

# **FITOREMEDIÁCIÓ**

## **FITOEXTRAKCIÓ**

Készült a Sapientia EMTE Környezettudomány szakos  
államvizsgázói számára

**Összeállította:**  
**dr. Tonk Szende Ágnes**  
egyetemi adjunktus

**Kolozsvár, 2020**

## FITOREMEDIÁCIÓ

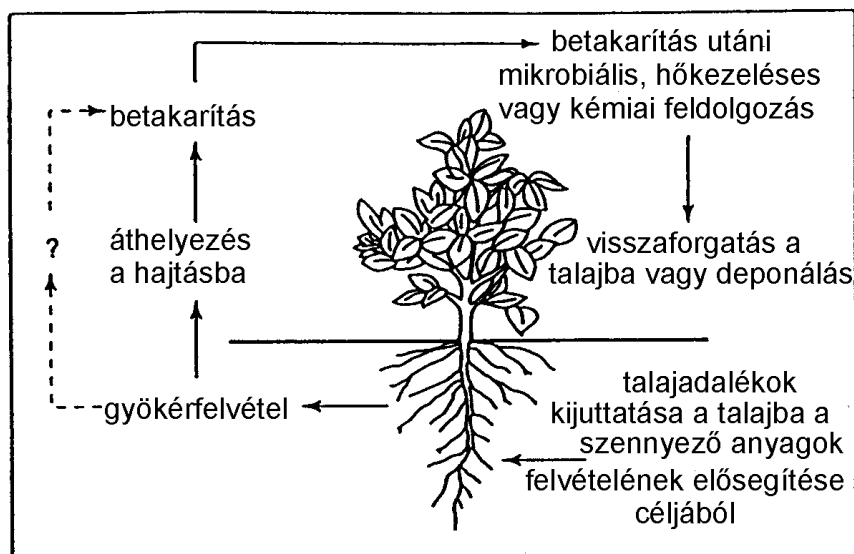
A *fitoremediáció* során a természetben előforduló vagy géntechnológiai úton előállított növények (illetve a velük társult mikrobák) segítségével tisztítják meg a környezeti elemeket (talajt, talajvizet, felszíni vizet, ipari szennyvizet, levegőt) a szervetlen vagy szerves kémiai szennyező anyagoktól. A kifejezés előtagja a görög *fito* = növény szóból ered. A *remediáció* kifejezés a szennyezett terület megjavítását, helyrehozatalát, „meggyógyítását” jelenti a latin *remedium* = orvoslás, gyógyszer, orvosság kifejezés alapján. Ezt a szakkifejezést használjuk arra a tevékenységre, amikor a talajt szennyező vegyi anyagok koncentrációját olyan kis értékre csökkentjük, amelynek a *kockázata* már elfogadható.

A *fitoremediáció* előnyei közé tartozik, hogy környezetkímélő technológia, lényegesen olcsóbb, mint a hagyományos fizikai vagy fizikai–kémiai talajtisztítási eljárások. A *fitoremediáció* során kevesebb másodlagos szennyeződés (pl. szennyezett víz) keletkezik, a talaj fizikai szerkezete nem károsodik, biológiai aktivitása nem szűnik meg, termékenysége a legtöbb esetben megmarad. Az eljárás nagy felületen *in situ* alkalmazható. A betakarított, szennyeződést tartalmazó biomasszából elégetés után a koncentrált nehézfémek visszanyerhetők. A *fitoremediáció* várhatóan *négyszer-hétszer olcsóbb* lesz, mint a szennyezett talaj kitermelése, depóniákban való elhelyezése, vagy fizikai és kémiai módszerekkel történő *remediációja*. A *fitoremediáció* hátrányai közé tartozik, hogy időigényes folyamat, a növények nem vesznek fel vagy nem bontanak le minden szennyezőanyag-féleséget, és a *fitoremediáció* során a növényeket gondozni kell (tápanyagokkal, vízzel kell ellátni). Az eljárás elsősorban az olyan mérsékelt szennyezett talajok tisztítására alkalmas, ahol nem kell az összes szennyező anyagot eltávolítani, elegendő azok mennyiségét a határérték alá csökkenteni.

