

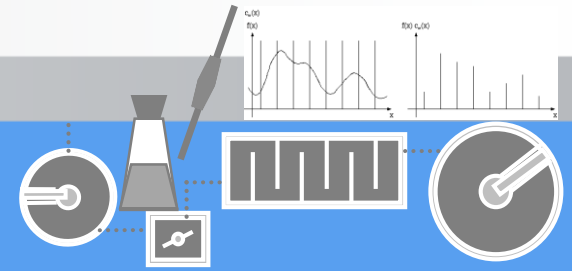
**Xenobiotikumok és mikroszennyezők által okozott  
kockázatok és kihívások a szennyvíztisztításban,  
valamint a használtvizek és a biomassza  
újrahasznosításban**

*Dr. Bakos Vince,  
egyetemi adjunktus (BME ABÉT)*

*Budapest, 2019/20. ősz*

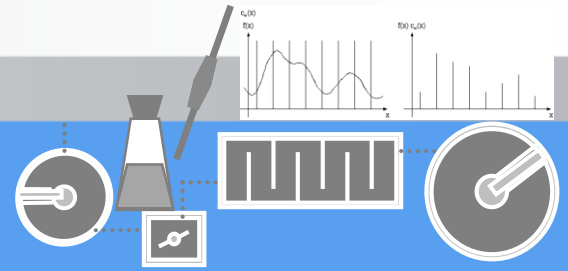


# Az előadás anyag irodalmi háttere



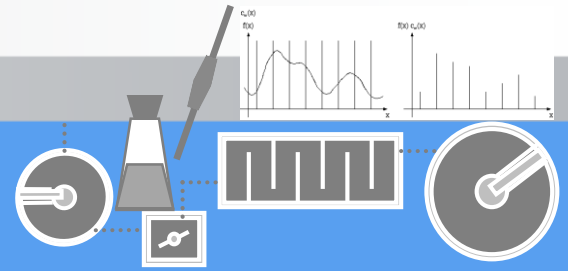
- **Dr. Jobbágy Andrea, Dr. Bakos Vince: Alkalmazott biodegradáció; Környezetvédelmi biotechnológia; Környezetvédelmi mikrobiológia és biotechnológia előadások anyagai**
- **Plósz Benedek, egy. docens, Technical University of Denmark / University of Bath előadás anyagai**
- **Materials of Leading edge summer course on Management of micropollutants in the urban water cycle, IRSTEA-INRA, 9-13 July, 2018, Lyon, France. Trainers: J-M. Choubert, D. Patureau, S. Suarez, F. Metz, M. Pomies, I. Bazin, B. Gy. Plósz.**
- **Dr. Clement Adrienne: Veszélyes anyagok jelenléte a hazai felszíni vizekben, MaSzeSz Szakmai nap előadás, BME VKKT, 2019.**
- **Dr. Kun Ágnes: A mikroszennyezők kockázata a használtvizek újrahasznosításában, *Hírcsatorna*, 2019/3. szám, 6-12. oldal.**
- **Kapcsolódó tudományos cikkek (a cikkek listáját ld. a diasor végén, ajánlott tudományos folyóiratcikkek)**

# Tematika



- I. Xenobiotikumok és az Andrews-kinetika**
- II. Mikroszennyezők általános jellemzői, szabályozási jogi háttér**
- III. Mikroszennyezők eltávolítása – folyamatok és mechanizmusaik leírása, modellezése**
- IV. Szennyvíztisztítási technológiák mikroszennyezők eltávolítására**
- V. Szennyvíziszap és a használtvíz (mezőgazdasági) újrahasznosítása a mikroszennyezők tükrében, felmerülő kockázatok**
- VI. Antibiotikum rezisztencia**
- VII. Konklúziók**

