

## A talajok fémszennyeződése ellen hatékonyan – remediációtól a fitoextrakcióig

**Tőzsér Dávid**

Debreceni Egyetem, Ökológiai Tanszék – [tozser.david@science.unideb.hu](mailto:tozser.david@science.unideb.hu)

A talajokat érintő szennyeződések, ezeken belül a fémterhelések környezeti kockázatának csökkentésére különféle ártalmatlanítási, azaz remediációs eljárások kerültek kifejlesztésre. Az egyéb környezeti elemekkel, például élő szervezetekkel és víztestekkel való érintkezésének és ökológiai funkciói sokrétűségének okán a talajszennyezés elhárítása komplex szemléletet kíván. A legmegfelelőbb remediációs eljárás kiválasztásánál a kizárólagos cél nem csupán a negatív hatások megszüntetése, hanem a talajok szennyeződés előtti szerepének és funkcióinak visszaállítása és megőrzése is. Az utóbbi időkben ez a megközelítés segítette az olyan, ún. alternatív technológiák megjelenését, mint a fitoremediáció, ezen belül a szennyezők akkumulációját célzó fitoextrakció. A módszer gyakorlati alkalmazása mellett számos érv szól, azonban nem lehetünk el szó nélkül annak valós hátrányai mellett sem. A hagyományos kármentesítési eljárásokkal szembeni versenyképesség az általánosan nagyfokú költséghatékonyság növelésével tovább fokozható, mely a fitoremediáció valós alternatívaként történő számbavételét, így szélesebb körű gyakorlati alkalmazását segítené elő.

**Kulcsszavak:** fitoremediáció, akkumuláció, transzlokáció, környezetszennyezés, kármentesítés

### Effectively against soil metal pollution – from remediation to phytoextraction

**Dávid Tőzsér**

Department of Ecology, University of Debrecen – [tozser.david@science.unideb.hu](mailto:tozser.david@science.unideb.hu)

Over the past decades the growing number of soil contaminants (e.g., metals) triggered the development of various remediation methods. When considering soil clean-up techniques, several factors must be taken into consideration due to the complexity of their ecological functions and interactions with other environmental elements, such as living organisms and water bodies. By the selection of the most adequate method, remediation is aimed not only to mitigate the degree of contamination but also to restore and conserve soil condition prior to the adverse impact. This approach supported the emergence of certain alternative techniques such as phytoremediation. As a generic term for plant-based remediation, phytoremediation offers a broad range of tools to cope with contamination. Among these, phytoextraction is the most studied approach. Application of phytoextraction offers several benefits, however, in a thorough evaluation, drawbacks should also be lined up. In comparison to conventional remediation methods, competitiveness of phytoremediation can be further facilitated by the increase in cost-efficiency, which would improve the support of decision makers, enabling a more extensive practical implementation.

**Keywords:** phytoremediation, accumulation, translocation, environmental contamination, remediation

A környezetünket terhelő szennyeződések az utóbbi néhány évszázad során egyre nagyobb nyomást jelentenek az élő és élettelen környezeti alkotókra. A szennyeződések csoportosítása – sokféleiségükhöz igazodóan – szempont szerint történhet. A klasszikus felosztások (pl. fizikai és kémiai anyagi jellemzők) mellett a szakirodalomban gyakran alkalmazzák azonosítást, melyben a szennyeződések egyik típusát a természetes, azaz vi-

szonylagosan bolygatatlan állapotban meglévő alkotók (pl. alumínium, cink) koncentrációjának növekedése, míg másik csoportját az ilyen módon elő nem forduló elemek és vegyületek megjelenése és feldúsulása jelenti [Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007].

A talajok elszennyeződése, köztük a fémek okozta környezeti stressz, több szempontból is különösen nagy kockázatot rejt [Yang *et al.*, 2018]. A talajok termőközegei a természetes előfordulásuk révén tenyésző és a mezőgazdasági (élelmezési) célzattal termesztett növényeknek. A szennyezőanyagok a táplálék, mint közvetítő anyag segítségével bejuthatnak az élő szervezetbe, ahol a különböző biokémiai reakciók és anyagcsere-folyamatok révén a szennyezőanyag típusától és koncentrációjától függően reakciópartnerek lehetnek, illetve átalakulásokon mehetnek keresztül [Wuana és Okieimen, 2011]. A hatásmechanizmus eredménye a természetes élettani folyamatok fokozása, gátlása vagy megszüntetése lehet. Az előbbieken túl a talajok a (fém)szennyeződés univerzális érintkezési felületeként is felfoghatók, azaz a talajokat a szennyeződések transzportjának közbülső- vagy végállomásaként is értelmezhetjük; a légkörből száraz vagy nedves ülepedés útján, a felszín alatti vizekkel érintkezve közvetlenül, míg a felszíni vizekből szintén közvetlenül vagy légköri folyamatok közreműködésével jöhet létre az érintkezés. A környezeti elemek ezen összekapcsoltsága a szennyezőanyagok hatókörét nagyban kiszélesíti, mely jelenség komplex gondolkodást igényel a kármentesítés tervezésekor [Khan *et al.*, 2004].

Az alábbiakban a környezeti kármentesítés lehetőségeit a talaj fémszennyezettségének csökkentési lehetőségein keresztül tekintjük át. Ezek közül kitüntetett figyelmet szentelünk az

alternatív technológiák egy sokrétű, az utóbbi időkben dinamikusan fejlődő csoportjának, a fitoremediációnak, azon belül is a fémek akkumulációját célzó fitoextrakciónak. A célunk az, hogy megismerjük a módszerek főbb ismérveit, illetve a megvalósíthatóság (esetenként nyitott) kérdéseire válaszokkal szolgáljunk.