Gyorsan fejlődő környezetvédelmi technológiáról van szó (amelyet egyelőre még nem alkalmaznak üzemszerűen); a *fitoremediációt* vizsgáló kutatások a kilencvenes években gyorsultak fel. A *fitoremediáció*n belül újabb fogalmak, illetve eljárások alakultak ki az elmúlt időszakban, amelyek közül a *fitoextrakció*, *fitofiltráció*, *fitovolatizáció*, *fitostabilizáció* és a *fitodegradáció* a legígéretesebb. A *fitoextrakció*, *fitofiltráció*, *fitovolatizáció* a szennyező anyagok felvételén, áthelyeződésén alapul, a *fitostabilizáció* során a szennyező anyagok immobilizálódnak, míg a *fitodegradáció* során a szennyező anyagok lebomlanak, átalakulnak.

## FITOEXTRAKCIÓ

A *fitoextrakció* során magasabb rendű növényeket alkalmaznak a fémekkel (illetve egyes szerves szennyező anyagokkal) szennyezett talajok megtisztítására. Speciális, a fémek hiperakkumulációjára képes növényekkel vonják ki a nehézfémeket a talajból (*folyamatos fitoextrakció*), illetve kelátképzők talajba juttatásával teszik a fémeket könnyen felvehetővé nagy biomasszát képező növényfajok számára (*indukált fitoextrakció*). A fitoextrakció történhet gyorsan növő, nagy biomasszát képező fajok (elsősorban fűzfa és nyárfa hibridek) segítségével is. A szennyeződések (fémek, szerves vegyületek) a talajból (talajvízből) a növények könnyen betakarítható föld feletti szerveibe (hajtásába), illetve gyökerébe helyeződnek át. A szennyezett biomasszát ellenőrzött körülmények között feldolgozzák (1. ábra).



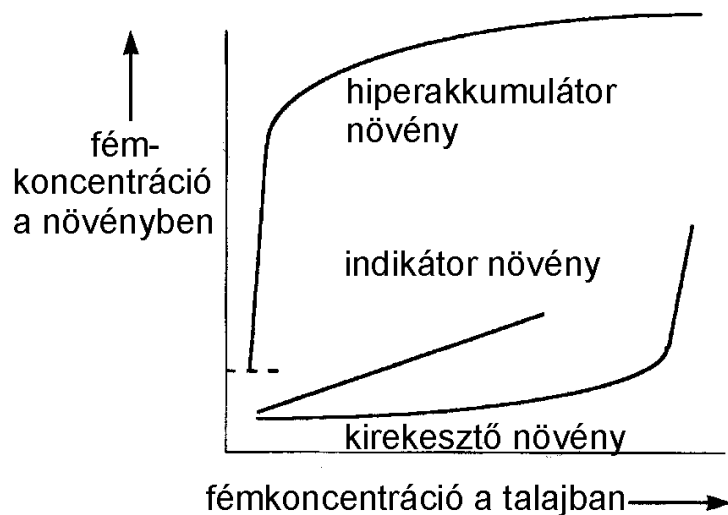
1. ábra A szennyező anyagok fitoextrakciója során lezajló folyamatok sémája

## Folyamatos fitoextrakció

A hiperakkumulátor növények segítségével végzett *folyamatos fitoextrakció* során a fémekkel szennyezett talajon olyan növényeket nevelünk, amelyek az átlagosnál nagyobb mennyiségű fém felvételére és hajtásba történő áthelyezésére képesek.

A talaj fémszennyeződése esetén a magasabb rendű növények fémfelvétele alapvetően három módon alakulhat (2. ábra):

- a „kirekesztő” növények szerveiben nem nő a talaj fémkoncentrációjával arányosan a fémfelvétel (a fémek általában a gyökerekben akkumulálódnak, és kevés helyeződik át belőlük a hajtásokba),
- az indikátornövények gyökerében és hajtásában a talaj fémterhelésével arányosan emelkedik a fémfelvétel,
- a hiperakkumulátor növények szerveiben (hajtásában) pedig jóval nagyobb mennyiségben halmozódnak fel a fémek, mint az a talaj fémkoncentrációjából következne.



