

KÖRNYEZETGAZDÁLKODÁS

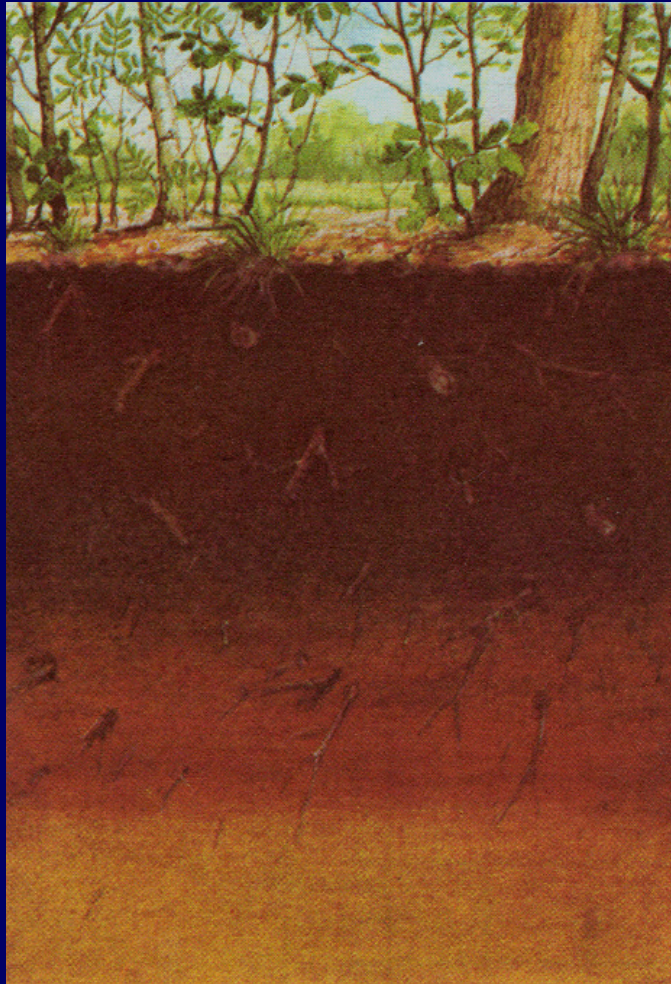
**Talajszennyeződés
Talajremediáció**

Összeállította:

Dr. Simon László

Nyíregyházi Főiskola

Talaj fogalma és funkciói



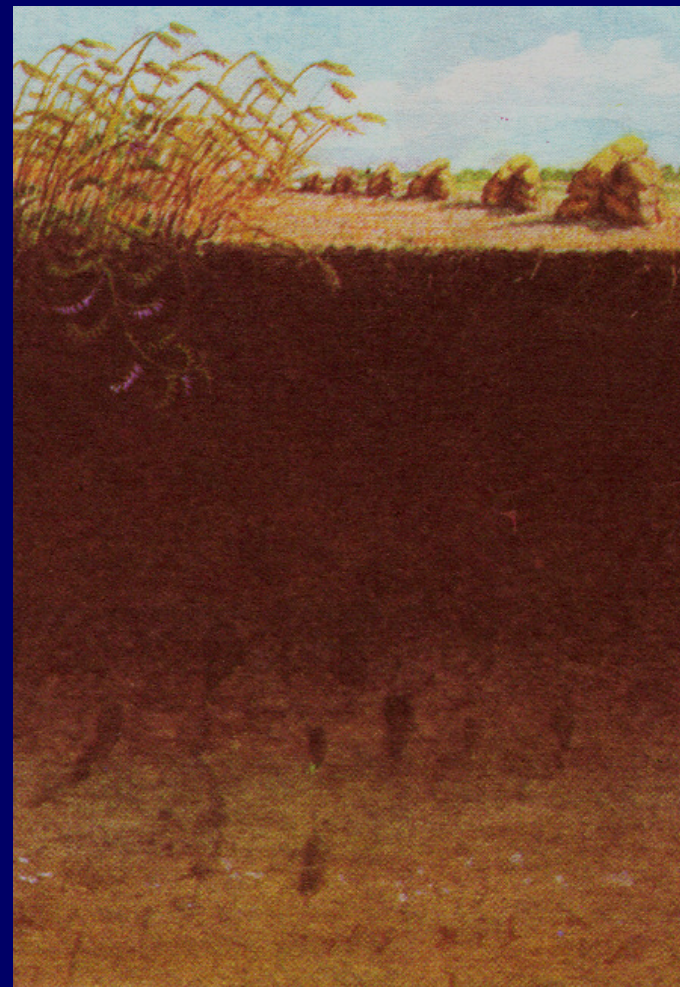
Talaj: a földtani közeg legfelső rétege, ami ásványi részecskékből, szerves anyagból, vízből, levegőből és élő szervezetekből áll

Talaj ökológiai funkciói: biomassza termelés, szűrő, kiegyenlítő, átalakító, raktározó szerep, ökológiai élettér, genetikai tartalék

Termékenység: A talaj legfontosabb tulajdonsága, hogy képes a növényeket tápanyagokkal és vízzel ellátni

Talajdegradáció fogalma

Talajdegradáció: minden olyan folyamat, mely a talaj termékenységét csökkenti, minőségét rontja, illetve a funkcióképességét korlátozza, vagy a talaj teljes pusztulásához vezet (víz- és szélrózió, elsódás, szikesedés, talajsavanyodás, talajszerkezet romlása, elmocsarasodás, talaj pufferkapacitásának romlása, **talajszennyeződés**)



Talajszennyeződés fogalma



Talajszennyeződés: az a folyamat, mely során a talaj természetes viszonyok között kialakult fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai jelentős mértékben és kedvezőtlen arányban változnak meg, az ökológiai talajfunkciók károsodnak

pH csökkenés (talajsavanyodás),
kémiai összetevők megváltozása
(toxikus elemek, vegyületek felhalmozódása), **biológiai összetevők megváltozása**
(baktériumok, vírusok, gombák elszaporodása, talajmikroflóra és talajfauna arányainak kedvezőtlen eltolódása)

A talajszennyeződés legfontosabb forrásai

(Vermes, 1996 nyomán)

Pontszerű	Nem pontszerű
<i>Természetes eredetű talajszennyeződések</i>	
<p>Ásványi lelőhelyek</p> <p>Geológiai formációk</p>	<p>Természetes (pl. vulkáni) eredetű nedves és száraz kiülepedés a légkörből</p> <p>Árvizek, elöntések, nagy esők</p> <p>Erős szelek</p> <p>Természetes radioaktív sugárzások</p>
<i>Emberi (antropogén) eredetű talajszennyeződések</i>	
<p>Szennyvizek, szennyvíziszapok, hígtrágya</p> <p>Hulladékok (folyékony, szilárd, nem toxikus, toxikus)</p> <p>Termelési (ipari) emissziók</p>	<p>Légszennyezésből eredő száraz és nedves kiülepedés</p> <p>Mezőgazdasági vegyszerek: műtrágyák, növényvédő szerek</p> <p>Közlekedés</p> <p>Atomrobbantások</p>

Antropogén eredetű talajszennyeződések

- **Nehézfémek**
- **Radioaktív szennyezőanyagok**
- **Egyéb szerves szennyezőanyagok (légszennyező gázok)**
- **Kőolaj és kőolajszármazékok**
- **Szerves mikroszennyezők**
- **Peszticidek**
- **Biológiai szennyezőanyagok**



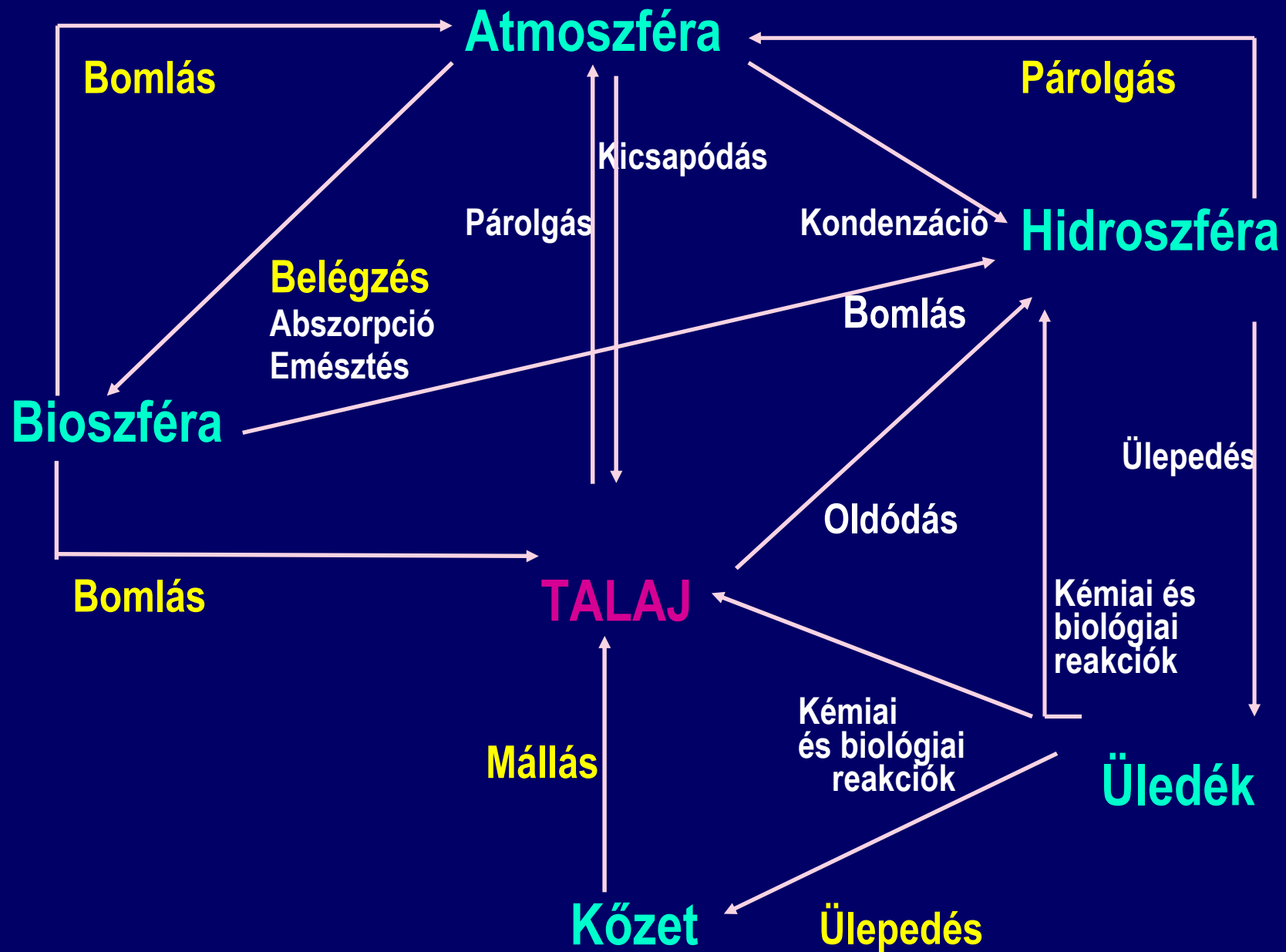
A talaj szennyeződése nehézfémekkel

Nhézfémek: azok a fémek, amelyek sűrűsége 5 g/cm³-nél, rendszáma 20-nál nagyobb

Toxikus elem: olyan fém vagy félfém, mely biológiai hatása bizonyos koncentrációtartományban, illetve a fölött negatív

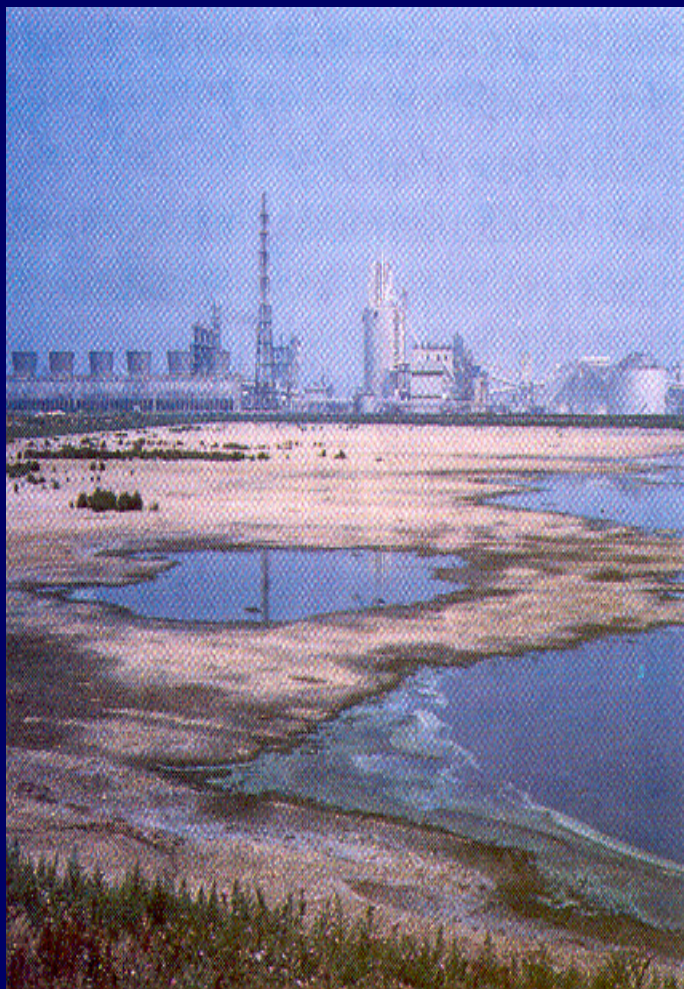
Legkritikusabb hatású, a bioszférába nagy mennyiségben bekerülő nehézfémek: Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, Ni, Hg

A bioszférába kisebb mennyiségben bekerülő nehézfémek: As, Co, Mn, Mo, Se, V



Fémek körforgása a környezetben (Paasivirta, 1991 nyomán)

A talaj nehézfém-szennyeződésének okai



- **Fosszilis energiahordozók** (szén, olaj) elégetése
- **Ipari létesítmények emissziója**
- **Közlekedés** légszennyezése
- **Bányászat** (meddőhányók), kohászat, fémfeldolgozás
- **Ipari és kommunális hulladékok** (pl. galvániszap) gondtalan kezelése
- **Mezőgazdasági termelés**

A talajok nehézfém-szennyeződésének mezőgazdasági forrásai

(Alloway, 1990 és Kabata-Pendias és Pendias, 1992 nyomán; Simon et al., 1999)

Elem	Szennyvíz- iszap*	Foszfor- műtrágya	Nitrogén- műtrágya	Istálló- trágya	Meszező- anyag	Szemét- komposzt	Peszti- cid
	mg/kg						%
Cd	1-3410	0,1-170	0,05-8,5	0,1-0,8	0,04-0,1	0,01-100	–
Cr	8-40600	66-245	3,2-19	1,1-55	10-15	1,8-410	–
Cu	50-8000	1-300	–	2-172	2-125	13-3580	12-50
Hg	0,1-55	0,01-1,2	0,3-2,9	0,01-0,36	0,05	0,09-21	–
Ni	6-5300	7-38	7-34	2,1-30	10-20	0,9-279	–
Pb	29-3600	7-225	2-27	1,1-27	20-1250	1,3-2240	60
Zn	91-49000	50-1450	1-42	15-566	10-450	82-5894	1,3-25

*A hazai szennyvíziszapok nehézfém koncentrációi jóval kisebbek a megadott maximális értékeknél.