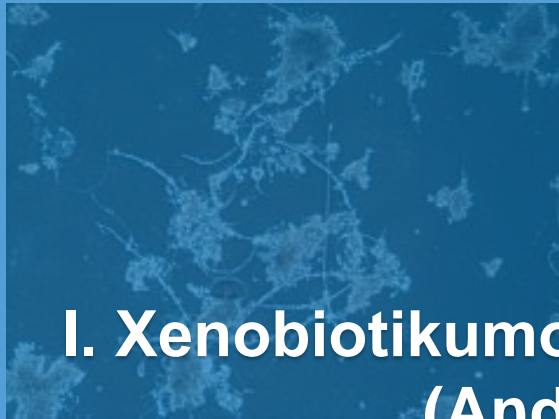
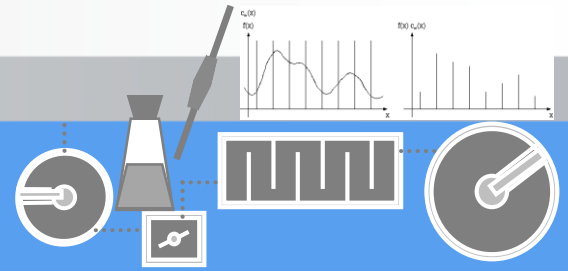
# Számonkérésre való felkészülés



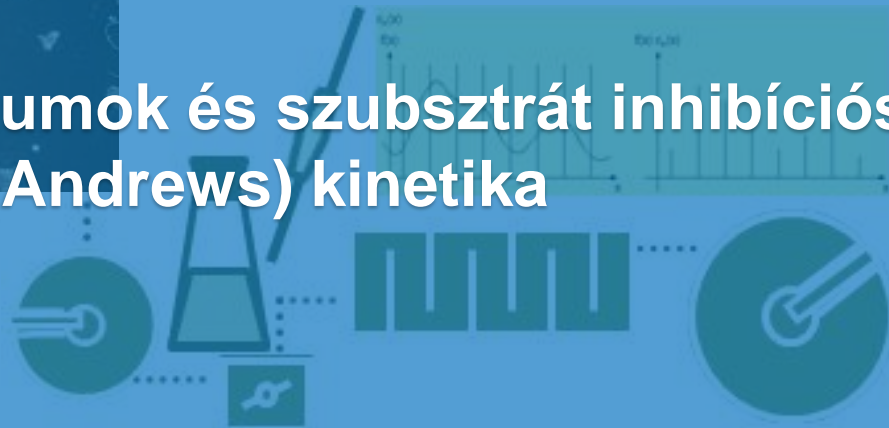
Minden dia bal felső sarka meg van jelölve a számonkérhető tartalomnak megfelelően a következők szerint:

**Számonkérés lehet belőle**

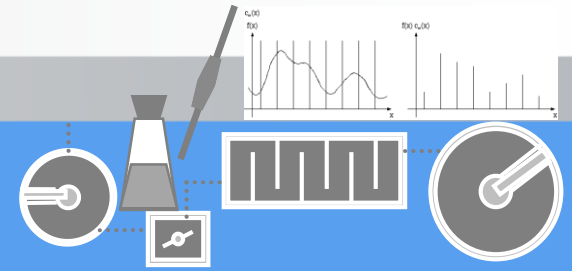
**Nem lesz belőle számonkérés – hasznos / érdekes háttérismeret**



# I. Xenobiotikumok és szubsztrát inhibíciós (Andrews) kinetika



# Szubsztrátumok biodegradálhatósága



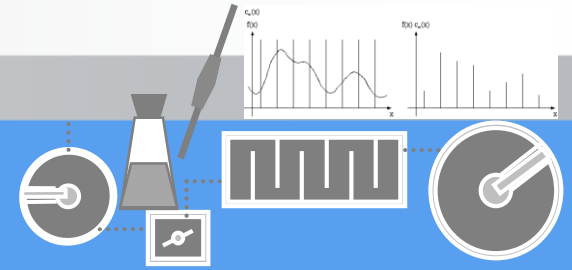
## Biodegradálhatóság

- **Mineralizálható, könnyen biodegradálható, nehezen biodegradálható**
- **Perzisztens, rekalcitráns**
- **Befolyásoló tényezők: szubsztrát, másik szubsztrát (kometabolízis), mikroorganizmus, környezet, technológia**

