ Hajhullás ▪ Látászavar ▪ Tüdő- és veseelégtelenség ▪ Autoimmun betegségek |
| Cu | 1,30 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Agy- és vesekárosodás ▪ A megnövekedett szint májcirrózist eredményez ▪ Krónikus vérszegénység ▪ Gyomor- és bélirritáció |
| Zn | 0,50 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Szédülés és fáradtság |
| Ni | 0,20 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Allergiás bőrbetegségek ▪ A tüdő, az orr, az orrmelléküreg vagy a torok szöveteinek rákos elfajulása folyamatos belélegzés esetén ▪ Immunotoxikus, neurotoxikus, genotoxikus |
| Cd | 5,00 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Krónikus mérgezés ornyálkahártya gyulladást okoz ▪ Rákkeltő ▪ Károsítja az endokrin rendszert ▪ Tüdőkárosodás és törékeny csontok ▪ Befolyásolja a kalciumháztartás szabályozását a biológiai rendszerekben |
| Cr | 0,10 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hajhullás |
| As | 0,01 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Befolyásolja az olyan alapvető sejtanyagcserét, mint az oxidatív foszforiláció és az ATP szintézis |

Forrás / Source: SALAMA et al., 2019

Mindezek miatt kiemelten fontos a tápanyagok utánpótlásának biztosítása. A szennyvíziszapok alkalmasak lehetnek erre a célra, amihez megfelelő minőségű, a határértékeknek megfelelő iszap használata szükséges.

PTE-k okozta egészségügyi károsodások

Az élő szervezetbe bekerülő PTE-k egy része megfelelő koncentrációban mikrotápanyagként hasznosul. A PTE-k által kifejtett egészségügyi hatások igen változatosak lehetnek, több közülük nagymértékben károsítja az idegrendszert, agykárosodást idéz elő. Számos szennyező anyaggal ellentétben a PTE-k nem bomlanak le, ezért a nem hasznosuló mennyiség az élő szervezetben akkumulálódik (CAMARGO et al., 2016; de NAMOR et al., 2012).

A PTE-k különböző expozíciós útvonalakon juthatnak be a szervezetbe, ezek a belégzés, lenyelés, illetve a bőrön keresztüli bejutás. Az élő szervezetre kifejtett hatás jellege nagyban függ az expozíciós úttól és a kitettség hatóidejétől (SALAMA et al., 2019). A 2. táblázatban a leggyakrabban vizsgált PTE-k emberi szervezetre kifejtett negatív hatásait foglaltuk össze.

A szennyvizek potenciálisan toxikus elem-tartalma

A PTE-k koncentrációja széles határok között mozoghat a szennyvízben annak típusától, eredetétől, de akár évszaktól függően. A PTE-k általában a szennyvíz szárazanyag-tartalmának 0,5–4%-át teszik ki, melyek többféle formában is jelen lehetnek a pH-értéktől, a páratartalomtól vagy a szerves anyag mennyiségétől függően (CAMARGO et al., 2016; GARCÍA-DELGADO et al., 2007).

Kínában, Heilongjiang tartomány környezetében öt fém – ólom (Pb), kadmium (Cd), króm (Cr), arzén (As) és higany (Hg) – koncentrációját vizsgálták a nyers és a tisztított szennyvízben. 2015 és 2017 között havi rendszerességgel gyűjtöttek szennyvízmintákat 15 város szennyvíztisztító telepeiről (összesen 27 db). A telepekre befolyó és az onnan távozó vízben mért átlagos értékeket a 3. táblázat foglalja össze. A fémek kimutatása atomfluoreszcens spektrofotométerrel (AFS) történt (DU et al., 2020).