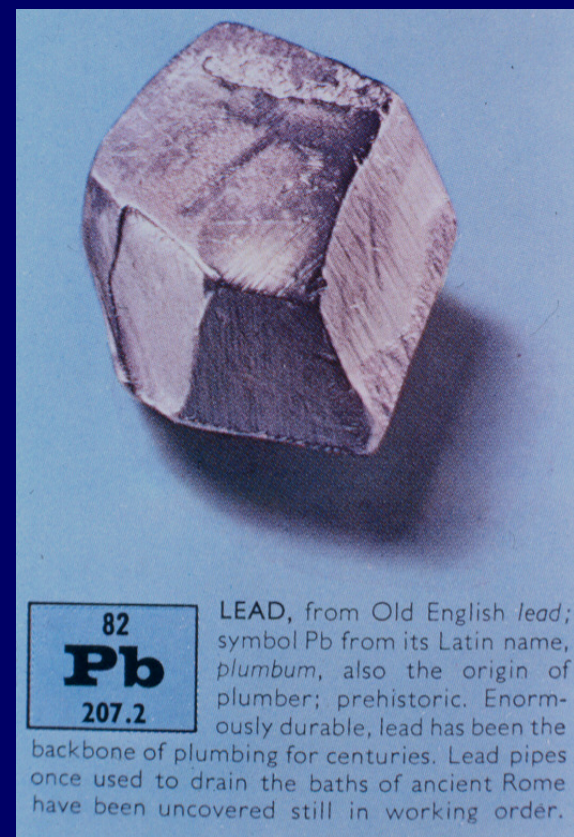
Az adatok száraz tömegre vonatkoznak.

A talajok nehézfém-szennyeződésének veszélyei

- A termőtalajok **nehézfém** (mikroelem) - **mérlege** általában **pozitív**
- A nehézfémek általában a **feltalajokban dúsulnak fel**
- A talaj egy bizonyos határig **pufferként** viselkedik, majd később **önmaga is szennyezővé válik** → “**kémiai időzített bomba**”
- A **talajsavanyodással** a nehézfémek mobilizálódnak és bekerülnek a talajoldat → talajvíz → mikroorganizmus → növény → állat → ember **táplálékláncba**
- A **növényekben** igen nagy mennyiségű nehézfém **halmozódhat fel** látható toxicitási tünetek nélkül

A talajok ólomszennyeződése

- Szennyezetlen mezőgazdasági talajokban átlagosan **32 mg/kg Pb**
- **Talajok ólomszennyeződése:** ipari tevékenység (bányászat, kohászat), közlekedés (**ólmozott üzemanyagok**), széntüzelésű erőművek, gumigyárak, ólomakkumulátorok, gumiköpenyek kopása, ólomtartalmú festékek, műanyagok elégetése
- **Szennyvíziszapok, műtrágyák és a meszezőanyagok** közvetítésével viszonylag kevés ólom kerül be a növények termésébe, mivel azt a növények nem tudják gyökerükből a föld feletti szerveikbe szállítani (nem mobilis a talaj-növény rendszerben)
- Hazai **talajhatárérték (C-érték)** (10/2000. rendelet): **150-600 mg/kg Pb**



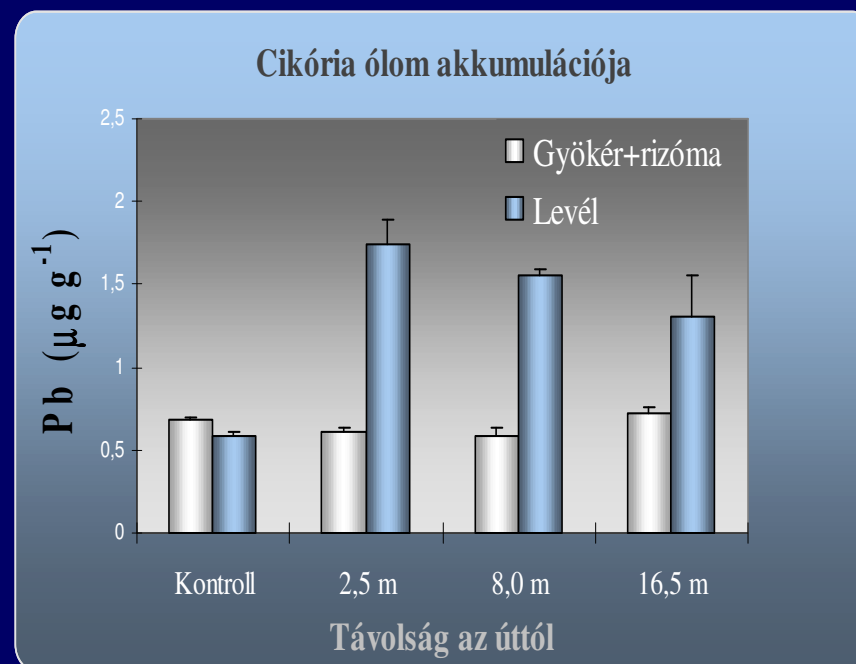
Az ólom (Pb) szerepe a táplálékláncban

- A **szennyezetlen talajokon fejlődő növényekben** általában 0,1-10 mg/kg ólom található, az átlagérték 2 mg/kg
- Általában a talaj 100-500 mg/kg, a növények 30-300 mg/kg-os ólomkoncentrációja esetén alakulnak ki **toxicitási tünetek**: a növény fejlődése lelassul, fotoszintézise, sejtosztódása, vízfelvétele gátolt. A levelek ez esetben sötétzöldek, az idősebb levelek elhervadnak, rövid barna színű gyökerek és satnya levelek alakulnak ki
- A **növények** (elsősorban a gyökerek) **ólomakkumulációját** a talaj meszezésével, foszfátok, szulfátok, mangán-oxid és szerves anyag kijuttatásával lehet **csökkenteni**
- Az **állati és emberi szervezetben** az ólom **kumulatív mérég**: rákkeltő hatás, fejlődési rendellenességek, idegrendszer károsodása

A nyíregyházi feltalajok ólomszennyeződése

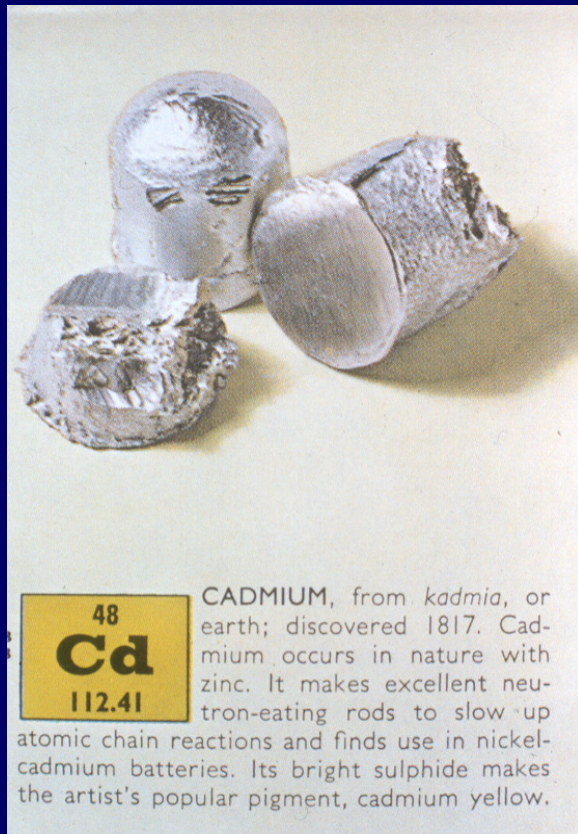
Nyíregyháza forgalmas útjai mentén a feltalajokban 0,2–4,0 méter távolságban az **ólomkoncentráció 9-607 mg kg⁻¹**, a cinkkoncentráció 34-246 mg kg⁻¹, a kadmiumkoncentráció pedig 0,28-1,12 mg kg⁻¹. Mindez szignifikánsan magasabb a forgalomtól távol eső szennyezetlen talajok nehézfém-koncentrációihoz (**5,6-9,2 mg kg⁻¹ Pb**, 33-48 mg kg⁻¹ Zn és 0,05-0,30 mg kg⁻¹ Cd) képest.

Az utak mentén a passzív monitoring során indikátor növényként használt **mezei katángban**, illetve az aktív monitoring során az utak mellé kihelyezett **levélcikóriában** egyaránt magasabb Pb, Cd, Cr, és Ni koncentrációt mértünk a kontroll terület növényeihez képest.



E573-as főútra merőlegesen kihelyezett levélcikória indikátornövények ólom akkumulációja 30 napos expozíció után
(aktív monitoring, Nyíregyháza, 1995;
Simon 2001 nyomán)

A talajok kadmiumszennyeződése

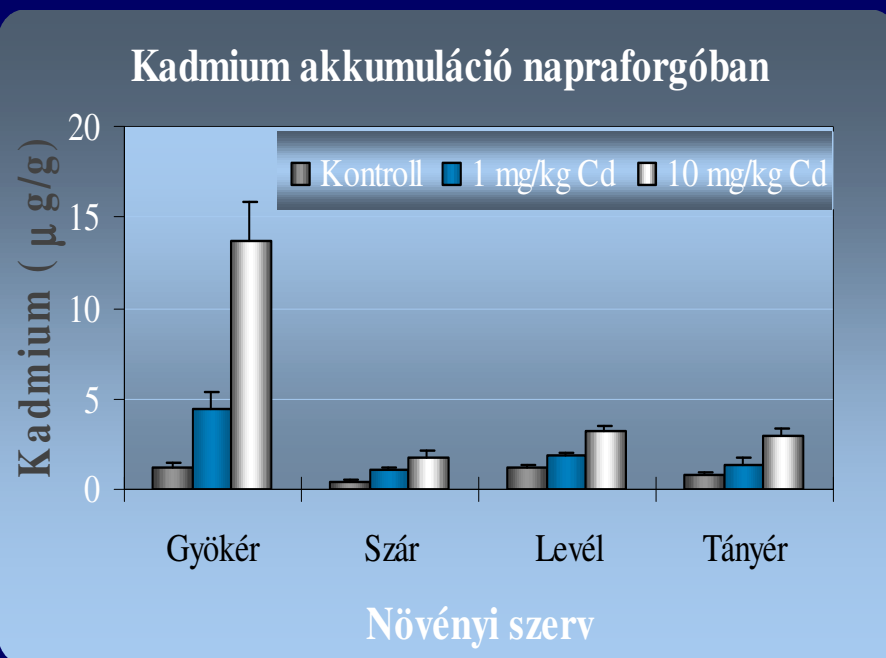


- **Szennyezetlen talajok kadmiumtartalma** 0,06-1,1 mg/kg, világátlag a felszíni talajokban **0,53 mg/kg**
- A **legjelentősebb szennyezőforrás** a **légköri ülepedés** (kadmium kerülhet a légkörbe a fémkohászattal, fosszilis tüzelőanyagok és a szemét elégetésével) és a **foszfor műtrágyázás**
- A **foszfát-műtrágyákban** 0,1-170 mg/kg kadmium található
- A **szennyvíziszapok** 1-3650 mg/kg kadmiumot tartalmazhatnak (ez utóbbi szélsőségesen magas, ritkán előforduló érték)
- Hazai **talajhatárérték (C-érték)** (10/2000. rendelet): **2-10 mg/kg Cd**

A kadmium (Cd) szerepe a táplálékláncban

- A **szennyezetlen talajokon** termesztett növényekben általában 0,3-0,5 mg/kg-nál kevesebb kadmium található
- A talaj-növény rendszerben a kadmium **nagyon mobilis**
- A növényekben legtöbbször 5-20 mg/kg kadmiumtartalom okoz **toxicitási tüneteket**: a növények növekedése gátolt, gyökérzetük károsodik, levelei klorotikusak, a levélszélek vagy levélerek vörösesbarnára színeződnek, később elhalnak és lehullanak
- Általában nagy a **levélzöldség-félék** és a **káposztafélék** kadmiumtartalma, míg a **gabonafélék** magvai viszonylag keveset tartalmaznak ebből a nehézfémről
- A **haszonnövények kadmiumfelvételét** a szennyezett talaj meszezésével, szervesanyag kijuttatással, szennyezetlen talajjal történő takarással lehet csökkenteni
- Az **állati és emberi szervezetben** a kadmium **nagyon toxikus**: rákkeltő hatás, csontelváltozások, tüdő- és vesekárosodás → **itai-itai** betegség

Kadmiummobilitás vizsgálatok



**Napraforgó kadmium akkumulációja
tenyészedényes kísérletben**
(Nyíregyháza, 1995; Simon, 1998
nyomán)

- Szabadföldi körülmények között a **szennyezetlen barna erdőtalajon** ($162 \mu\text{g Cd kg}^{-1}$) természetett **napraforgó kaszatjában** relatíve kevés kadmium ($114 \mu\text{g Cd kg}^{-1}$) akkumulálódott

- **Üvegházi tenyészedényes kísérletben** a barna erdőtalajhoz adott 10 mg kg^{-1} kadmium hatására a kadmium elsősorban a **gyökerekben akkumulálódott** ($13,69 \text{ mg Cd kg}^{-1}$), de a viszonylag rövid interakciós idő ellenére a **virágkezdeményekben** is jelentős mennyiségű kadmium ($3,17 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) jelent meg – **fennáll** tehát **a Cd táplálékláncba kerülésének veszélye.**

A talajok rézszennyeződése

Réz (Cu) a talajokban

- a **litoszférában** átlagosan 50 mg/kg található, **felszíni talajokban** az átlagos érték 20 mg/kg
- a **talajok rézszennyeződését** részben a bányászat, kohászat, fémelőállítás következtében fellépő légköri ülepedés okozhatja
- a hőerőművekben elégetett **szénből keletkezett hamu** a talajokban fontos szennyezőforrás lehet
- a fa, fosszilis tüzelőanyagok és a szemét elégetése miatt a **városi talajok** réztartalma a vidékiekhez képest 5-10-szeresére nőhet
- a **mezőgazdasági talajok** legjelentősebb szennyezőforrásai a réztartalmú **növényvédő szerek**.
- **Hazai talajhatárérték (C-érték):** 200-400 mg/kg

Réz (Cu) a növényekben

- általában a talaj 150-400 mg/kg-os réztartalma már **fitotoxikus**
- réz takarmánykiegészítők** alkalmazása esetén megnő a sertés- és tyúktrágya réztartalma, és az elérheti akár a 2000 mg/kg-os értéket is
- a **szennyezetlen talajokon fejlődő növények** 5-20 mg/kg rézet tartalmaznak
- a hajtás 20-30 mg/kg-nál magasabb réztartalma már **toxicitási tüneteket** okozhat: a gyökérzet károsodik (megvastagodik, elszíneződik, az elágazások száma csökken), a levelekben klorózis alakul ki, az esszenciális elemek felvétele gátolt.