2. ábra Magasabb rendű növények fémakkumulációja szennyezett talajból

Az alapötlet, hogy fémakkumuláló növényeket talaj- és víztisztításra lehetne alkalmazni viszonylag réginek mondható (már a hatvanas évek elején ismert volt, hogy a radionuklidokkal szennyezett víz egyes vízi növényekkel megtisztítható), az ez irányú kutatások azonban csak az elmúlt 10-15 évben kerültek ismét előtérbe. A fémek hiperakkumulációjára képes növényeket viszonylag régen felfedezték; 1885-ben A. Baumann Aachen (Németország) környékén több mint 1% (10 000 µg/g) cinket mért a *Viola calaminaria* és a *Thlaspi alpestre* var. *calaminare*

növényekben. Prat fedezte fel 1934-ben egy rézbánya közelében, hogy a *Melandrium rubrum* (vörös mécsvirág) növény nagy mennyiségű réz felvételére és eltűrésére képes. Az 1930-as években O. A. Beath és munkatársai az USA nyugati részén felfedezték, hogy az *Astragalus* fajok a nikkel hiperakkumulációjára képesek. 1948-ban O. V. Gambi és C. Minguzzi felfedezik, hogy az *Alyssum bertolonii* növény nagy mennyiségű nikkel felvételére képes a toszkániai szerpentin talajokból. 1977-ben R. R. Brooks és munkatársai használják először a „hiperakkumuláció” fogalmat.

Elsősorban érlelőhelyek közelében, fémekben gazdag ún. *metallifer* vagy *szerpentin talajokon* találhatóak olyan őshonos növényfajok, amelyek igen nagy mennyiségben képesek cinket, nikkelt, kadmiumot, ólmot, mangánt, rezet és kobaltot felhalmozni föld feletti szerveikben. *Hiperakkumulációról* akkor beszélhetünk, ha a növény adott szervében a fémkoncentráció meghaladja az 1000 mg/kg szárazanyag értéket, a növény tehát jóval nagyobb mennyiségben veszi fel az adott elemet, mint az annak talajbéli koncentrációjából következne. A hiperakkumulátor növényekben a hajtás/gyökér fémkoncentrációjának aránya általában >1 (a fémek elsősorban a hajtásban halmozódnak fel), míg a hiperakkumulációra nem képes növényekben ez az arány fordított, a fémek elsősorban a gyökerekben akkumulálódnak. A hiperakkumuláció koncentrációkritériuma nehézfémeként változik, a fémaakkumuláció pedig fajspecifikus (1. táblázat). A fémek hiperakkumulációjára képes vadon előforduló növényfajok (pl. *Thlaspi*, *Alyssum*, *Sebertia*, *Berkheya*) hajtásukban >0,01 % Cd-ot; >0,1 % Co-ot, Cu-et, Pb-ot, Ni-t, valamint >1 % Mn-t és Zn-et halmoznak fel. A mérsékelt égövben a hiperakkumulátor növények elsősorban a keresztesvirágúak (*Brassicaceae*), a trópusokon a kutyatejfélék (*Euphorbiaceae*) családjába tartoznak, fűfélékként, gyomként, cserjeként, félcserjeként, faként fordulnak elő.[2] A felfedezett hiperakkumulátor növényfajok száma meghaladja a 400-at (1. táblázat).

1. táblázat A fém hiperakkumuláció koncentráció kritériumai és a hiperakkumulációra képes növényfajok családjai

Nehézfém	Koncentráció kritérium (% a levél szárazanyagban)	Növények száma	Család
Kadmium (Cd)	>0,01	1	<i>Brassicaceae</i>
Kobalt (Co)	>0,1	28	<i>Scrophulariaceae</i> , <i>Asteraceae</i> , <i>Lamiaceae</i> , <i>Fabaceae</i>