3. táblázat: PTE-k szennyvízben mért átlagos koncentrációja [$\mu\text{g/L}$] / Table 3. Average concentrations of PTE-s in wastewater [$\mu\text{g/L}$]

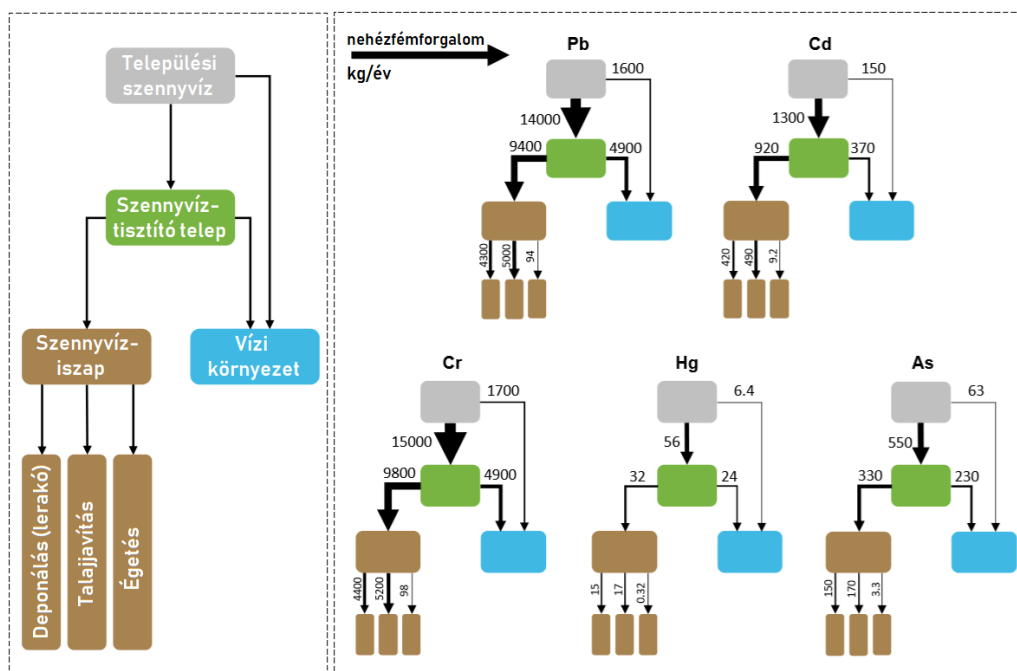
| | PTE-k szennyvízben mért átlagos koncentrációja [$\mu\text{g/L}$] | | Eltávolítási hatásfok [%] |
|-----------|--|--------------------------------|---------------------------|
| | Befolyó (nyers szennyvíz) | Elfolyó (tisztított szennyvíz) | |
| Pb | 160 \pm 100 | 45 \pm 15 | 67 \pm 9% |
| Cd | 15 \pm 9,0 | 5,2 \pm 5,1 | 64 \pm 11% |
| Cr | 170 \pm 64 | 57 \pm 13 | 64 \pm 7% |
| Hg | 0,67 \pm 1,5 | 0,28 \pm 0,12 | 50 \pm 9% |
| As | 6,2 \pm 4,8 | 2,6 \pm 1,4 | 55 \pm 9% |

Forrás: DU et al. 2020

Bebizonyították, hogy a szennyvíztisztító telepek nagyban hozzájárulnak a vízi környezetbe történő PTE-kibocsátás csökkentéséhez, a vizsgált fémek eltávolítási hatásfoka 50% és 67% között volt (DU et al., 2020).

A 27 szennyvíztisztító esetében toxikus fémekre vonatkozó anyagáram-elemzést a 2. ábra foglalja össze. Az eredmények azt mutatják, hogy jelentős mennyiségű Pb, Cd, Cr, Hg és As került ki a települési szennyvízből (rendre 15 600; 1450; 16 700; 62,4; illetve 613 kg). A szennyvíztisztító telepekre beérkező jelentős mennyiségű toxikus fémeknek két végső sorsa lehet: egy része a tisztítási fokozatokat követően is benne marad a tisztított szennyvízben, így

távozik a felszíni befogadóba (folyó, patak, tó, tenger). Nagyobbik hányada a tisztítási folyamat közben keletkező szennyvíziszapokban koncentrálódott, ezáltal lerakásra, égetésre, illetve mezőgazdasági hasznosításra összesen 9400 kg Pb, 920 kg Cd, 9800 kg Cr, 32 kg Hg, illetve 330 kg As jutott ki a szennyvíztisztító telepekről (DU et al., 2020).



2. ábra: Anyagáram-elemzés öt PTE-re (Kína, Heilongjiang tartomány 2017.) / Figure 1. Mass flow analyses of five PTE-s (China, Province Heilongjiang 2017.)