A talaj szennyeződése radioaktív izotópokkal

Radioaktív szennyeződés

forrásai: radioaktív hulladék,
atomfegyver kísérletek,
reaktor balesetek, nukleáris
létesítmények emissziója

Radioaktív kihullás (fall out):

levegő → víz → talajfelszín
→ tápláléklánc →
sugárbetegség

Reaktorbalesetek talaj-

szennyezői: ^{137}Cs , ^{134}Cs ,
 ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru

Erőművek, foszfátműtrágya gyárak talajszennyezői: ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U ,
 ^{230}Th , ^{232}Th

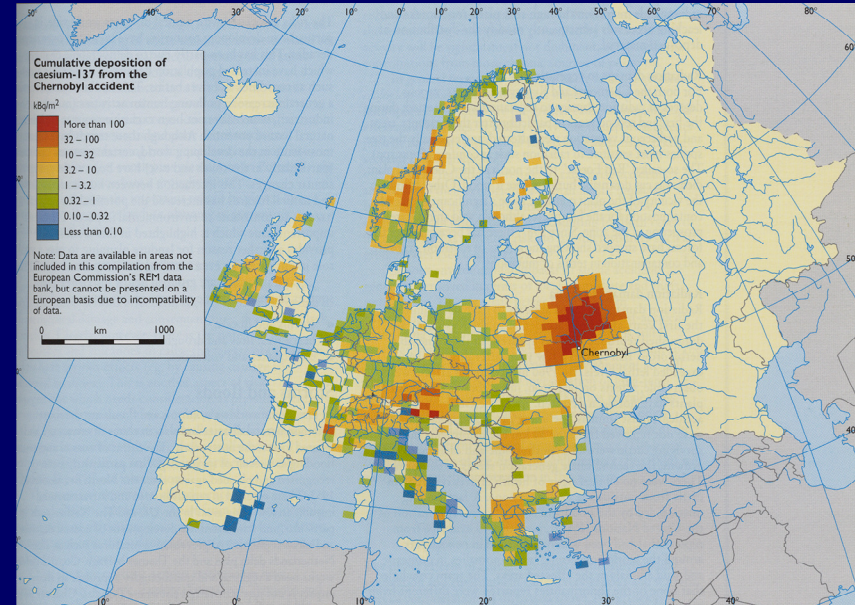
Természetes radioaktív izotópok: kálium műtrágyákkal ^{40}K ,
nyerszfátokkal ^{238}U , foszfor műtrágyákkal ^{236}Ra kerülhet a talajba



Csernobil, 1986

A talaj szennyeződése radioaktív izotópokkal

Radiocézium: ^{137}Cs 30 év felezési idő, ^{134}Cs 2,2 év felezési idő, a ^{137}Cs a talaj legfelső rétegében akkumulálódik, **agyag-ásványokhoz és szerves anyaghoz erősen kötődik**, a talajból a növények kevés radiocéziumot vesznek fel, 95 % a levélzeten keresztül jut a növényekbe. **Talajszennyeződés** esetén a növények ^{137}Cs felvételét meszezéssel, tőzeg és kálium sók kijuttatásával lehet csökkenteni.

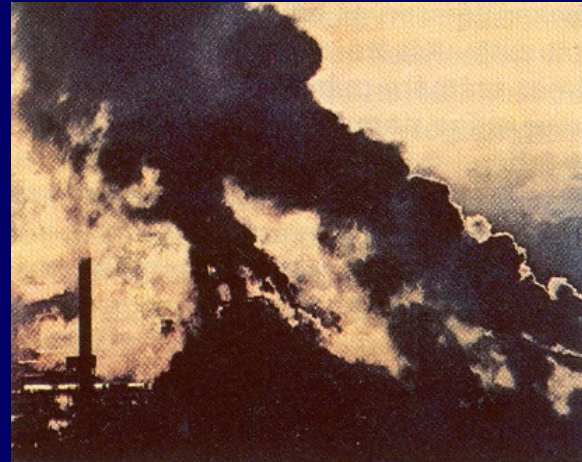


Csernobili radioaktív szennyeződés szétterjedése Európában

Radiostroncium (^{89}Sr , ^{90}Sr): a ^{90}Sr a kolloidokban szegény talajokban **mozgékony**, könnyen bekerül a növények hajtásába. **Talajszennyeződés** esetén a növények ^{90}Sr felvételét meszezéssel, Mg, K, Na és nem sugárzó Sr kijuttatással lehet csökkenteni.

Egyéb talajszennyező szervesetlen anyagok (légszennyező gázok: SO_2 , NO_x , NO_3 , NH_3 , Cl_2 , HCl , F_2 , HF)

- ❖ **Légszennyező gázok:** fosszilis tüzelőanyagok elégetése (energiatermelés, közlekedés, fűtés során), ipari termelés, ipari és természeti katasztrófák → SO_2 , NO_x , NO_3 , NH_3 , Cl_2 , HCl , F_2 , HF
- ❖ **Száraz ülepedés:** kirakódás a talajfelszínre
- ❖ **Nedves ülepedés:** átalakulás a levegőben és a csapadékvízben; kén-dioxid, szulfátok, nitrogén-oxidok, nitrátok → savas-ülepedés → savas eső
- ❖ A **savas esők negatív hatásainak** elsősorban a szabad karbonátokban szegény, kis kationcserélő kapacitással rendelkező talajok vannak kitéve



Szervetlen makroszennyezők talajra gyakorolt hatása

- ❖ **Kén-dioxid:** kéntartalmú energia hordozók elégetésével kerül a légkörbe, ahonnan a talajokba ülepedik ki. Hőerőművek, ipari komplexumok, környezetében, városi övezetekben a talajok kéntartalma megemelkedhet, pontoszerűen kénnel szennyeződik. Nyíregyházán a forgalmas belvárosi autóutak mentén a feltalajokban 301-590 mg/kg ként mértünk, míg a forgalomtól távol eső helyeken 146-264 mg/kg volt a talajok kéntartalma.
- ❖ **Nitrogén-oxidok, nitrátok, ammónia:** antropogén hatásra (pl. műtrágyagyártás, olaj- és gáztüzelés, belső égésű motorok, szennyvíz- és szeméttelpek) jelentős mennyiségű nitrogén-oxid és ammónia jut a légkörbe, ahol salétromsavvá és nitrát sókká alakul → nedves vagy száraz ülepedés a talajfelszínre. Mindez a túlzott nitrogénműtrágyázással együtt hozzájárul a talajvíz **elnitrátosodásához**.
- ❖ **Klór:** a klór cellulóz- és műtrágyagyártás, szeméttégetés során kerül a légkörbe → savas esők. Klór és **nátrium** kerülhet a talajba egyes műtrágyákból, az öntözővízből és az utak jégtelenítése során (Nyíregyháza belvárosi talajaiban 3-10 x magasabb a nátriumkoncentráció a háttér-értéknél) → **másodlagos szikesedés**

A talaj szennyeződése kőolajjal és kőolajszármazékokkal



- ❖ **Olajszennyeződés:** tankhajó-katasztrófák, csővezeték-törés, olajkutak kitörése, berobbanása, kőolaj és kőolajszármazékok tárolása, szállítása során,
- ❖ **Talajszennyeződést okozhatnak:** mezőgazdasági munka- és erőgépek, nyersolajvezetékek, benzintartályok eltörése, katonai bázisokon a kerozin hanyag kezelése, ipari üzemekben az olaj helytelen tárolása, olajos szennyvízzel történő öntözés, olajos szennyvíziszapok mezőgazdasági hasznosítása

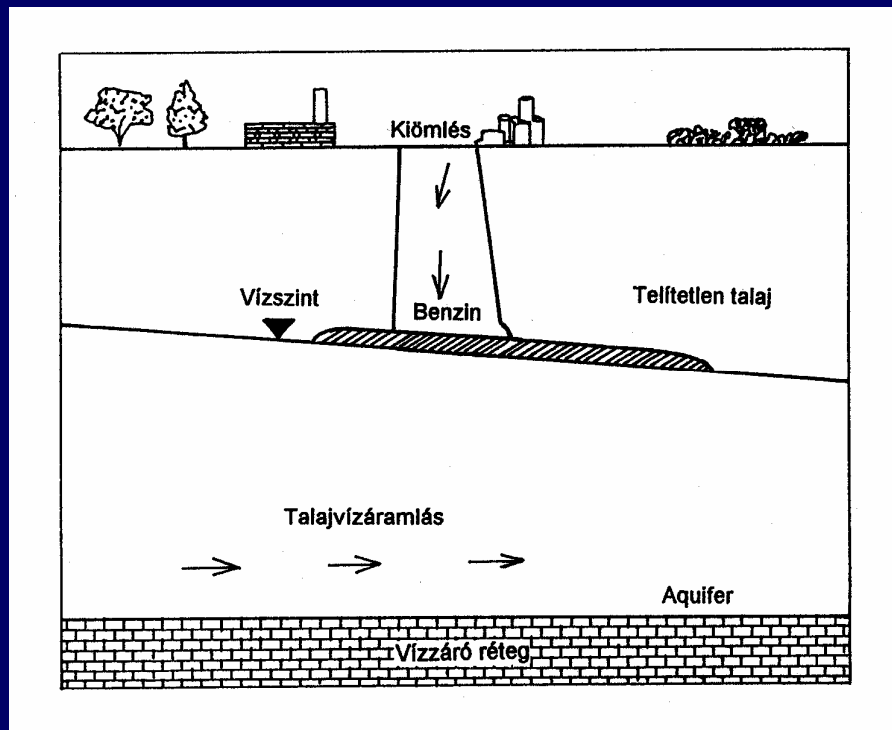
Kőolaj és kőolajszármazékok talajra gyakorolt hatásai

- ❖ Poliklórozott bifenilek, policiklikus aromás szénhidrogének, nehézfémek jutnak a talajba
- ❖ A talaj víz- és levegőháztartása felborul, a növények elpusztulnak
- ❖ A talaj mikrobaközösségeinek működése és összetétele károsodik



Kőolaj-vezeték törés
(Nagyhalász, 1992)

Kőolaj és kőolajszármazékok mozgása és viselkedése a talajban



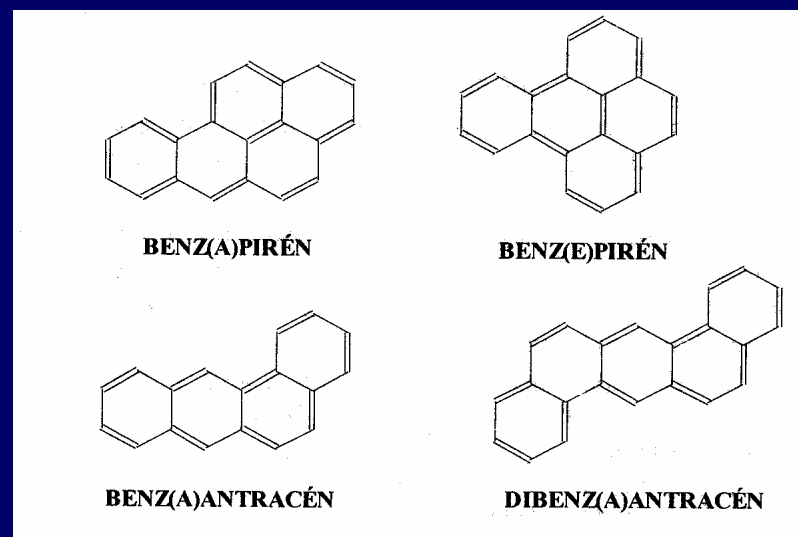
- ❖ **Talajtulajdonságok:** víztelítettség, talajrészecskék átmérője, töltése (fajlagos felület), a talaj kapilláris és vízemelő képessége → összefüggő **olajlencse** alakulhat ki a talajvízszinten
- ❖ A kőolajszármazékok mozgását és viselkedését a talajban és talajvízben azok **fizikai és fiziko-kémiai tulajdonságai** (pl. illékonyság, oldhatóság, viszkozitás,

A talaj szennyeződése szerves mikroszennyezőkkel

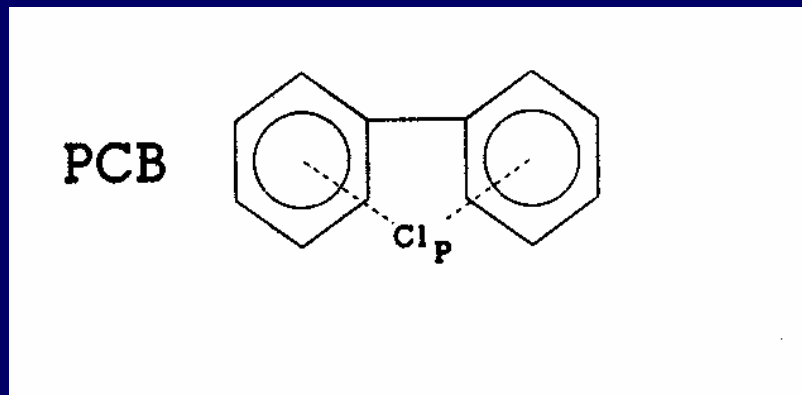
- ❖ **Szerves mikroszennyezők:** kis mennyiségben előforduló, egészségre ártalmas, igen veszélyes kémiai anyagok
Mutagén és rákkeltő hatásúak, idegrendszeri károsodást, bőr, csont, keringési és emésztőrendszeri megbetegedéseket okoznak az emberben
- ❖ **Policiklikus aromás szénhidrogének (PAH)**
- ❖ **Benzol és alkil-benzolok (BTEX)**
- ❖ **Poliklórozott bifenilek (PCB)**
- ❖ **Klórozott aromás szénhidrogének**
- ❖ **Poliklórozott dibenzo-dioxinok (PCDD) és dibenzo-furánok (PCDF)**
- ❖ **Klórfenolok**
- ❖ **Felületaktív anyagok (detergensek)**