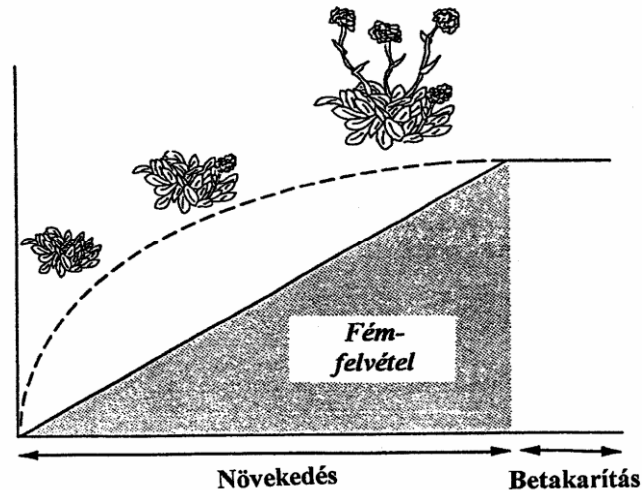
Réz (Cu)	>0,1	37	<i>Cyperaceae, Lamiaceae, Poaceae, Scrophulariaceae, Caryophyllaceae, Asteraceae</i>
Mangán (Mn)	>1,0	11	<i>Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae</i>
Nikkel (Ni)	>0,1	318	<i>Brassicaceae, Cunoniaceae, Euphorbiaceae, Flacourtiaceae, Violaceae, Buxaceae, Asteraceae, Rubiaceae, Sapotaceae stb.</i>
Szelén (Se)	>0,1	19	<i>Fabaceae, Lecythidaceae</i>
Tallium (Tl)	>0,1	1	<i>Brassicaceae</i>
Cink (Zn)	>1,0	16	<i>Brassicaceae, Violaceae</i>
Ólom (Pb)*	>0,1	14	<i>Brassicaceae, Poaceae</i>

---

\*Egyes szerzők megkérdőjelezzik ólom hiperakkumulátor növények létezését.

Egyes *Thlaspi* (tarsóka) fajok pl. cinkben, kadmiumban, ólomban gazdag talajokból 3 % (30 000 mg/kg) cinket, 0,1 % (1000 mg/kg) kadmiumot és 0,8 % (8000 mg/kg) ólmot is képesek akkumulálni hajtásukban. Hasonlóképpen az *Alyssum* (ternye) faj nikkelen és krómban gazdag szerpentintalajokon Dél-Európában 2% (20 000 mg/kg) nikkelen akkumulációjára képes. Tenyészedényes kísérletekben a nikkelen és krómmal mesterségesen elszennyezett galvániszappal szennyezett talajon nevelt osztrák tarsóka (*Thlaspi goesingense* Hal.) gyökerében 231 mg/kg, hajtásában 831 mg/kg nikkelt mértek. A krómakkumuláció megemelkedett ugyan a gyökerekben (110 mg/kg Cr), áthelyeződése azonban a hajtásba (4,16 mg/kg Cr) csekély mértékű volt. Az osztrák tarsóka hajtása egyébként jelentős mennyiségű cinket is akkumulált.

A *folyamatos fitoextrakció* során tehát hiperakkumulátor növényeket telepítenek a szennyezett talajra, amelyek fejlődésük során folyamatosan távolítják el a fémszennyeződések a talajból – elsősorban hajtásukban felhalmozva azokat (3. ábra).



3. ábra Folyamatos fitoextrakció sémája (a folyamatos vonal a hajtásban mért fémkoncentrációt, a szaggatott vonal a hajtás biomasszáját jelképezi)

Megfelelően nagy biomassza-mennyiség elérése után a növényeket betakarítják, és ellenőrzött körülmények között feldolgozzák. A fémekkel szennyezett biomassza tömegét komposztálással lehet csökkenteni, a komposztot a mikroelemekben szegény talajba vissza lehet juttatni. Másik megoldásként a biomassza zárt rendszerben elégethető (ezzel egyúttal energia is termelhető). A keletkezett hamu veszélyes hulladék lerakóba deponálható, vagy kellően nagy fémkoncentráció esetén a fémek „kohósítással” visszanyerhetők.