Forrás / Source: DU et al., 2020

Olaszországban lényegesen eltérő kapacitású szennyvíztisztító telepeket (befolyó szennyvíz mennyisége 4900 – 118 000 m³/nap között) vizsgálva kimutatták, hogy egyes fémek (As, Hg és Cd) csak nyomokban voltak jelen, míg mások széles koncentráció-tartományban fordultak elő a nyers szennyvízben, olykor a kimutatási határ alatt. A fémek főként a lebegőanyagokhoz kötve voltak jelen a kommunális eredetű szennyvizekben, míg az ipari forrásból érkező szennyvizek esetében gyakran az oldott forma dominált. Egyes fémek, mint például a Hg és a Pb gyakorisága erősen korrelál az Al és a Fe jelenlétével (CARLETTI et al., 2008).

A szennyvíziszap PTE-tartalma, alkalmazhatósága a mezőgazdaságban

A szennyvíziszap a szennyvíztisztítás mellékterméke, mely a szennyvíztisztítási technológia több pontján képződik. A primer iszap az előülepítőből elvett ülepíthető szerves anyag, a szekunder iszap pedig az utóülepítőben leválasztott eleveniszap (mikrobiális biomassza). Tercier iszap származhat a harmadik tisztítási fokozat fizikai-kémiai kezeléseiből, mint pl. kicsapás fém-sókkal vagy kalcium-oxiddal. Az iszapkezelés jelenlegi műszaki színvonalán alapvető szempont hogy a szennyvíziszap megfelelő hatékonyságú stabilizálási eljáráson (fizikai, kémiai, biológiai) essen át, amely során a szerves, vagy szagot okozó szilárd anyaghányad szagmentes végtermékké alakul, valamint csökken a patogén baktériumok száma. Az iszapkezelés végtermékeként keletkező stabilizált szennyvíziszap mennyisége igen jelentős, becslések szerint hazánkban évente körülbelül 240 ezer tonna száraz iszaptömeg képződik (BIOPSOL, 2022). A stabilizált szennyvíziszapok számos pozitív tulajdonsággal rendelkeznek. Nagy szervesanyag-tartalmuk, jelentős mikro-, makro- és nyomelem tartalmuk révén mezőgazdasági hasznosításuk előnyös lehet, azonban toxikus fémeket, illetve potenciálisan

veszélyes kórokozókat is tartalmazhatnak. A 4. táblázat öt kommunális szennyvíztisztító telepen (Dél-Spanyolország, Sevilla) keletkezett négyféle iszap (primer, szekunder, rothasztott-víztelenített és komposztált iszap) átlagos fém-tartalmát összesíti (ALVAREZ et al., 2002; CAMARGO et al., 2016).

4. táblázat: PTE-k összkoncentrációja a szennyvíztisztító telepeken keletkező iszapokban [mg/kg SZA] / Table 4. Total concentration of PTE-s in sludge produced at wastewater treatment plants [mg/kg DM]

| | Primer iszap | Szekunder iszap | Rothasztott, víztelenített iszap | Komposzt |
|----------------------|--------------|-----------------|----------------------------------|-----------|
| Víztartalom [%] | 88,4–97,4 | 95,7–98,5 | 64,3–82,5 | 44,2–48,9 |
| Szervetlen anyag [%] | 29,7–52,6 | 17,7–37,3 | 38,4–65,9 | 62,5–76,1 |
| Szerves anyag [%] | 47,4–70,3 | 62,7–82,3 | 34,1–61,6 | 23,9–37,5 |
| Cd | 1,89–6,03 | 1,68–4,44 | 2,37–9,20 | 3,30–5,09 |
| Cu | 131–256 | 145–278 | 204–326 | 298–406 |
| Cr | 36,1–239 | 23,2–245 | 54,4–439 | 161–351 |
| Hg | <DL | <DL | <DL | <DL |
| Ni | 14,3–21,7 | 9,80–18,2 | 23,2–36,5 | 28,0–31,9 |
| Pb | 72,5–222 | 47,2–142 | 179–223 | 188–203 |
| Zn | 633–997 | 519–883 | 930–1636 | 1503–2469 |