Policiklikus aromás szénhidrogének (PAH)

- ❖ **Policiklikus aromás szénhidrogének** (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH): 4–7 benzolgyűrű összekapcsolódásából keletkező nagy molekulatömegű vegyületek
- ❖ **Előfordulás:** tökéletlen égés, kokszosítás, pirolízis, kipufogógázok, ipari üzemek, olajkályhák füstgázai
- ❖ **Talajszennyeződés:** ülepedés útján vagy csapadékkal kerülnek a talajokba, ahol felhalmozódnak, humuszkolloidok felszínén kötődnek meg → perzisztenciájuk 2-16 év
- ❖ Gyökérzöldségek, gumósok föld alatti szerveiben halmozódnak fel, **táplálékláncba** kerülve mutagének és rákkeltők
- ❖ **Hazai talajhatárérték:** 1-40 mg/kg összes PAH (10/2000. rendelet)

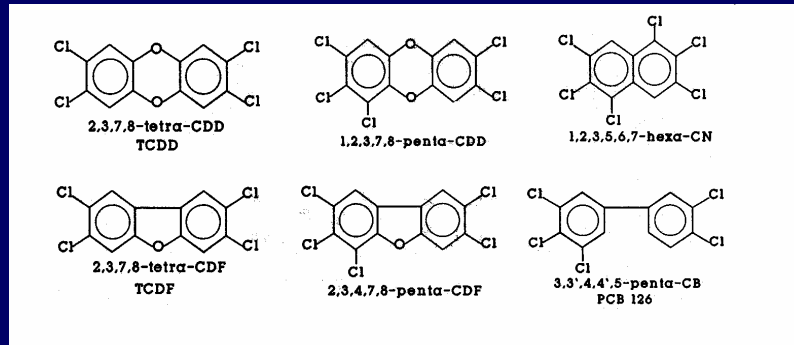


Poliklórozott bifenilek (PCB)



- ❖ **Előfordulás:** transzformátorok, kondenzátorok szigetelő folyadéka, hidraulikai folyadék, lágyítók, ragasztó és kittelő anyagok, textíliák, lakkok, indigók, kenőolajok, kenőzsírok
- ❖ **Talajszennyeződés:** ülepedés a légkörből, szennyvizekből, szennyvíziszapokból. Lebomlásuk a talajokban lassú, mobilitásuk csekély, vízdoldhatóságuk és toxicitásuk a klórozottság függvénye, koncentrációjuk a szennyezetlen talajban 0,05-0,1 mg/kg
- ❖ Növények közvetítésével kerülnek a **táplálékláncba** ahol az emlősökben felhalmozódhatnak, a májat károsítják, rákkeltő hatásuk sem kizárt
- ❖ **Hazai talajhatárérték:** 0,1-5 mg/kg összes PCB (10/2000. rendelet)

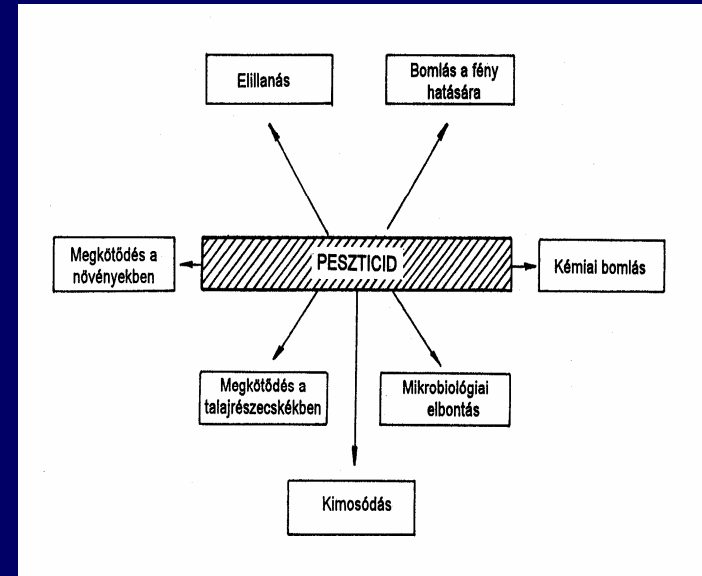
Dioxinok



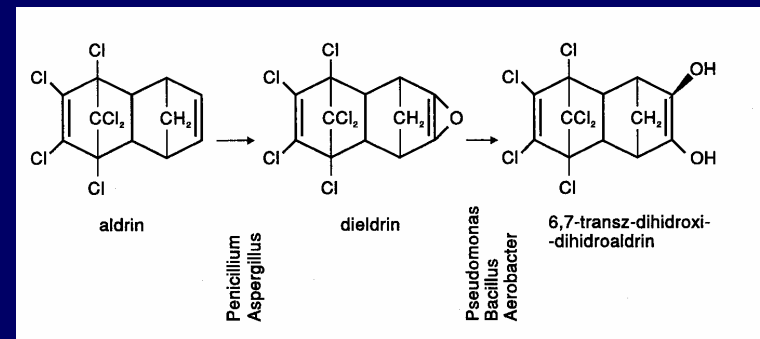
- ❖ **Poliklórozott dibenzo-dioxinok (PCDD)** és **dibenzo-furánok (PCDF)**: szerves klórszennyezők gyártása és alkalmazása (papírfehéretés, cellulózipar) és *termikus eljárások* (kábelégetés, fűtőolaj égetés, háztűzek, PVC tüzek, kórházi és veszélyes hulladék égetés, szeméttégetés) során keletkeznek
- ❖ **Talajszennyeződés**: légköri szennyeződés útján. Nagyfokú perzisztencia, felezési idejük a talajban 12 év. Szennyvíziszapok hasznosítása során a PCDD és PCDF a talajban feldúsul.
- ❖ Növények, hal, hús, tej közvetítésével kerülnek a **táplálékláncba**, ahol rendkívül toxikusak, kumulálódnak, rákkeltőek, károsítják az immun- és idegrendszert, és a magzat fejlődését.
- ❖ **Hazai talajhatárérték**: 5-1000 ng/kg TE (toxicitási egyenérték) (10/2000. rendelet)

A talaj szennyeződése peszticidekkel

- ❖ **Növényvédő szerek (peszticidek):** a termesztett növényeket károsító növényi vagy állati szervezetek elleni védekezésre használt, többnyire szintetikus vegyszerek
- ❖ **Problémák talajszennyeződés esetén:** károsíthatják a talaj élővilágát, csökkenthetik a talaj termékenységet, szennyezhetik a talajvizet
- ❖ A **perzisztens**, nehezen lebomló peszticidek a csúcsragadozóknak és az emberben **felhalmozódhatnak** → toxikusak, mutagének, rákkeltők
- ❖ **Perzisztens szerek:** klórozott szénhidrogének, nitro-alkil-fenol származékok, ditiokarbamát származékok, bipiridilium-származékok, klór-amino-sz-triazin származékok, szulfonurea-származékok

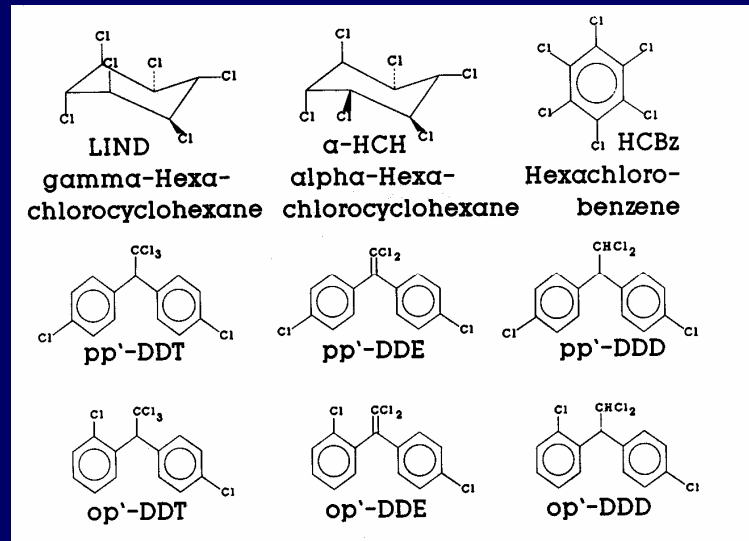


A növényvédő szerek átalakulása a talajban
(Szege, 1992 nyomán)



A bomlástermék toxikusabb mint az
eredeti vegyület

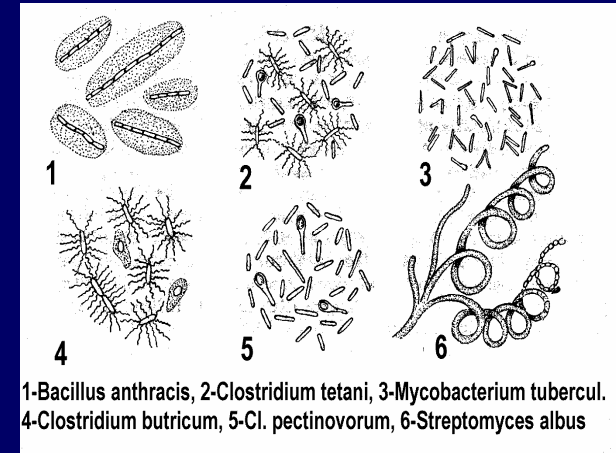
Klórozott szénhidrogének



- ❖ **Klórozott szénhidrogének:** rovarirtó szerek, pl. malária ellen, diklór-difenil-triklór-etán, technikai HCH, aldrin, dieldrin, endrin → **nagyon perzisztensek** (DDT 3-5 évig, bomlástermékei 15-25 évig is kimutathatóak a talajban), bomlástermékei gyakran toxikusabbak mint az eredeti vegyület
- ❖ Kumulálódnak, a **táplálékláncban** és az állati zsírszövetekben feldúsulnak, karcinogének, máj- és vesekárosodást okoznak. Használatuk 1968 óta Mo-n is tilos.
- ❖ **Engedélyezett vegyületek:** lindán, dienoklór, kelevan, endoszulfán, *kevésbé perzisztensek, kevésbé kumulálódnak*, klórozott szénhidrogének helyett szerves foszforsav-észterek
- ❖ **Hazai talajhatárérték:** 0,2-4 mg/kg DDT/DDD/DDE összkoncentráció (10/2000. rendelet)

A talaj biológiai szennyezőanyagai

Talajszennyeződés: antropogén eredetű szennyvizek, szennyvíziszapok kijuttatása és kommunális hulladékok elhelyezése során, állattartó üzemek hígtrágyáival és istállótrágyáival



- ❖ **Coli-csoport tagjai, Salmonella, Shigella, Klebsiella:** viszonylag gyorsan 2-6 hónap alatt elpusztulnak
- ❖ **Mycobaktérium-fajok:** 1-2 éven át megmaradnak aktív állapotban, tuberkolózis, lepra okozói
- ❖ **Patogén spóras Clostridium-fajok:** a talajok 50 %-ból kimutathatók, tetanusz, lépfene, botulizmus okozói
- ❖ Szennyvíziszap kijuttatással a **termofil baktériumok**, anaerob cellulózbontó és fehérjeanyagot rothasztó **spóras baktériumfajok** nagy tömegben kerülnek a szántóföldre
- ❖ **Bacillusok:** a talaj kommunális vagy ipari eredetű szennyeződésekkel való terhelésének indikátorai

Talajremediáció

Talajremediáció fogalma: 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, melynek a *kockázata* már elfogadható.

Beavatkozási szint: a talajszennyezők azon *küszöbértéke* (határértéke), mely már elviselhetetlen kockázatot jelent az ökoszisztémára és az emberi egészségre → a területet használót remediációra kötelezik.

Remediálási módszerek: fizikai, kémiai, termikus és biológiai módszerek ismertek, melyek *ex situ* → a talaj eltávolításával, és *in situ* → a talaj eltávolítása nélkül, helyben végezhetőek el.

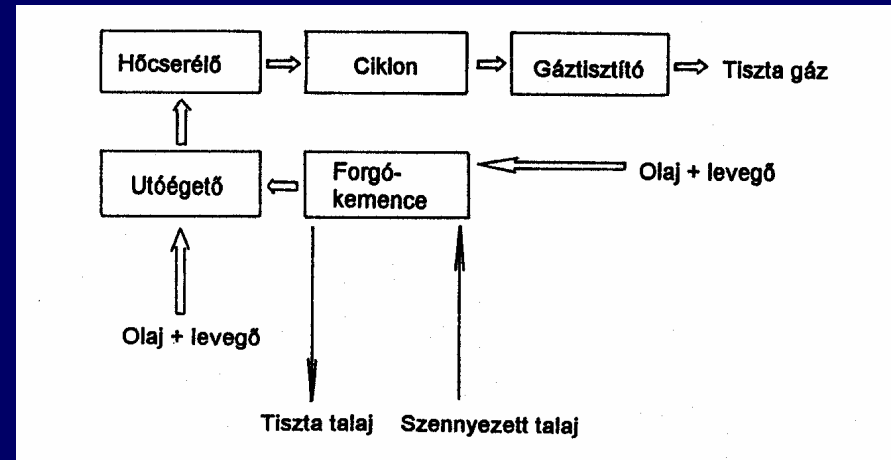
Leggyakoribb talajremedációs eljárások: talajégetés (talajüvegesítés), talajmosás és talajextrakció, talajszellőztetés, elektrokémiai talajkezelés, talajstabilizálás és talajszilárdítás, bioremediáció, fitoremediáció.