### **A talajok szennyezettségének csökkentése – remediáció**

Kétségtelen, hogy környezeti, társadalmi és gazdasági részről egyaránt az lenne az ideális, ha a környezeti elemek elszennyeződésének kialakulását meg tudnánk előzni. Azokban az esetekben azonban, amikor erre nincs lehetőség vagy törekvés, az érintettek kénytelenek a minden szempontból körülményesebb és költségesebb kármentesítési eljárások eszköztárából meríteni.

A szennyezőanyagokat célzó, környezeti kockázatot csökkentő technológiák körét összefoglalóan remediációs eljárásoknak nevezzük. A terminológia a *remedium* (orvosság) latin kifejezésen alapszik, s magában foglalja mindazon technológiákat, melyek a terhelt közeg (esetünkben talajok) szennyezettségének mértékét a jogszabályok által előírt határértékek alá, ökológiailag elfogadható szintre mérsékelik. A szennyezett közeg ártalmatlanítása történhet helyben (*in situ*) vagy kitermelési/begyűjtési helyétől távol (*ex situ*) [Khalid *et al.*, 2016].

A szennyezőanyagok sokasága az elmúlt évtizedek során számos kármentesítési eljárás kidolgozását tette szükségessé, melyek részleteibe menő ismertetésére nagy számban állnak rendelkezésre publikációk [Mulligan *et al.*, 2001; Yeung, 2010]. Ezek alapján arra a megállapításra juthatunk, hogy a remediációs eljárások bemutatásakor az egyes szerzők nagyon eltérő

megközelítéseket alkalmaznak. Ugyan az osztályozási lehetőségek kategorizálása nem tartozik jelen tanulmány célkitűzései közé, érdemes kiemelni azon főbb eljárásokat, melyeket az egyes tanulmányok jelentős hányada külön alcsoportként említ. Ezek alapján az alábbi kármentesítési megoldásokról beszélhetünk: **(i)** izoláció és zárványképzés; **(ii)** mechanikai elválasztás, **(iii)** termikus eljárások, **(iv)** kémiai eljárások, **(v)** permeábilis reaktív gát (talajvíz), **(vi)** elektrokinetikus eljárások, **(vii)** talajmosás, **(viii)** biológiai/biokémiai eljárások és **(ix)** fitoremediáció (Mulligan *et al.*, 2001; Kuppusamy *et al.*, 2016). Ez utóbbi felosztás mellett közismert az az egyszerű csoportosítás is, mely a remediációs módszereket a környezetkímélőbb megoldások iránti fokozódó igény nyomán hagyományos (fizikai és kémiai) és alternatív (biológiai) technológiák szerint tagolja.

### **Az élő organizmusok szerepe a kármentesítésben – bioremediáció**

Az alternatív remediációs eljárások körét jó közelítéssel azonosíthatjuk a bioremediáció által felkínált lehetőségek széles spektrumával. A módszeregyüttes során természetesen előforduló vagy mesterségesen bejuttatott (inokulált) organizmusok irányított alkalmazására kerül sor. Ezek a szennyezett közegben (talaj, víz) élettevékenységeik, anyagcsere folyamataik révén képesek átalakítani, lebontani (mineralizálni) a szennyezőket, melynek nyomán az elem/vegyület a környezetre kevésbé ártalmas formába kerül (detoxifikáció). A folyamatot az előbb említett mechanizmusok figyelembevételével biodegradációnak is nevezik [Ojuederie és Babalola, 2017]. Jellegükből adódóan néhány szennyezőanyag-csoport (pl. nehézfémek) nem alkalmas biodegradáció révén történő ártalmatlanításra; az elsődleges célve-

gyületeket a (klórozott) szénhidrogének és más, a mezőgazdaságban alkalmazott vegyszerek jelentik. A bioremediáció tárgykörében készített tanulmányok a kifejezést általában a mikrobiális szervezetek általi remediációs folyamatokkal azonosítják. Ugyan a szennyeződések ártalmatlanításában a mikroorganizmusok remediációs szerepe elvitathatatlan, hatékony működésükhöz nélkülözhetetlen bizonyos abiotikus (hőmérséklet, pH stb.) és biotikus (interakciók, antropogén beavatkozás stb.) tényezők optimuma is [Megharaj és Naidu, 2017].

A remediációs technológiák sokféleségéhez hasonlóan a talaj-bioremediáció esetében is a módszeregyüttes számos altípusa ismert. A csoportosítás kiinduló pontjaként legcélszerűbb az eljárás megvalósításának helyét alapul venni (**1. ábra**).