Forrás / Source: ALVAREZ et al., 2002

5. táblázat: Szennyvíziszapban és szennyvíziszap komposztban megengedett mérgező elemek és káros anyagok határértékei mezőgazdasági felhasználás esetén / Table 5. Limit values of toxic elements and harmful substances allowed in sewage sludge and sewage sludge compost for agricultural use

| Paraméter | Szennyvíziszap határérték | Szennyvíziszap komposzt határérték |
|-----------|---------------------------|------------------------------------|
| | [mg/kg SZA] | [mg/kg SZA] |
| As | 75 | 25 |
| Cd | 10 | 5 |
| Co | 50 | 50 |
| Σ Cr | 1000 | 350 |
| Cr VI. | 1 | 1 |
| Cu | 1000 | 750 |
| Hg | 10 | 5 |
| Mo | 20 | 10 |
| Ni | 200 | 100 |
| Pb | 750 | 400 |
| Se | 100 | 50 |
| Zn | 2500 | 2000 |

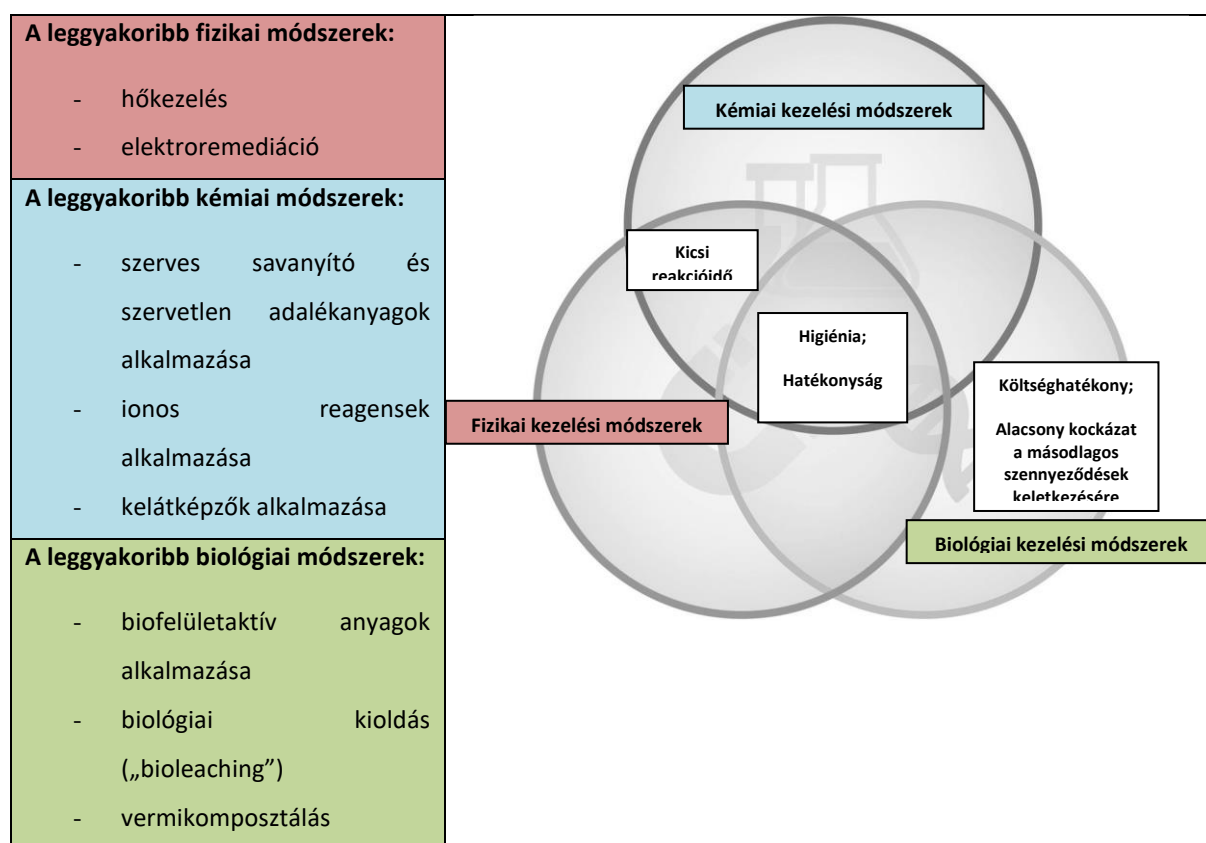
Forrás / Source: 50/2001. (IV. 3.) Korm. rendelet

A szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályait a hazai jogszabályozás az 50/2001. (IV. 3.) Korm. rendeletben foglalja össze. A rendelet 5. sz. melléklete tartalmazza a mezőgazdasági hasznosításra szánt szennyvíziszapban és a szennyvíziszap komposztban megengedett mérgező elemek és káros anyagok határértékeit (5. táblázat).

