



# ***TALAJREMEDIÁCIÓ***

***Kockázatcsökkentés, remediációs technológiák csoportosítása***

***A környezetvédelem alapjai***

***2019.11.18.***

**Dr. Feigl Viktória, Dr. Molnár Mónika**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

*Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék*

*Környezeti Mikrobiológia és Biotechnológia Kutatócsoport*

Ch. épület 2. emelet 244-es szoba

E-mail: [vfeigl@mail.bme.hu](mailto:vfeigl@mail.bme.hu); envirotox.hu

# BME ABÉT Környezeti Mikrobiológia és Biotechnológia Kutatócsoport

## *Környezeti kockázatmenedzsment:*

- Vegyi anyagok és szennyezett területek környezeti kockázatfelmérése
- Környezettoxikológiai tesztek fejlesztése és alkalmazása
- KÖRINFO környezetvédelmi adatbázis ([www.korinfo.hu](http://www.korinfo.hu))
- Hulladék hasznosítás (pl. vörösiszap, bioszén)
- Talaj és felszín alatti vizek kezelésére alkalmas (bio)technológiák fejlesztése



# A BME ABÉT KMBCS biomérnök tárgyai

## ▪ *Környezetvédelem témaköre:*

- A környezetvédelem alapjai (biomérnök BSc)
- Környezeti mikrobiológia és remediáció (biomérnök BSc, környezetvédelmi spec.)
- Környezeti kockázatmenedzsment (biomérnök MSc, környezetvédelmi spec.)
- Környezettoxikológia (biomérnök MSc, környezetvédelmi spec.)

## ▪ *Egyéb:*

- Sejtbiológia, mikrobiológia (biomérnök BSc)
- Mikrobiológia laborgyakorlat (biomérnök BSc)

# A környezetvédelem alapjai, 2. rész: ELŐADÁS TEMATIKA

## ▪ *Időpontok szerint:*

- **2017.11.11.** A talaj (Dr. Uzinger Nikolett, MTA TAKI)
- **2017.11.18.** Talajremediáció, remediációs technológiák csoportosítása (Dr. Feigl Viktória)
- **2017.11.25.** Toxikus fémekkel szennyezett területek kezelése, esettanulmány (Dr. Feigl Viktória)
- **2017.11.02.** Környezettoxikológia (Dr. Fekete-Kertész Ildikó)

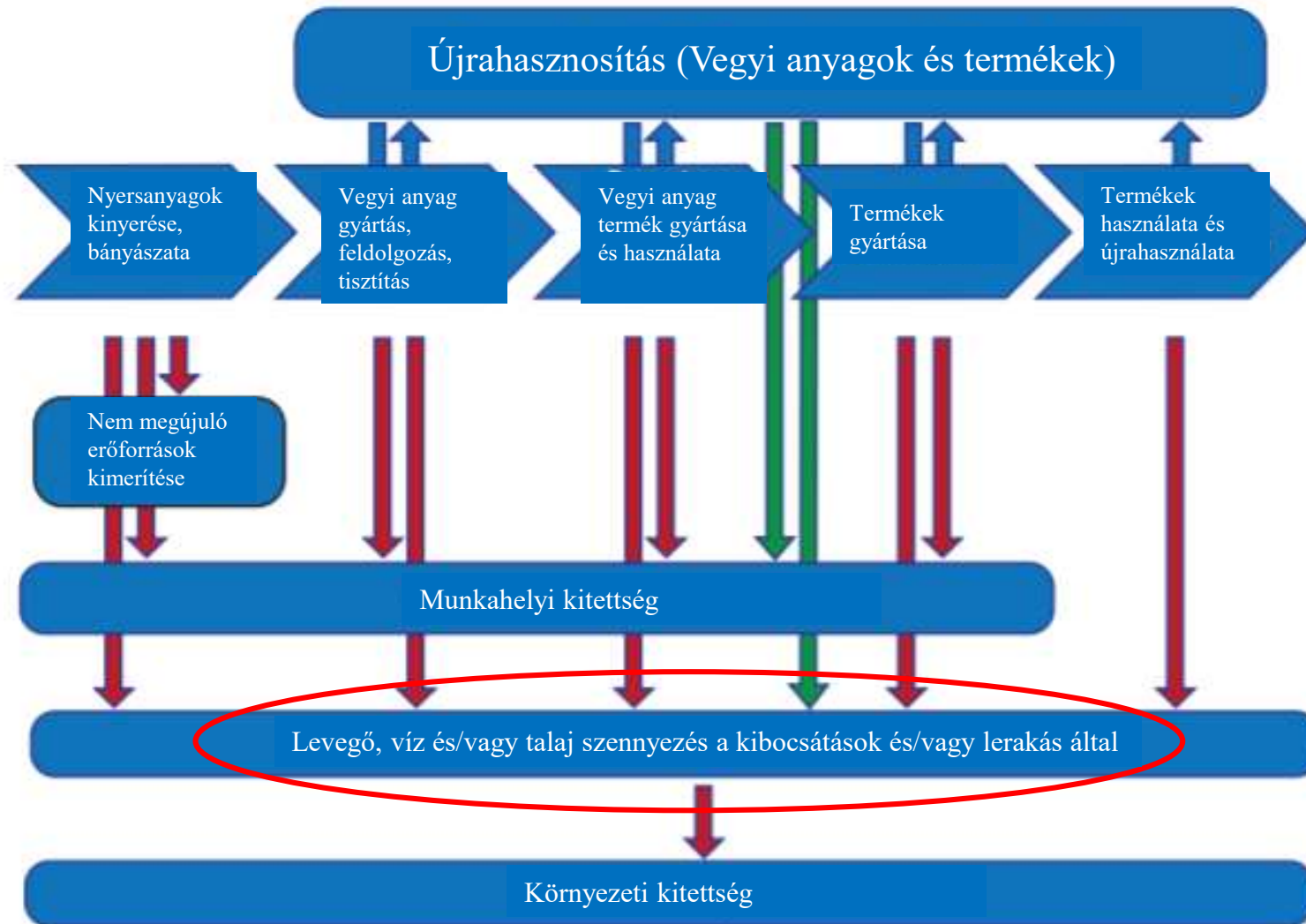
# Tartalomjegyzék

- Vegyi anyagok, talaj- és felszín alatti vizek szennyezettsége, talajremediáció
  - Statisztikai adatok a világból és Magyarországról
- Remediációs technológiák csoportosítása
- Döntési folyamatok





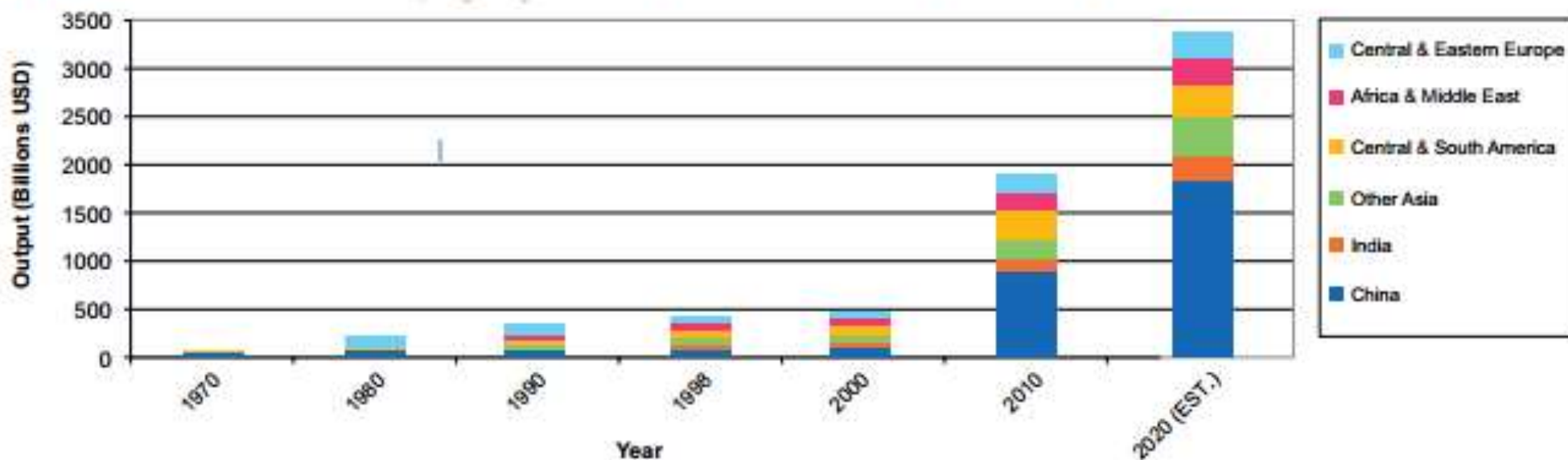
# Vegyai anyagok életciklusa



# Vegyri anyagok gyártása

Növekvő tendencia a világ minden részében!

