

Talajszennyeződés, talajtisztítás

(főiskolai oktatási segédlet, 2. bővített kiadás)

Összeállította:

dr. Simon László
(minden szerzői jog fenntartva!)



Nyíregyházi Főiskola
Műszaki és Mezőgazdasági Főiskolai Kar
Táj- és Környezetgazdálkodási Tanszék
2006



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, elsósodás, szikesedés, talaj-savanyodás, talajszerkezet romlása, elmocsarasodás, talaj puffer-kapacitásának 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</i>	
❖ Ásványi lelőhelyek ❖ Geológiai formációk	❖ Természetes (pl. vulkáni) eredetű nedves és száraz kiülepedés a légkörből ❖ Árvizek, elöntések, nagy esők ❖ Erős szelek ❖ Természetes radioaktív sugárzások
<i>Emberi (antropogén) eredetű</i>	
❖ Szennyvizek, szennyvíziszapok hígtrágya ❖ Hulladékok (folyékony, szilárd, nem toxikus, toxikus) ❖ Termelési (ipari) emissziók	❖ Légszennyezésből eredő száraz és nedves kiülepedés ❖ Mezőgazdasági vegyszerek: műtrágyák, növényvédő szerek ❖ Közlekedés ❖ Atomrobbantások

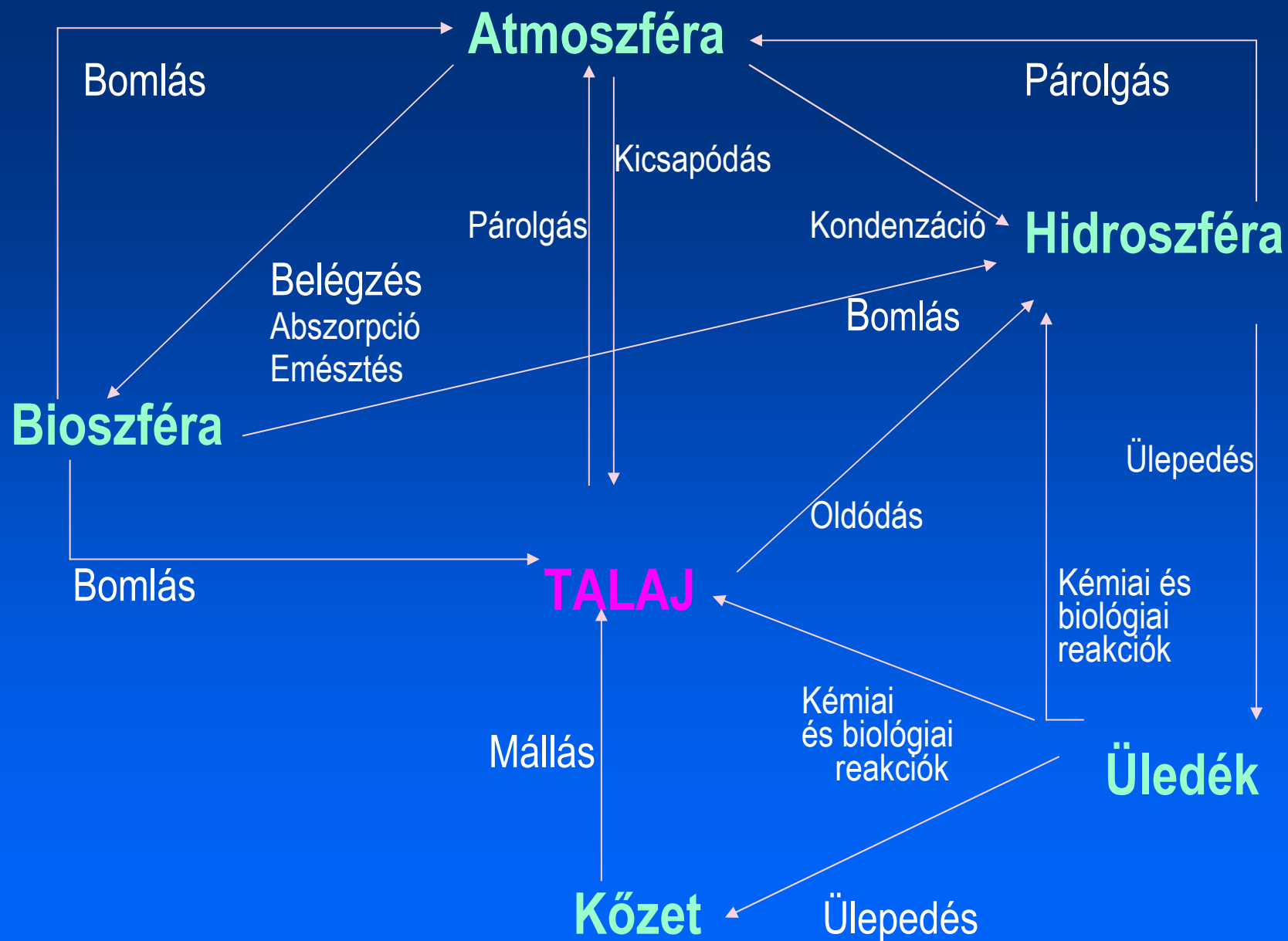
Antropogén eredetű talajszennyeződések

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



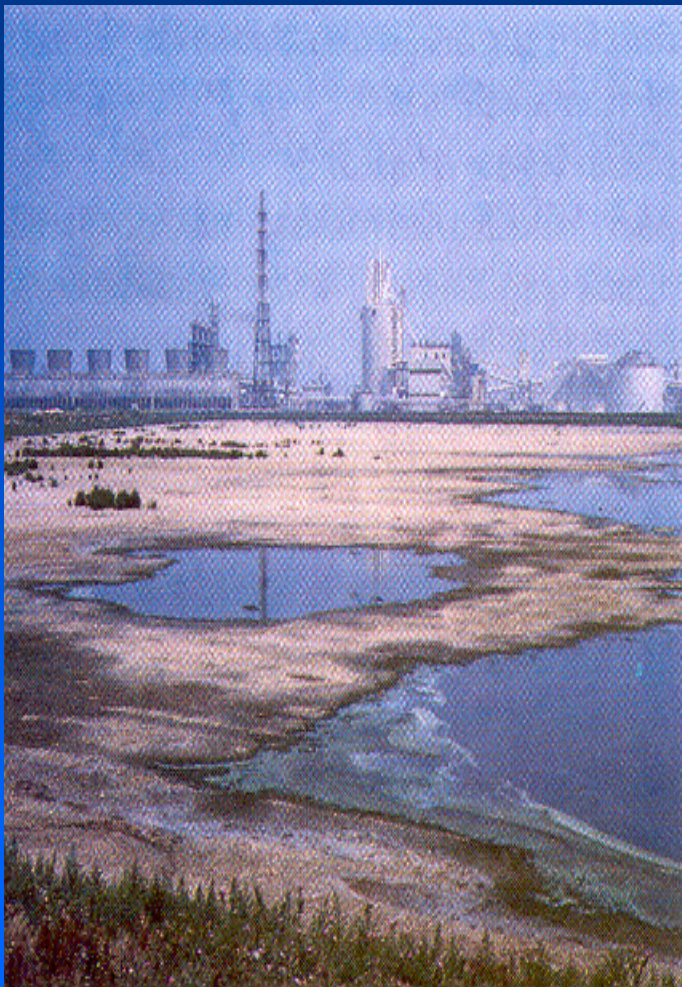
A talaj szennyeződése nehézfémekkel

- ❖ **Nehézfémek:** azok a fémek, amelyek sűrűsége 5 g/cm^3 -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	Pesztici- d
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

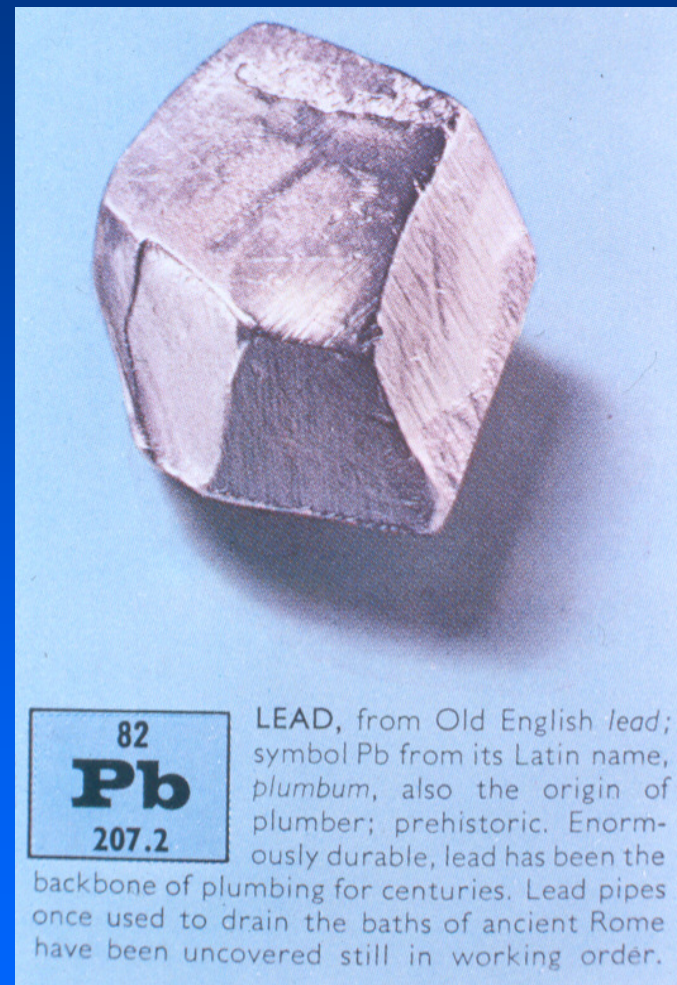
*A hazai szennyvíziszapok nehézfém koncentrációi jóval kisebbek a megadott maximális értékeknél.
Az adatok száraz tömegre vonatkoznak.