Azon szennyvíziszapok esetében, amelyek a határérték kritériumoknak nem felelnek meg, mentesítési eljárást kell alkalmazni, ennek hiányában mezőgazdasági alkalmazásuk nem megengedett.

A szennyvíziszap PTE-tartalmának csökkentése - módszerek

A szennyvíziszap PTE-tartalmának minél hatékonyabb csökkentésére számos technológia létezik, ezek közül több egyelőre csak kísérleti körülmények között bizonyította hatékonyságát. Néhány fizikai, kémiai, illetve biológiai módszert és azok egymáshoz viszonyulását foglalja össze a 3. ábra:



3. ábra: A szennyvíziszapból történő PTE-eltávolítás módszerei / Figure 2. Methods of PTE-removal from sewage sludge

Forrás Source: CAMARGO et al., 2016

Fizikai módszerek: hőkezelés és elektroremediáció

A **hőkezelés** egy elterjedt, hatékony fizikai módszer. Az iszapot 300–400°C-on kezelik, melynek következtében egyes fémek mobilitása megváltozik, ezáltal könnyebben eltávolíthatók az adott közegből. A hőkezelés rövidebb reakcióidőt igényel, 1 óra alatt 94, illetve 97%-os hatásfokkal távolítható el a szennyvíziszap Cd- és Cu-tartalma. A módszer hátránya a nagy energia- és térigénye, illetve fennáll a hőszennyezés veszélye is. Az

elektroremediáció egy új, ez idáig laboratóriumi körülmények között vizsgált módszer. Elve, hogy kis erősségű elektromos áramot vezetnek közvetlenül a szennyvíziszapba (az iszapba vezetett elektródokra potenciált kapcsolnak). Ily módon a szennyezők ionizálódhatnak, mineralizálódhatnak és mobilizálódhatnak, ami megkönnyíti eltávolításukat. A módszer egyik előnye a rövid expozíciós idő (általában órákban mérhető). (CAMARGO et al., 2016; ELICKER et al., 2014; SHI et al., 2013)

Kémiai módszerek: savanyítás, ionos reagensek és kelátképzők alkalmazása

Savanyítás esetében szerves és szervetlen savakat alkalmaznak a fémek eltávolítására, mely a közeg pH-értékének és a fémek mobilizációja közötti összefüggésen alapul. A módszer ultrahang alkalmazásával intenzifikálható. **Ionos reagensek** alkalmazásakor a nemkívánatos fémionokat helyettesítik egyéb, nem szennyező anyagokkal. **Kelátképzők** alkalmazása esetén fémiont tartalmazó szerves vegyületet (kelátképző) alkalmaznak a fémek eltávolítására. Vizsgálták az etilén-diamin-tetraecetsav (EDTA), a nitrilo-triacetsav (NTA) és az N,N-bisz(karboximetil)-L-glutamát (GLDA) hatásait. Utóbbi biológiailag bontható, ennél fogva környezetbarát alternatíva lehet a többi kelátképzőhöz képest. A kémiai módszerek előnye nagyfokú hatékonyságuk és egyszerűségük, valamint a kisebb reakcióidő. Hátrányuk, hogy költséges módszerek, illetve fennáll másodlagos szennyezés kockázata. (CAMARGO et al., 2016; DENG et al., 2009; FUERHACKER et al., 2012; WU et al., 2015)

Biológiai módszerek: biofelületaktív anyagok alkalmazása, bioleaching és vermikomposztálás