**Figure 2.** Chemical Industry Output: Developing Regions\* & Countries with Economies in Transition



Forrás: United Nations Environment Programme, 2012

[http://www.unep.org/pdf/GCO\\_Synthesis%20Report\\_CBDTIE\\_UNEP\\_September5\\_2012.pdf](http://www.unep.org/pdf/GCO_Synthesis%20Report_CBDTIE_UNEP_September5_2012.pdf)

# A talajszennyezettség főbb forrásai Európában (2014-es adatok)

A talajszennyezés főbb lokális forrásai	Átlag (22 ország) (%)
Hulladék lerakás és kezelés	38,1
Ipari és kereskedelmi tevékenység	34,0
Tárolás	10,7
Egyéb	8,1
Szállítási balesetek	7,9
Hadászat	3,4
Nukleáris tevékenység	0,1

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites-3/assessment>



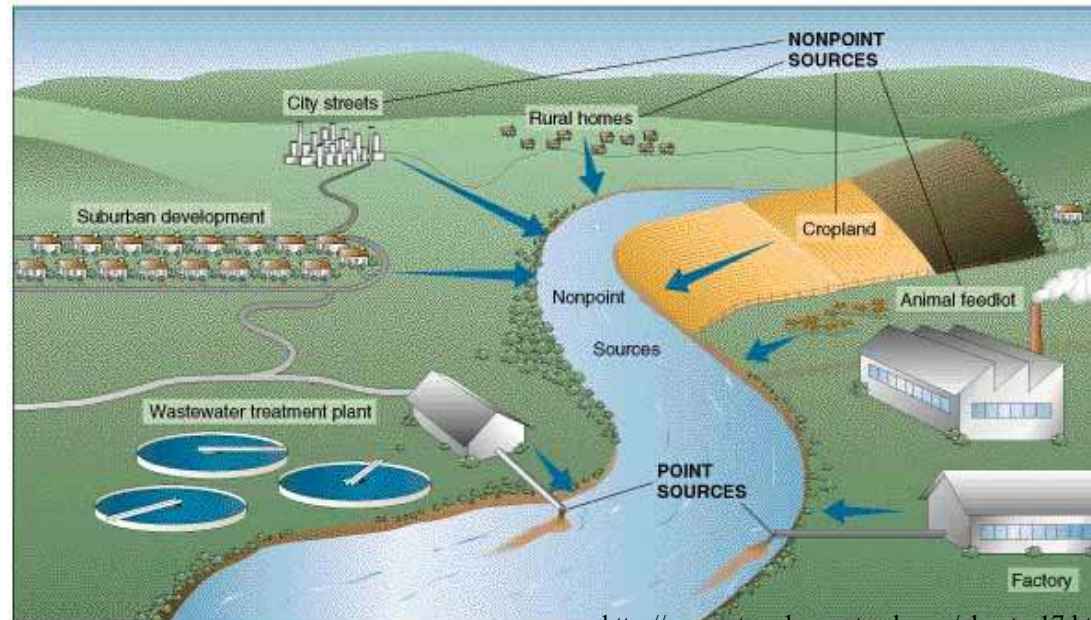
# Szennyezőforrások típusai

- *Szennyezés eredete szerint:*

- Természetes eredetű források (vulkáni eredetű, ásványi eredetű stb.)
- Emberi eredetű (antropogén) források

- *Szennyezőforrás/szennyezettség mérete szerint:*

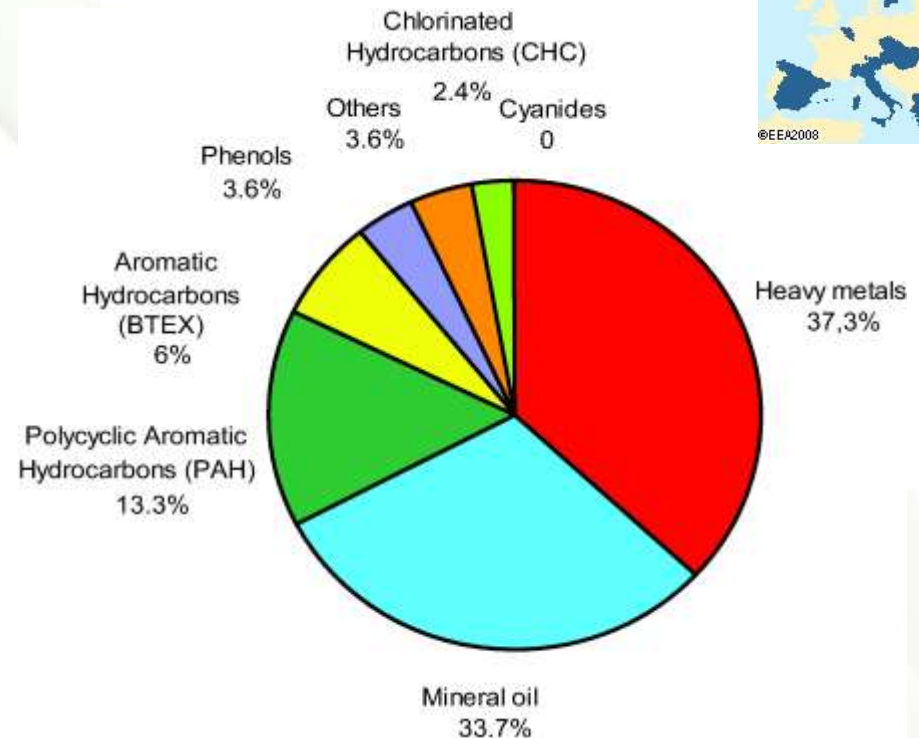
- Pontszerű szennyezőforrások/szennyezettség (pl. ipari emisszió, hulladéklerakók stb.)
- Diffúz szennyezőforrások/szennyezettség (kiülepedés a légkörből, műtrágyák használata stb.)



# SZENNYEZŐANYAGOK A TALAJBAN

EU – European Environment Agency  
felmérése (2011)

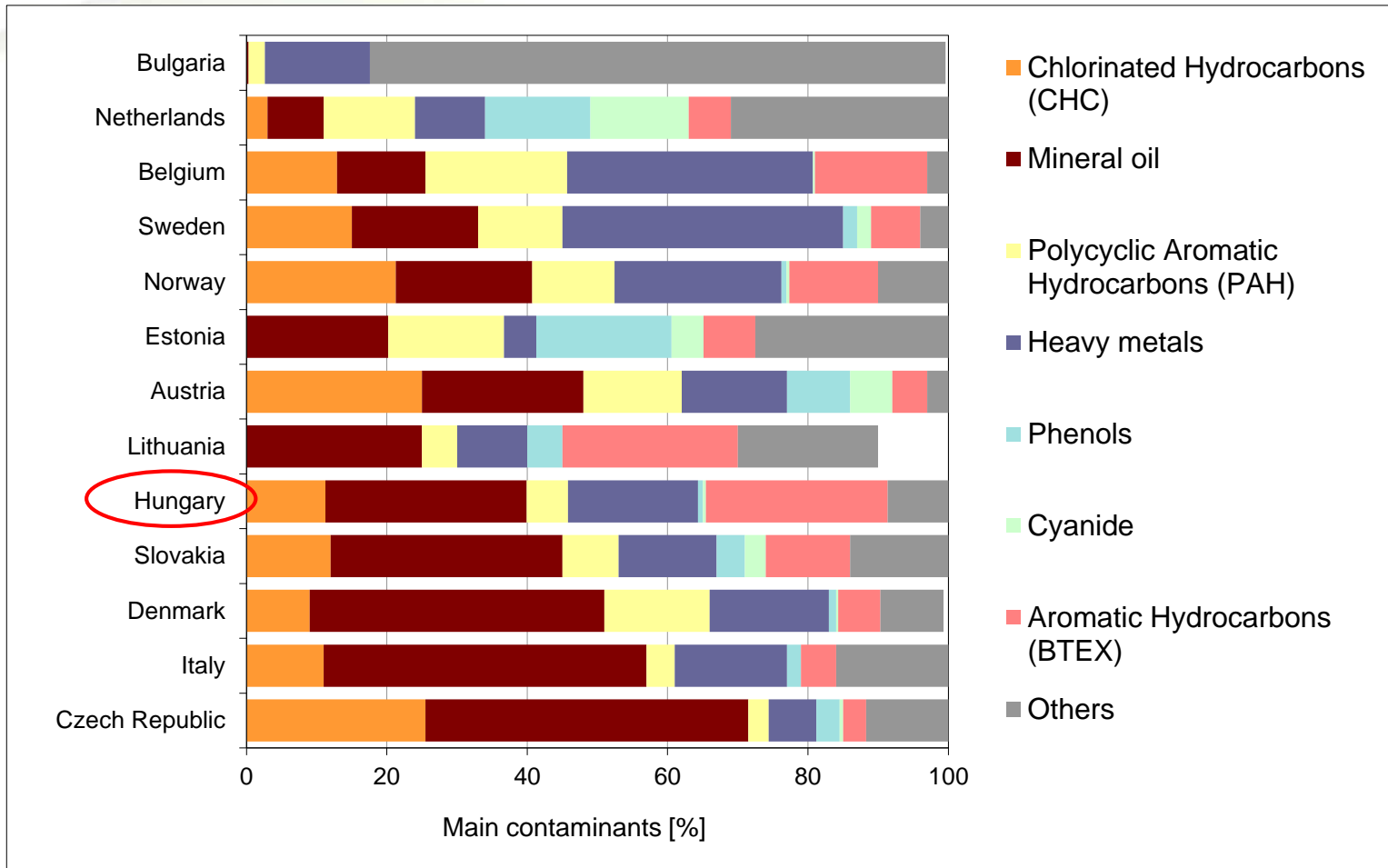
- Toxikus nehézfémek (Pb, Cd, Ni, Hg, Cu, Zn)
- Ásványolaj és ásványolaj-termékek
- Policiklikus aromás szénhidrogének (PAH)
- Aromás szénhidrogének (BTEX: benzol, toluol, etil-benzol, xilol)
- Fenolok
- Klórozott szénhidrogének, poliklórozott bifenilek (PCB) és egyes származékaik
- Cianidok