## Eredet

- **Biogén anyagok**
- **Ipari eredetű anyagok**
  - Természetben is előforduló anyagok
  - **Xenobiotikumok**

# A biodegradáció koncentrációfüggése



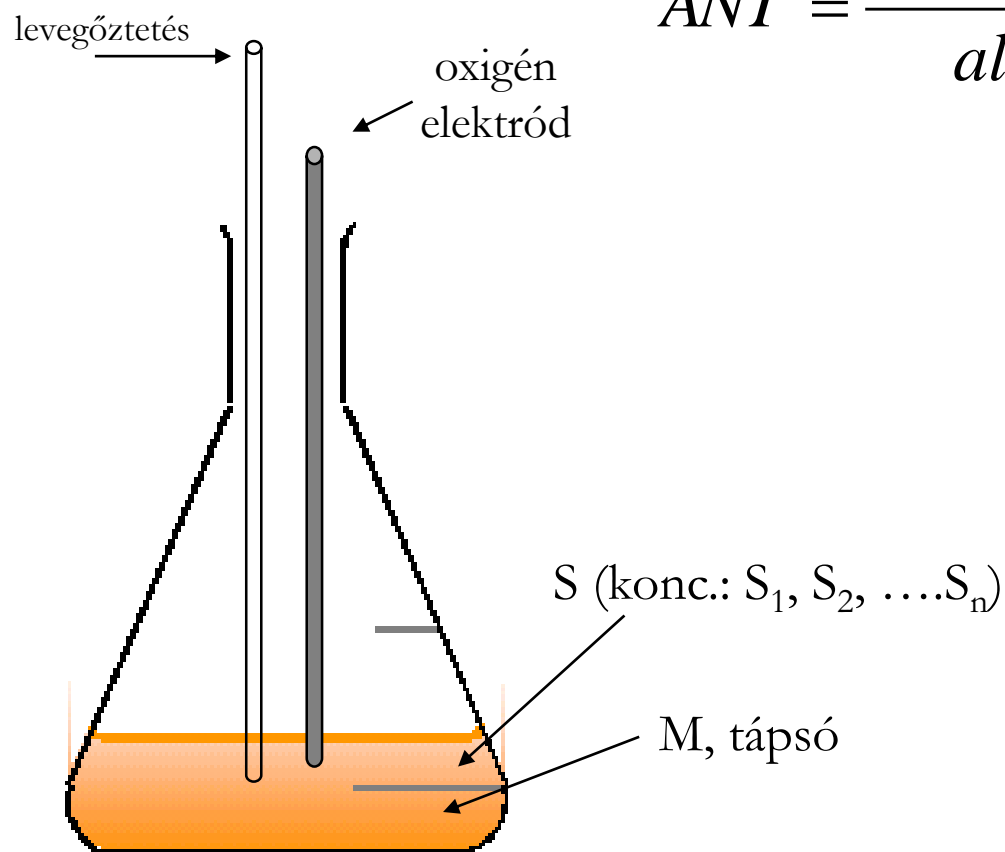
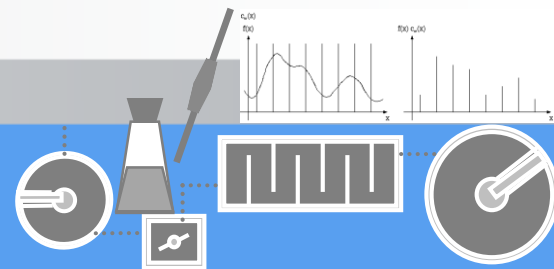
- ANT – Anyagcsere sebesség Növelő Tényező

$$ANT = \frac{\textit{szubsztrátanyagcsere sebessége}}{\textit{alapanyagcsere sebessége}}$$

(endogén metabolizis)