A fizikai és kémiai kezelések nagy költsége, valamint a másodlagos szennyezés veszélye miatt a kutatások egyre inkább a biológiai eljárások irányába mozdultak el, melyek gazdasági és környezeti szempontból is kedvezőbb eljárásoknak számítanak. A természetes eredetű, mikroorganizmusok által extracellulárisan (sejten kívülre) termelt biofelületaktív anyagok, melyek kölcsönhatásba lépnek az egyébként rosszul oldódó szennyeződésekkel és vizes fázisba viszik azokat. Ez a folyamat a fémek eltávolítását is lehetővé teszi. A biológiai kioldás („**bioleaching**”) során a mangán és vasoxidáló mikroorganizmusok anyagcsere-aktivitása által kiváltott katalitikus hatást használják ki, melynek eredményeként megváltozik a fémek mobilitása. Ezt a módszert szennyvíziszapban, folyami kotrásos üledékekben és talajban is tanulmányozták. Ez a technika ígéretesnek bizonyult, mivel egyszerű, hatékony, gazdaságosan működtethető és nem veszélyezteti az iszap hasznos sajátosságait (talajkondicionáló, műtrágya jelleg). A **vermikomposztálás** nem más, mint a fémek élő szervezetek segítségével történő bioakkumulációja. A földigiliszták a vermikomposztálás során lenyelik, majd gazdag bélflórájuk közreműködésével megemésztik a hulladékot, ez után a külvilágba ürítik az immár nedvesített, homogén és szennyezőanyagokban szegény székletüket. A *L. rubellus* fajjal végzett kísérletek során 20%-ban szennyvíziszapot és 80%-ban gombatrágyát tartalmazó keveréket alkalmaztak. A toxikus fémek eltávolításában 88%-os (Cu), 81%-os (Cr) és maximum 97%-os (Pb) hatékonyságot mutattak ki. A szükséges expozíciós idő igen hosszú volt, elérte a 105 napot. A vermikomposztálás nagy potenciállal rendelkezik a fémek eltávolításában, mivel kis költségigényű, illetve nem változtatja meg negatív irányba a szubsztrát tápanyag-összetételét. Hátránya a hosszú expozíciós idő (70-90 nap). Azzal kapcsolatban további kutatások szükségesek, hogy a toxikus fémeket akkumuláló giliszták sorsa mi lehet a vermikomposztálás folyamata után. (AZIZI et al., 2013; CAMARGO et al., 2016; YANG et al., 2016)

Az 6. táblázatban a fent említett módszerek potenciálisan toxikus fémek eltávolítási hatásfokát foglaljuk össze.

6. táblázat: Fizikai, kémiai és biológiai módszerek összehasonlítása az elérhető eltávolítási hatások alapján / Table 6. Comparison of physical, chemical and biological methods based on the achievable removal efficiency

| Módszer | Reakcióidő | Fémek eltávolítási hatásfoka a szennyvíziszapból [%] | | | | | |
|-------------------------------------|------------|--|-----|-----|----|-----|-----|
| | | Zn | Ni | Cd | Cu | Cr | Pb |
| Hőkezelés | 1 óra | 86 | 72 | 94 | 97 | 74 | 11 |
| Elektro-remediáció | 40 óra | 68 | - | - | 55 | 55 | 72 |
| Savasítás | 20 perc | 82 | - | - | 9 | - | 87 |
| Ionos reagensek alkalmazása | 24 óra | >90 | >90 | >85 | 90 | >90 | >85 |
| Kelátképzők alkalmazása | 72 óra | 32 | 82 | 89 | 84 | - | - |
| Biofelületaktív anyagok alkalmazása | 5 nap | 44 | - | 38 | 24 | - | 32 |
| Biológiai kioldás | 8 nap | 99 | 84 | - | 74 | 65 | 58 |
| Vermikomposztálás | 105 nap | - | - | 37 | 88 | 81 | 97 |