Talajégetés

- A **talajégetés** (termikus kezelés) során a talaj szennyezőit magas hőmérsékleten elégetik, illetve átalakítják.
- A kitermelt szennyezett talajból a 40-50 mm-nél nagyobb átmérőjű részeket szitálással eltávolítják, majd a talajt aprítják.
 - **1. égetési szakasz:** olajjal fűtött forgó *kemencében* a talajrészecskék szennyezőit 200-700 °C közötti hőmérsékleten elpárologtatják, illetve kémiaiilag átalakítják.
 - **2. égetési szakasz:** *utóégető berendezésben* olaj-levegő (oxigén) keverék elégetésével 900-1100 °C-on a gázhalmazállapotú szennyezőanyagokat szén-dioxiddá és vízzé oxidálják → a szennyezett gázokat lehűtik → a szennyezőanyag részecskéket ciklonokban leválasztják → a gázt gáztisztító berendezésben tisztítják és így ártalmatlanítják → a megtisztított talajt ezután levegővel vagy vízzel lehűtik

Alkalmazhatóság: Valamennyi talajtípusból valamennyi szerves szennyezőanyag eltávolítható → pl. *benzin, dízelolaj, policiklusos aromás vegyületek, halogénezett szerves vegyületek, cianidok. Higannyal, arzénnel, kadmiummal, ólommal és vegyületeikkel* szennyezett talajok is megtisztíthatók → a szennyezett gázokat különös gondossággal kell megtisztítani

Időszükséglet: kevés ; **költség:** magas; **előny:** univerzalitás



Hátrány: az égetés során a halogénezett szerves szennyezőanyagokból *másodlagos toxikus anyagok* (pl. *dioxin*) *keletkezhetnek* → a dioxinok emisszióját elkerülendő az utóégetőben 1000-1100 °C-nál magasabb hőmérsékletet kell kialakítani. Az eljárás során a talaj *szervesanyag-tartalma*, illetve *humusztartalma elvész* → a talaj mezőgazdasági célra már nem hasznosítható

A módszer alkalmazása a gyakorlatban: Általában nagy mennyiségű, halogénezett szerves vegyületet nem tartalmazó szennyezett talaj *ex situ* tisztítására. **Költségei** a talajtípustól, a talaj víztartalmától és szennyezőanyag-tartalmától függnnek

Talajüvegesítés

A **talajüvegesítés** (*vitrifikáció*) során a a szennyezett talajokban vagy iszapokban lévő kioldódó vagy kioldható nehézfémeket és/vagy radionuklidokat olvadt üvegben oldhatatlan oxidokká alakítják. A nehézfémek és radioaktív anyagok mérgező hatása megszűnik, az olvadékokat depóniákban lehet elhelyezni. A szerves szennyezők a magas hőmérsékleten leválnak a talajkolloidokról és/vagy elégnek. Speciális hőkezeléses (termikus) ex situ talajkezelési eljárás.

Alkalmazhatóság: a módszer nehézfémek és radioaktív anyagok immobilizálására, egyes szerves szennyezőanyagok eltávolítására alkalmas. Igen fontos kritérium, hogy a talajüvegesítési eljárás során ne szabaduljanak fel mérgező gázok a szennyezett talajokból → a villamos kemence sokkal alkalmasabb a szilárd tüzelőanyaggal fűtött olvasztónál a szennyezett talajok elüvegesítésére, mivel lényegesen kisebb a káros anyag emissziója

Előny: kis emisszió kibocsátás, nagyon kis füstgáztermelés → a módszer alternatívaként kínálgózik nagy radioaktivitású hulladékok ártalmatlanítására. Megfelelő előkezeléssel és adalékanyagokkal értékes építőanyag (kerámia, díszkavics) állítható elő. **Időszükséglet:** közepes; **költségigény:** magas.

Talajmosás és talajextrakció

A **talajmosás** és **talajextrakció** során a szennyezőanyagokat kémiai és fizikai folyamatok eredményeképpen *folyékony kivonószer* segítségével távolítják el a talajból.

- a talajmosás során *vizet vagy adalékanyagokat* (savakat, felületaktív anyagokat, komplexképzőket, nátrium-hidroxidot) tartalmazó híg vizes oldatokat
- *talajextrakció* során *tömény szerves oldószereket* (pl. trietil-amint, acetont), szervesetlen savakat (sósavat, kénsavat), *szerves savakat* (ecetsavat, tejsavat, citromsavat), illetve *komplexképző szereket* (EDTA, NTA; nitrilo-triacetát) alkalmaznak a szennyezőanyagok eltávolítására
- a szennyezett talaj kezelése során a szennyezőanyagok a kivonószerként alkalmazott *vizes oldatban* és az *iszapszerű talajfrakcióban koncentrálnak* (talajmosás), illetve a *kivonószerbe kerülnek át* (talajextrakció).

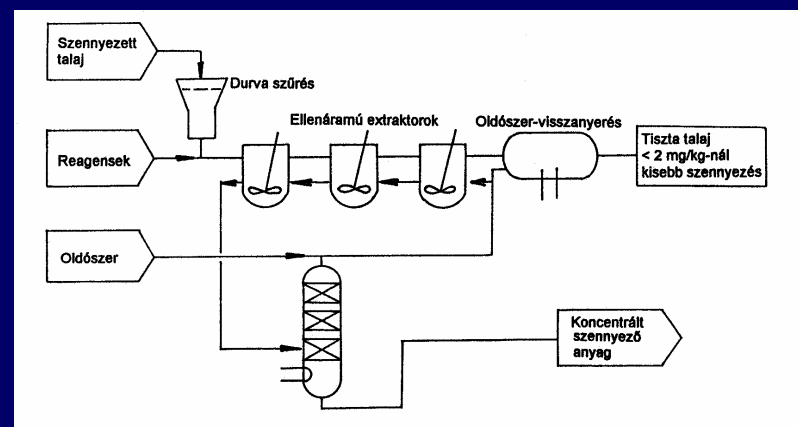
Alkalmazhatóság: szénhidrogének (kőolajszármazékok) mellett halogénezett szénhidrogének, policiklusos aromás szénhidrogének, egyes nehézfémek (pl. kadmium, ólom-tetraetil) és cianid eltávolítása a szennyezett talajokból

Időszükséglet: sok; **költség:** közepes/magas; **előny:** *ex situ* és *in situ* is alkalmazható; **hátrány:** nagy mennyiségű szennyvíz keletkezik, amit meg kell tisztítani; nincs univerzálisan alkalmazható oldószer, csak akkor alkalmazható, ha a szennyezőanyag oldhatósága az oldószerben megfelelően nagy; az eljárás leginkább homoktalajokon alkalmazható, a talajvíz elszennyeződhet

Ex situ talajmosás

A szennyezett talajt **előkezelik** → rostálással eltávolítják a növényi maradványokat, nagyobb tárgyakat (pl. fadarabokat, köveket).

- a kitermelt szennyezett talajt speciális berendezésben alaposan **összekeverik a kivonószerrel**
- a kivonószert **elválasztják** a talajrészecskéktől
- a szennyezőanyagokat tartalmazó kivonószert **kezelik, tisztítják**
- az eljárást **szemcseméret szerinti frakcionálással** (szétválasztással) is kombinálhatják ilyenkor a viszonylag nagy méretű tiszta talajrészecskéket (durva homokot, köveket) hidrociklonokban, fluidágyas vagy flotációs berendezésekben választják szét a kisméretű szennyezett talajrészecskéktől (iszaptól, agyagtól), illetve a szennyezett szerves anyagtól, humusztól.



Alkalmazhatóság: leginkább más remediációs eljárások **előkezeléseként** alkalmazzák → a szennyezett talaj térfogata így lényegesen (az eredeti mennyiség 5-40 %-ára) csökken és a szennyezőket koncentráltan tartalmazza, ezt a kisebb volumenű szennyezett anyagot már olcsóbban lehet más remediációs technikákkal (pl. **termikus eljárással, bioremediációval**) tovább kezelni, vagy víztelenítés után veszélyes hulladékként **deponálni** (lerakni)

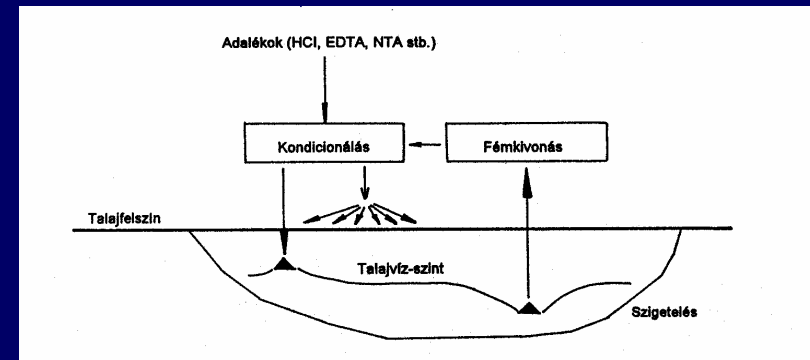
– Elsősorban **homoktalajok tisztítására** alkalmas (a talaj homok és kavics tartalma érje el az 50 %-ot, agyagtartalma pedig ne haladja meg a 10-20 %-ot), melyek humusztartalma is alacsony.

In situ talajmosás

A **vizet** (melyhez savakat, felületaktív anyagokat, komplexképzőket, oxidáló és redukáló szereket is adhatnak) **felszíni árkok, csatornák, függőleges mély kutak** segítségével vagy azok kombinációjával juttatják a talajba.

- a bejuttatott oldószer átmossa a talajrészecskéket és az oldható szennyezőanyagokat **felveszi**,
- a szennyezőanyagokat felvett kivonószert ezután kiszivattyúzzák a talajból, és **kezelik, tisztítják** → a tisztított vizet a folyamatban újból felhasználhatják.

Ügyelni kell arra, hogy a **talajvíz** ne szennyeződjön el!



Alkalmazhatóság: nagy felületen, elsősorban **szénhidrogén-szennyeződések** eltávolítására.

- eredményesen vontak ki **kadmiumot** is a talajból **sósavat** tartalmazó vízzel
- az eljárás időigényes, és leginkább homogén, jó áteresztő képességű **homoktalajok** esetén alkalmazható

Talajszellőztetés

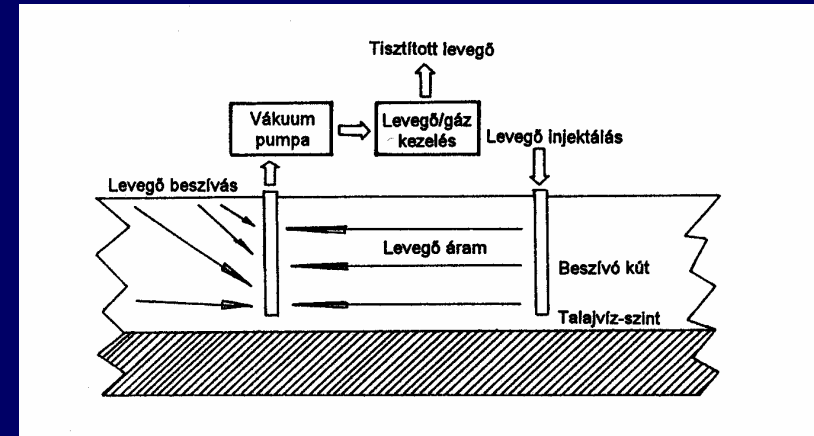
A **talajszellőztetéses** (átlevegőztetéses, vákuum extrakciós) eljárás során az illékony szennyezőket a szennyezett talajrétegen átszívott vagy átnyomott megfelelő hőmérsékletű, nedvességtartalmú és sebességű **levegőáram** segítségével távolítják el. A szennyezett levegőből a szennyezőanyagokat alkalmas módszerrel **leválasztják** → a megtisztított levegő a folyamatba visszavezethető.

Alkalmazhatóság: elsősorban **illékony szénhidrogén-szennyeződések** (triklór-etilén, perklór-etilén, toluol, benzol, szerves oldószerek és benzin) eltávolítására a helyszínen alkalmazott (*in situ*) talajtisztítási módszer, melyet **nagy áteresztő képességű homokos talajok** tisztítására lehet alkalmazni. A gyakorlatban nagy kiterjedésű szennyezett területek esetén alkalmazzák → *in situ vizes extrakcióval* és *in situ bioremediációval* kombinálhatják → elvileg *ex situ* is kivitelezhető.

Időszükséglet: közepes/sok (néhány hónaptól néhány évig terjed); **költség:** magas (de kevesebbe kerül mint a talaj hőkezelése vagy kiemelés utáni mosása); **előny:** nagy felületen alkalmazható; **hátrány:** agyagos talajok tisztítására nem alkalmazható.

In situ talajszellőztetés

- a szennyezett területen viszonylag kis mélységig (a talajvíz szintjéig) *levegőztető kutakat* helyeznek el függőlegesen a talajban, melyeken levegőt *injektálnak* keresztül, vagy azokból a levegőt vákuumpumpákkal *elszívják*
- a *talajvíz szintjének csökkentésével* a telítetlen zóna mélysége megnövelhető
- a szennyezett talaj felszínét levegőzáró réteggel (pl. aszfalttal, fóliával) *szigetelik* le
- a kialakuló levegőáram hatására az illékony szerves szennyezők a talajrészecskékről *leválnak*, illetve a talaj pórusvizéből a talaj *póruslevegőjébe* kerülnek át
- a szennyezőanyagok gőzeit tartalmazó levegőt *aktív szénen, gázmosókban vagy katalitikus elégetéssel* meg kell *tisztítani*, hogy az a környezetet ne szennyezze



A talajszellőztetéses talajtisztítás *speciális változata*, amikor a talajba levegő helyett *forró gőzt* injektálnak, vagy a talaj más módon (pl. *forró levegővel, rádióhullámokkal*) melegítik → a talajban kialakuló magasabb hőmérséklet következtében a szerves szennyezőanyagok illékonyasága nő → az eljárás hatékonysága javul.