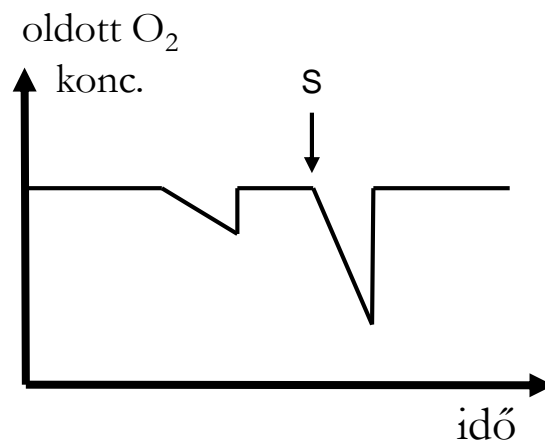
**Anyagcsere sebesség mérés**

# A biodegradáció koncentrációfüggése



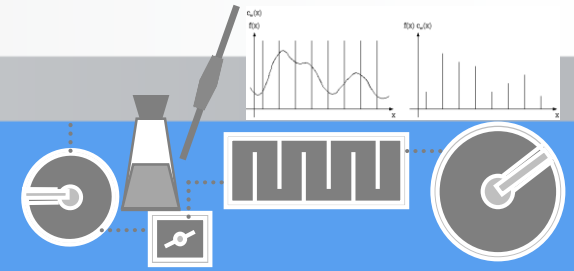
$$ANT = \frac{\text{szubsztrátanyagcsere sebessége}}{\text{alapanyagcsere sebessége}}$$

(endogén metabolizis)