Forrás / Source: CAMARGO et al., 2016

Összefoglalás

A stabilizált szennyvíziszap tápanyag-tartalma jelentős forrást jelenthet a talajok minőségének javításában. Gazdasági, illetve környezetvédelmi szempontból a szennyvíziszap legmegfelelőbb hasznosítási módja annak trágyaként történő alkalmazása lenne, azonban potenciálisan toxikus elem (PTE)-tartalma széles skálán mozoghat (hasonlóan a szennyvíztisztító telepekre befolyó nyers szennyvíz és az onnan távozó tisztított szennyvíz PTE-tartalma is igen eltérő lehet), mely korlátozhatja annak felhasználhatóságát. A mezőgazdaságban hasznosítani kívánt szennyvíziszapnak kormányrendeletben rögzített minőségi és mennyiségi paramétereknek kell megfelelnie. A nagy fém-tartalommal rendelkező szennyvíziszapok kihelyezése fokozhatja a talajok toxikus elem-koncentrációját, a potenciálisan toxikus elemek jelentős koncentrációja pedig káros hatást fejt ki a talaj-növény rendszerre, valamint az élővizekre.

A nemkívánatos toxikus elemek szennyvíziszapból történő eltávolítására számos technológia áll rendelkezésre (fizikai, kémiai és biológiai), azonban környezetvédelmi és gazdasági megtérülésük eltérő, a másodlagos szennyeződések képződése kiemelten kezelendő. A fizikai és kémiai módszerek relatíve nagy költsége, valamint a másodlagos szennyezés kialakulásának kockázata miatt a kutatások egyre inkább a biológiai eljárások irányába nyitnak, melyek kedvezőbb eljárások lehetnek a jövőben, érdemes lehet egyre nagyobb hangsúlyt fektetni e módszerek gyenge pontjainak részletes feltárására, fejlesztésére, pl. a kezelés reakcióidejének csökkentésére. A szennyvíziszap vermikomposztálása ígéretes módszer lehet a fémek eltávolításában, mivel kis költségigényű, emellett nem változtatja meg negatív irányba az iszap tápanyag-összetételét, azonban a toxikus fémeket akkumuláló giliszták sorsáról egyelőre keveset tudunk.

Hivatkozott források

- ALVAREZ, E.A. – MOCHON, M.C. – SÁNCHEZ, J.J. – RODRÍGUEZ, M.T. (2002): Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 47(7), 765–775. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00021-8)
- AZIZI, A.B. – LIM, M.P.M. – NOOR, Z.M. – ABDULLAH, N. (2013): Vermiremoval of heavy metal in sewage sludge by utilising *Lumbricus rubellus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 90, 13–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.006>
- BIOPSOL (2022): Szennyvíziszap - Letöltés dátuma: 2022. szeptember 30., forrás: http://szennyviziszap.hu/30_szennyviziszap
- CARLETTI, G. – FATONE, F. – BOLZONELLA, D. – CECCHI, F. (2008): Occurrence and fate of heavy metals in large wastewater treatment plants treating municipal and industrial wastewaters. *Water Science and Technology*, 57(9), 1329–1336. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2008.230>
- CAMARGO, F.P. – SÉRGIO TONELLO, P. – DOS SANTOS, A.C.A. – DUARTE, I.C.S. (2016): Removal of Toxic Metals from Sewage Sludge Through Chemical, Physical, and Biological Treatments—a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3141-3>
- CULTURA-MTI (2016): Ki volt Paracelsus? *Cultura Magazin* - Letöltés dátuma: 2022. szeptember 30., forrás: <https://cultura.hu/psziche/ki-volt-paracelsus/>
- DENG, J. – FENG, X. – QIU, X. (2009): Extraction of heavy metal from sewage sludge using ultrasound-assisted nitric acid. *Chemical Engineering Journal*, 152(1), 177–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.04.031>
- DU, P. – ZHANG, L. – MA, Y. – LI, X. – WANG, Z. – MAO, K. – WANG, X. (2020): Occurrence and fate of heavy metals in municipal wastewater in Heilongjiang Province, China: a monthly reconnaissance from 2015 to 2017. *Water*, 12(3), 728. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030728>
- ELICKER, C. – SANCHES-FILHO, P.J. – CASTAGNO, R.L. (2014): Electroremediation of heavy metals in sewage sludge. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(02), 365–371. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140312s00002394>
- FODOR F. (szerk.) (2013): A növényi anyagcsere élettana. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Letöltés dátuma: 2022. szeptember 30., forrás: <https://tkk.elte.hu/dstore/document/844/book.pdf>
- FU, F. – WANG, Q. (2011): Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*, 92(3), 407–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- FUERHACKER, M. – HAILE, T.M. – KOGELNIG, D. – STOJANOVIC, A. – KEPPLER, B. (2012): Application of ionic liquids for the removal of heavy metals from wastewater and activated sludge. *Water Science & Technology*, 65(10), 1765–1773. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2012.907>
- GARCÍA-DELGADO, M. – RODRÍGUEZ-CRUZ, M.S. – LORENZO, L.F. – ARIENZO, M. – SÁNCHEZ-MARTÍN, M.J. (2007): Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludges from different wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 382(1), 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.009>