<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/overview-of-contaminants-affecting-soil-and-groundwater-in-europe>

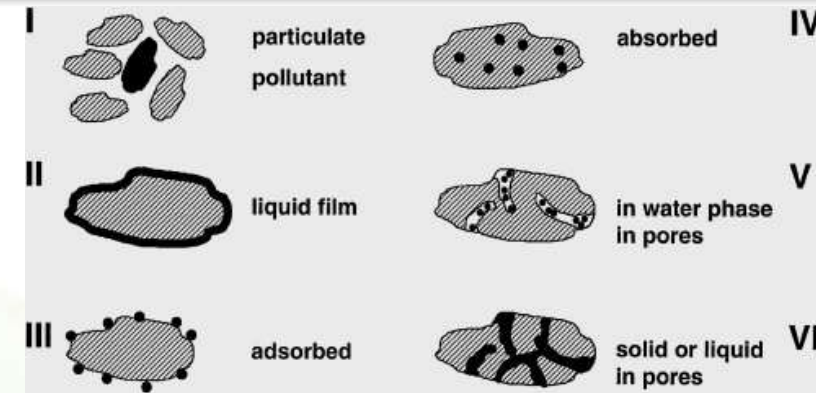
Hasonló adatok felszíni vizekre és talajvízre!

# EU felmérés - A jelentősebb talaj- és talajvíz szennyezőanyagok országonként (2006)



# SZENNYEZŐANYAGOK A TALAJBAN

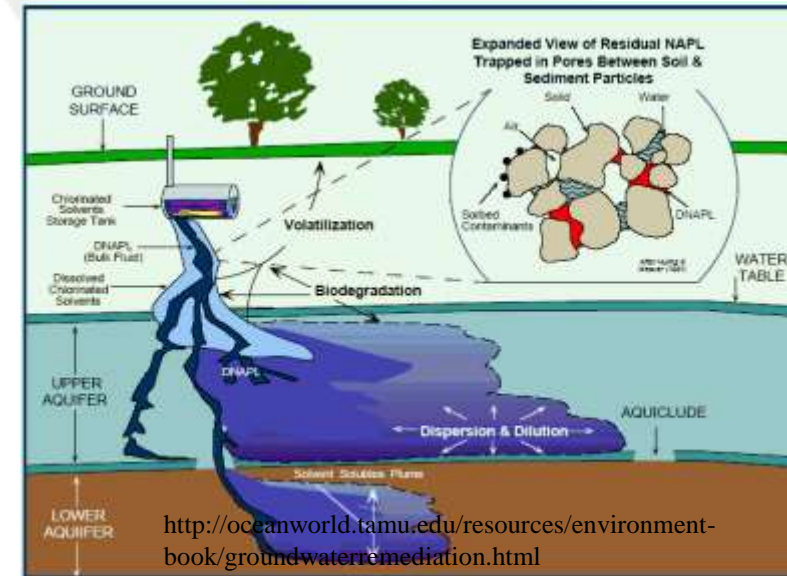
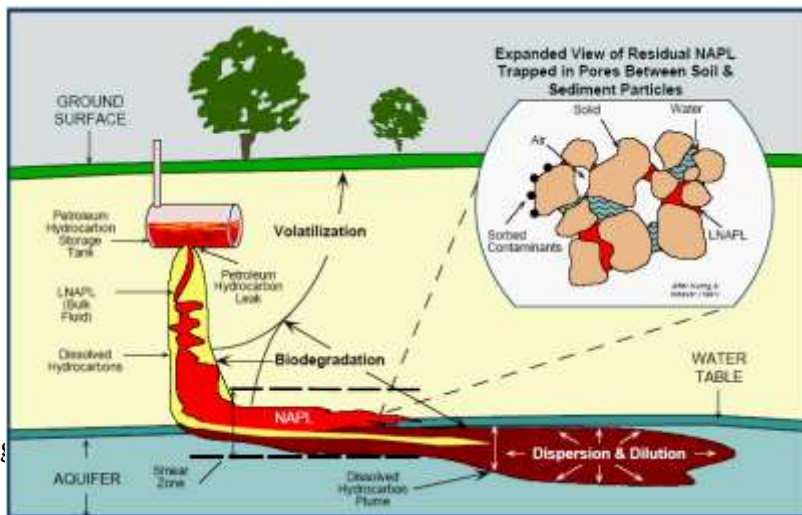
- **Gáz és gőz** → talajgázban, szorpcióval a szilárd felülethez kötődve
- **Folyékony** → talajnedvességben, talajvízben oldva, emulgeálva, folyadékfilm, a szilárd fázishoz kötődve, különálló fázisként
- **Szilárd** → talajszemcsékhez keveredve, szilárd szemcsék felületéhez kötve szorpcióval, mátrixba kötődve különféle erőkkel (pl. a humuszba épülve)



F. Volkering, A.M. Breure, W.H. Rulkens: Microbiological aspects of surfactant use for biological soil remediation, Biodegradation, 8 (1998), p. 401

LNAPL: light nonaqueous phase liquid (pl. olaj, BTEX)

DNAPL: dense nonaqueous phase liquid (pl. halogénezett szénhidrogének)



<http://oceanworld.tamu.edu/resources/environment-book/groundwaterremediation.html>