Elektrokémiai talajkezelés

Az **elektrokémiai talajkezelés** azon az elven alapul, hogy elektromos áram hatására a talajba helyezett anódhoz vagy katódhoz vándorolnak a töltéssel rendelkező részecskék, így a szennyezőanyagok is. Elvégezhető a *helyszínen (in situ)* vagy a *szennyezett talaj kiemelése után külön berendezésben (ex situ)*. **Elektrokinetikai folyamat** → az elektródok között a talajban elektrooszmózis, elektroforézis és elektrolízis játszódik le:

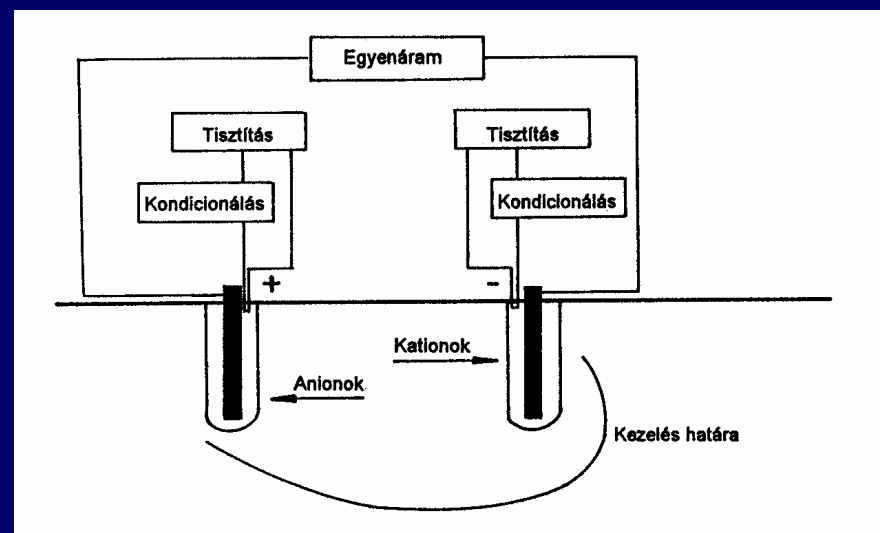
- **elektrooszmózis** hatására a talajpórusokban lévő nem ionos jellegű szennyezőanyagokat is tartalmazó vizes fázis a negatív elektród (katód) felé szállítódik
- **elektroforézis** hatására a pórusvízben jelenlévő töltéssel rendelkező kolloidok és agyagrészecskék **elektrolízis** hatására pedig az ionok és ion komplexek vándorolnak az elektródokhoz
- a pozitív töltésű kationok a **katódhoz**, a negatív töltésű anionok az **anódhoz** vándorolnak

Alkalmazhatóság: *ionos szennyezőanyagok vagy elektromos töltéssel rendelkező kis részecskék; nehézfémek és radionuklidok (Pb, Cd, Cr, Sr, Cs, U), szerves anyagok (antracén, fluorantén) vagy azok keverékeinek eltávolítása a talajból*

In situ elektrokémiai talajkezelés

A rendszer több, a talajban függőlegesen vagy vízszintesen elhelyezett **elektród párból** (anódból vagy katódból) áll, melyekbe egyenáramot vezetnek.

- elektrokinetikai folyamatok hatására a nedvesség (talajvíz) az ionokkal és a töltéssel rendelkező kis részecskékkel az elektródokhoz *vándorol*
- a porózus házban elhelyezett elektródokat *oldószerekkel folyamatosan öblítik*, hogy az elektrokémiai folyamat ne álljon le
- az szennyezett oldószert megtisztítják és újból felhasználják.



Időszükséglet: közepes (néhány héttől néhány hónapig terjed); **költség:** magas; **előny:** agyagtalajokból is lehetséges a nehézfémek eltávolítása; nem csak az ionos, vízoldható formában jelenlévő fémeket lehet kivonni a talajból, a talajporusokban lévő fémion-koncentráció csökkenésével az oxidokhoz, hidroxidokhoz, karbonátokhoz kötött nehézfémek is oldatba kerülnek és onnan eltávolíthatók; **hátrány:** nagyobb fémdarabok hatására leáll az elektrokémiai folyamat

Talajstabilizálás, talajszilárdítás

A **stabilizálás** és a **szilárdítás** során kémiai, fizikai és termikus folyamatokat alkalmazunk a veszélyes hulladékok ártalmatlanítására.

–A **stabilizálás** során a szennyezőanyagot (hulladékot) kémiaiilag stabilabb, kevésbé oldékony, kevésbé mozgékony (mobilis) és kevésbé mérgező formájúvá alakítjuk át *adalékanyagok* segítségével. Az eljárás során a szennyezőanyagok fizikai tulajdonságai nem feltétlenül változnak meg.

–A **szilárdítás** során a szennyezőanyagot nagy szerkezeti szilárdsággal rendelkező *tömbbe* (monolitba) *ágyazzuk be*. A folyamat során nem mindig alakul ki kémiai kölcsönhatás a szennyezőanyag és a szilárdító közeg között, a szennyezőanyag általában fizikai úton kötődik meg a monolitban.

Időszükséglet: kevés; **költség:** alacsony; **előny:** viszonylag olcsó eljárás, a talajba dolgozott adalékanyagok hatására a szennyezőanyagok (nehézfémek) immobilizálódnak, kisebb felületet szennyeznek, nem mosódnak le a talajvízbe és kisebb mértékben kerülnek be a növényzetbe.; **hátrány:** a szennyezőanyagot nem távolítjuk el a talajból

Szennyezett talajok stabilizálása, szilárdítása

Stabilizáló adalékanyagok:

- ioncserélő gyanták, humuszanyagok, szén pernye, aktív szén, mész, foszfátok, apatit, vas- és mangán-oxidok, agyagásványok, alumínium-szilikátok, beringit, természetes és mesterséges zeolitok, bentonit → *nehézfémek megkötésére*, kioldódásuk megakadályozására
- az agyagásványokon hidrofób jellegű *szerves szennyezőanyagok* is megköthetők, amennyiben azok fémionjait (Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+}) kvaterner ammónium ionokkal cseréljük ki
- a szerves szennyezőanyagok *felületaktív anyagok* közvetítésével is hozzáköthetők a *cementek alkotórészeihez* melyek ezután megszilárdíthatók

Alkalmazhatóság: számos *veszélyes hulladék* mellett olyan *szervetlen anyagokkal szennyezett talajok* ártalmatlanítására is alkalmazzák, melyek viszonylag kis koncentrációban tartalmaznak *szerves szennyezőanyagokat*.

Szilárdító anyagok:

- vázképző anyagok; cement, termoplasztikus kéntartalmú módosított cement, mész–pernye, hőre lágyuló anyagok (paraffin, polietilén, aszfalt emulzió, bitumen), szerves monomerek (karbamid-, formaldehid-, és poliészter gyanta), üveg és/vagy kristályszerű termékek.
- a *szerves szennyezőanyagok* felületaktív anyagok közvetítésével is hozzáköthetők a cementek alkotórészeihez, melyek ezután szintén megszilárdíthatók.

Alkalmazhatóság: iszapszerű vagy folyékony veszélyes anyagok, radioaktív hulladékok, galvániszapok, égetőművek hamuja, nehézfémek ártalmatlanítására, kőolajjal szennyezett talajok kezelésére

Bioremediáció

A **bioremediáció** során a talajba jutott *szerves szennyezőanyagokat* mikroorganizmusok segítségével lebontják, és ártalmatlan anyagokká (pl. szén-dioxiddá és vízzé) alakítják, vagy a nehézfémeket kevésbé toxikus formává alakítják.

- talajok természetes *öntisztuló képességgel* rendelkeznek → a szennyezőanyagok mikrobák által végzett ún. *biodegradációja* (biológiai lebontása) lassú folyamat, melyet *optimális körülmények* teremtésével fel lehet gyorsítani
- *tápanyag* → nitrogén, foszfor, magnézium, mikroelemek, *aerob körülmények* → a szennyezett talajt levegőztetik, *oxigén* vagy *hidrogén-peroxid* bejuttatással folyamatosan oxigénnel látják el → elektronfogóként *nitrátokat*, *szulfátokat* vagy *szén-dioxidot* is alkalmaznak
- a szennyezőanyagok *biológiai felvehetőségét* felületaktív anyagokkal segítik elő
- a biológiai lebontás *optimális hőmérséklete* általában 20-24 °C, a talaj *optimális nedvességtartalma* 20-80 %, *optimális kémhatása* pH 6,5-7,5.
- *talajszennyező szénhidrogének lebontása* → Pseudomonas, Acinetobacter, Citrobacter, Flavobacterium vagy Chromobacter nemzetségbe tartozó *aerob* vagy *fakultatív* (szennyezőanyagok hatására kiválogatódott és legellenállóbbnak bizonyult) anaerob szaprofita baktériumok

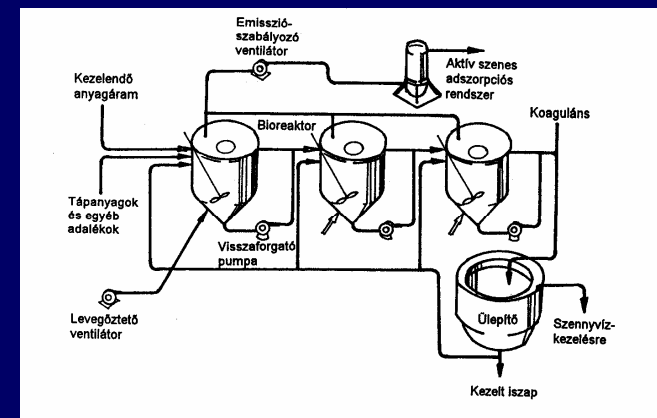
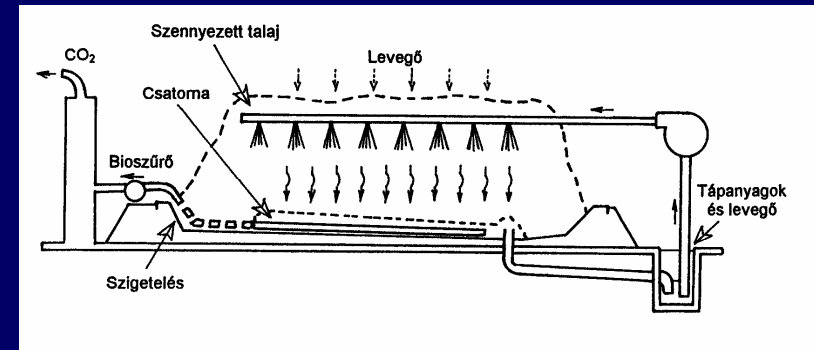
Időszükséglet: közepes vagy sok; **költség:** alacsony; **előny:** a szerves szennyezőanyagok ártalmatlan molekulákká bomlanak; **hátrány:** rossz hatékonyságú, ha többféle szerves szennyezőanyag fordul elő együtt a talajban, vagy ha azok nehézfémekkel, cianidokkal kombinálódnak, illetve ha a szennyezőanyagok nehezen hozzáférhetők a mikrobák számára.

Ex situ bioremediáció

Agrotechnikai (angolul land treatment, landfarming) eljárás → a szennyezett talajt vékony 0,5-1,5 m-es rétegben vízzáró réteg felett terítik szét. A szennyezőanyagok aerob biológiai lebontását a talajréteg rendszeres forgatásával (oxigén bejuttatásával), víz és tápanyagok adagolásával segítik elő. A forgatás elősegíti a könnyebb kőolajszármazékok elillanását, míg a nehezebb származékokat a mikrobák bontják le. Az eljárás során dréncsővel, illetve övcsatornával összegyűjtik a keletkezett szennyezett vizet és visszajuttatják a talajréteg tetejére. A szerves szennyezőanyagok lebontása a fenti módon 1-3 év alatt játszódik le, a folyamatot mesterséges levegőztetéssel, a talajhőmérséklet emelésével gyorsítani lehet.

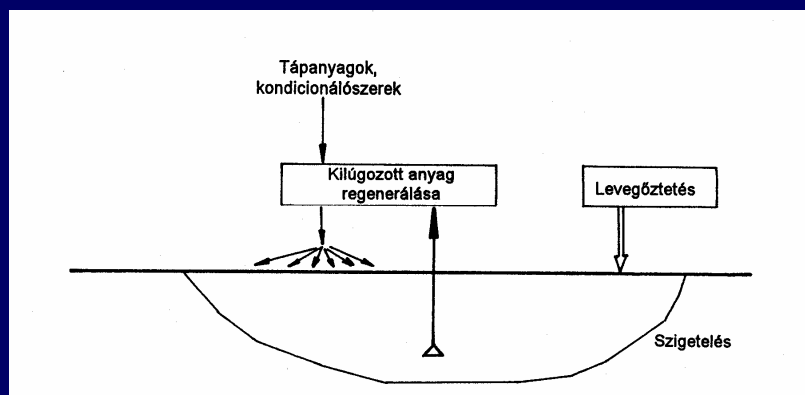
Bioágyas eljárás (biooxidáció vagy prizmázás) → a kőolajjal, vagy kőolaj származékokkal szennyezett talajt kiemelik és halmokba (prizmákba) rakják. A halmokat intenzíven levegőztetik, vízzel és tápanyagokkal látják el, mikroba kultúrákkal kezelik. A módszer előnye, hogy kisebb helyet igényel, mint az agrotechnikai eljárás és az *in situ* bioremediációs eljárásokkal ellentétben kötöttebb talajok esetén is alkalmazható.

Bioreaktor eljárás → a szennyezett talajt kiemelik, vízzel összekeverik és a híg iszapot egy zárt reaktortartályban oxigénnel és tápanyagokkal intenzíven keverik, hogy a szennyezőanyagok mikrobiális lebontását felgyorsítsák. A biológiai lebontást a talaj természetes mikroba populációjával vagy szelektált olajfalo baktérium kultúrákkal végzik. A szerves szennyezőanyagok lebontása így néhány nap vagy hónap alatt elérhető, a bioreaktorokban kis mennyiségű talajt lehet megtisztítani, a szerves szennyezőanyagok koncentrációja azonban igen magas is lehet.



In situ bioremediáció

A szennyezőanyagokat lebontó mikrobák számára *optimális körülményeket* biztosítunk (azokat szelektíven felszaporítjuk). A talajba csatornák, árkok vagy kutak segítségével először *tápanyagokat*, majd *vizet* és folyamatosan *oxigént*, *felületaktív anyagokat*, és ha szükséges *mikroorganizmus kultúrákat* juttatunk. A felületaktív anyagok feladata, hogy a szennyezőanyagok hozzáférhetőségét a mikrobák számára elősegítsék. Megfelelő idő eltelte után a talajba beszivárogtatott folyadékot kiszivattyúzzák, a felvett szennyezőanyagokat eltávolítják, majd a *folyadékot kezelik* és ismét visszajuttatják a talajba. Ez az eljárás az *ex situ* bioremediációs eljárásokhoz képest lényegesen *olcsóbb és egyszerűbb*, de hosszabb ideig (néhány hétig, hónapig, esetleg évig) tart. A módszer *hátránya*, hogy jelenleg kizárólag a *nagy áteresztő képességű homoktalajok* esetén alkalmazható.