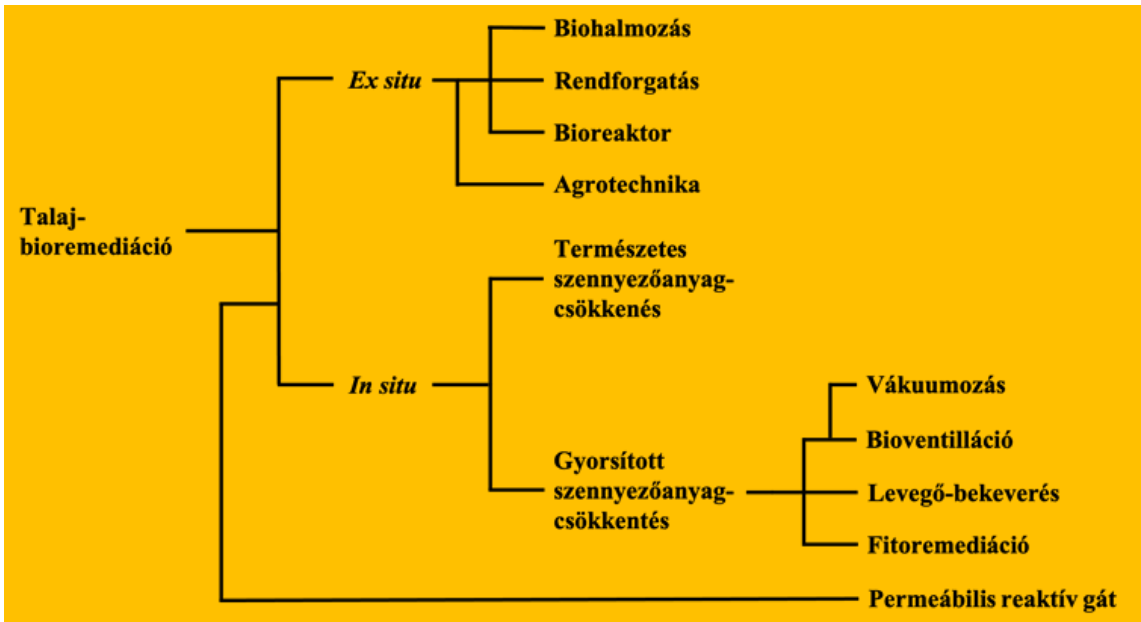
A módszerek megnevezésére a nemzetközi szakirodalomban tömör és egyértelmű terminológia alakult ki, melyek a hazai szaknyelvi szóhasználatba az **1. ábrán** látható kifejezések meghonosításával kerültek. A szennyeződés helyétől távol (*ex situ*) történő kármentesítés egyik módja a szennyezett talaj felhalmozása, kiegészítve a szennyezőanyag biokémiai átalakulásának/lebontásának oxigén- és tápanyag-bejuttatás általi serkentésével (biohalmozás). Az előbbi eljárás esetében további határfok-javulás érhető el a kezelendő talaj rendszeres átforgatásával, ezáltal többlet oxigént biztosítva (rendforgatás). A szennyezők ártalmatlanítása a technológiai igényekhez igazodó méretű ún. reaktorterekben is megvalósítható, melyben az átalakulást befolyásoló szinte valamennyi tényező szabályozható (bioreaktor). A szennyeződés helyétől távol és helyben (*in situ*) végezve egyaránt bevett gyakorlat a szennyezett talajon mezőgazdasági művelési mód-

szerek (szántás, öntözés, tápanyag-utánpótlás) alkalmazása, a biodegradációs folyamatok fenntartása érdekében (agrotechnika) [Azubuiké *et al.*, 2016].

A helyben történő remediáció során hagyatkozhatunk egyrészt a természetes (kontrollálatlan) folyamatok lezajlására (természetes szennyezőanyag-csökkenés), másrészt elősegíthetjük a bioremediációt kontrollált-intenzifikált körülmények kialakításával (gyorsított szennyezőanyag-csökkentés). Utóbbi esetben hatékony módszer a mikrobiális aktivitás fokozása a telítetlen zóna oxigénnel való dúsítása által (bioventilláció), szükség esetén társítva a talajnedvesség eltávolításával (vákuumozás). Az oxigén telített zónába juttatásával a szennyezőanyagok vertikális mozgása is elősegíthető, mely illékony szerves szennyezők esetén gyorsítja a detoxifikációt (levegő-

bekeverés). Egy további, a remediációs technológiáknál már említett megoldás lehet szennyezett talajvíz ártalmatlanítására permeábilis reaktív gát telepítése, melynek hatásfoka mikroorganizmusok reaktív felületre juttatásával jelentősen fokozható [Azubuiké *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018].

Mint láttuk, a bioremediáció ismertetésekor nem elegendő csupán a mikroorganizmusok élettevékenységeinek sajátosságait figyelembe vennünk, sokkal inkább érdemes egy olyan komplex megközelítést alkalmaznunk, mely mérlegeli a befolyásoló abiotikus és biotikus tényezők működését, kiegészülve egyes esetekben a hagyományos remediációs technológiák, vagy akár további, biológiai vonatkozású (növényi) eljárások bevonásával [Perei és mtsai, 2013].



**1.ábra:** A talajok bioremediációjának főbb lehetőségei [Azubuiké *et al.*, 2016 nyomán]

## A növényekre alapozott környezet-helyreállítás – fitoremediáció

A környezet szennyezettségének csökkentése érdekében, a potenciálisan alkalmazható technológiák között egyre gyakrabban kerül mérlegelésre a fitoremediáció [Máthéné Gáspár és Anton, 2004]. A módszer csoport létjogosultságát az a megfigyelés adja, hogy a magasabb rendű növények természetes élettevékenységeik révén, – fajoként és a befolyásoló tényezők függvényében jelentősen eltérő mér-

tékben –, képesek csökkenteni az adott szennyezőanyag(ok) környezeti kockázatát [Marques *et al.*, 2009]. Az erre a növényi képességre épülő remediációs megoldások igen változatosak lehetnek. A növényéletteni folyamatok, illetve a szennyezőanyagok további sorsa alapján lehetőség nyílik a fitoremediáció altechnológiák szerinti felosztására (**1. táblázat**). Az alábbiakban részletesebben a fitoremediáció szakirodalomban leggyakrabban tárgyalt altípusát, a fitoextrakciót vizsgáljuk.

Altípus	Fő folyamat(ok)	Kezelhető közeg(ek)	Szennyező-anyag típusa	Szennyező-anyag és származékainak lokalizációja a folyamat végén
<i>Fitoextrakció</i>	akkumuláció, transzlokáció	talaj (üledék), felszíni víz, felszín alatti víz, szennyvíz	szerves anyagok, szervesetlen anyagok	növényi szervek
<i>Fitostabilizáció</i>	akkumuláció, adszorpció, abszorpció, stabilizáció	talaj (üledék), felszín alatti víz	szerves anyagok, szervesetlen anyagok	talaj, gyökerek
<i>Fitovolatizáció</i>	akkumuláció, transzlokáció, volatizáció	talaj (üledék), felszín alatti víz	arzén, higany, szelén, szerves anyagok	léggör
<i>Fitodegradáció</i>	akkumuláció, degradáció	talaj (üledék), felszíni víz, felszín alatti víz, szennyvíz	szerves anyagok, peszticidek	víz, talaj, léggör, növényi szervek
<i>Fito(rizo)filtráció</i>	immobilizáció; adszorpció, abszorpció, kicsapódás	felszíni víz, felszín alatti víz, szennyvíz	szervesetlen anyagok	gyökerek