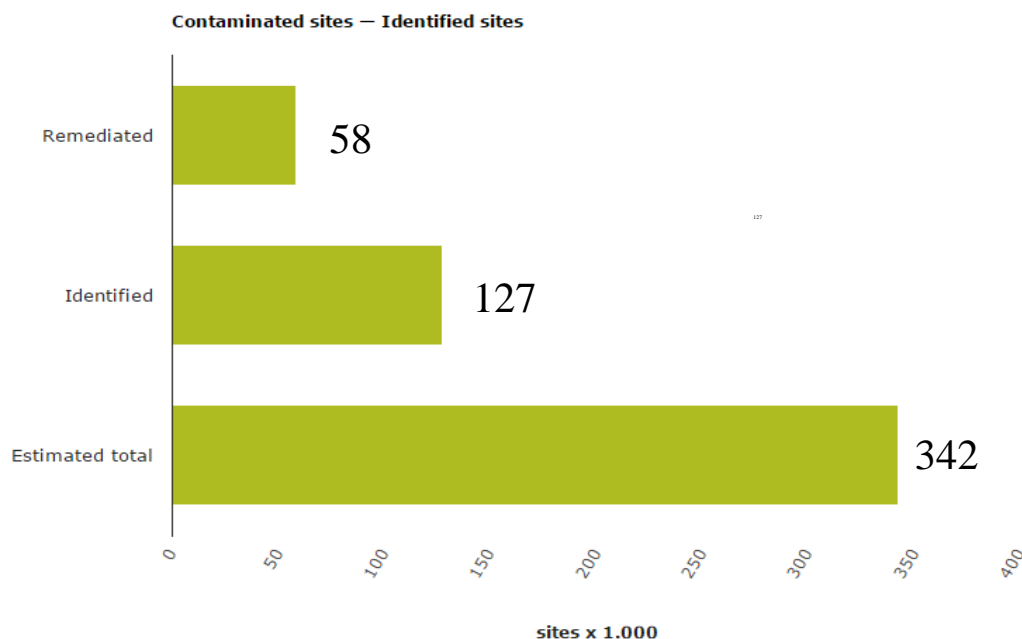
# Környezeti kockázatmenedzsment



Veszély azonosítása	Kockázatfelmérés	Megelőzés	Remediáció	Korlátozás
<ul style="list-style-type: none"> <li>Osztályozás</li> <li>Fontossági sorrendek (prioritások)</li> <li>Prioritási lista</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Általános kockázatfelmérés</li> <li>Lokális kockázatfelmérés</li> <li>Ökológiai kockázat</li> <li>Egészségkockázat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendeletek</li> <li>Monitoring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technológiaválasztás</li> <li>Előzetes felmérés</li> <li>Félüzemi kísérletek</li> <li>Részletes tervezés</li> <li>Kivitelezés</li> <li>Utókezelés</li> <li>Utómonitoring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Területhasználatkorlátozás</li> <li>Termeléskorlátozás</li> </ul>

# KÖRNYEZETI KOCKÁZAT CSÖKKENTÉSE

EU – European Environment Agency  
felmérése (2014)



<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites-3/assessment>

**Környezeti kockázat:** A vegyi anyagok környezetbe kerülése alapján előre jelezhető káros hatás. Abszolút (kitettség és hatás hányadosa) vagy relatív mérőszámmal jellemzett érték.

$RQ = \frac{PEC \text{ (Predicted Environmental Concentration)}}{PNEC \text{ (Predicted No Effect Environmental Concentration)}}$

**Remediáció:** meggyógyítás. Vegyi anyagokkal szennyezett környezeti elemek és/vagy fázisok környezeti kockázatának elfogadható mértékűre csökkentése.



# EU felmérés – Éves remediációs költségek a GDP %-ában (2014)





# ***REMEDIÁCIÓ***

## ***Remediációs technológiák csoportosítása***

# Talajremediációs technológiák osztályozása a kezelés helye szerint 1.

## ▪ Rendezett biztonságos lerakás (containment)

- Szennyezett talajtérfogat „kapszulálása”
- Környezettől való elszigetelés
- Kockázatcsökkentés nem végleges



<http://elements.geoscienceworld.org/content/6/6/363/F8.expansion.html>

# Talajremediációs technológiák osztályozása a kezelés helye szerint 2.

## ▪ Ex situ (off site)

- Kezelés a talaj (talajfázisok) eredeti helyéről való eltávolítás után, **kezelő üzemben/udvaron**
- Gyakran csak a szilárd fázisra vonatkoztatják
- Kiszívott talajgáz v. pára kezelése is





# Talajremediációs technológiák osztályozása a kezelés helye szerint 3.

## ▪ (Ex situ) On site

- Kezelés a talaj eredeti helyéről való eltávolítás után a **helyszínen**
- Technológiai szempontból kevés a különbség az *ex situ off site*-hoz képest
- Megkülönböztetés: a kapcsolódó műveletek, időtartam



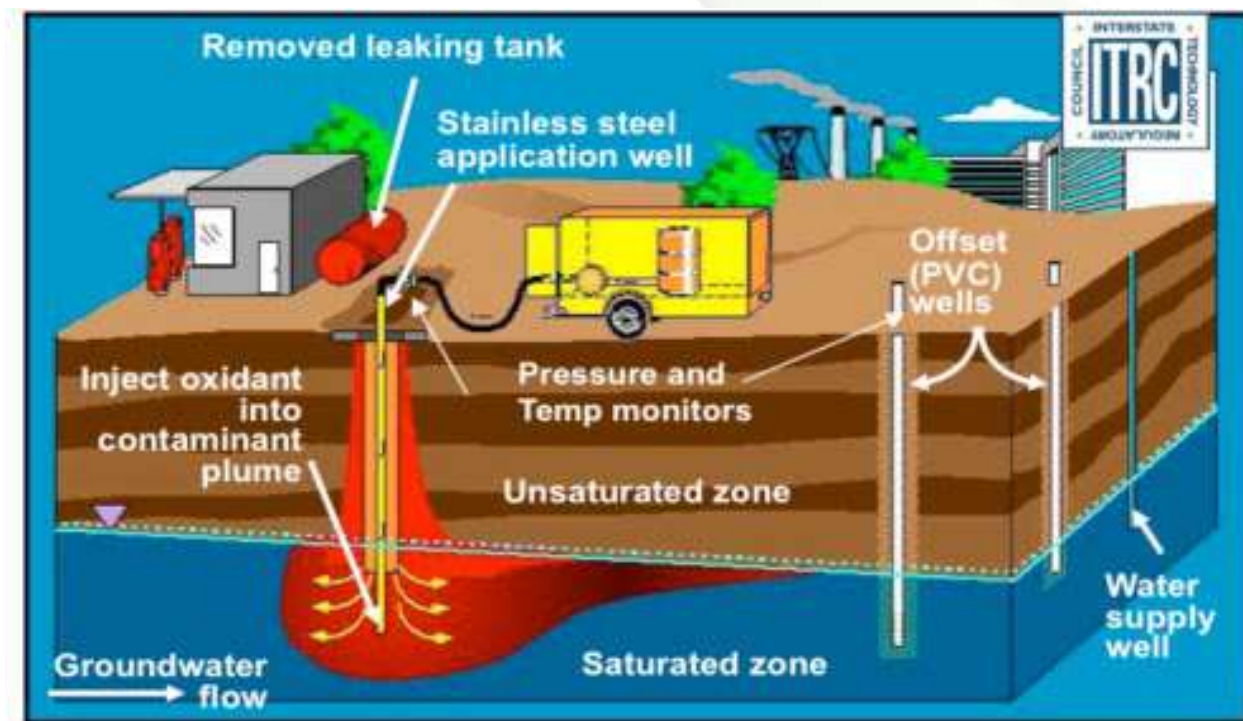
[http://www.gaicontractors.com/\\_english/1\\_applications\\_04.html](http://www.gaicontractors.com/_english/1_applications_04.html)



# Talajremediációs technológiák osztályozása a kezelés helye szerint 4.

## ▪ In situ

- Kezelendő talajfázisokat nem távolítjuk el (vagy egyiket sem, vagy csak a szilárdat nem)
- „Kvázi reaktor” (Nyitott reaktor: faltalan, de nem végtelen)
- További megkülönböztetés: a rendszer zavartalansága



<http://www.regenesis.com/contaminated-site-remediation-products/chemical-oxidation/>

**In-Situ Chemical Oxidation (ISCO)**



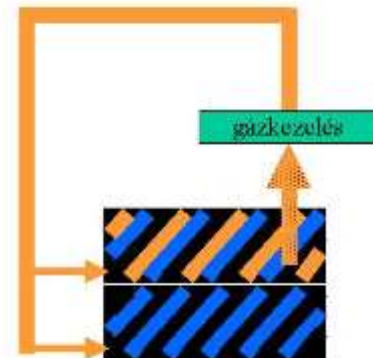
# *In situ*



# Talajremediációs technológiák osztályozása a technológia alapfolyamata szerint

## ▪ Technológia alapfolyamata:

- **Fizikai:** szennyezett talajgáz elszívása és a víz kiszivattyúzása a talajból és felszíni kezelése
- **Kémiai:** a mobilitás növelése (illékonyá tétel, vízoldhatóvá tétel, biológiai hozzáférhetőség növelése), immobilizálás (oldhatatlanná tétel, kicsapás), teljes vagy részleges bontás, toxikusság csökkentés: toxicitásért felelős csoportok elbontása, lecserélése (pl. deklórozás)
- **Termikus:** A kismértékű hőmérsékletemeléstől (intenzifikálja a biológiai folyamatokat, növeli az illékonyt, deszorpciót) a közepes, a magas és az extrém magas (égetés) hőfokokig, gőz, meleg levegő, elektromos erőtér, rezgések segítségével
- **Biológiai...**



# Biológiai folyamatokon alapuló talajkezelési technológiák

**Bioremediáció** → élő sejtek vagy szervezetek, esetleg azok valamely termékének (pl. enzim) biodegradációs, bioakkumulációs vagy biológiai stabilizáló képességét állítja a technológia középpontjába → a biológiai folyamatoknak biztosít **optimális körülményeket** az alkalmazott technológiai paraméterekkel, adalékanyagokkal.