A bioremediáció alkalmazhatósága:

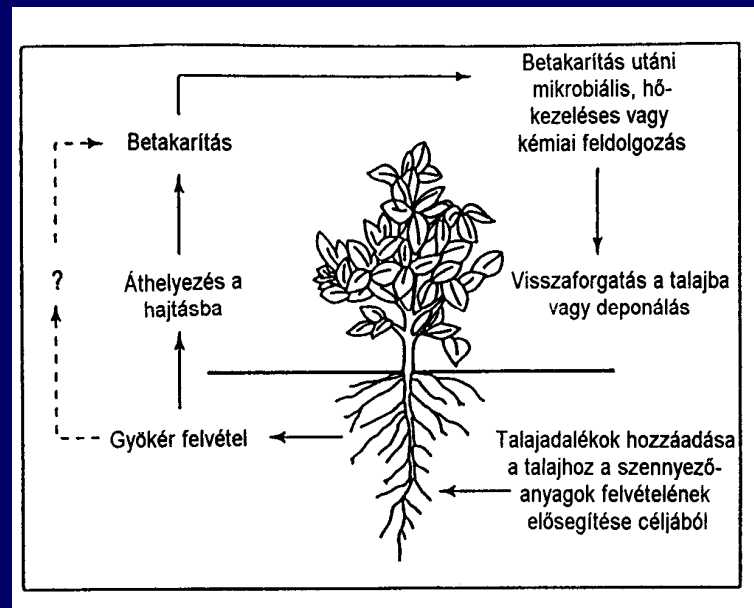
Elsősorban *könnyen lebontható szerves anyagokat* (benzint, gázolajat, kis molekulatömegű aromás szénhidrogéneket) lehet eltávolítani a talajból. Laboratóriumi körülmények között *halogénezett szerves vegyületek lebontása* is sikeres volt. Egyes mikroorganizmusok segítségével a *mérgező nehézfémek* kevésbé toxikus formává redukálhatóak ($\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$) vagy oxidálhatók ($\text{As}^{3+} \rightarrow \text{As}^{5+}$) és metilezhetők, illetve bioakkumulációval a talajból eltávolíthatók.

FITOREMEDIÁCIÓ

- A **fitoremediáció** során a természetben előforduló vagy génebeszeti úton előállított növények segítségével tisztítják meg a talajt és a környezetet a szennyezőanyagoktól
- **Fitoremediációs eljárások:** fitoextrakció, fitostabilizáció, fitodegradáció, fitovolatizáció és a rizofiltráció (Simon, 2004: **Fitoremediáció, Környezetvédelmi Füzetek, BMKE OMIKK, Budapest**)
- **Előnyei:** környezetbarát technológia, lényegesen olcsóbb, mint a hagyományos fizikai vagy fizikai-kémiai talajtisztítási eljárások. A fitoremediáció során kevesebb másodlagos szennyeződés (pl. szennyezett víz) keletkezik, a talaj szerkezete nem károsodik, biológiai aktivitása nem szűnik meg. Az eljárás nagy felületen alkalmazható. A betakarított szennyeződést tartalmazó biomasszából elégetés után a koncentrált nehézfémek visszanyerhetők
- **Hátrányai:** időigényes folyamat, a növények nem vesznek fel vagy nem bontanak le minden szennyezőanyag-féleséget, a fitoremediáció során a növényeket tápanyagokkal, vízzel kell ellátni. Az eljárás elsősorban a mérsékelten szennyezett talajok, ipari szennyvizek, felszíni vizek tisztítására alkalmas

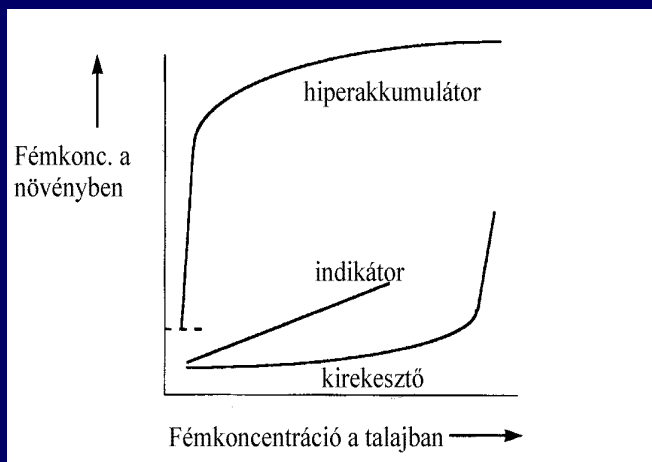
Fitoextrakció

A **fitoextrakció** során különleges, a fémek **hiperakkumulációjára** képes növényeket alkalmaznak a nehézfémekkel szennyezett talajok megtisztítására. Speciális fém-akkumuláló növényekkel vonják ki a nehézfémeket a talajból, melyek a növények könnyen betakarítható föld feletti szerveibe (hajtásába), illetve gyökerébe helyeződnek át. A szennyezett biomasszát ellenőrzött körülmények között feldolgozzák.



A szennyezett talajok fitoextrakciója során lejátszódó folyamatok
(Cunningham et al., 1995 nyomán)

Hiperakkumuláció fogalma



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 hiperakkumuláció koncentráció kritériuma nehézfémeként változik, a fémakkumuláció pedig fajspecikus (ld. táblázat).

Nehéz-fém	Koncentráció kritérium (% a levél szárazanyagban)	Növények száma	Család
Cd	>0,01	1	Brassicaceae
Co	>0,1	26	Scrophulariaceae
Cu	>0,1	24	Cyperaceae, Lamiaceae, Poaceae, Scrophulariaceae
Mn	>1,0	11	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Ni	>0,1	290	Brassicaceae Cunoniaceae, Euphorbiaceae, Flacourtiaceae, Violaceae
Se	>0,1	19	Fabaceae
Tl	>0,1	1	Brassicaceae
Zn	>1,0	16	Brassicaceae, Violaceae

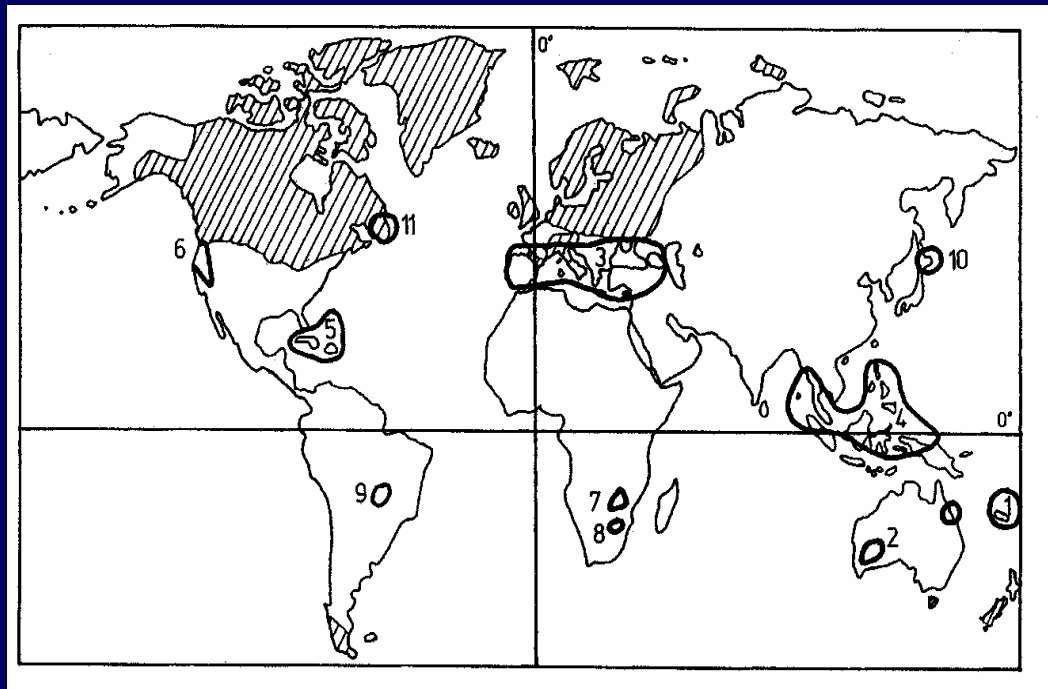
Hiperakkumulátor növények elterjedése



***Thlaspi goesingense* Hal.**

**Ni, Zn, Co és Mn
hiperakkumulátor**

(Farkas, 1999 nyomán)



Nikkel hiperakkumulátor növények globális elterjedése

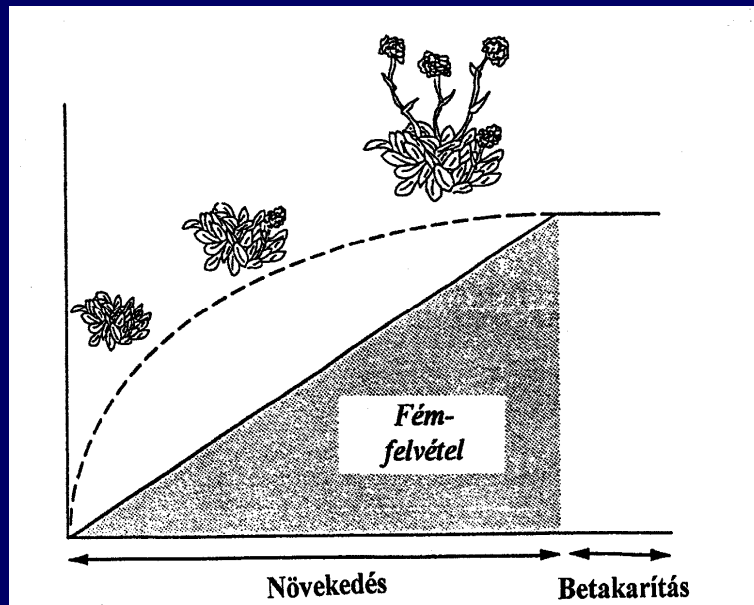
(Brooks, 1983 nyomán)

1. Új-Kaledónia, 50 faj; 2. Ausztrália, 5 faj; 3. Dél-Európa/Kis-Ázsia, 90 faj; 4. Délkelet-Ázsia, 11 faj; 5. Kuba és Dominika, 128 illetve 1 faj; 6. Észak-Amerika (észak-nyugat és Kalifornia) 5 faj; 7. Zimbabwe, 5 faj; 8. Dél-Afrika, 4 faj; 9. Brazília 11 faj; 10. Japán 1 faj; 11. Kanada, 4 faj.

Fitoextrakció a gyakorlatban

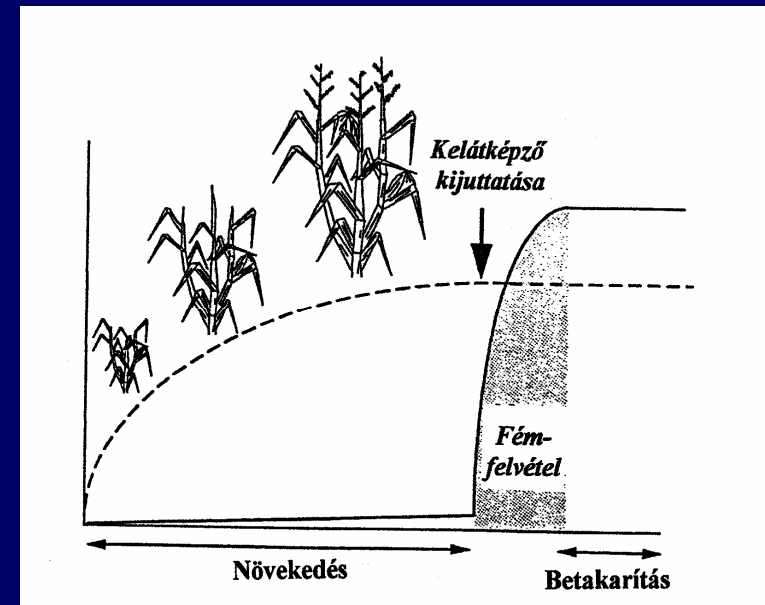
A legújabb kutatások arra irányulnak, hogy a hiperakkumulátor növények **fém-toleranciáért felelős génjeit** gyorsan növő, nagy biomasszát képező, mélyen gyökerező **mezőgazdasági növényekbe** ültessék át.

Nagy biomasszát képező növények fémakkumulációja a talajba juttatott **kelátképző szerekkel** elősegíthető, ezek a nehézfémek kötésformáit megváltoztatják és azokat **könnyebben felvehetővé** teszik. A legújabb kutatások szerint pl. azt etilén-diamin-tetraecetsav (EDTA) igen jelentős mértékben megnövelte a szennyezett talajon termesztett kukorica és borsó ólomfelvételét, és elősegítette az ólomnak a gyökerekből a hajtásba történő szállítását.



Folyamatos fitoextrakció sémája

A folyamatos vonal a hajtásban mért fémkoncentrációt, a szaggatott vonal a hajtás biomasszáját jelképezi (Salt et.al., 1998 nyomán)

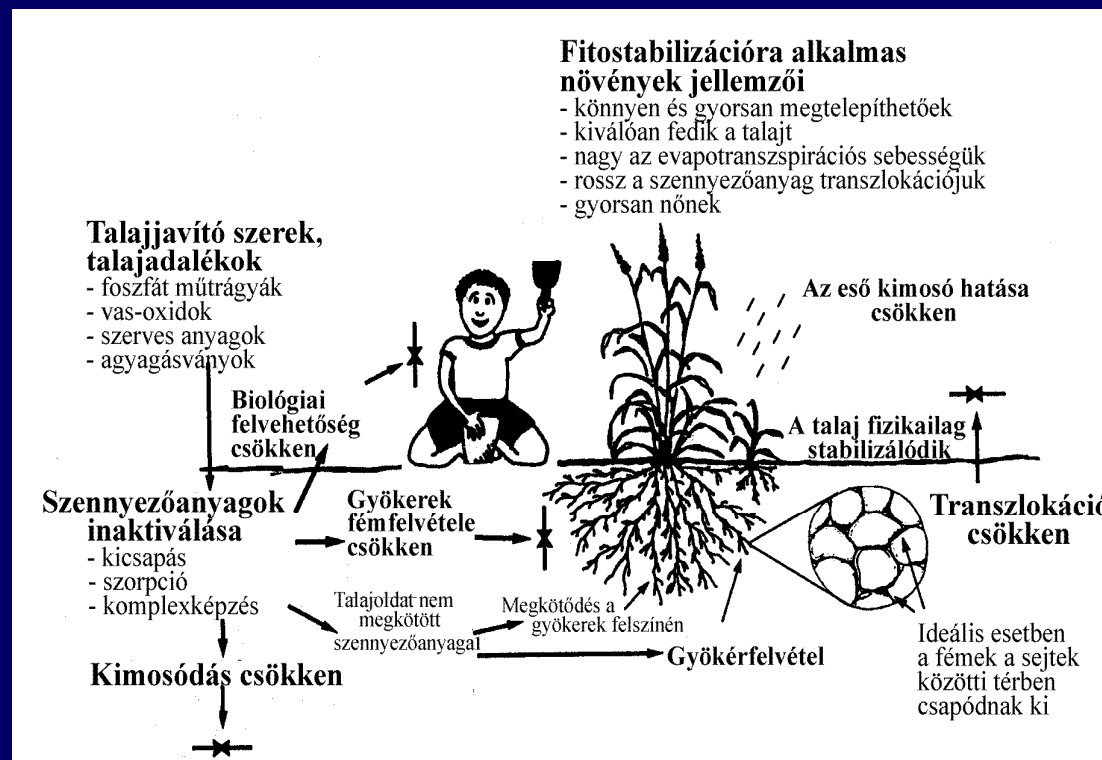


Kelátképzővel előidézett fitoextrakció sémája

A folyamatos vonal a hajtásban mért fémkoncentrációt, a szaggatott vonal a hajtás biomasszáját jelképezi (Salt et.al., 1998 nyomán)

Fitostabilizáció

A **fitostabilizáció** során nehézfém-toleráns növények segítségével akadályozzák meg, hogy a szennyezett talajokból a nehézfémek a talajvízbe vagy a levegőbe jussanak. Az eljárás során a nehézfémek talajbéli mozgását, vándorlását növénytakaróval gátolják meg.