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, ólom-akkumulátorok, 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



Ólom (Pb) szerepe a tápláléklánban

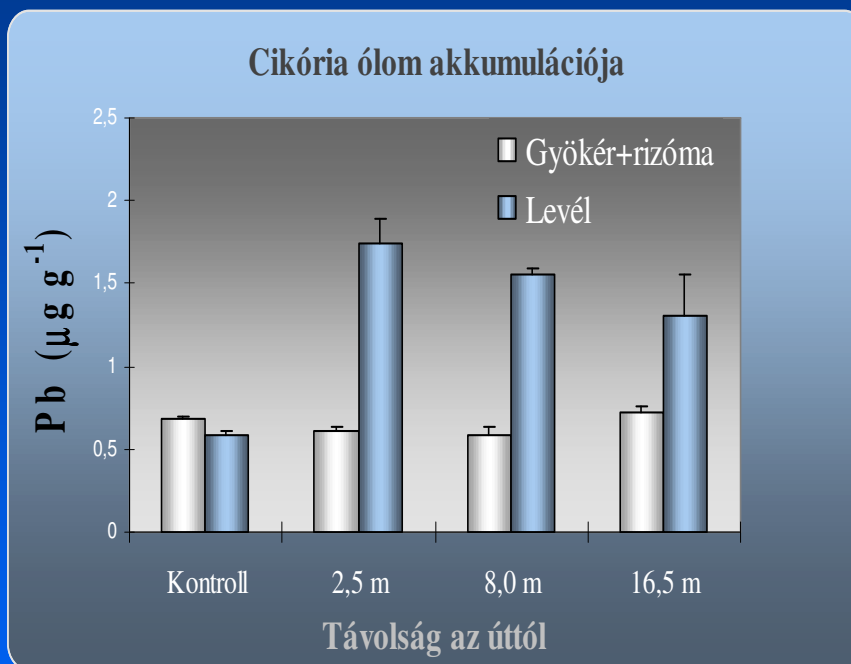
- ❖ A **szennyezetlen talajokon fejlődő növényekben** általában 0,1-10 mg/kg ólom található, az átlagérték 2 mg/kg
- ❖ Általában a talaj 100-500 mg/kg, a növények 30-300 mg/kg-os ólomkoncentrációja esetén alakulnak ki **toxicitási tünetek**: a növény fejlődése lelassul, fotoszintézise, sejtosztódása, 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 cink-koncentráció 34-246 mg kg⁻¹, a kadmium-koncentráció pedig 0,28-1,12 mg

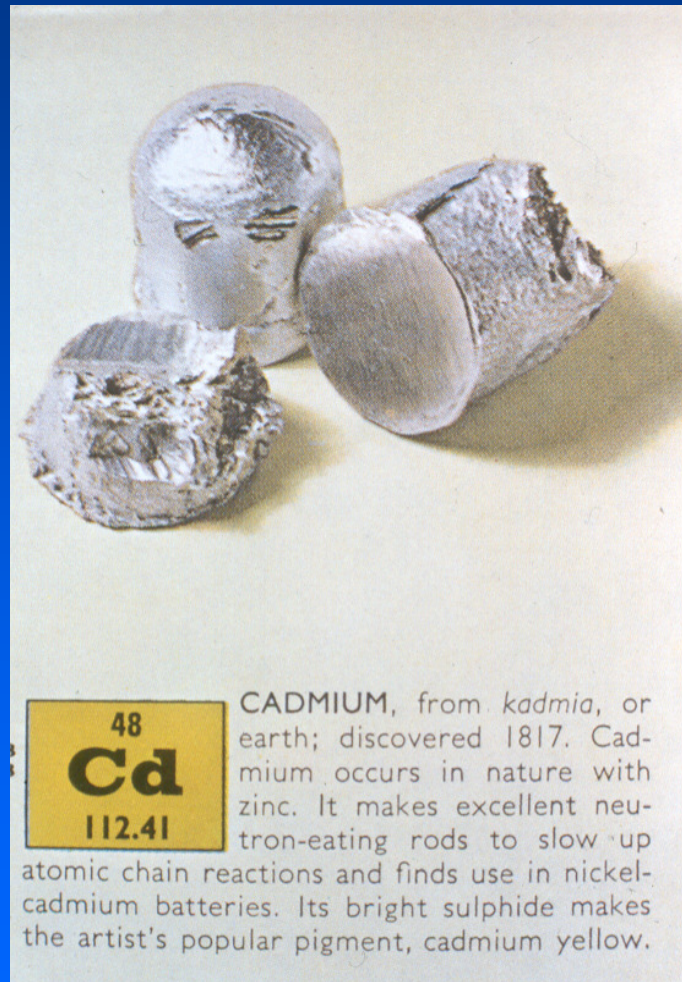
kg⁻¹. Mindez szignifikánsan magasabb a forgalomtól távol eső szennyezetlen talajok nehézfém-koncentrációihoz (**5,6-9,2 mg kg⁻¹ Pb**, 33-48 mg kg⁻¹ Zn és 0,05-0,30 mg kg⁻¹ Cd) képest.

- 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

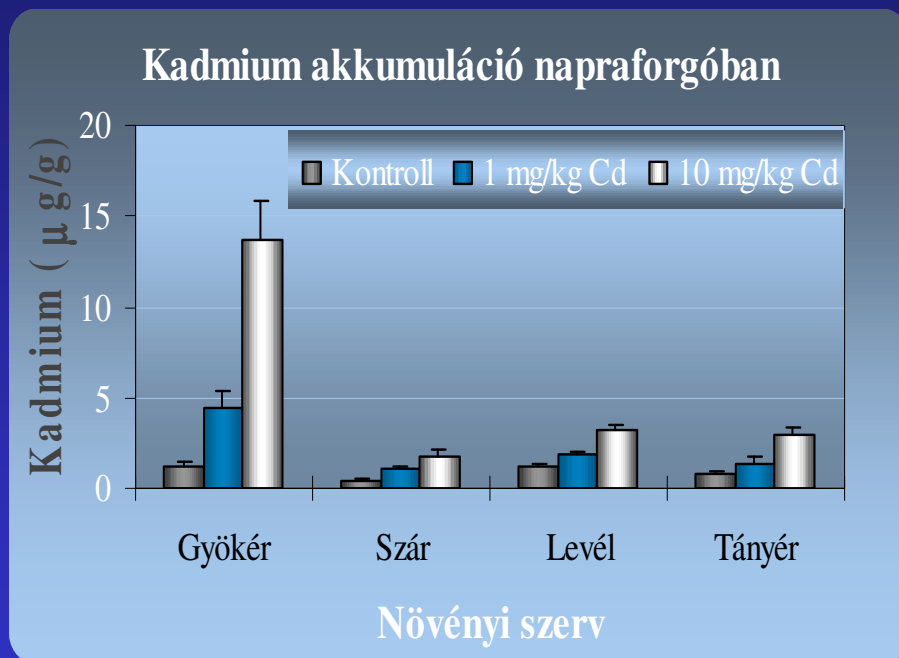


- ❖ **Szennyezetlen talajok kadmium-tartalma** 0,06-1,1 mg/kg, világátlag a felszíni talajokban **0,53 mg/kg**
- ❖ A **legjelentősebb szennyezőforrás** a *légköri ülepedés* (kadmium kerülhet a légkörbe a fémkohászattal, fosszilis tüzelőanyagok és a szemét elégetésével) és a *foszfor műtrágyázás*
- ❖ 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 **levélzöltség-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

Kadmium-mobilitás vizsgálatok



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

- ❖ Szabadföldi körülmények között a **szennyezetlen barna erdőtalajon** ($162 \mu\text{g Cd kg}^{-1}$) termesztett **napraforgó magjában** 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 cinkszennyeződése

Cink (Zn) a talajokban

- litoszféra 80 mg/kg, szennyezetlen talajok 10-300 mg/kg, átlagos koncentráció 50 mg/kg
- **cinktöbblet a talajokban**: bányászat, kohászat, fosszilis tüzelőanyagok elégetése (légköri ülepedés), **mezőgazdasági tevékenység**; foszfát műtrágyák (50-1450 mg/kg), szerves trágyák (45-250 mg/kg), meszezőanyagok (10-450 mg/kg), komposztok, szennyvíziszapok (1500-4000 mg/kg), egyes peszticidek.
- a **szennyezett talajok** általában néhány száz vagy néhány ezer mg/kg-nyi cinket tartalmaznak
- **Hazai talaj-határérték (C-érték)**: 500-2000 mg/kg

Cink (Zn) a növényekben

- a mezőgazdasági növények cinkfelvétele meszezéssel, illetve szerves anyag kijuttatással csökkenthető.
- a **növények normálisnak tekinthető** cinktartalma 25-150 mg/kg, cinkhiány általában 10-20 mg/kg⁻¹ alatti ellátottság esetén lép fel. **400 mg/kg** feletti cinktartalom esetén általában **toxikációs tünetek** figyelhetők meg. A cinkfeleslegre a legtöbb növényfaj hozamcsökkenéssel reagál, a növények fejlődése megáll.
- **levegőszennyezés** esetén a cink elsősorban a hajtásban, **talajszennyezés** esetén pedig a növények gyökerében akkumulálódik.