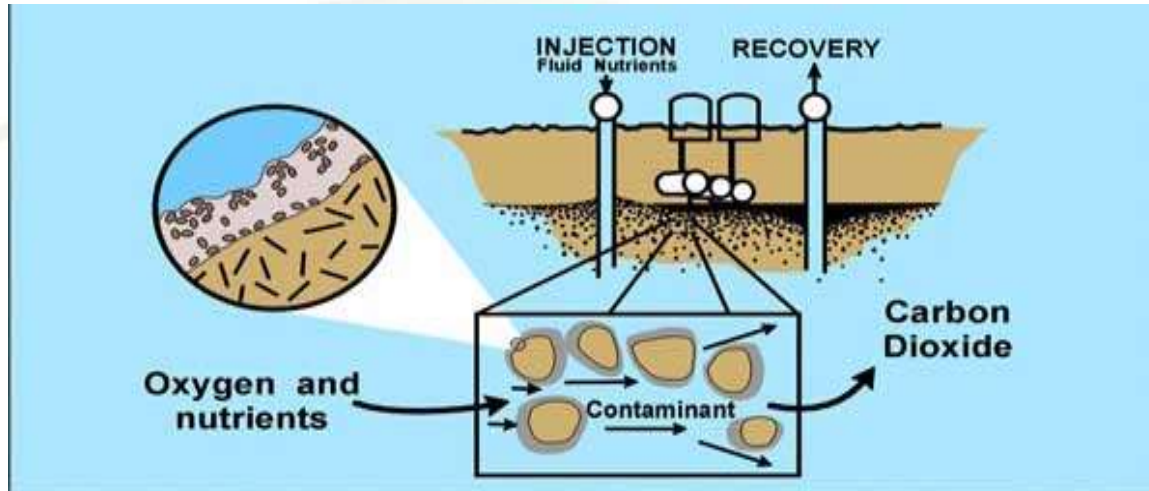
- Biodegradáció: szerves szennyezőanyagok komplexitásának csökkentése vagy teljes lebontása, **mineralizációja**, biológiai hatásra.

✦ Felhasználhatóak:

- **Ökoszisztéma endogén tagjai/közösségei**
- **Izolált és mesterségesen felszaporított mikroorganizmusok, növények** (adaptált, genetikailag módosított...)
- **Aktív közösségek** (pl. szennyvíziszapból, komposztból, aktív talajból stb.)



# BIODEGRADÁCIÓN ALAPULÓ REMEDIÁCIÓ



Forrás: <http://www.alken-murray.com/clearflo.htm>,  
<http://biomineralsystems.com/e1.php>

**Szubsztrát → Szerves szennyezőanyag**

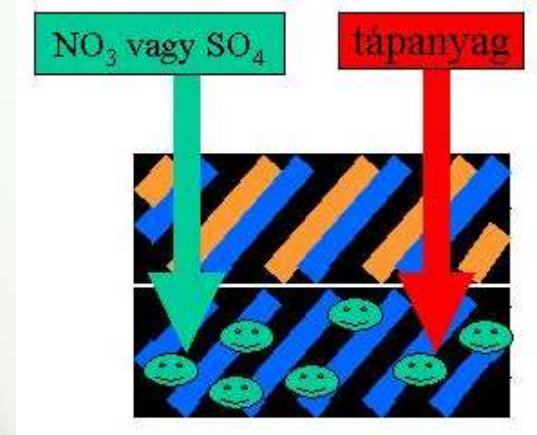
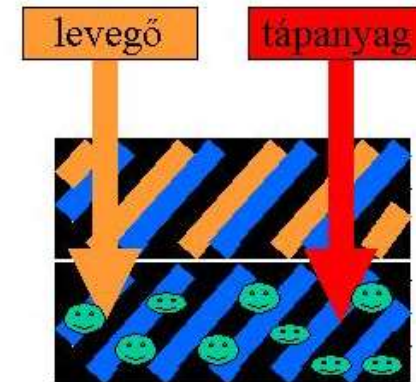
**Mikroflóra lebontja (optimális körülmények)**

**Mikroorganizmusok tevékenységének tudatos felhasználása**



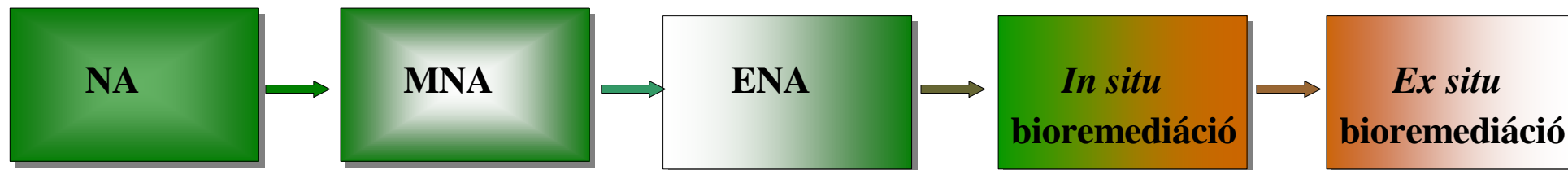
# Biológiai folyamatokon alapuló talajkezelési technológiák

- *Cél:* A mikroflóra működésének optimalálása, aktivitásának növelése
- **Fokozatok** beavatkozástól függően:
  - Enyhe beavatkozás: nedvesítés, levegőztetés, tápanyag adagolás, pH állítás
  - Erőteljesebb beavatkozás: adalékanyagok alkalmazása, mikrobiális oltóanyagok, hőmérséklet emelése
- Helyszínspecifikusság
- *In situ, ex situ*
- Talajgáz, talajvíz, teljes talaj



# A szennyezett talajok kezelésére alkalmazott módszerek – osztályozás biológiai technológiák esetében

## A természetes folyamatok mérnöki alkalmazásának fokozatai szennyezett talaj remediálásában



**NA:** Natural Attenuation – természetes szennyezőanyag-csökkenés

**MNA:** Monitored Natural Attenuation – monitorozott természetes szennyezőanyag-csökkenés

**ENA:** Enhanced Natural Attenuation – gyorsított természetes szennyezőanyag-csökkenés



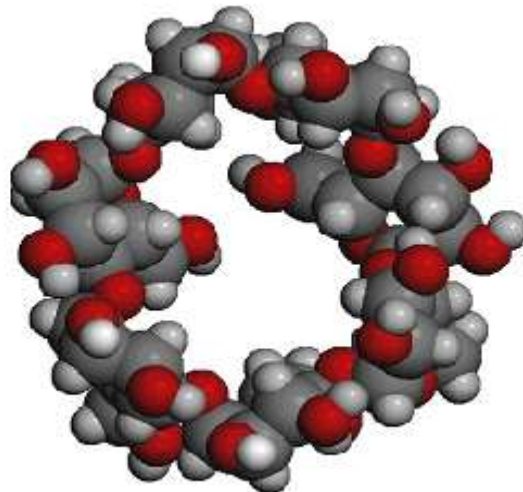
# Döntési folyamat

1. Területfelmérés, konceptuális terület modell (CSM)
2. Szóbajövő technológiai alternatívák kijelölése (melyek a választott célértéket teljesíteni tudják)
3. A megfelelő technológiai alternatívák rangsorolása (ökomérnök):
  1. **ökoszisztéma és az emberi egészség védelme,**
  2. **kockázatkommunikációs és szociális szempontok,**
  3. **területfejlesztés, területhasználat,**
  4. **gazdasági szempontok.**