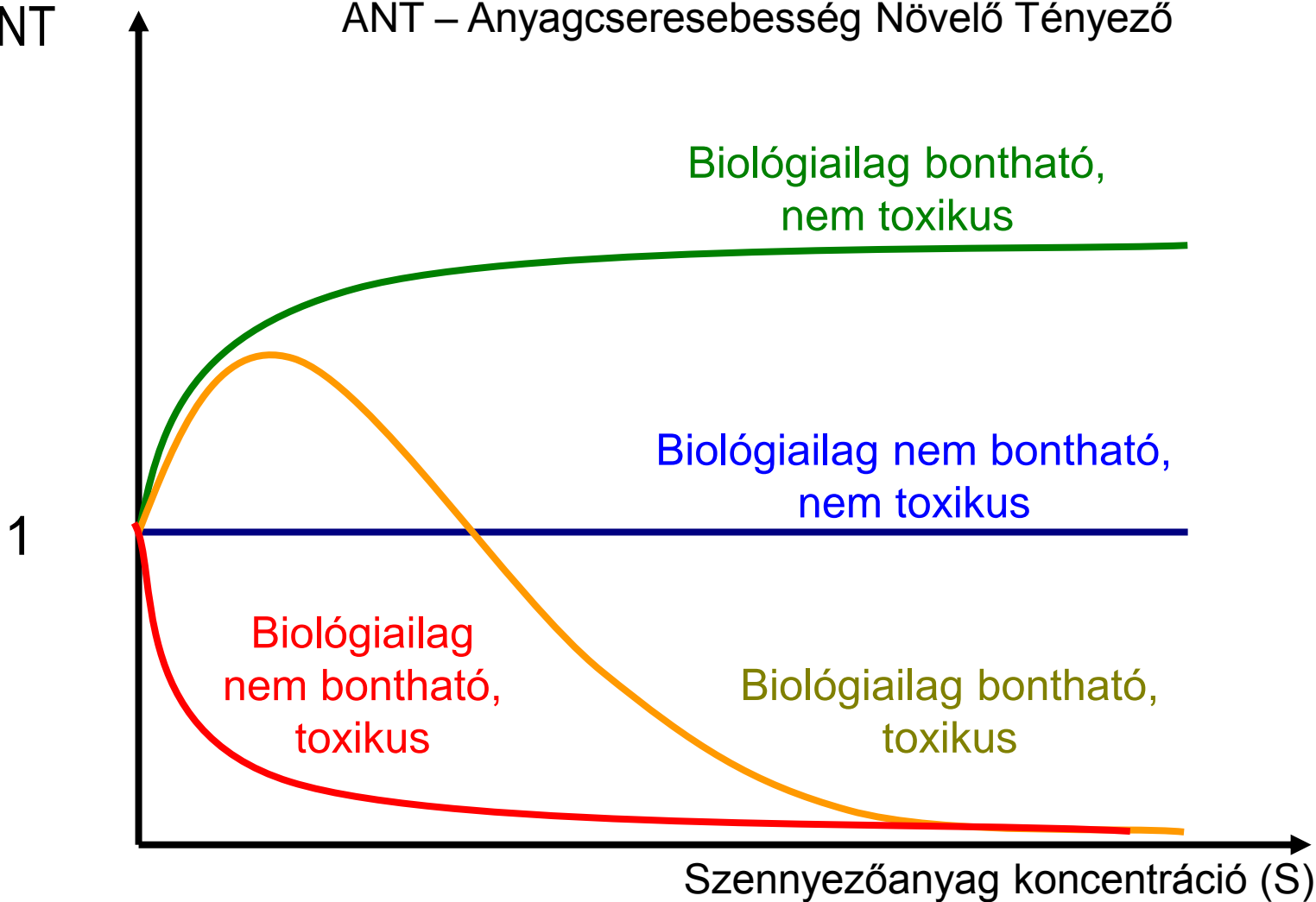


# A biodegradáció kinetikája

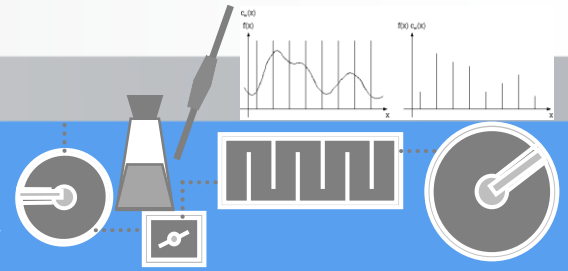


ANT

ANT – Anyagcsere sebesség Növelő Tényező



# Monod kinetika a nem toxikus anyagokra



$$\frac{dx}{dt} = \mu \cdot x$$

ahol :  $x$  – mikroorganizmusok koncentrációja [g/l]

$\mu$  – fajlagos növekedési sebesség [d<sup>-1</sup>]

Fajlagos növekedési sebesség:

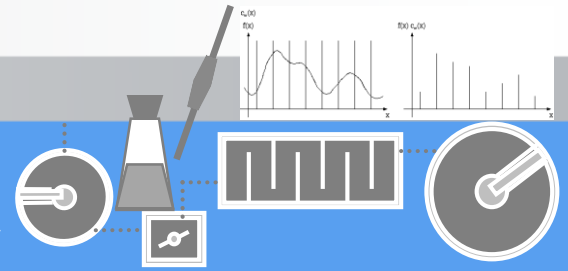
$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S}$$

ahol :  $\mu_{\max}$  – maximális fajlagos növekedési sebesség [d<sup>-1</sup>]