A talajok higanyszennyeződése

Higany (Hg) a talajokban

- litoszféra 0,05 mg/kg, **szennyezetlen talajok** higanytartalma kisebb mint 0,1 mg/kg, általában 0,01-0,06 mg/kg.
- **talajok higany-szennyeződése:** bányászat, kohászat, fosszilis tüzelőanyagok (elsősorban szén) elégetése, ipari termelés és szeméttégetés
- **mezőgazdasági talajok Hg szennyeződése:** műtrágyák (50 µg/kg), meszezőanyagok (20 µg/kg), szerves trágyák (100 µg/kg), szennyvíziszapok (5-10 mg/kg, esetenként 100 mg/kg). Higanytartalmú fungicidek és csávázószeres mezőgazdasági alkalmazása
- a **szennyezett talajok** higanytartalma általában 0,1-40 mg/kg, higanybányák közelében 100 mg/kg
- **Hazai talaj-határérték (C-érték):** 1-10 mg/kg

Higany (Hg) a növényekben

- **fitotoxikusnak** tekintett mennyiség 2-10 mg/kg.
- haszonnövényeink higanyfelvételét a talajok meszezésével, kéntartalmú vegyületekkel, foszfortrágyázással lehet **csökkenteni**.
- a **szennyezetlen növényekben** 1-100 µg/kg higany található.
- **legmérgezőbbek** illékony formái (higanygőz, metil-higany).



A talajok nikkel-szennyeződése

Nikkel (Ni) a talajokban

- a földkéreg átlagos *nikkeltartalma* 80 mg/kg, a világátlag 22 mg/kg
- a *talajokba nikkel kerülhet* a bányászat, kohászat során, illetve az olajszármazékok, szén és szemét elégetésével, a *forgalmas utak* mentén a dízelolaj elégetése következtében a talaj nikkeltartalma az ólomhoz, cinkhez, rézhez hasonlóan megemelkedhet
- a *mezőgazdasági termelés* során nikkellel szennyeződhetnek el a talajok a szennyvíziszap hasznosítással. A szennyvíziszapokban 13-410 mg/kg nikkelt mértek, szélsőséges esetben ez az érték elérheti a 0,5 %-ot
- *Hazai talaj-határérték (C-érték):* 150-250 mg/kg

Nikkel (Ni) a növényekben

- a növények *túlzott nikkelfelvétele* ellen legkönnyebben a talaj meszezésével védekezhetünk. A nikkelakkumulációt a szerves anyag, a foszfor és magnézium kijuttatás is csökkentheti
- a *szennyezetlen talajokon fejlődő növények* nikkeltartalma általában 0,1-5 mg/kg
- a növényekben 10-100 mg/kg nikkelkoncentráció esetén jelentkeznek *toxikációs tünetek*: a növények növekedése és gyökérfejlődése gátolt, a leveleken a vasklorózishoz hasonló tünetek alakulnak ki



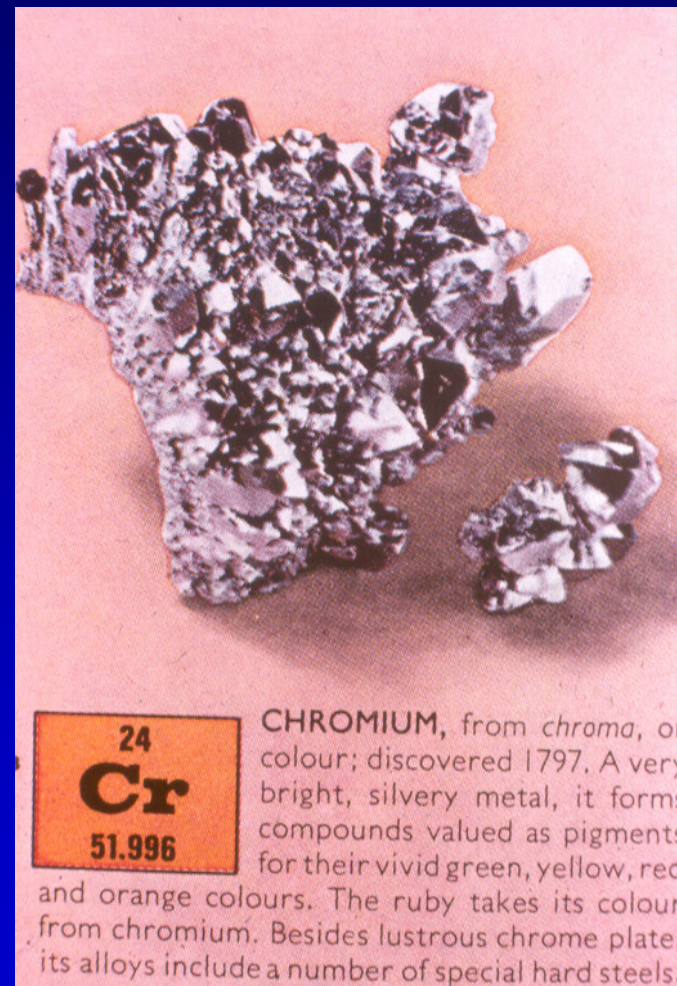
A talajok krómszennyeződése

Króm (Cr) a talajokban

- *litoszférában* átlagosan 200 mg/kg, világátlag 54 mg/kg, a talajok krómmal az ipari termelés során (pl. a bőrcserzés, galvanizálás, festékgyártás melléktermékeivel), illetve a légszennyezés (acélipar, fémkohászat, szén elégetése) következtében *szennyeződhetnek* el. Jelentős mennyiségű króm (100-10000 mg/kg, átlag 500 mg/kg) kerülhet be a *szennyvíziszapokba* pl. ipari üzemek szennyvizéből
- a *foszfát műtrágyákban* 30-3000 mg/kg, a *szuperfoszfátban* 60-250 mg/kg króm található, valószínűleg a kevésbé toxikus Cr(III) formában
- *Hazai talaj-határérték (C-érték):* 150-800 mg/kg (összes Cr),
2,5-10 mg/kg (Cr(VI))

Króm (Cr) a növényekben

- a Cr(III) ion *jóval kevésbé toxikus* és a növények számára nehezebben felvehető, mint a Cr(VI) ionforma.
- a talaj 150 mg/kg-nál nagyobb krómtartalma általában már *fitotoxikus* hatású.
- a talajok meszezésével, foszfor és szervesanyag kijuttatással a növények krómfelvétele *csökkenthető*, a Cr(VI) ion kevésbé toxikus Cr(III) ionná redukálása kénnel, levélkomposztal elősegíthető.
- a *szennyezetlen talajok növényeinek* krómtartalma 0,02-0,2 mg/kg. A növényekben általában 1-10 mg/kg króm okoz *mérgezési tüneteket*: a hajtás elhervad, a gyökérfejlődés gátolt, a fiatal levelek klorotikusak, illetve barnásvörös színűek, a gabonafélék levelein klorotikus sávok alakulnak ki.



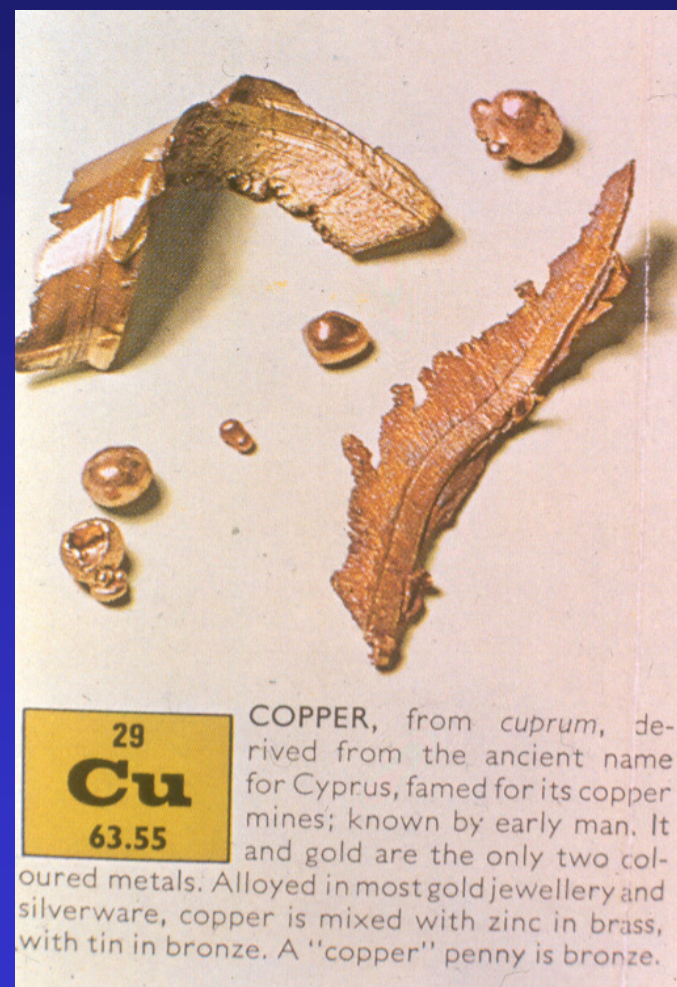
A talajok rézszenyeződése

Réz (Cu) a talajokban

- a *litoszférában* átlagosan 50 mg/kg található, *felszíni talajokban* az átlagos érték 20 mg/kg
- a *talajok rézszenyeződését* 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 talaj-határérték (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 rezet 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