A növények fém hiperakkumulációját illetően sok még a tisztázatlan kérdés. A *Thlaspi caerulescens* gyökerében sokkal több cink transzporter (illetve transzportert kódoló gén) található, mint a hiperakkumulációra nem képes *Thlaspi arvense* gyökereiben. Nem jelenthető ki viszont egyértelműen, hogy a hiperakkumulációra képes növények fémfelvétele nagyobb mértékű a hiperakkumulációra nem képes növényekhez képest, ez mindig az adott növényfajtól és az adott fémtől függ. Egyértelmű viszont, hogy a hiperakkumulátor növények sokkal nagyobb fémtoleranciával rendelkeznek, mint a közönséges növényfajok. A hiperakkumulátor növények igen gyorsan és nagy hatékonysággal szállítják át a fémeket a gyökereikből a hajtásukba, mely részben azzal magyarázható, hogy a gyökérsejtekben kevesebb fém kerül elkülönítésre a vakuólumokban. Egyes hiperakkumulátor növényfajok xilemben történő fémszállításában és az adott fém detoxikálásában specifikus ligandumok játszanak fontos szerepet; a nikkel és a cink szállítását és detoxikálását pl. a hisztidin és a citromsav segíti elő. A levelekbe átszállított fémek (Ni, Zn) az epidermiszsejtek vakuólumaiban kerülnek elkülönítésre, amely magyarázatul szolgálhat arra, hogy a *Thlaspi caerulescens* 25 000-30 000 µg/g cinket képes felhalmozni leveleiben fitotoxicitási tünetek kialakulása nélkül. A magasabb

rendű növények talajból történő fémfelvételében fontos szerepe van a rizoszférában lezajló folyamatoknak. A hiperakkumulátor növények rizoszférájában nem feltétlenül azok a törvényszerűségek érvényesülnek, mint a közönséges növényfajok esetén. A közönséges növényfajokkal szemben egyes hiperakkumulátor fajok (*Alyssum murale*, *Thlaspi caerulescens*) nikkel- és cinkfelvételt pl. nem segíti elő a talaj pH-jának, illetve a rizoszféra pH-jának csökkenése. Míg a közönséges növények gyökerei igyekeznek kikerülni a talaj fémszennyeződéseit, a *Thlaspi caerulescens* gyökerei a ZnO-dal (Cd-mal) elszennyezett talajt jobban átszótták, mint a szennyezetlen talajszemcséket. Mindez arra utal, hogy a hiperakkumulátor növény gyökerei valamilyen módon felismerik a cinket és kadmiumot a talajban. A közönséges növényfajok tápelemhiány (Fe, Zn) esetén fémeket kelatizáló vagy redukáló gyökérizadományokat választanak ki, elősegítendő a fémfelvételt. A nikkelt hiperakkumuláló osztrák tarsóka (*Thlaspi goesingense*) gyökerei nem választottak ki olyan kelátképzőket, amelyek elősegítik a nikkelfelvételt. Ezzel ellentétben a talaj nikkelszennyezése esetén megemelkedett a mezei tarsóka (*Thlaspi arvense*) gyökereinek hisztidin- és citrátkiválasztása – e hiperakkumulációra nem képes növény esetén mindez valószínűleg védekezőként szolgál a túlzott nikkelfelvétel és nikkeltotoxicitás ellen. A közönséges növények a fémeket általában a talajoldatból veszik fel, ezzel szemben a hiperakkumulátor *Thlaspi caerulescens* valószínűleg a kicserélhető és az adszorbeált fémkészletből is képes cinket és kadmiumot felvenni, mindezt azonban egyes megfigyelések cáfolják.

A mikorrhiza gombák legtöbbször lecsökkentik, illetve néhány esetben serkentik a közönséges növények gyökerének fémfelvételét. A leghatékonyabb hiperakkumulátor növények a káposztafélék (*Brassicaceae*) családjába tartoznak, amelyek gyökerei általában nem élnek szimbiózisban mikorrhiza gombákkal. A mikorrhiza gombák mellett a baktériumok és a patogén gombák szerepét is kizárhatjuk a hiperakkumulációban, mivel a rizoszférában a nagy fémkoncentráció miatt az utóbbi két faj egyedszáma lecsökken.

Sajnos a folyamatos fitoextrakció során több gyakorlati problémával szembesülünk. A hiperakkumulátor növények levelei a talaj közelében találhatók, így nehezen takaríthatók be. Az egyik legjelentősebb probléma azonban, hogy a hiperakkumulátor növények sekélyen gyökereznek, nagyon lassan fejlődnek, föld feletti hozamuk kicsi, általában nem haladja meg az 5 tonnát hektáronként. Így a fémeltávolítás hatékonysága a nagy fémfelvétel ellenére alacsony (ld. még 3. táblázat). Ezért a legújabb kutatások arra irányulnak, hogy a hiperakkumulátor növények fémtoleranciáért felelős génjeit gyorsan növvő, nagy mennyiségű biomasszát képező, mélyen gyökerező mezőgazdasági növényekbe ültessék át. Jelenlegi genetikai ismereteink



alapján a fentieket két évtizeden belül még nem lehet megvalósítani, ez a kutatási irány azonban mindenképpen ígéretes.