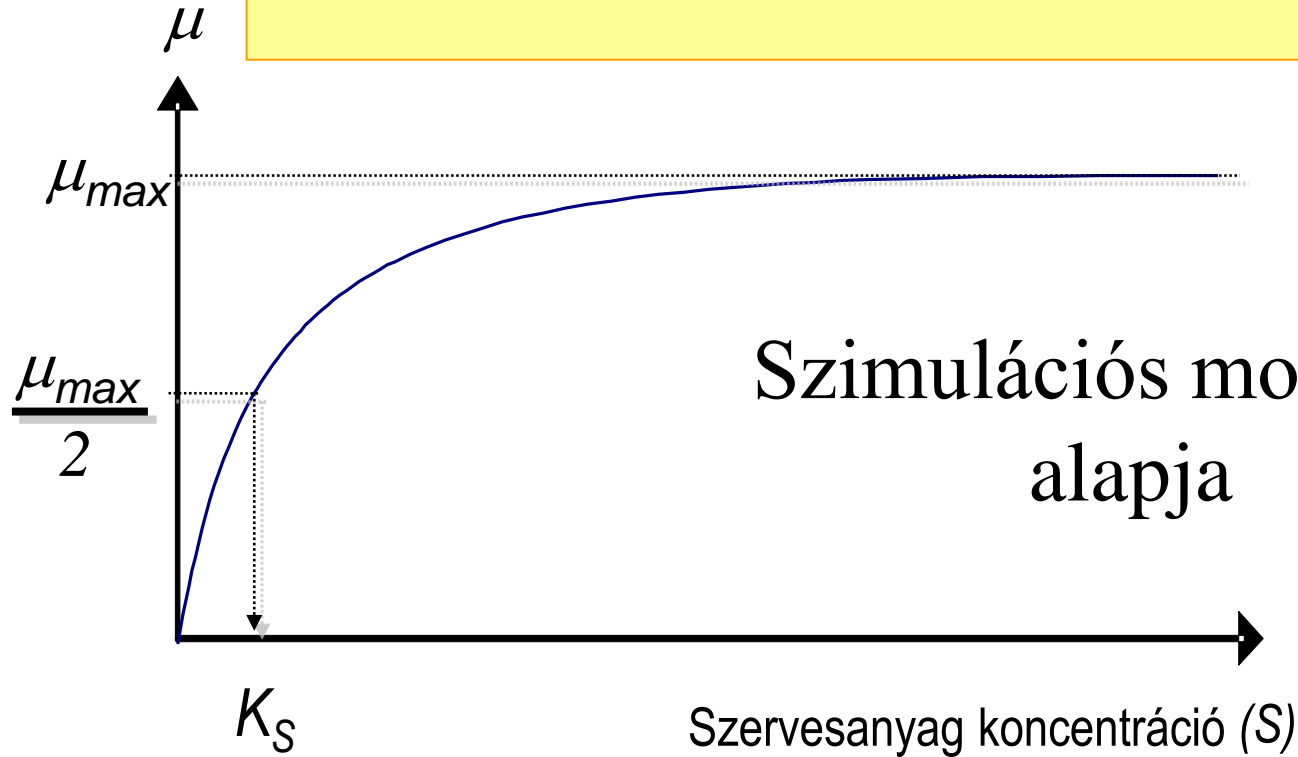
$S$  – szubsztrát koncentráció [mg/l]

$K_S$  – féltelítési koefficiens [mg/l]

# Monod kinetika a nem toxikus anyagokra

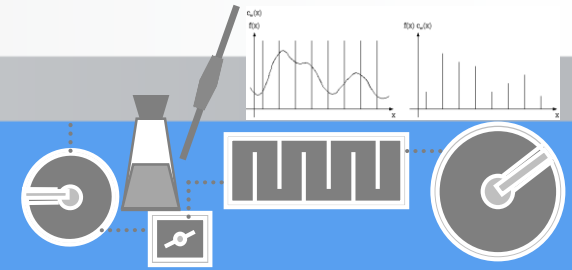


Fajl. növekedési sebesség: 
$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S}$$