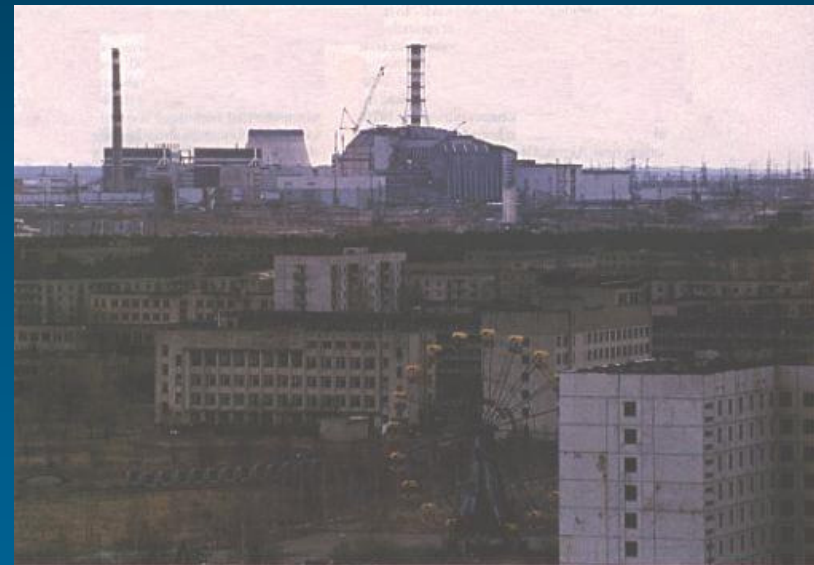
→

sugárbetegség

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

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

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

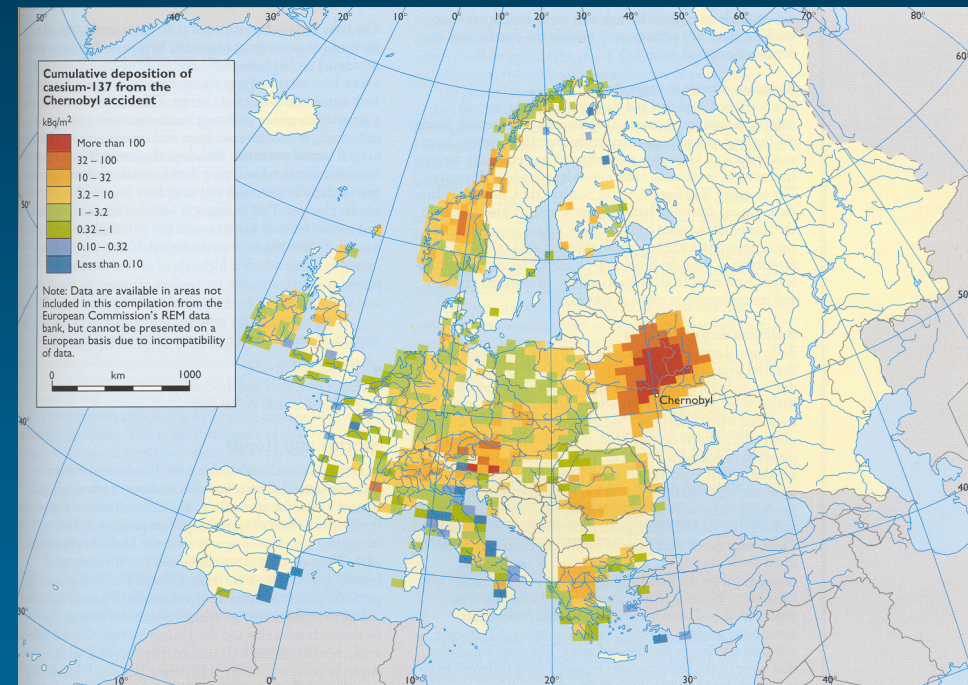


Csernobil, 1986

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, agyagásványokhoz 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

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, pontszerűen kénnel szennyeződhet. Nyíregyházán a forgalmas belvárosi autópályák 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 szemétteltelepek) jelentős mennyiségű nitrogén-oxid és ammónia jut a légkörbe, ahol salétromsavvá és nitrát sókká alakul → nedves vagy száraz ülepedés a talajfelszínre. Mindez a túlzott nitrogén-műtrágyázással 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 háttérértéknél) → **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

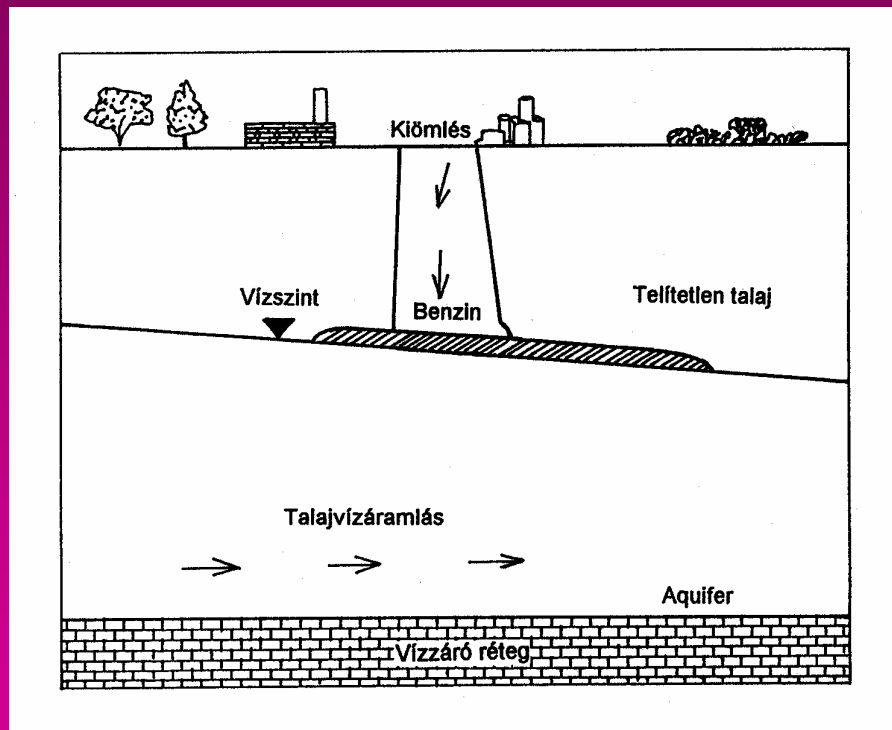
Kőolaj és kőolajszármazékok talajra gyakorolt hatásai

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



Kőolaj-vezeték törés
(Nagyhalász, 1992)

Kőolaj és kőolajszármazékok mozgása és viselkedése a talajban



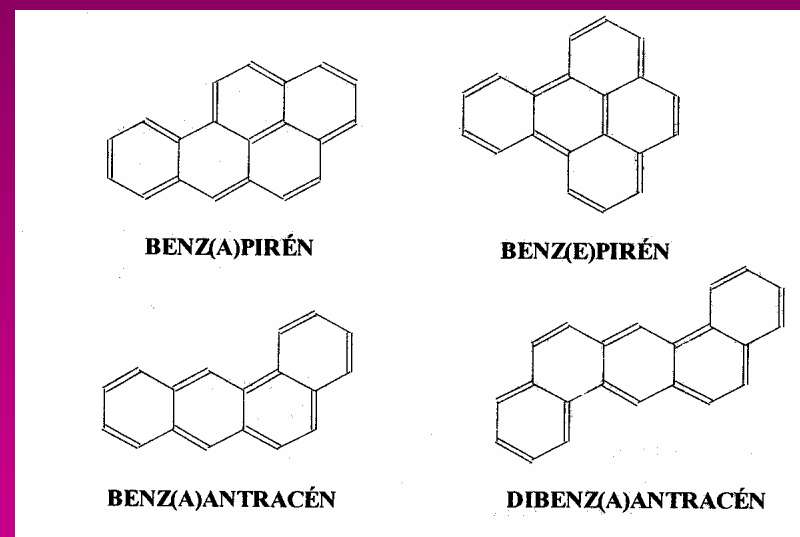
- ❖ **Talajtulajdonságok:** víztelítettség, talajrészecskék átmérője, töltése (fajlagos felület), a talaj kapilláris és vízemelő képessége → összefüggő **olajlencse** alakulhat ki a talajvízszinten
- ❖ A kőolajszármazékok mozgását és viselkedését a talajban és talajvízben azok **fizikai és fiziko-kémiai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

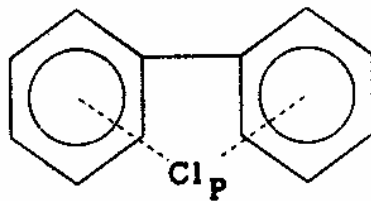
Policiklikus aromás szénhidrogének (PAH),

- ❖ **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)



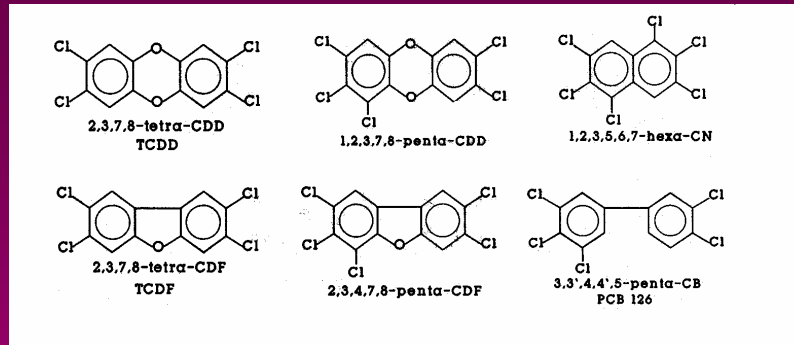
Poliklórozott bifenilek (PCB)

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)