**1. táblázat:** A fitoremediáció eszköztára [Cunningham és Ow, 1996 és Simon, 2004]

## A szennyezőanyagok növényi akkumulációja – fitoextrakció

A növényekben rejlő remediációs potenciál kiaknázása kísérleti és üzemi alkalmazási jelleggel elsősorban a *fitoextrakció* révén valósul meg. Ennek során a növények gyökereiken, a tápanyagok felvételére szolgáló csatornákon keresztül veszik fel a szennyező-

anyagokat, melyek talajok esetében leggyakrabban (nehéz)fémek [Dickinson *et al.*, 2009]. A felvételt követően a szennyezők a növényen belül áthelyeződhetnek (transzlokáció), s az egyes növényi szervekben eltérő koncentrációkban felhalmozódhatnak. A szennyezők felvételének külső (ember általi) befolyásoltsága szerint a fitoextrak-

ció lehet **(a)** folyamatos vagy **(b)** indukált [Simon, 2004; Bosiacki *et al.*, 2014]:

**(a) Folyamatos fitoextrakció** – Annak függvényében, hogy az adott növény faji sajátosságai alapján milyen mértékű fémakkumulációra és transzlokációra képes, eltérő növényi stratégiákat különböztetünk meg; beszélhetünk kizáró, indikátor és hiperakkumulátor fajokról. A kizáró növényfajok a szennyezők kis mértékű felvételére képesek, s ezen anyagokat elsősorban gyökerükben koncentrálik, a transzlokáció intenzitása csekély ( $C_{\text{növény}} < C_{\text{talaj}}$ ). Az indikátor fajok a szennyezők nagy mértékű felvételére képesek, melynek nyomán a talaj és a növényi szervek szennyezőanyag-koncentrációja nagyságrendileg megegyezővé válik ( $C_{\text{növény}} \approx C_{\text{talaj}}$ ). A hiperakkumulátor kifejezés azon fajokra alkalmazható, melyek szerveiben a szennyezőanyag koncentrációja egy vagy több nagyságrenddel meghaladja a talajokban megfigyelhető koncentrációt ( $C_{\text{növény}} >> C_{\text{talaj}}$ ). A szárazanyagra vonatkoztatott növényi koncentráció, azaz a hiperakkumuláció küszöbértéke fémenként változó; mangán (Mn) és cink (Zn) >1% (>10.000 mg/kg), króm (Cr), réz (Cu), nikkel (Ni) és ólom (Pb) >0,1% (>1.000 mg/kg), kadmium (Cd) >0,01% (>100 mg/kg). Erősen szennyezett talajok fémkoncentrációjának folyamatos, kontrollált körülmények közötti hiperakkumulációját, majd a felhalmozott fémek visszanyerését a szakirodalom fitobányászatnak (*phytomining*) nevezi [Erdei, 2015; Reeves *et al.*, 2018].

**(b) Indukált fitoextrakció** – Bizonyos esetekben a nagyfokú akkumulációs képességű növényfajok alkalmazása sem garancia arra, hogy a szennyezett közeg fitoextrakció révén hatékonyan ártalmatlanítható. A legfőbb limitáló tényező az lehet, ha a fémek a növé-

nyek által nehezen vagy nem hozzáférhető formában vannak jelen a talajban, azaz immobilisak. Egyre nő azon kísérletek száma, melyekben a talajban felhalmozódott immobilis, de potenciálisan kockázatot jelentő fémek mozgékonyosságát, azaz növényi felvehetőségét kívánják fokozni [Chaney *et al.*, 1997; Meers *et al.*, 2008]. Ezek eredményeként olyan, ún. kelátképző adalékanyagok kerülnek alkalmazásra, melyek a növény biomassza-hozamának maximumakor kijuttatva intenzív fémakkumulációt idéznek elő. Az ilyen célra legáltalánosabban kijuttatott vegyületek az EDTA (etiléndiamin-tetraecetsav) és a NTA (nitrilotriecetsav), melyek egyaránt hatékonyak többek között a Cd, Cu és Zn mobilizálására és felvételének elősegítésére [Bian *et al.*, 2018]. A szennyezők akkumulációja az említettek mellett számos egyéb univerzális vagy fémspecifikus adalékanyaggal serkenthető [Arsenov *et al.*, 2017]. A talaj mobilis fázisában, illetve a növényi szervekben jelentősen megnövekedő fémkoncentráció hatására a növények kondíciója leromlik, ezért betakarításuk röviddel az adalékanyagok alkalmazása után szükségessé válik.

A folyamatos és indukált fitoextrakció szempontjából ígéretes növényfajok alaptulajdonságaiban több eltérés is megfigyelhető, azonban néhány tulajdonság mindkét csoport tagjai körében általános. A jó fitoextrakciós képességű növényfajok nagyfokú fémtoleranciával és magas fémakkumulációs potenciállal rendelkeznek, melyhez ideális esetben jelentős mértékű transzlokációs képesség is társul [Bosiacki *et al.*, 2014; Tózsér *et al.*, 2018]. A különbséget a folyamatos és indukált fitoextrakció növényei között elsősorban méretbeli eltérésük adja. Míg az előbbi csoportba tartozó fajok

jellemzően kis méretűek, addig az utóbbi célra alkalmazott fajok nagy biotermék-hozamúak, melynek köszönhetően a növényi szöveteket a nagy fémkoncentráció mellett kiemelkedő akkumulált fémmennyiség is jellemzi.