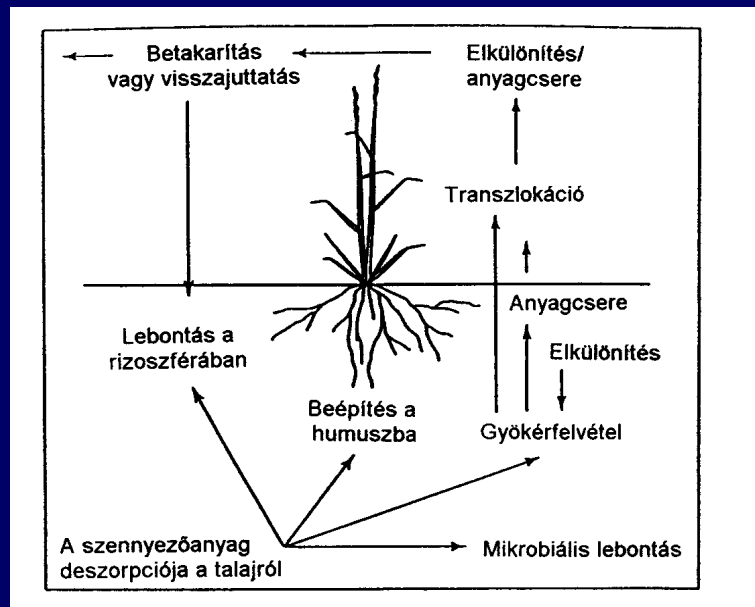
Talajjavító szerek, talajadalékok és a növények szerepe a nehézfémekkel szennyezett talajok fitostabilizációjában

(Berti és Cunningham, 2000 nyomán)

Egyes nehézfém toleráns növényfajok (pl. **fűfélék**) segítségével a talajba került nehézfémek mobilitása lecsökkenthető, ezáltal megakadályozható azok talajvízbe oldódása, illetve légkörbe kerülése.

Fitodegradáció

A **fitodegradáció** során egyes növényfajok (vagy a növények gyökerének mikroflórája) enzimatiszus folyamatok során a veszélyes szerves szennyezőanyagokat ártalmatlan molekulákká (pl. vízzé, szén-dioxiddá) bontják le, illetve a szerves szennyezőanyagokat átalakítják.

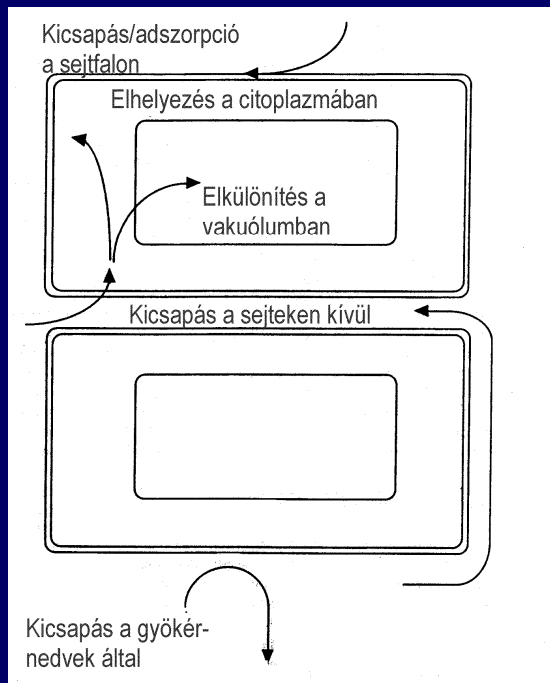


A szennyezett talajok fitodegradációja során lejátszódó folyamatok
(Cunningham et al., 1995 nyomán)

A **cukorrépa** pl. a nitroglicerín, a **nyárfa** triklór-etilén bontására képes. A Hg-rezisztens transzgénikus (genetikailag módosított) **Arabidopsis thaliana** növény a higanyt a talajból a légkörbe párologtatja el, csökkentve ezzel a talaj szennyezettségét → **fitovolatizáció**.

RIZOFILTRÁCIÓ

A **rizofiltráció** során növényi gyökerek segítségével távolítják el a **fémeket, radionuklidokat** a szennyezett vízből. A fémeket, illetve a radionuklidokat a gyökerek megkötik, felhalmozzák vagy kicsapják. Rizofiltrációra elsősorban azok a növényfajok alkalmasak, amelyek nagy gyökértömeggel, gyökérfelülettel rendelkeznek, gyökereik sok fém megkötésére képesek, és viszonylag kevés fémet szállítanak át a gyökereik a hajtásba (pl. napraforgó, szareptai mustár).



A rizofiltráció során a növények gyökerei a sejten kívüli térben (extracellulárisan) csapják ki a fémeket, illetve azok a sejtfalon csapódnak ki és adszorbeálódnak, vagy a sejtekbe bejutva a citoplazmába, vakuólu-mokba bezárva nem toxikus formában kerülnek elkülönítésre. A fémek egy részét a növényi gyökerek által kiválasztott izzad-mányok (exudátumok) csapják ki és alakítják át vízdoldhatatlan formákká.

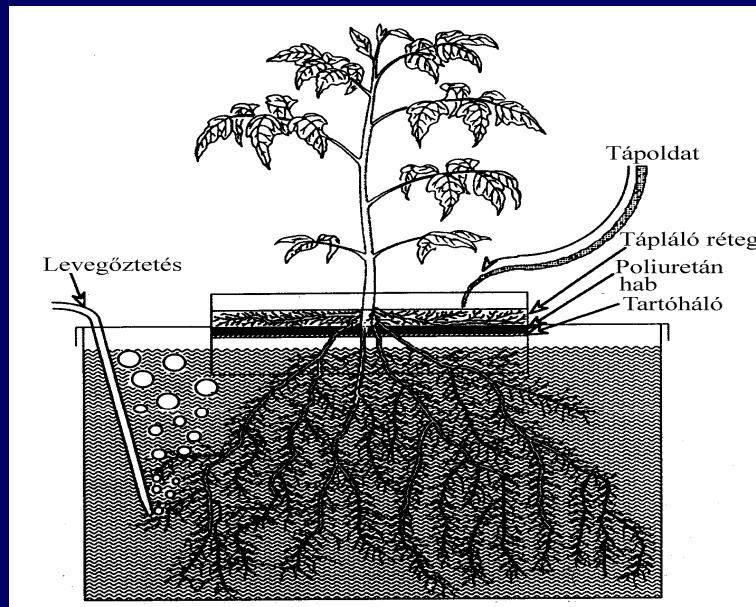
Növényi gyökerek oldatokból történő fémeltávolítása során lezajló folyamatok
(Dushenkov és Kapulnik, 2000 nyomán).

A RIZOFILTRÁCIÓ ELŐNYEI

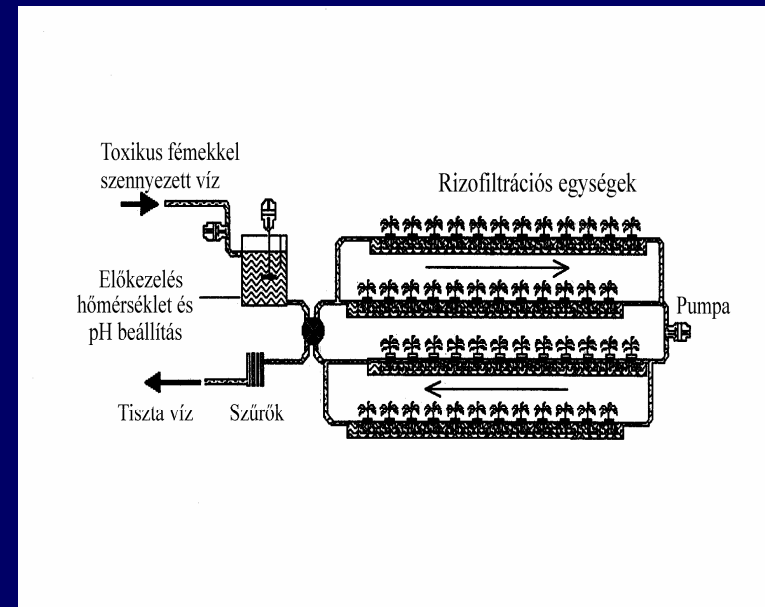
Az eljárás előnyei: A fizikai-kémiai módszerek (ioncsere műgyantákkal, fémkicsapás lúgos anyagokkal) nagy térfogatú megtisztítandó szennyvíz és alacsony eltávolítandó fémkoncentráció esetén drágák, a rizofiltráció olcsóbban alkalmazható. A bioremediáció (élő vagy elpusztult baktériumok, gombák, algák alkalmazása fémtávolításra) során költséges a fenti élő anyagok szaporítása, problémás a szennyvizekben történő immobilizálása, és az onnan történő eltávolítása. A vízínövényekkel (pl. vízi jácint, gázló, békalencse) történő fémtávolítás hatékonysága kicsi, mert a fenti növények kis méretűek, kis felületű, lassan növvő gyökérzettel rendelkeznek. A szennyeződések felvett vízi növények szárítással, komposztálással, elégetéssel történő térfogat-csökkentése esetén külön gondot okoz azok magas víztartalma. Ezzel szemben a szárazföldi növények (ezen belül egyes kultúrnövények) általában nagy biomasszát képeznek, és nagy kiterjedésű, rostos, nagy fajlagos felületű gyökérzettel rendelkeznek, melyet szoba-hőmérsékleten is könnyen meg lehet szárítani.

RIZOFILTRÁCIÓS EGYSÉG

A **rizofiltrációs egységben** a rizofiltrációt végző gyökek folyamatosan érintkeznek az áramló szennyezett vízzel. A növények poliuretán habból készített tálcán úsznak, melyben tápanyag réteg található. A tápanyag rétegbe tápoldat juttatható, vagy a tápanyagok a növények leveleire permetezhetőek. Így nem kell a növényi tápanyagokat a szennyezett vízbe bejuttatni, és ily módon elkerülhető, hogy azok a szennyeződésekkel kölcsönhatásba lépve különféle csapadékokat képezzenek. A gyökek túlnyomó többsége átnő a tartóhálón, és a vízáramba merülő sűrű finom térhálójú gyökérzet rizofiltrációt végez. A **rizofiltrációs egységeket** az ábrán bemutatott módon lehet rendszerbe foglalni.

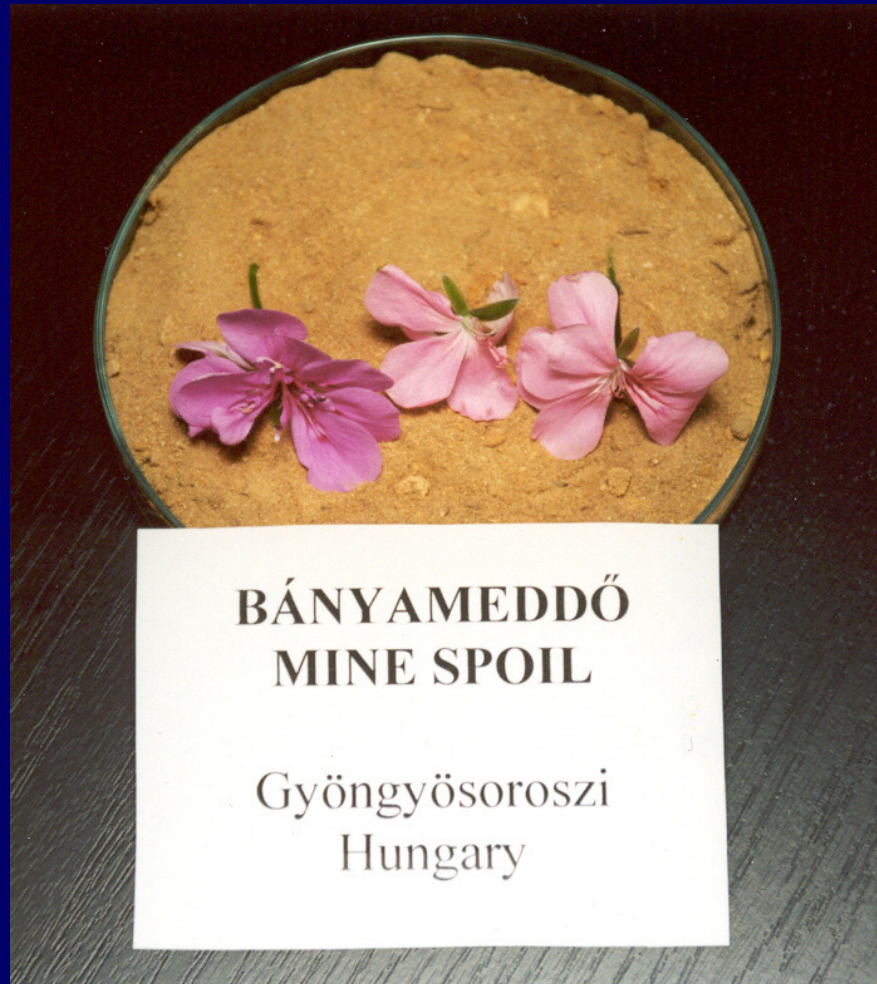


Rizofiltrációs egység sémája
(Dushenkov és Kapulnik, 2000 nyomán).



Átfolyó rendszerű rizofiltrációs rendszer
(Dushenkov és Kapulnik, 2000 nyomán).

Megelőzés, forrás-kontroll, felelősség!



Egyetlen ismert talajremediációs technika sem jelent teljes körű környezetvédelmi megoldást! A talajszennyeződés megelőzésére, a szennyezőanyag emisszió csökkentésére (forrás- kontroll) kéne sokkal nagyobb figyelmet fordítani! A termőföld termékenységének megőrzése a jövő generációi számára mindannyiunk feladata, melyen belül felelősségteljes szerep hárul a hazai szakemberekre.

A legújabb innováció: bioremediációval kombinált fitoremediáció