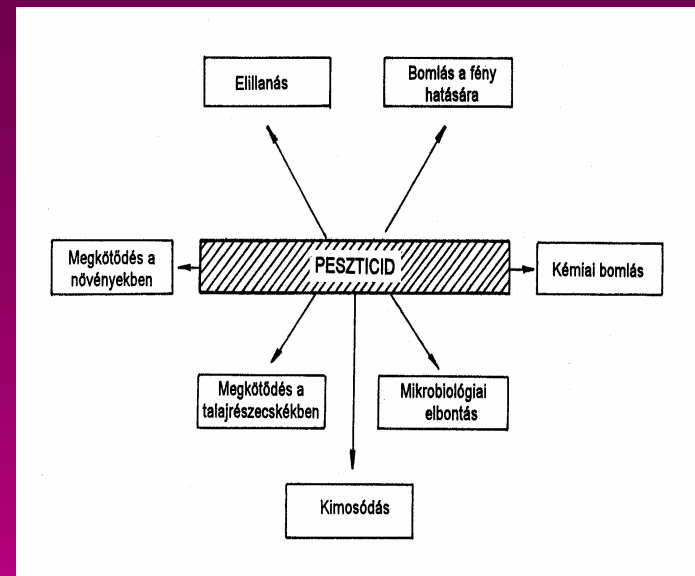
Dioxinok



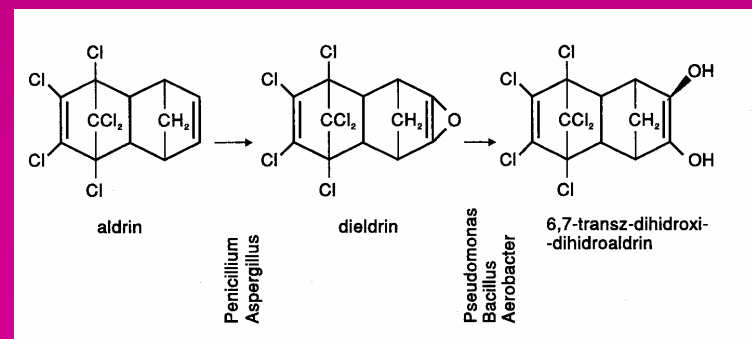
- ❖ **Poliklórozott dibenzo-dioxinok** (PCDD) és **dibenzo-furánok** (PCDF): szerves klóranyagok gyártása és alkalmazása (papírfehérítés, cellulózipar) és *termikus eljárások* (kábelégetés, fáradt olaj égetés, háztüzek, PVC tüzek, kórházi és veszélyes hulladék égetés, szemétegetés) során keletkeznek
- ❖ **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 termékenységét, szennyezhetik a talajvizet
- ❖ A **perzisztens**, nehezen lebomló peszticidek a csúcsragadozóknak és az emberben **felhalmozódhatnak** → toxikusak, mutagének, rákkeltők
- ❖ **Perzisztens szerek:** klórozott szén-hidrogének, nitro-alkil-fenol származékok, ditiokarbamát származékok, bipiridilium-származékok, klór-amino-sz-triazin származékok, szulfonurea-származékok

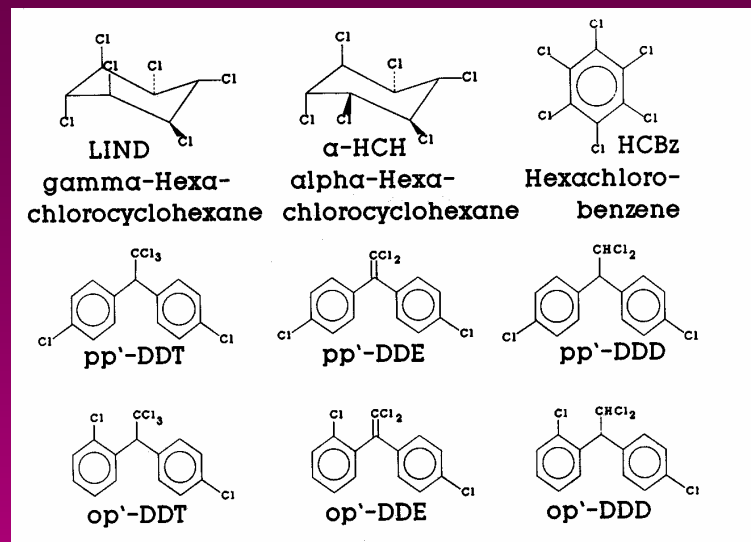


A növényvédő szerek átalakulása a talajban
(Szege, 1992 nyomán)



A bomlástermék toxikusabb mint az
eredeti vegyület

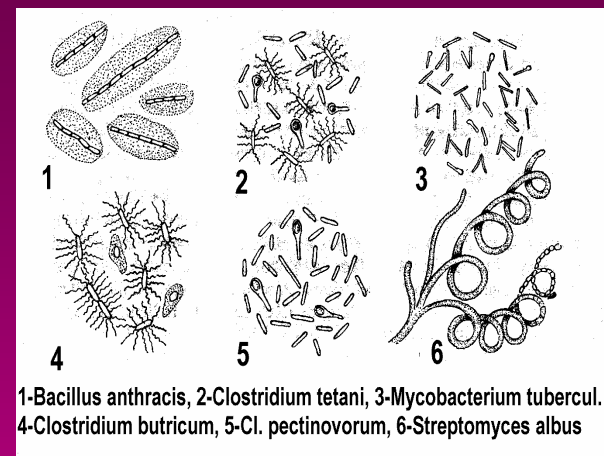
Klórozott szénhidrogének



- ❖ **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 spórás Clostridium-fajok:** a talajok 50 %-ból kimutathatók, tetanusz, lépfene, botulizmus okozói
- ❖ Szennyvíziszap kijuttatással a **termofil baktériumok**, anaerob cellulózbontó és fehérjeanyagot rothasztó **spórás 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, orvoslás 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 végezhetők el.

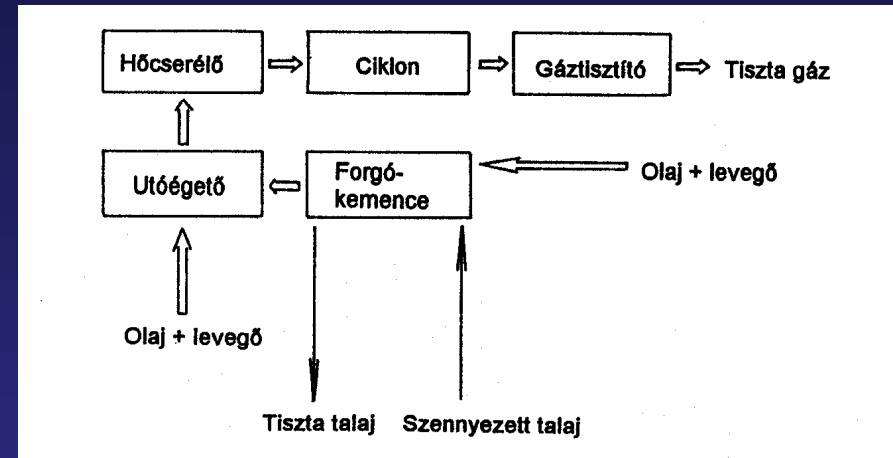
Leggyakoribb talajremedációs eljárások: talajégetés (talajüvegesítés), talajmosás és talajextrakció, talajszellőztetés, elektrokémiai talajkezelés, talajstabilizálás és talajszilárdítás, bioremediáció, fitoremediáció.

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 kémiai 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 függenek

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 olvadékot depóniákban lehet elhelyezni. A szerves szennyezők a magas hőmérsékleten leválnak a talajkolloidokról és/vagy elégnak. 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 kínálik 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 koncentrálódnak* (talajmosás), illetve a *kivonószerbe kerülnek át* (talajextrakció).

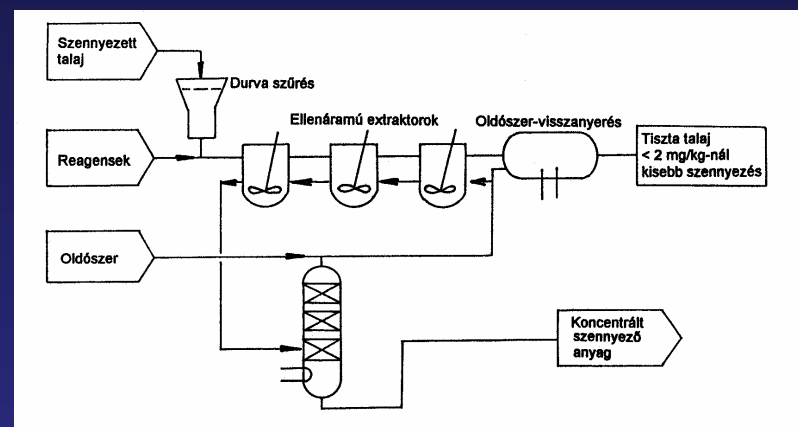
Alkalmazhatóság: szénhidrogének (kőolajszármazékok) mellett halogénezett szénhidrogének, policiklusos aromás szénhidrogének, egyes nehézfémek (pl. kadmium, ólom-tetraetil) és cianid eltávolítása a szennyezett talajokból

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)

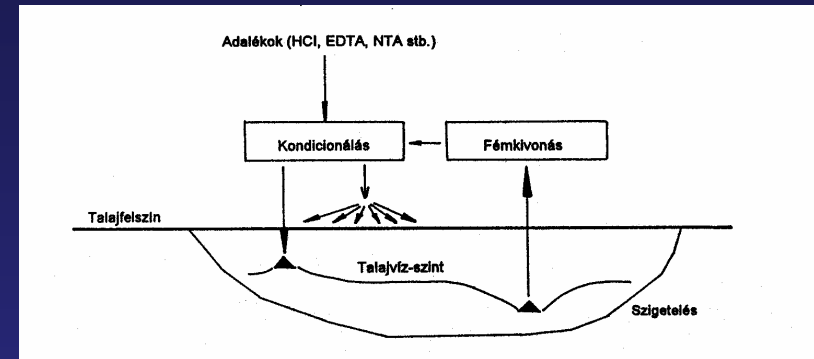
– Elsősorban **homoktalajok tisztítására** alkalmas (a talaj homok és kavics tartalma érje el az 50 %-ot, agyagtartalma pedig ne haladja meg a 10-20 %-ot), melyek humusztartalma is alacsony.