KABATA-PENDIAS, A. (2011): Trace elements in plants and soil. Fourth edition, CRC Press, Boca Raton, 548p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b10158>

KALOCSAI, R. – SCHMIDT, R. (2011): A mikroelemek növény táplálási jelentősége. UIS Ungarn Laborvizsgáló és Szolgáltató Kft, Mosonmagyaróvár 9p. Letöltés dátuma: 2022. szeptember 30., forrás: <https://docplayer.hu/2754067-A-mikroelemek-novenytoplalasi-jelentisege.html>

MALIK, A. – GROHMANN, E. – AKHTAR, R. (2014): Environmental deterioration and human health. Springer Dordrecht, 10, 978-94, 421p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7890-0>

de NAMOR A.F.D. – EL GAMOUZ A. – FRANGIE S. – MARTINEZ V. – VALIENTE L. – WEBB O.A. (2012): Turning the volume down on heavy metals using tuned diatomite. A review of diatomite and modified diatomite for the extraction of heavy metals from water. *J Hazard Mater*, 241-242, 14–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.030>

SALAMA, E.S. – ROH, H.S. – DEV, S. – KHAN, M.A. – ABOU-SHANAB, R.A. – CHANG, S.W. – JEON, B.H. (2019): Algae as a green technology for heavy metals removal from various wastewater. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(75). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2648-3>

SHI, W. – LIU, C. – DING, D. – LEI, Z. – YANG, Z. – YANG, Y. – FENG, C. – ZHANG, Z. (2013): Immobilization of heavy metals in sewage sludge by using subcritical water technology. *Bioresource Technology*, 137, 18–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.106>

SIPOS, P. (2011): Potenciálisan toxikus elemek környezetgeokémiája - Letöltés dátuma: 2022. november 10. forrás: http://eta.bibl.u-szeged.hu/4479/1/2010-0012_40_04.pdf

SU, C. – JIANG, L.Q. – ZHANG, W.J. (2014): A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 3(2), 24–38.

TCHOUNWOU, P.B. – YEDJOU, C.G. – PATLOLLA, A. – K. – SUTTON, D.J. (2012): Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology*, 133–164. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

WU, Q. – CUI, Y. – LI, Q. – SUN, J. (2015): Effective removal of heavy metals from industrial sludge with the aid of a biodegradable chelating ligand GLDA. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 748–754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.10.027>

YANG, Z. – ZHANG, Z. – CHAI, L. – WANG, Y. – LIU, Y. – XIAO, R. (2016): Bioleaching remediation of heavy metal contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90. *Journal of Hazardous Materials*, 301, 145–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.047>

50/2001. (IV. 3.) Korm. rendelet a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól. Letöltés dátuma: 2022. szeptember 20., forrás: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0100050.kor>

Szerzők

NAGY-MEZEI Csenge

levelező szerző

PhD-hallgató, technológus mérnök

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék 1118 Budapest, Villányi út 29-43.

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.

1087 Budapest, Asztalos Sándor út. 4.

pribelszkycs@fcsm.hu

BEZSENYI Anikó

biológus-mérnök, PhD-hallgató

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.

1087 Budapest, Asztalos Sándor út. 4.

Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest

bezsenyia@fcsm.hu

GYARMATI Imre

csoportvezető

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.

1087 Budapest, Asztalos Sándor út. 4.

gyarmatii@fcsm.hu

Dr. KARDOS Levente PhD

egyetemi docens, tanszékvezető

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék, 1118 Budapest, Villányi út 29-43.

kardos.levente@uni-mate.hu

A műre a Creative Commons 4.0 standard licenc alábbi típusa vonatkozik: [CC-BY-NC-ND-4.0.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