Szimulációs modellek  
alapja

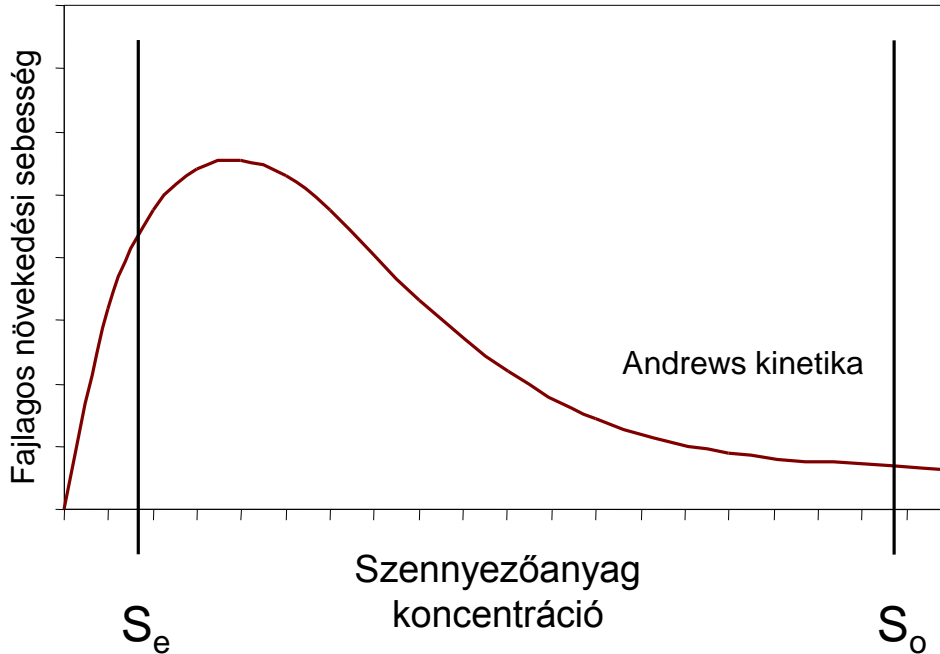
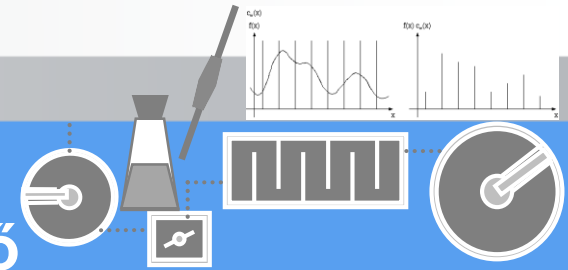
# Activated Sludge Model 1



Komponensek → i	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Folyamat sebessége, $\rho_i$ , [ML <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> ]	
Folyamatok		$S_s$	$S_s$	$X_s$	$X_s$	$X_{B,H}$	$X_{B,A}$	$X_p$	$S_o$	$S_{NO}$	$S_{NH}$	$S_{NO}$	$X_{NH}$	$S_{ALK}$		
1 Heterotrofik aerób növekedése			$-\frac{1}{Y_w}$			1			$-\frac{1-Y_w}{Y_w}$		$-i_{sp}$			$-\frac{i_{sp}}{14}$	$\mu_H \left( \frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left( \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) X_{BH}$	
2 Heterotrofik anoxikus növekedése			$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_w}{2,86 \cdot Y_w}$		$-i_{sp}$			$\frac{1-Y_w}{14 \cdot 2,86 \cdot Y_w} - \frac{i_{sp}}{14}$	$\mu_H \left( \frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \right) \cdot \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_A X_{BH}$	
3 Autotrofik aerób növekedése							1		$-\frac{4,57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{sp} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{sp}}{14} - \frac{1}{7 \cdot Y_A}$	$\mu_A \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left( \frac{S_o}{K_{OA} + S_o} \right) X_{BA}$	
4 Heterotrofik pusztulás					$1 - f_{B}$	-1		$f_{B}$					$i_{sp} - f_{B} b_H$		$b_H X_{BH}$	
5 Autotrofik pusztulás					$1 - f_{B}$		-1	$f_{B}$					$i_{sp} - f_{B} b_A$		$b_A X_{BA}$	
6 Oldott szerves nitrogén ammónifikációja											1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_A S_{NO} X_{BH}$	
7 Nehezen biodegradálható szerves anyag hidrolízise			1		-1										$k_h \frac{X_s / X_{BH}}{K_X + (X_s / X_{BH})} \cdot \left[ \left( \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) + \eta_H \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{BH}$	
8 Nehezen biodegradálható szerves anyaghoz kötött szerves nitrogén hidrolízise												1	-1		$\rho_A (X_{NO} X_s)$	
Az adott komponensek vonatkozó konverziós ráta [ML <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> ]		$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$														
Oldott inert szerves anyag																
Könnyen biodegradálható szerves anyag																
Inert, kibegőnyűg [M(KODL) <sup>-1</sup> ]																
Nehezen biodegradálható																
Aktív heterotrof biomassa																
Aktív autotrof biomassa																
Biomassa széntartalom																
Oxigén (megkötött KOD) [M(KOD) L <sup>-1</sup> ]																
Nitrit és nitrit nitrogén [M(N) L <sup>-1</sup> ]																
Amónia nitrogén [M(N) L <sup>-1</sup> ]																
Könnyen biod. szerves anyag																
Nehezen biodegradálható																
Alkalitás - moláris egység																