In situ talajmosás

A **víz** (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 területen, 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

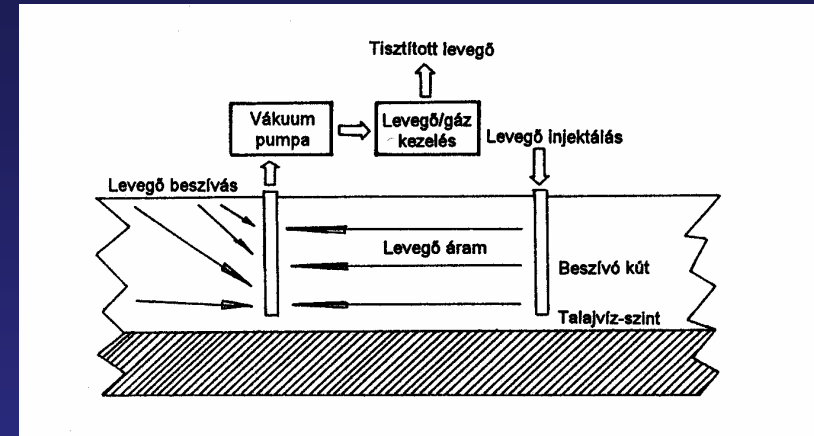
A **talajszellőztetéses** (átlevegőztetéses, vákuum extrakciós) eljárás során az illékony szennyezőket a szennyezett talajrétegen átszívott vagy átnyomott megfelelő hőmérsékletű, nedvességtartalmú és sebességű **levegőáram** segítségével távolítják el. A szennyezett levegőből a szennyezőanyagokat alkalmas 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 elektroosmózis, elektroforézis és elektrolízis játszódik le:

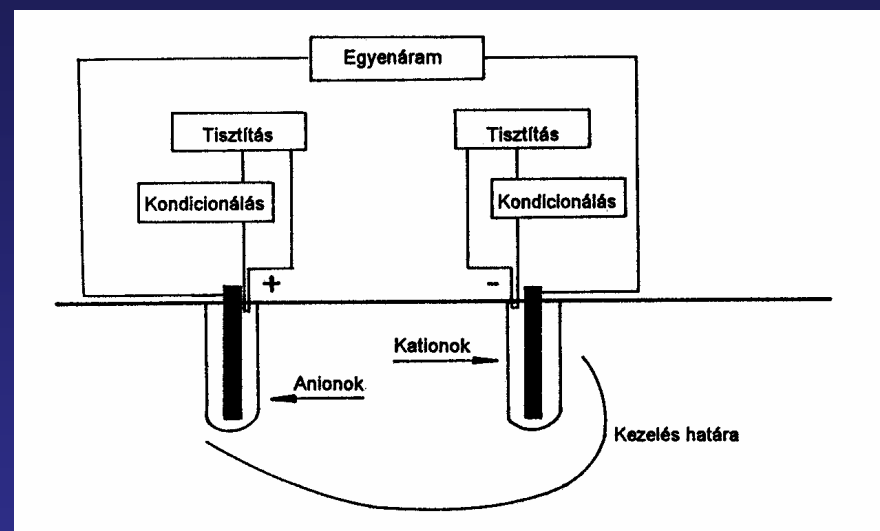
- **elektroosmózis** hatására a talajpórusokban lévő nem ionos jellegű szennyezőanyagokat is tartalmazó vizes fázis a negatív elektród (katód) felé szállítódik
- **elektroforézis** hatására a pórusvízben jelenlévő töltéssel rendelkező kolloidok és agyagrészecskék **elektrolízis** hatására pedig az ionok 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 hozzákötethők 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 hozzákötethők 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.

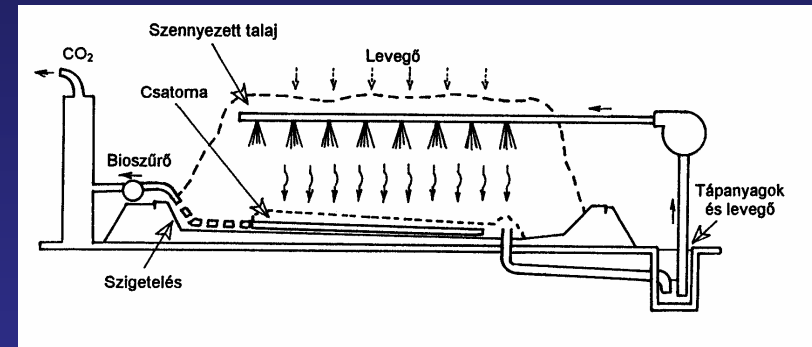
- talajok természetes **öntisztuló képességgel** rendelkeznek → a szennyezőanyagok mikrobák által végzett ún. **biodegradációja** (biológiai lebontása) lassú folyamat, melyet **optimális körülmények** teremtetésével fel lehet gyorsítani
- **tápoldat** → nitrogén, foszfor, magnézium, mikroelemek, **aerob 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.

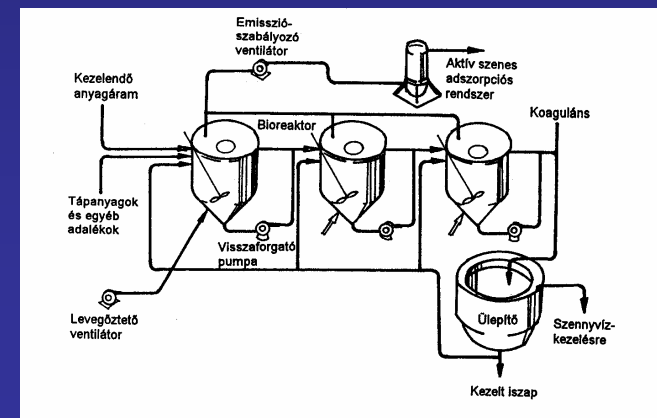
Ex situ bioremediáció

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 dréncsövekkel, 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.

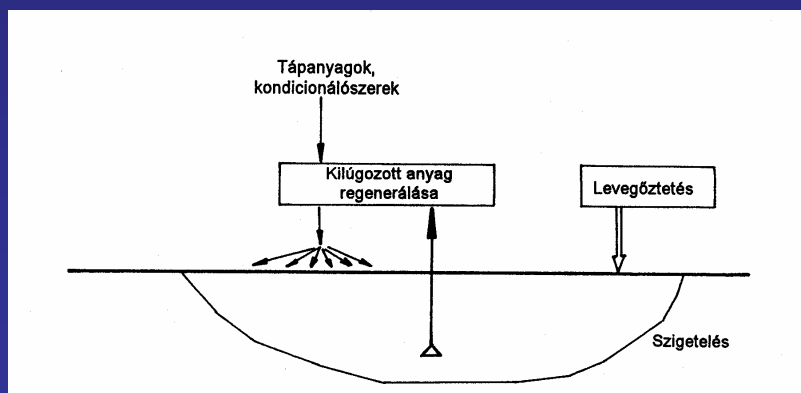


Bioreaktor eljárás → a szennyezett talajt kiemelik, vízzel összekeverik és a híg iszapot egy zárt reaktortartályban oxigénnel és tápanyagokkal intenzíven keverik, hogy a szennyezőanyagok mikrobiális lebontását felgyorsítsák. A biológiai lebontást a talaj természetes mikroba populációjával vagy szelektált olajfálo 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:

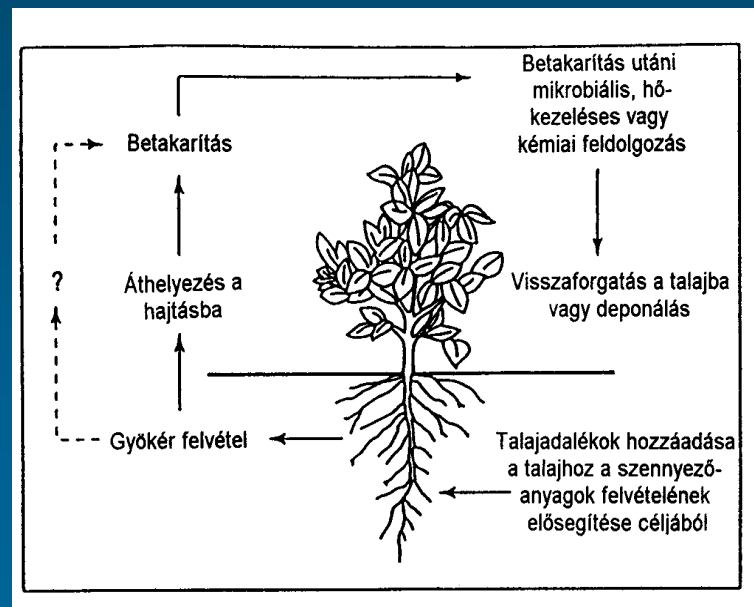
Elsősorban *könnyen lebontható szerves anyagokat* (benzint, gázolajat, kis molekulatömegű aromás szénhidrogéneket) lehet eltávolítani a talajból. Laboratóriumi körülmények között *halogénezett szerves vegyületek lebontása* is sikeres volt. Egyes mikroorganizmusok segítségével a *mérgező nehézfémek* kevésbé 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 génszétválasztási úton előállított növények segítségével tisztítják meg a talajt és a környezetet a szennyezőanyagoktól
- **Fitoremediációs eljárások:** fitoextrakció, fitostabilizáció, fitodegradáció, fitovolatilizáció 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