### **Fitoextrakció pro és kontra**

A fitoremediáció technológiájának alkalmazása csakúgy, mint az egyéb környezet-helyreállítási megoldások, jól behatárolható előnyökkel és hátrányokkal jellemezhető, melyeket a hagyományos remediációs eljárásokkal összevetve lehet a legjobban érzékelteni. Az érveket és ellenérveket a fent bemutatott fitoextrakció példáján soroljuk fel. Gyakorlati szempontból a fitoextrakciónak az alábbi főbb előnyei vannak:

**(i) Költséghatékony** – A hagyományos remediációs eljárásokhoz (lásd korábban) képest a fémek koncentrációjának növények általi csökkentése egy, de akár több nagyságrenddel is kisebb anyagi ráfordítást igényel [Dickinson *et al.*, 2009]. A technológia költségoldali vonatkozásait a következő alfejezetben részletesebben is tárgyaljuk.

**(ii) Környezetkímélő** – A fitoextrakcióban rejlő lehetőségek kiaknázása során lényeges szempont, hogy a talaj, illetve annak környezete csupán minimális mértékű bolygatást szenved. Ez annak köszönhető, hogy a növények telepítése és fejlődése a szennyeződés helyén, *in situ* történik, ennél fogva nincs szükség a talaj kitermelésére, szállítására, valamint *ex situ* deponálására és kezelésére. Ezáltal elkerülhető, hogy a talaj szerkezete és ökológiai funkciói károsodjanak vagy megszűnjenek, így a termőképesség hosszú távon biztosítható [Azubuike *et al.*, 2016].

**(iii) Hasznosítható biotermék** – A

fémakkumulációs céllal termesztett növények – különösen az indukált fitoextrakció során alkalmazott növényfajok –, nagy biotermék-hozamuknak köszönhetően különféle hasznosítást tesznek lehetővé. Ennek irányát nagy mértékben megszabja maga a növényfaj, illetve ebből következően az egyes növényi szövetek folyamat végén jellemző fémkoncentrációja. A kis fémkoncentrációjú biotermék egyes fémek esetén a mezőgazdasági felhasználást (pl. réztrágyázás), míg a nagy fémkoncentrációjú biotermék elsősorban a termikus hasznosítást (pl. lakossági célú hőszolgáltatás) teheti lehetővé. A nemfémes elemek növényi akkumulációjának vizsgálatakor példaként említhetjük a szelént (Se), mely az azt koncentráló biotermék közvetítésével trágyázásra és takarmányként szelénpótlásra nyújt lehetőséget [Abhilash és Yunus, 2011].

**(iv) Gazdaságos fémkinyerés** – Ahogyan korábban láthattuk, hiperakkumulációra alkalmas, illetve indukált fitoextrakció során telepített növények esetében technológiai igény a nagy fémkoncentráció. Munkájukban kutatók több fém, például a Ni kapcsán alátámasztották, hogy az akkumulációs célból termesztett növények biotermékjének elégetése során keletkező hamu fémkoncentrációja jelentősen nagyobb lehet, mint a hagyományos bányászati eljárások során kitermelt érc esetén [Barbaroux *et al.*, 2012]. Az ilyen formán kinyerhető fémek körét és a gazdaságos fémkinyerés koncentrációküszöbét a mindenkori gazdasági viszonyok szabják meg.

**(v) Tájesztétika** – A fitoextrakció alkalmazásával, – ahogyan a fitoremediáció egyéb típusai esetében is –, határozott cél a hagyományos fizikai-kémiai módszerek kiegészítése, segítése és optimális esetben kiváltása. Szennyezett talajok ártalmatlanításakor ez azt

eredményezi, hogy az érintett területen közép- (1–10 év) és hosszútávú (>10 év) növényborítás jön létre, mely a talajszerkezet megőrzése és az ültetvény biomassza-produkciója mellett a zöldfelület gyarapodása révén egyéb, járulékos előnyöket is biztosít (élőhely-, zaj- és levegőtisztaság-védelem stb.). A gazdasági szempontokon és területhasznosítási igények figyelembevételén túl az előbb felsorolt jellemzők segíthetik a társadalmi elfogadottság és támogatottság mértékének növekedését [Sleegers, 2010].

A fitoextrakció alkalmazását megelőzően az előbbieken felsorolt előnyök mellett az alábbi hátrányokat, korlátokat is mérlegelni kell:

**(A) Időigényes folyamat** – A fitoextrakció megvalósítása során a leggyakrabban hangsúlyozott negatívum a remediációs cél eléréséhez szükséges időtartam. Ezt elsősorban a talaj szennyezettségének mértéke, az elérni kívánt szennyezőanyag-koncentráció és a kiválasztott növényfaj(ok) élettani tulajdonságai, többek között fémakkumulációs képessége határozzák meg [Pulford és Watson, 2003]. Egyes esetekben az időjárási körülmények változása is jelentősen befolyásolja (hátráltathatja) a növények élettevékenységeit, azaz közvetve az akkumuláció hatékonyságát. A lehetséges változók sokféleségéből következik, hogy a fitoextrakció időtartamát illetően nem jelölhető ki garantált érvényű időtáv. Általános megállapítás azonban, hogy hiperakkumulátor fajok esetén a technológia időigénye ideális esetben hónapokban-években, míg kisebb akkumulációs potenciállal rendelkező fajok esetén években-évtizedekben mérhető [Koptsik, 2014]. Kádár [2012] kutatása során rámutatott, hogy extrém mértékű talajszennyezettség mellett a remediáció elméleti időtartama akár több száz vagy

több ezer év is lehet, mely jelentősen behatárolja a technológia alkalmazási körét.