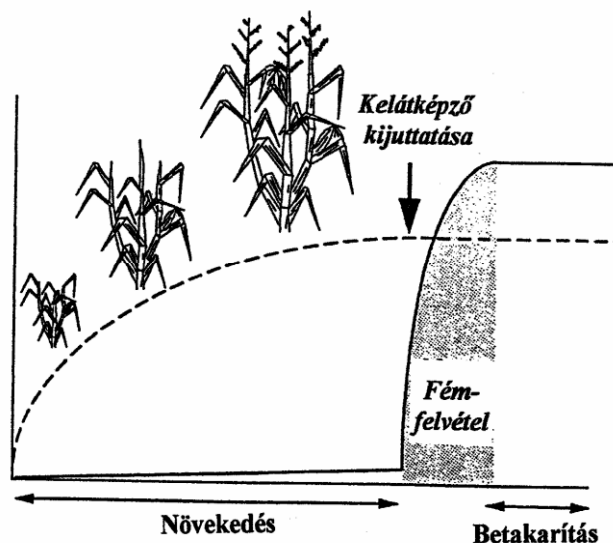
Nehézfémekkel erősen szennyezett talajokon több évtizedig, illetve évszázadig kellene tehát hiperakkumulátor növényfajokat termesztetni ahhoz, hogy a talajt teljesen megtisztítsuk a szennyezőktől. A hiperakkumulátor növények nem képesek valamennyi környezetszennyező fém felvenni a talajból (vízből), jelenleg pl. nem ismerünk olyan fajt mely a króm vagy az urán hiperakkumulációjára képes.

A folyamatos fitoextrakció során is alapkérdés tehát, hogy a termőtalajok milyen mértékben szennyezettek nehézfémekkel, milyen nehézfémeket kell eltávolítani, és a fémek milyen kötési formában találhatók a talajokban. A folyamatos fitoextrakció elsősorban a *mérsékelt* (pl. rendszeres szennyvíziszap kijuttatással) *szennyezett talajok* tisztítása esetén lehet eredményes, amikor nem törekszünk a talaj teljes megtisztítására, hanem az adott nehézfém koncentrációját csak a mezőgazdasági talajokra érvényes határérték eléréséig csökkentjük.

### **Indukált fitoextrakció**

Az *indukált fitoextrakció* során kelátképzők talajba juttatásával teszik a fémeket könnyen felvehetővé a nagy biomasszát képező növényfajok számára. A növények fémakkumulációja a talajba juttatott kelátképző szerekkel elősegíthető, ezek a nehézfémek kötési formáit megváltoztatják és azokat könnyebben felvehetővé teszik.

Általában a nehézfémek oldhatósága a talajban kicsi, amely különösen igaz ólom, króm, urán esetén. A hiperakkumulációra nem képes növényfajok viszonylag kevés fémot vesznek fel a talajból, amelyet legtöbbször a gyökerekben halmoznak fel, és csak keveset szállítanak át belőle a könnyen betakarítható hajtásba. Az *indukált fitoextrakció* során olyan növényeket termesztünk a szennyezett talajon, amelyek eltűrik a nagy fémkoncentrációt és nagy mennyiségű biomasszát képeznek. Amikor a növény föld feletti hozama eléri a maximumot, fémeket kelatizáló vegyületeket juttatnak a talajba. A fémek mobilitása a talajban azonnal megnő, és a növények – evapotranszpirációjuknak köszönhetően – néhány napig jelentős mennyiségű fémot vesznek fel a gyökerekbe, amelynek nagy része áthelyeződik a hajtásba. Ekkor kell a sokszor már elpusztult növényeket betakarítani (4. ábra).