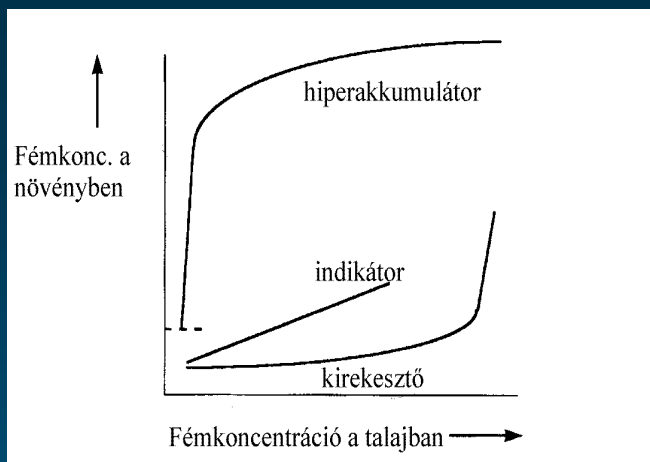
Fitoextrakció

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



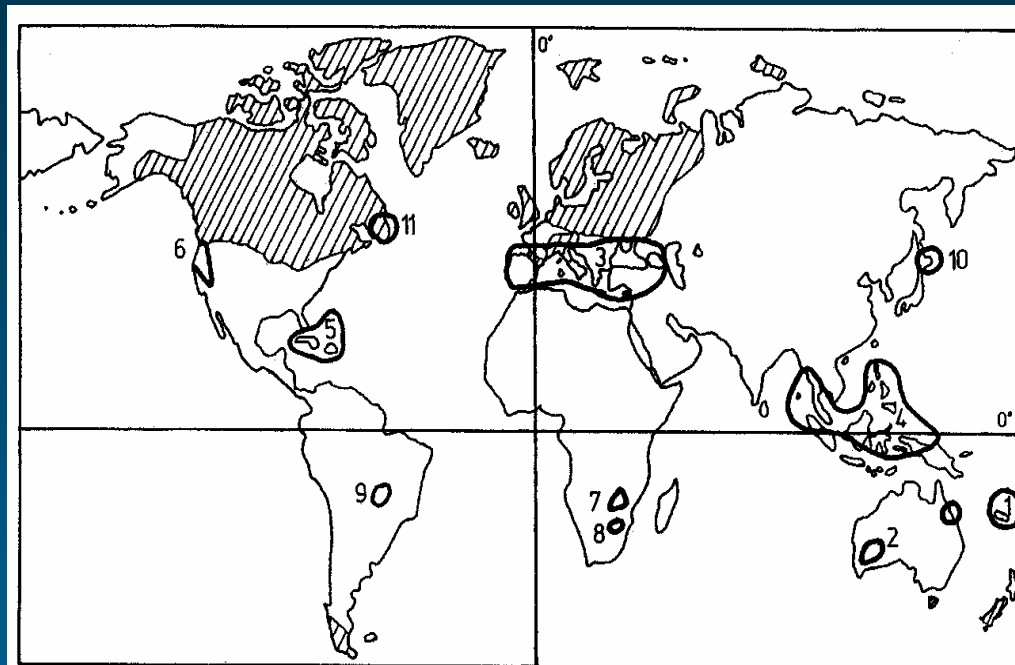
Hiperakkumulációról akkor beszélhetünk, ha a növény adott szervében a fémkoncentráció meghaladja az 1000 mg/kg szárazanyag értéket, a növény tehát jóval nagyobb mennyiségben veszi fel az adott elemet, mint az annak talajbéli koncentrációjából következne. A hiperakkumuláció koncentráció kritériuma nehézfémeként 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)



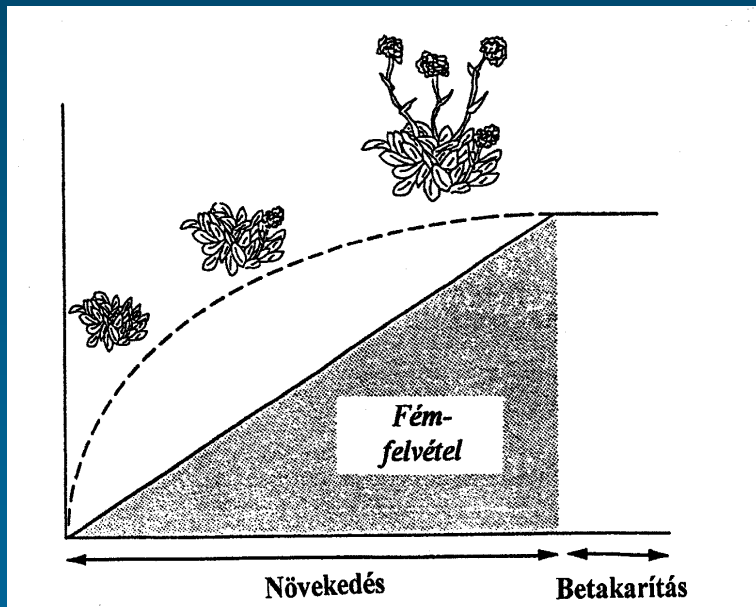
Nikkel hiperakkumulátor növények globális elterjedése
(Brooks, 1983 nyomán)

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

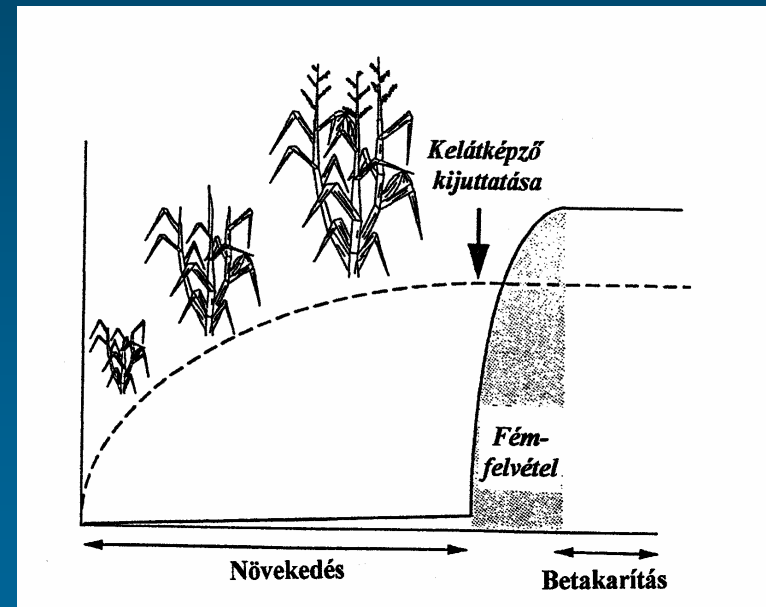
A legújabb kutatások arra irányulnak, hogy a hiperakkumulátor növények **fém toleranciáért felelős génjeit** gyorsan növő, nagy biomasszát képező, mélyen gyökerező **mezőgazdasági növényekbe** ültessék át.

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)

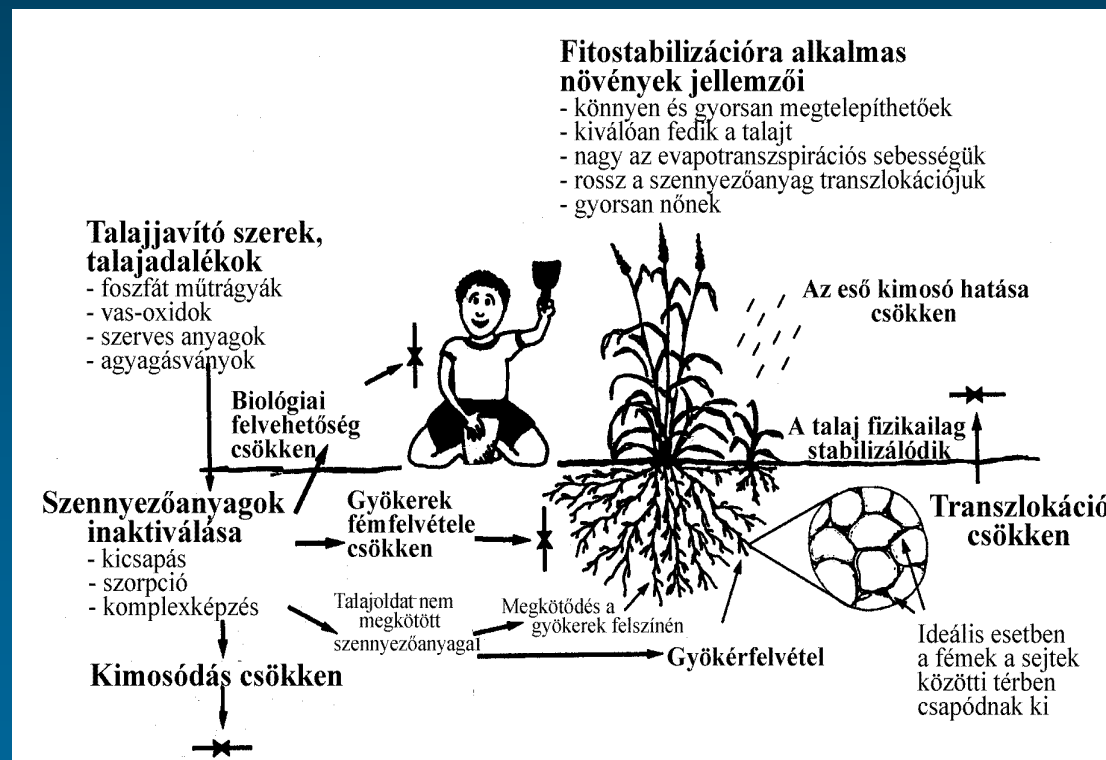


Kelátképzővel előidézett fitoextrakció sémája

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.