**(B) Szennyezőanyag-koncentrációtól függő hatékonyság** – A hagyományos remediációs eljárásokkal szemben, melyek teljesítménye nem, vagy csak elenyésző mértékben függ a szennyezőanyag koncentrációjától, a fitoremediációs módszerek hatásfoka súlyos szennyeződés mellett igen korlátozott; a technológia optimumát a kis- és közepes mértékben szennyezett közegek jelentik [Ali *et al.*, 2013]. A szennyezett talaj növényi remediációjának sikerét a növényfaj adott fémre vonatkozó toleranciaküszöb-koncentrációja alapjaiban meghatározza. A közeg nagymértékű szennyezettsége jelentősen képes csökkenteni a növények fotoszintetikus-, fejlődési- és reprodukciós képességét. Az ezekhez kapcsolódó tápanyag- és fémakkumulációs zavarok, illetve gátolt növekedés (biomassza-produkció) pedig lassítják, esetenként akadályozzák a fémek kivonásának ütemét. A szennyezőanyag-tolerancia fokozása a napjainkban egyre nagyobb figyelmet kapó génsebészeti eljárások útján valósítható meg, elsősorban a fémtoleranciáért felelős gének túlexpresszáltatása révén [Erdei, 2015].

**(C) Folyamatos monitoringigény** – A szabadföldi és üzemszerűen alkalmazott fitoextrakció növényei a környezeti tényezőknek akár évtizedekig is ki lehetnek szolgáltatva, így remediációs teljesítményüket számos faktor jelentősen befolyásolja [Koptsik, 2014]. Erre alapozva nélkülözhetetlen, hogy a potenciálisan változóképes paraméterek folyamatos nyomon követése és a tervezett remediáció ütemszerű lebonyolítása biztosítva legyen. Ennek érdekében el kell végezni a megfelelő időközönként, szabványos módszerekkel történő talaj- és növényi mintavé-

telezést, a sérült vagy életképtelen egyedek felderítését, begyűjtését és pótlását, illetve a nem célfajok egyedének visszaszorítását és eltávolítását. A fitoextrakció széleskörű értelmezése azonban nem korlátozódik a növények terepi fejlődésének nyomon követésére. A kívánt fémkoncentráció elérése után rendszerint előírás és elvárás a terület meghatározott időtartamú (akár évtizedes léptékű) utógondozása, melyet jellemzően hosszú élettartamú fás szárú fajok telepítésével és időszakos mintavételezéssel valósítanak meg [Tózsér *et al.*, 2017]. Az említett lépések kivitelezése időigényes, míg költség- és humán erőforrás-igénye hosszú távú biztosítást igényel.

**(D) Szennyezett biomassza miatti kockázat** – A szennyezett környezetben fejlődő növények biomasszája mellett, hogy megfelelő technológiák révén hasznosítható, a növények fejlődése, majd azok betakarítása után egyaránt környezeti kockázatot jelent. Amint a növények valamilyen szaporítóanyag (magvak, dugványok stb.) formájában kihelyezésre kerülnek, a tápanyagfelvételi csatornákon keresztül történő fémakkumuláció fémekkel terhelt növényi biomasszát eredményez [French *et al.*, 2006]. Az egyes növényi részekkel táplálkozó élőlények szervezetében ezek elfogyasztásával bioakkumuláció, a tápláléklánc további szintjeit érintve pedig biomagnifikáció valósul meg. A növények környezetébe kikerülő szennyeződés egy további jellemző formája, amikor a vegetációs periódus végéhez közeledve a jó transzlokációs képességgel rendelkező fásszárú, lombhullató fajok egyedinek levelei lehullanak, s a bennük akkumulált fémek a bomlási folyamatok révén visszajutnak a talajba. Ekkor a lelassult növényi anyagcsere miatt az újbóli akkumuláció intenzitása csökken, míg a talajalkotókon történő ad-

szorpció és a szennyezőanyag-migráció jelentősége nő [Scheid *et al.*, 2009]. A betakarítást követően a fémekben gazdag biomassza veszélyes hulladéknak megfelelő kezelést igényel, azaz további hasznosítása kizárólag szabályozott keretek között történhet [Kovács és Szemmelveisz, 2016]. A nem körültekintő kezelés egyik velejárója lehet, hogy a termikus hasznosításra kerülő biomassza szilárd és gáz halmazállapotú égéstermékai megfelelő leválasztó/hasznosító berendezés hiányában a környezetbe jutnak, s a lokális léptéken túlmutató légköri eredetű szennyeződést okoznak.

### **A fitoextrakció anyagi vonzata – költséghatékonysági körkép**

A korábbiakban láthattuk, hogy a fitoextrakció bizonyos feltételek mellett megfelelő alternatívája lehet a hagyományos remediációs módszereknek. A hagyományos kármentesítési eljárásokkal összevetve a technológia legfőbb előnyét annak egységnyi költségvonzata jelenti. Cunningham és Ow [1996] tanulmányukban egy 4,9 hektáros, nehézfémekkel terhelt területen több, köztük néhány hiperakkumulációra képes növényfaj fémfelvételi képességét vizsgálták. A költségbecslési folyamat során a kutatók megállapították, hogy a kivitelezési és fenntartási munkák összköltsége, melyet a szennyezett talaj lefedése (555.000 US\$) és a talajmosás (5.833.000 US\$) jelentene, fitoextrakció alkalmazásával jelentősen csekélyebb (185.000 US\$). Összehasonlító jellegű tanulmányában Schnoor [1997] a fémek talajból történő eltávolítására különböző remediációs módszereket vizsgált. Ennek során a szerző megállapította, hogy míg 1m<sup>3</sup> szennyezett talajra számítva a kitermelés-lerakás költsége 100-400 US\$, a talajmosásé 250-500

US\$, addig a vonatkozó talaj fitoextrakcióra számított anyagi vonzata mindössze 15-40 US\$. Marques és munkatársai [2009] ugyancsak a költséghatékonyságot tartják a fitoremediáció egyik fő előnyének. A szerzők általánosságban a hagyományos remediációs eljárásokhoz képest a fitoextrakciót egy nagyságrenddel olcsóbb megoldásként említik.