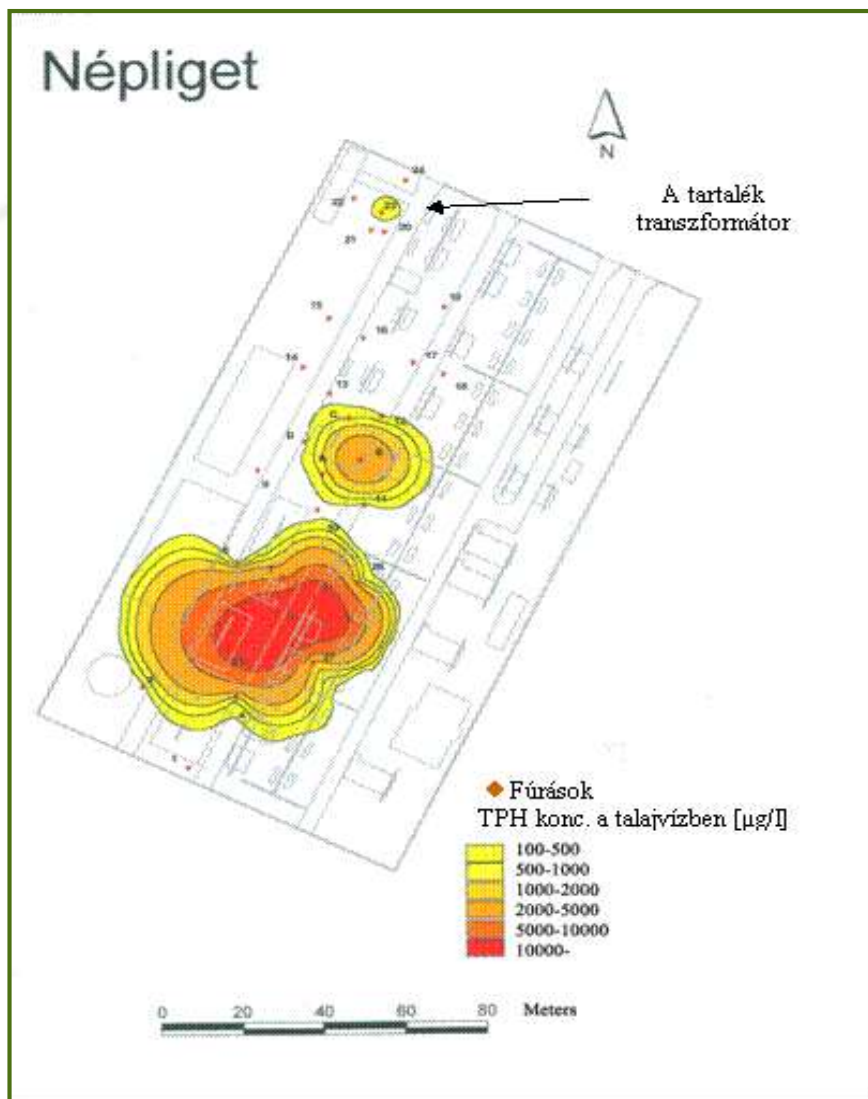
De a terület tulajdonosa ettől eltérő prioritásokat jelölhet meg  
(1. Területhasznosítás, bevételszerzés)!

# TRANSZFORMÁTOR OLAJJAL SZENNYEZETT TALAJ CIKLODEXTRINNEL INTENZIFIKÁLT BIOREMEDIÁCIÓJA

## Esettanulmány 1.



# SZABADFÖLDI DEMONSTRÁCIÓ HELYSZÍNE



*Népligeti transzformátor állomás.*

A szennyezőanyag: TO40A  
transzformátorolaj;

a talajban 20 000–30 000 mg/kg,

a talajvízben átlagosan 0,99 mg/l.

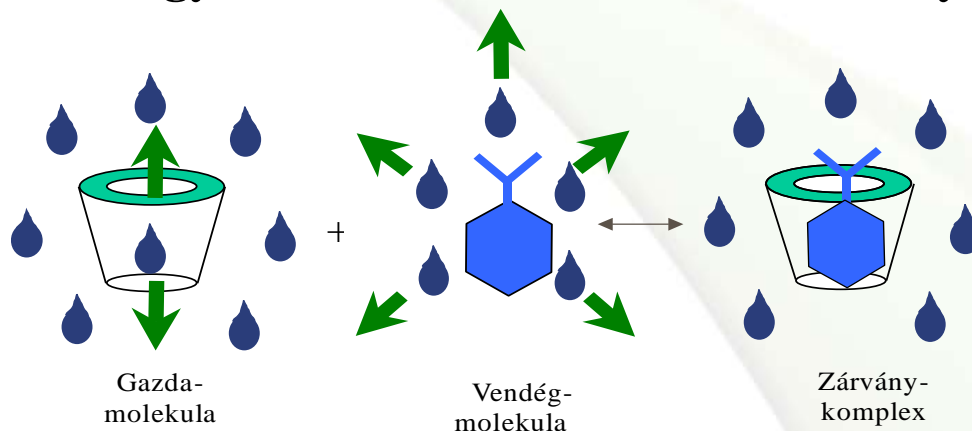
B szennyezettségi határérték alifás szénhidrogénekre  
talajra: 100 mg/kg, talajvízre: 100  $\mu\text{g/l}$   
6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet



# Bioremediáció intenzifikálása - technológiafejlesztés

- A bioremediáció (biodegradáció) gyakori korlátozó tényezője a szennyezőanyag korlátozott biológiai hozzáférhetősége.
- A hozzáférhetőség növelésének egyik módja: *ciklodextrinek* alkalmazása.

ciklodextrinek  $\Rightarrow$  egyedülálló szerkezet  $\Rightarrow$  zárványkomplex-képzés

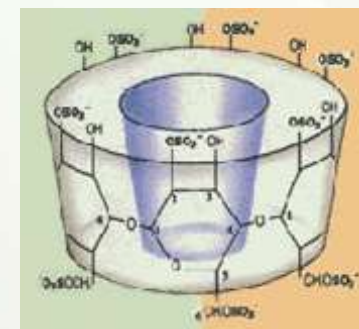
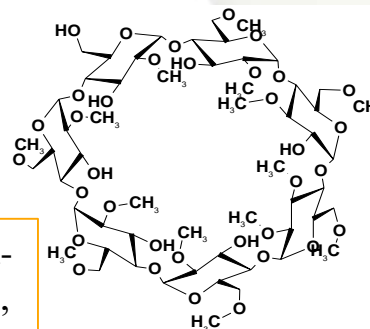


*A zárványkomplex-képzés sematikus szemléltetése: a ciklodextrin hidrofób üregében elhelyezkedő vízmolekulákat kiszorítja a hidrofób vendégmolekula*

## Ciklodextrinek felhasználása talajkezelésben:

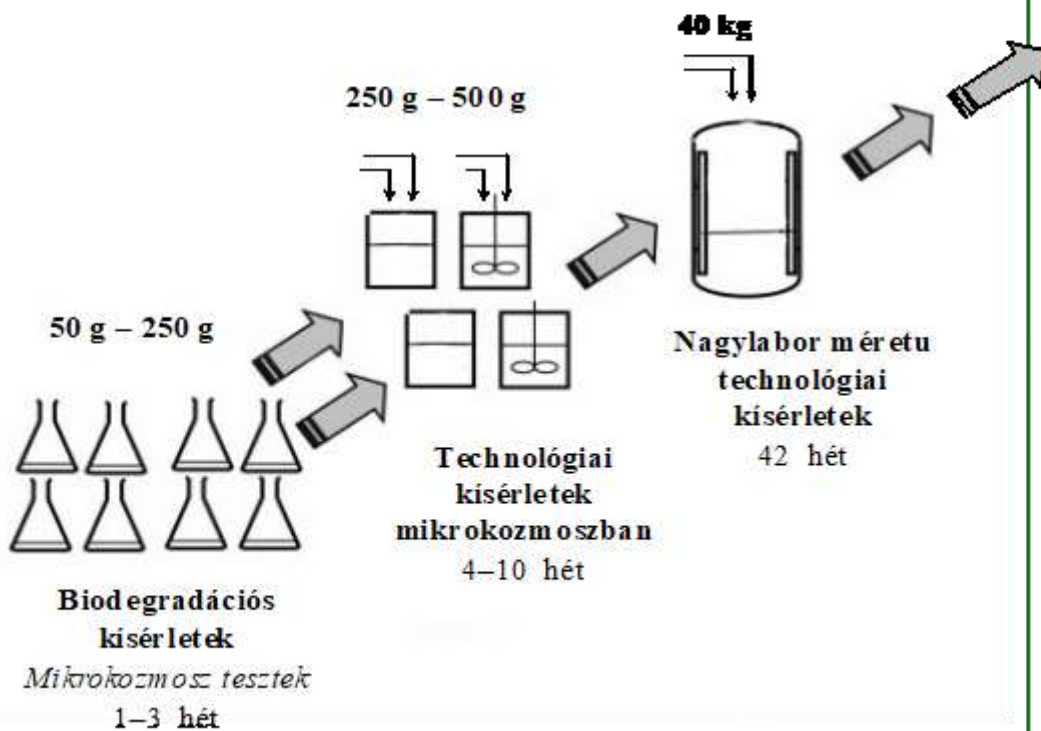
- talajmosási technikákban
- extrakciós eljárásokban

Ciklodextrinek: hat, hét vagy nyolc alfa-D-glükopiranoz-egységből álló ciklikus, nem redukáló oligoszacharidok.