4. ábra Indukált fitoextrakció sémája (a folyamatos vonal a hajtásban mért fémkoncentrációt, a szaggatott vonal a hajtás biomasszáját jelképezi)

Az indukált fitoextrakció gyakorlati alkalmazása abban az esetben célszerű, ha fémszennyezők mobilitása és biológiai felvehetősége a talajban rendkívül alacsony (pl. Pb, Cr, U estén). Indukált fitoextrakciót célszerű alkalmazni abban az esetben is, ha a kis koncentrációban jelen lévő szennyeződést nem lehet hiperakkumulátor növényekkel eltávolítani, pl. radionuklidok esetén. Az indukált fitoextrakció alkalmazásával kiküszöbölhető az a gyakorlati probléma, hogy a hiperakkumulátor növények igen nagy fémfelvételre képesek ugyan, viszont kis biomasszát képeznek, és betakarításuk is nehéz. A technika alkalmazásának előnyei közé tartozik továbbá, hogy a területen rövid ideig van jelen a sok fémet tartalmazó növényi biomassza – kisebb tehát a tápláléklánc többi tagjára (pl. az állatokra) leselkedő veszély. Hátrányként meg kell azonban említenünk, hogy a kelátképzők talajba juttatásával fennáll annak a veszélye, hogy megindul a növények által fel nem vett fémkelátok talajvíz felé történő kimosódása. Ez a probléma a szennyezett talaj kitermelésével és kibetonozott medencékbe (liziméterekbe) helyezésével kiküszöbölhető.

Az *etilén-diamin-tetraecetsav* (EDTA) tenyészedényekbe történő kijuttatása igen jelentős mértékben megnövelte a szennyezett talajon termesztett kukorica és borsó *ólomfelvételét*, és elősegítette az ólomnak a gyökerekből a hajtásba történő szállítását. A 2500 mg/kg ólommal szennyezett talajból a növények hajtásukban az EDTA kijuttatása előtt kevesebb mint 500 µg/g ólmot vettek fel, ez az érték a kijuttatás után a kukoricában több mint 8500, borsóban több mint

10 000 µg/g-ra nőtt. Az EDTA ólomfelvételre gyakorolt pozitív hatását számos laboratóriumi és szabadföldi kísérletben is megerősítették. Számítások szerint amennyiben az EDTA-val indukált fitoextrakció esetén a növények hajtásába több mint 10 000 µg/g ólom kerül át, és a hozam eléri a 20 t/ha-t, a technika gazdaságosan alkalmazható ólommal szennyezett talajok megtisztítására.

A fentiekhez hasonló jelenséget figyeltünk meg tenyészedényes kísérletben króm esetén is; *krómmal* mesterségesen elszennyezett talajon nevelt tesztnövényeink (a *Brassicaceae* családba tartozó takarmányretek és komatsuna) Cr-felvétele több nagyságrenddel megnőtt abban az esetben, ha a krómot szerves kelát (króm-pikolinát) formájában juttattuk ki a talajba, illetve ha a talajt a növények 4-8 hetes korában több alkalommal pikolinsavat tartalmazó vízzel öntöztük meg. *EDTA kijuttatásával* az ólmon kívül a szareptai mustár hajtásának cink- és rézfelvétele is jelentősen megemelhető volt, míg kadmium- és nikkelszennyeződés esetén ez a hatás kisebbnek bizonyult. Tenyészedényes kísérletben *kadmiummal* mesterségesen elszennyezett (100 mg/kg Cd) talajból az EGTA (etilén-bisz(oxietilén-nitrilo)tetraecetsav) kijuttatása serkentette leginkább a szareptai mustár hajtásának kadmiumfelvételét, amely elérte a 2800 µg/g-ot. *Elemi kén* és *nitro-triacetát* (NTA) szennyezett talajba juttatásával jelentősen megnövelhető volt a Zn, Cd és a Cu koncentrációja a talajoldatban, a tesztnövények hajtásában azonban nem emelkedett meg ezzel arányosan a fémkoncentráció. A talajt szennyező radiocézium (<sup>137</sup>Cs) ammóniumsók (pl. ammóniumnitrát, ammónium-szulfát), illetve káliumsók kijuttatásával mobilizálható, és a növények radiocézium-felvétele megemelhető. Citromsav talajba juttatásával jelentősen megemelhető a talajoldat, illetve egyes mezőgazdasági növényfajok uránfelvétele.

#### Irodalom

Simon L., 2004. Fitoremediáció. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318. BMKE OMIKK, Budapest. 1-59. old. ISBN:963 593 429 0, ISSN 0866-6091