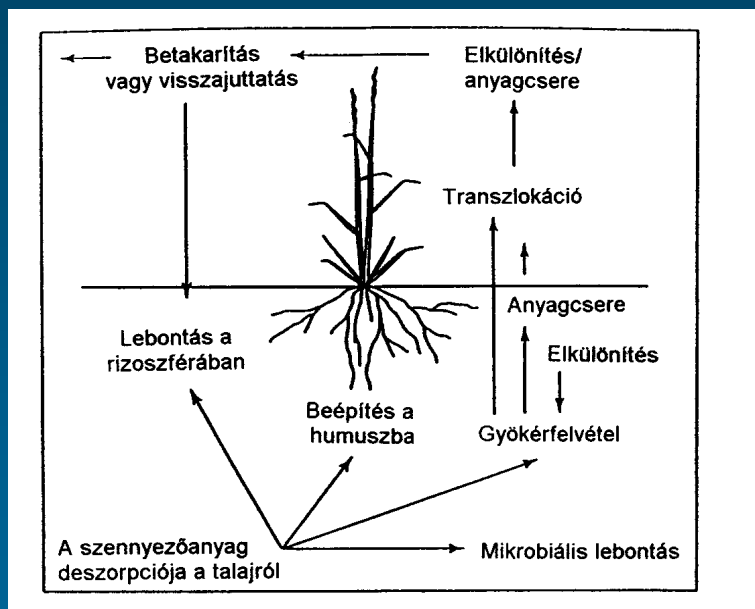
Talajjavító szerek, talajadalékok és a növények szerepe a nehézfémekkel szennyezett talajok fitostabilizációjában

(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.

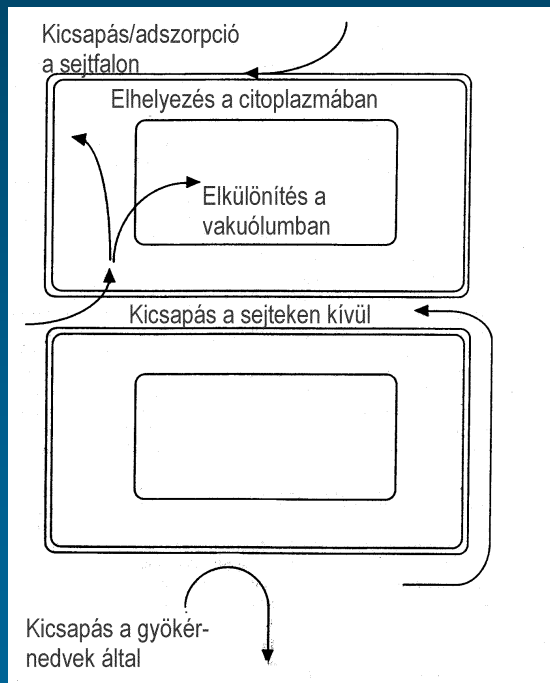


A szennyezett talajok fitodegradációja során
lejátszódó folyamatok
(Cunningham et al., 1995 nyomán)

A **cukorrépa** pl. a nitroglicerint, 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 vízoldhatatlan formákká.

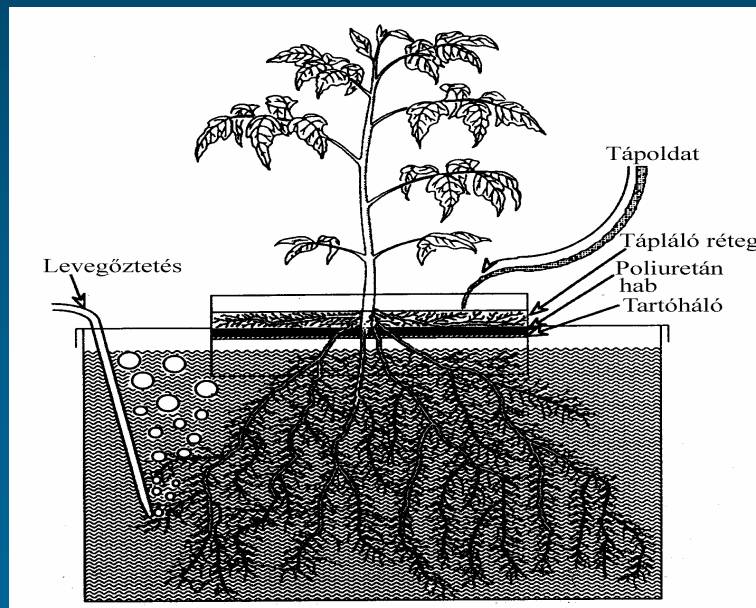
Növényi gyökerek oldatokból történő fémeltávolítása során lezajló folyamatok
(Dushenkov és Kapulnik, 2000 nyomán).

A RIZOFILTRÁCIÓ ELŐNYEI

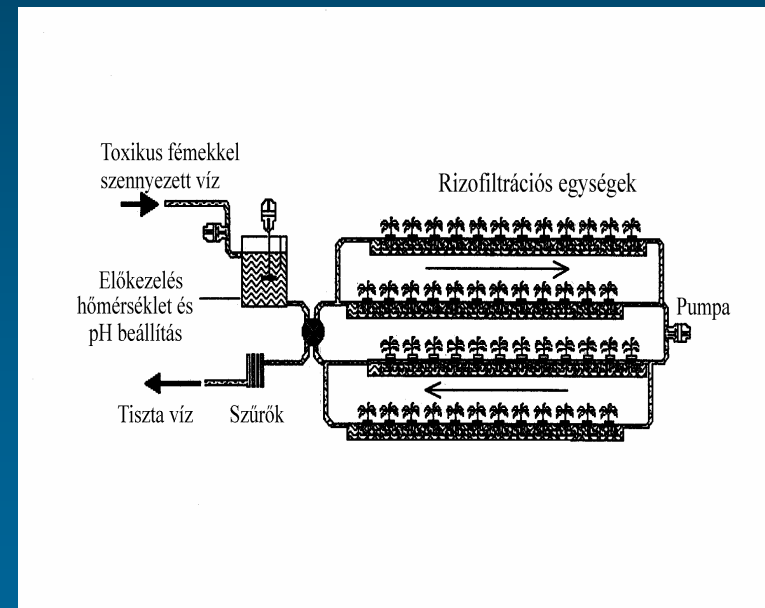
Az eljárás előnyei: A fizikai-kémiai módszerek (ioncsere műgyantákkal, fémkicsapás lúgos anyagokkal) nagy térfogatú megtisztítandó szennyvíz és alacsony eltávolítandó fémkoncentráció esetén drágák, a rizofiltráció olcsóbban alkalmazható. A bioremediáció (élő vagy elpusztult baktériumok, gombák, algák alkalmazása fémeltávolításra) 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 fémeltávolítás 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 gyökök 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 permetezhetők. Így nem kell a növényi tápanyagokat a szennyezett vízbe bejuttatni, és így módon elkerülhető, hogy azok a szennyeződésekkel kölcsönhatásba lépve különféle csapadékokat képezzenek. A gyökök 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.

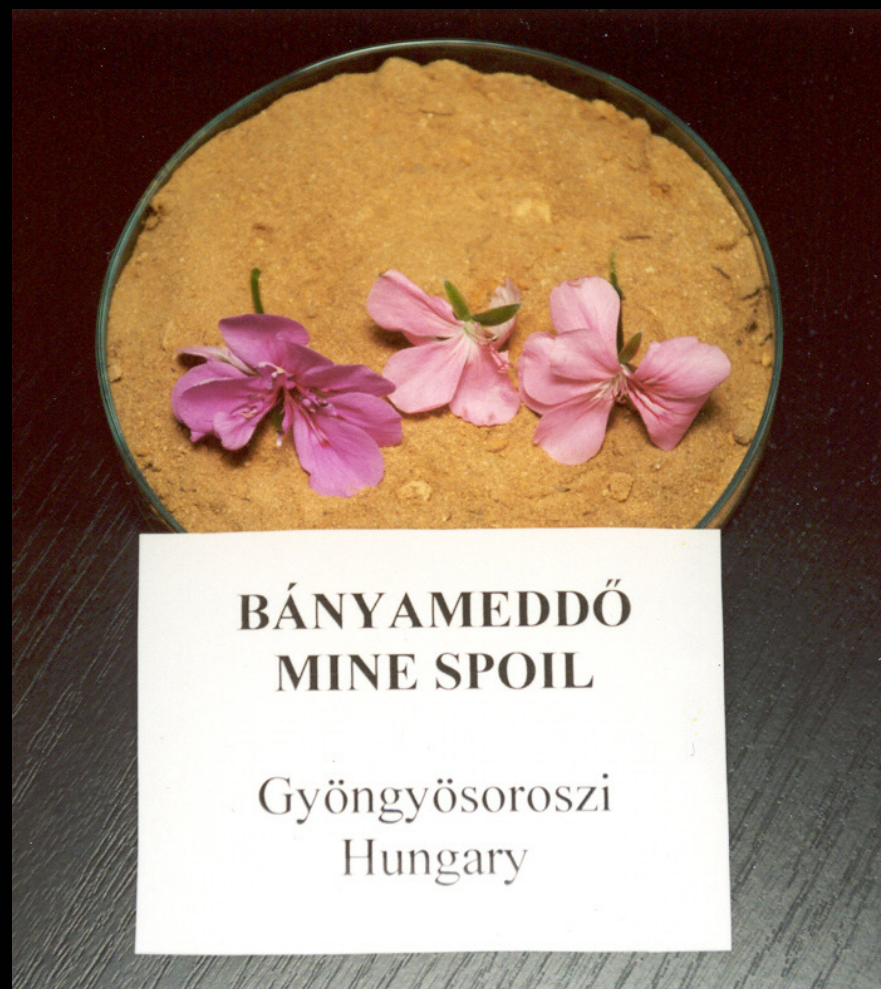


Rizofiltrációs egység sémája
(Dushenkov és Kapulnik, 2000 nyomán).



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