A fentiek alapján nyilvánvalónak tűnik, hogy a fitoextrakció akár évtizedekben is mérhető időtávja során a környezeti tényezők változékonysága a technológia hatékonyságát, így ráfordításigényét is befolyásolja. Emiatt előfordulhat, hogy az előzetesen tervezett költségek időközben megnőnek, mellyel a fitoextrakció többi remediációs alternatívához viszonyított versenyképessége csökken [Chen és Chiou, 2008]. Az előbb említett, a technológia viszonylagos kiszolgáltatottságából eredő bizonytalanságok hatása éppen a fitoextrakció sajátosságai miatt jelentősen enyhíthető. Wan és munkatársai [2016] részletes elemzéseik nyomán megállapították, hogy a költséghatékonyság nagy mértékben fokozható, amennyiben a folyamat során alkalmazott növények a betakarítás után értékesíthetőek. A kutatók számításai szerint cukornád és eperfa termesztésével és értékesítésével a második év végére a remediáció éves szinten jövedelmezővé válik, míg a befektetett teljes összeg megtérülése a hetedik év végétől várható.

Amennyiben tehát a szennyezőanyagok terjedéséből és expozíciójából fakadó kockázat, illetve egyéb tényezők nem indokolják a szennyeződés néhány héten vagy hónapon belül történő felszámolását, úgy a fitoextrakció mellett szóló érvek, köztük az anyagi előnyökkel, a technológiát különösen versenyképessé tehetik.

## Irodalomjegyzék

- Abhilash, P.C., Yunus, M. (2011): Can we use biomass produced from phytoremediation? *Biomass Bioenerg.*, **35**, 1371-1372.
- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A. (2013): Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. *Chemosphere*, **91**, 869-881.
- Arsenov, D., Župunski, M., Borišev, M., Nikolić, N.P., Orlović, S., Pilipovic, A., Pajević, S. (2017): Exogenously applied citric acid enhances antioxidant defense and phytoextraction of cadmium by willows (*Salix* Spp.). *Water Air Soil Poll.*, **228**, 221.
- Azubuike, C.C., Chikere, C.B., Okpokwasili, G.C. (2016): Bioremediation techniques – classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J. Microb. Biot.*, **32**, 180.
- Barbaroux, R., Plasari, E., Mercier, G., Simonnot, M.O., Morel, J.L., Blais, J.F. (2012): New process for nickel ammonium disulfate production from ash of the hyperaccumulating plant *Alyssum murale*. *Sci. Total Environ.*, **423**, 111-119.
- Bian, X., Cui, J., Tang, B., Li, Y. (2018): Chelant-induced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils: A review. *Pol. J. Environ. Stud.*, **27**, 2417-2424.
- Bosiacki, M., Kleiber, T., Markiewicz, B. (2014): Continuous and induced phytoextraction – Plant-based methods to remove heavy metals from contaminated soil. pp 566-612. In: Soriano, M.C.H. (Ed.) *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. InTechOpen. ISBN 978 953 51 1235 8
- Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S., Baker, A.J.M. (1997): Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotech.*, **8**, 279-284.
- Chen, C.H., Chiou, I.J. (2008): Remediation of heavy metal-contaminated farm soil using turnover and attenuation method guided with a sustainable management framework. *Environ. Eng. Sci.*, **25**, 11-32.
- Cunningham, S.D., Ow, D.W. (1996): Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiol.*, **110**, 715-719.
- Dickinson, N.M., Baker, A.J.M., Doronilla, A., Laidlaw, S., Reeves, R.D. (2009): Phytoremediation of inorganics: realism and synergies. *Int. J. Phytoremediat.*, **11**, 97-114.
- Erdei, L. (2015): *Fito(bio)remediáció*. JATEPress, Szeged. ISBN 978 963 315 238 6

- French, C.J., Dickinson, N.M., Putwain, P.D. (2006): Woody biomass phytoremediation of contaminated brownfield land. *Environ. Pollut.*, **141**, 387-395.
- Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B. (2007): *Trace Elements from Soil to Human*. Springer, Heidelberg. ISBN 978 3 540 32713 4
- Kádár, I. (2012): *A főbb szennyező mikroelemek környezeti hatása*. MTA ATK Talajtani és Agrokémiai Intézet, Budapest. ISBN 978 963 89041 5 7
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I., Dumat, C. (2016): A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *J. Geochem. Explor.*, **182**, 247-268.
- Khan, F.I., Husain, T., Hejazi, R. (2004): An overview and analysis of site remediation technologies. *J. Environ. Manage.*, **71**, 95-122.
- Koptsik, G.N. (2014): Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: A review. *Eurasian Soil. Sci.*, **47**, 923-939.
- Kovács, H., Szemmelveisz, K. (2016): Heavy metal contaminated biomass combustion as treatment after phytoremediation – A review. *Mater. Sci. Eng.*, **41**, 69-78.
- Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Naidu, R. (2016): *Ex-situ* remediation technologies for environmental pollutants: A critical perspective. *Rev. Environ. Contam. T.*, **236**, 117-192.
- Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M. (2018): Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Sci. Total Environ.*, **633**, 206-219.
- Marques, A.P.G.C., Rangel, A.O.S.S., Castro, P.M.L. (2009): Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.*, **39**, 622-654.
- Máthéné Gáspár, G., Anton, A. (2004): Toxikus elem-szennyeződés káros hatásainak mérséklése fitoremediációval. *Agrokém. Talajtan*, **53**, 413-432.
- Meers, E., Tack, F., van Slycken, S., Ruttens, A., Du Laing, G., Vangronsveld, J., Verloo, M. (2008): Chemically assisted phytoextraction: A review of potential soil amendments for increasing plant uptake of heavy metals. *Int. J. Phytoremediat.*, **10**, 390-414.
- Megharaj, M., Naidu, R. (2017): Soil and brownfield bioremediation. *Microb. Biotechnol.*, **10**, 1244-1249.
- Mulligan, C.N., Yong, R.N., Gibbs, B.F. (2001): Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Eng. Geol.*, **60**, 193-207.
- Ojuederie, O.B., Babalola, O.O. (2017): Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. *Int. J. Env. Res. Pub. He.*, **14**, 1504.
- Perei, K., Pernyeszi, T., Lakatos, Gy. (2013): *Bioremediáció*. TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0025. Szegedi Tudományegyetem, Debreceni Tudományegyetem, Pécsi Tudományegyetem.
- Pulford, L.D., Watson, C. (2003): Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – A review. *Environ. Int.*, **29**, 529-540.
- Reeves, R.D., van der Ent, A., Baker, A.J.M. (2018): Global distribution and ecology of hyperaccumulator plants. pp 75-92. In: van der Ent A., Echevarria G., Baker A.J.M., Morel J.L. (Eds) *Agromining: Farming for metals*. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 978 3 319 61898 2
- Scheid, S., Günthardt-Goerg, M.S., Schulin, R., Nowack, B. (2009): Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil. *Eur. J. Soil Sci.*, **60**, 613-621.
- Schnoor, J.L. (1997): *Phytoremediation*. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh. ISBN 978 0471 394 35 8
- Simon, L. (2004): *Fitoremediáció*. Környezetvédelmi Füzetek. BMKE OMIKK, Budapest. ISBN 963 593 429 0
- Slegers, F. (2010): Phytoremediation as green infrastructure and a landscape of experiences. *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy*, **15**, 132-140.
- Tózsér, D., Magura, T., Simon, E. (2017): Heavy metal uptake by plant parts of willow species: A meta-analysis. *J. Hazard. Mater.*, **336**, 101-109.
- Tózsér, D., Harangi, S., Baranyai, E., Lakatos, Gy., Fülöp, Z., Tóthmérész, B., Simon, E. (2018): Phytoextraction with *Salix viminalis* in a moderately to strongly contaminated area. *Environ. Sci. Pollut. R.*, **25**, 3275-3290.
- Wan, X., Lei, M., Chen, T. (2016): Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Sci. To-*