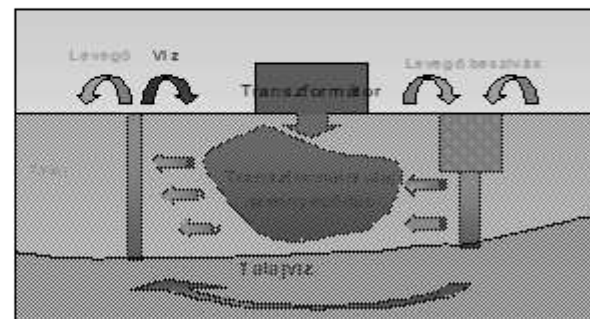
# Fokozatos léptéknövelés

## Technológia tervezés és fejlesztés



## Technológia demonstráció Alkalmazás

30 m<sup>3</sup>, 50 t szennyezett talaj



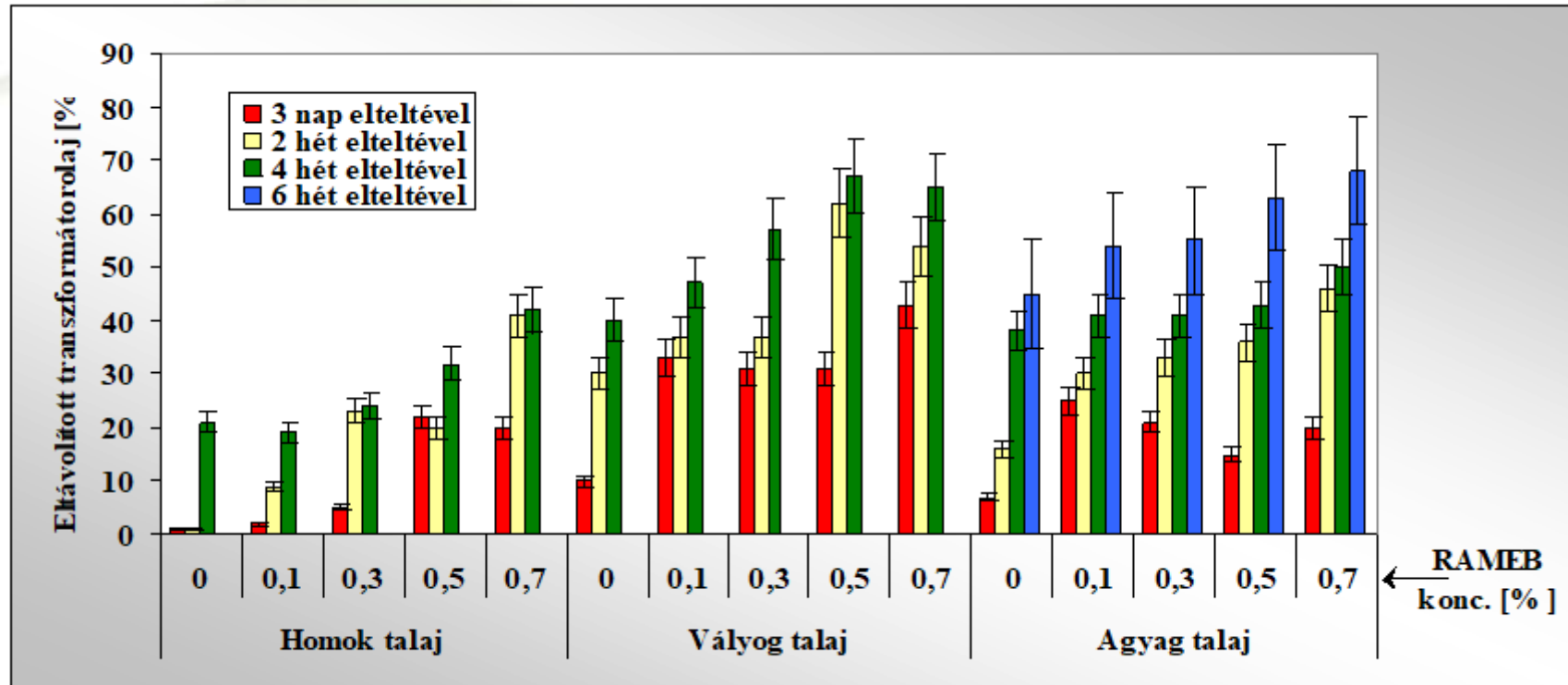
## Szabadföldi alkalmazás

*In situ* ciklodextrines biotechnológia – *CDT*  
47 hét



# RAMEB hatása a transzformátorolaj biodegradációjára különböző textúrájú talajokban

*A transzformátorolaj-eltávolítás (FT-IR) a RAMEB koncentráció függvényében*



- Minden esetben nőtt a szennyezőanyag biodegradációjának mértéke a RAMEB (véletlenszerűen metilezett béta-ciklodextrin) hatására függetlenül a talajtól.
- Az eltávolított szennyezőanyag-tartalom és az eltávolítás sebessége szignifikánsan függ a RAMEB koncentrációjától, és hogy az eltávolítás sebessége talajonként különböző.



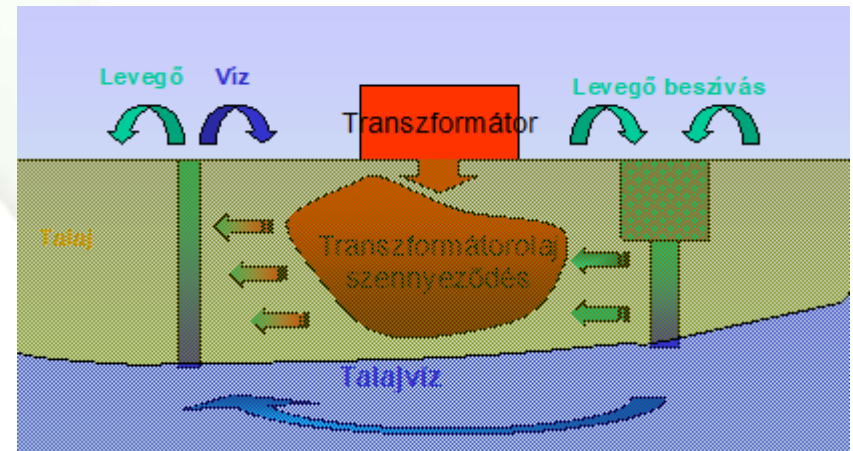
# SZABADFÖLDI DEMONSTRÁCIÓ – TECHNOLÓGIA

A szennyezett környezeti elemek kezelésére technológia-együttes:

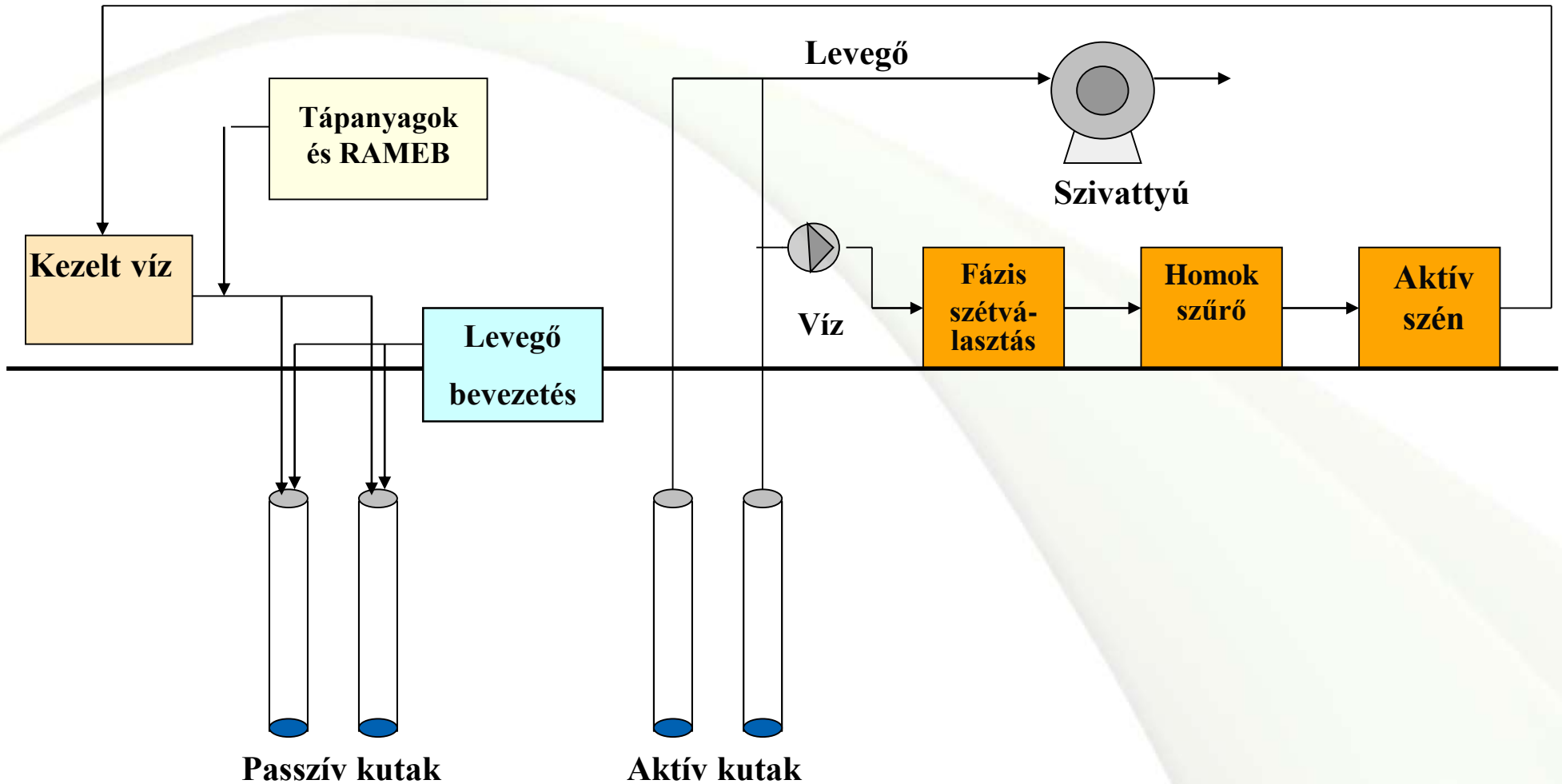
- A telítetlen zóna *in situ* kezelése bioventillációval
- A talajvíz *ex situ* fizikai-kémiai kezelése
- A telítetlen zóna nedvesítése és enyhe *in situ* mosása a felszínen kezelt vízzel

A remediáció intenzitásának növelése:

- Levegőztetés
- Tápanyagpótlás: N, P adagolása
- Adalékanyag: *RAMEB* (biológiai hozzáférhetőség-javító hatás a három fázisú talajban, és szolubilizáló képesség a talaj-talajvíz kölcsönhatás befolyásolására)

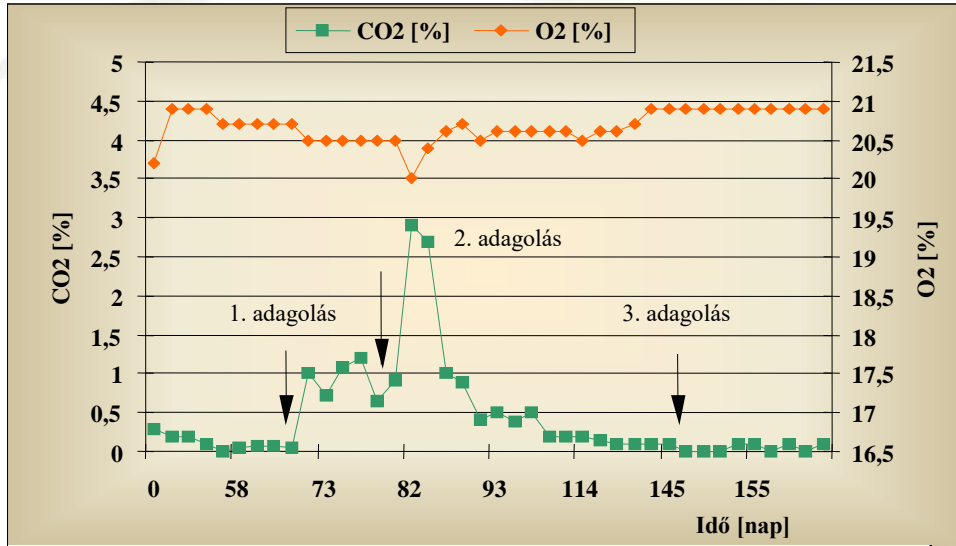


# CDT- komplex bioremediáció ciklodextrin alkalmazásával



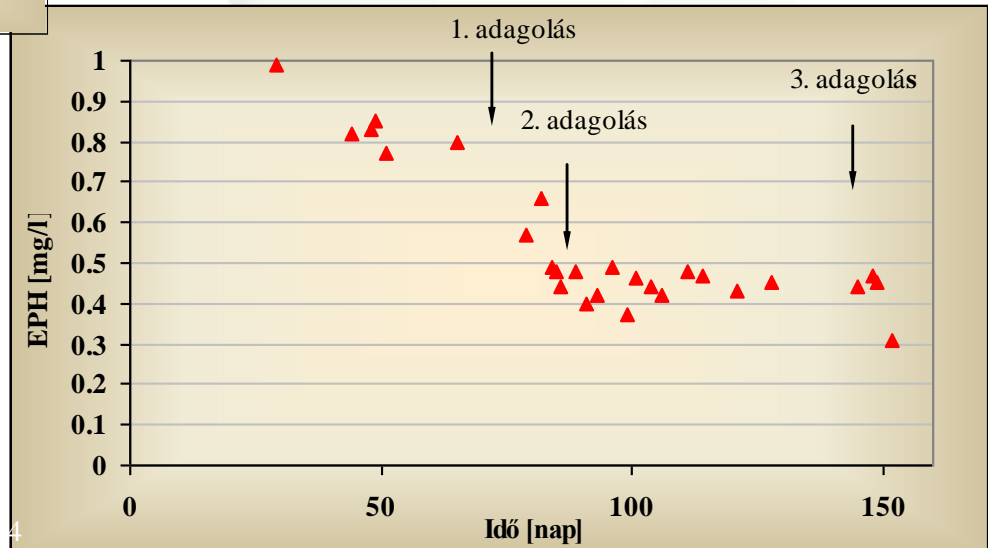
# *In situ* komplex ciklodextrines biotechnológia (CDT) transzformátorállomás szennyezett talajának kezelésére

## *Mozgékony talajfázisok analizisének eredményei*



*A széndioxid- és oxigéntartalom a talajból kiszívott levegőben a téliesítés előtt*

*A talajvíz EPH (extrahálható szénhidrogén) tartalma téliesítés előtt*



# ***In situ* komplex ciklodextrines biotechnológia (CDT) transzformátorállomás szennyezett talajának kezelésére**

*A talajminták transzformátorolaj-tartalma a kezelés indításakor, a 24. és a 47. héten*

Talajmintavétel helye a felszíntől	Transzformátorolaj-tartalom [mg/kg]		
	Indítás (kísérlet kezdete)	24. hét	47. hét (kísérlet vége)
10–30 cm	25 000	1 600	210
80–90 cm	25 000	800	260

*A szennyezett talaj toxicitása és jellemzése a kísérlet kezdetén és végén*

Tesztorganizmusok és végpontok	Mintavétel helye a felszíntől			
	10–30 cm		80–90 cm	
	Vizsgálat a kísérlet előtt és után			
	Előtte	Utána	Előtte	Utána
<i>Vibrio fischeri</i> biolumineszcencia-gátlás ED <sub>50</sub> [mg] ΣCu <sub>20</sub> [mg Cu/kg talaj] Jellemzés	22 320 <i>toxikus</i>	50 <80 <i>nem toxikus</i>	8 450 <i>nagyon toxikus</i>	65 <80 <i>nem toxikus</i>
<i>Sinapis alba</i> gyökernövekedés-gátlás ED <sub>50</sub> [g] Jellemzés	4 <i>toxikus</i>	>5 <i>nem toxikus</i>	2 <i>toxikus</i>	>5 <i>nem toxikus</i>
<i>Folsomia candida</i> mortalitás LD <sub>50</sub> [g] Jellemzés	12 <i>toxikus</i>	>20 <i>nem toxikus</i>	5 <i>toxikus</i>	>20 <i>nem toxikus</i>





- **KÖRINFO adatbázis ([www.korinfo.hu](http://www.korinfo.hu)):**
  - Talaj és felszín alatti víz környezeti kockázatának csökkentése  
<https://enfo.hu/node/140>
- **Gruiz Katalin: Reaktorszemlélet, <https://enfo.hu/etanfolyam/3423>**