*tal Environ.*, **563–564**, 796-802.

Wuana, R.A., Okieimen, F.E. (2011): Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*, Article ID [402647](#).

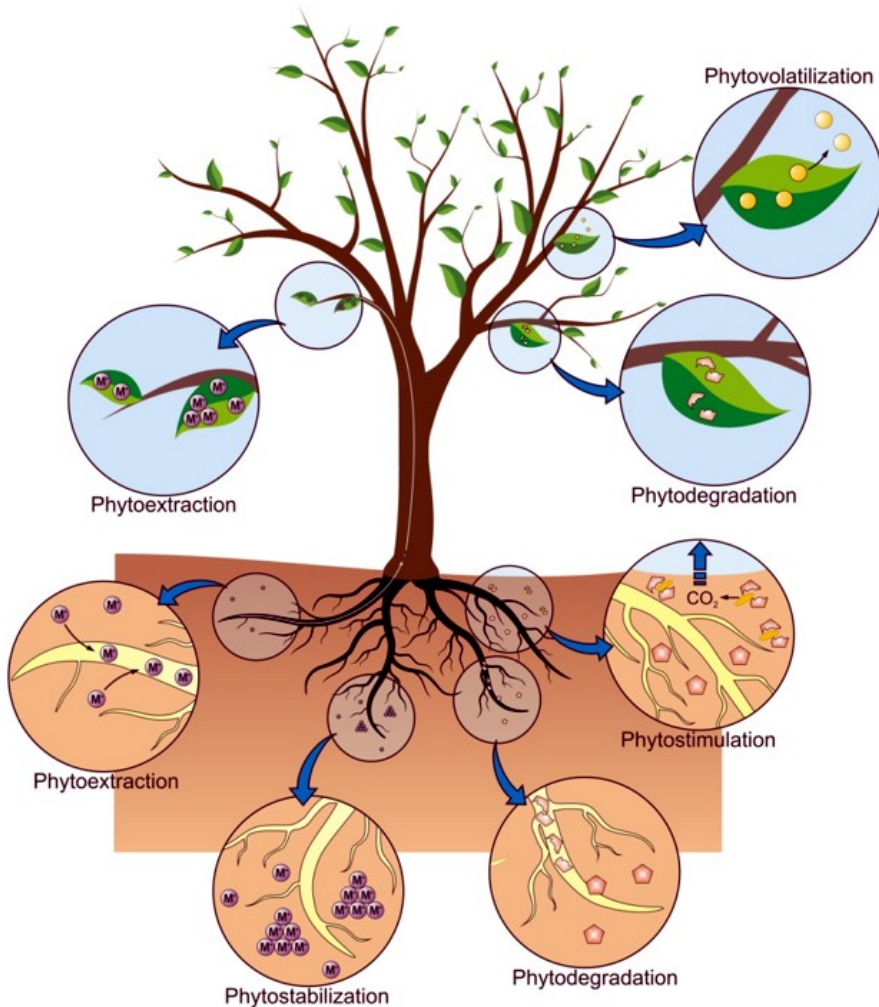
Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., Bi, J. (2018): A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural

regions in China: Pollution and risk assessment. *Sci. Total Environ.*, **642**, 690-700.

Yeung, A.T. (2010): Remediation technologies for contaminated sites. pp [328-369](#). In: Chen, Y., Tang, X., Zhan, L. (Eds) *Advances in Environmental Geotechnics*. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 978 3 642 04459 5

**A kézirat beérkezésének időpontja:** 2019. május 15.

**A cikk hivatkozása** - Tózsér D. (2019): A talajok fémzennyeződése ellen hatékonyan – remediációtól a fitoextrakcióig. *Ökotoxikológia*, **1** (1), 14-25.



A fitoremediáció formái [Favas *et al.*, [2013](#)]