Forrás: Henze et al., 1987

# Biológiailag bontható, mérgező anyagok biodegradációja erősen koncentráció függő



$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

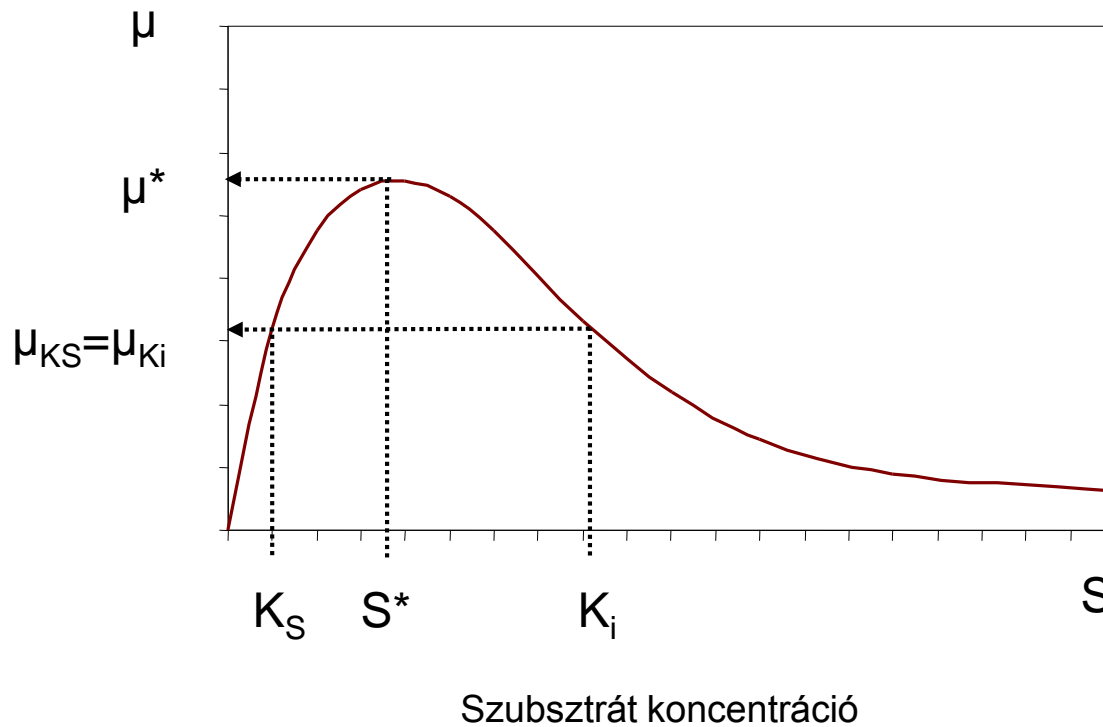
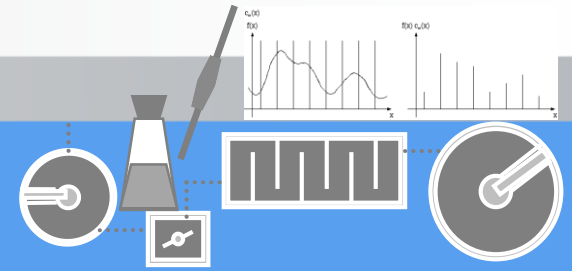
ahol :  $\mu_{\max}$  – maximális fajlagos növekedési sebesség [d<sup>-1</sup>]

S – szubsztrát koncentráció [mg/l]

$K_S$  – féltelítési koeficiens [mg/l]

$K_i$  – inhibíciós koeficiens [mg/l]

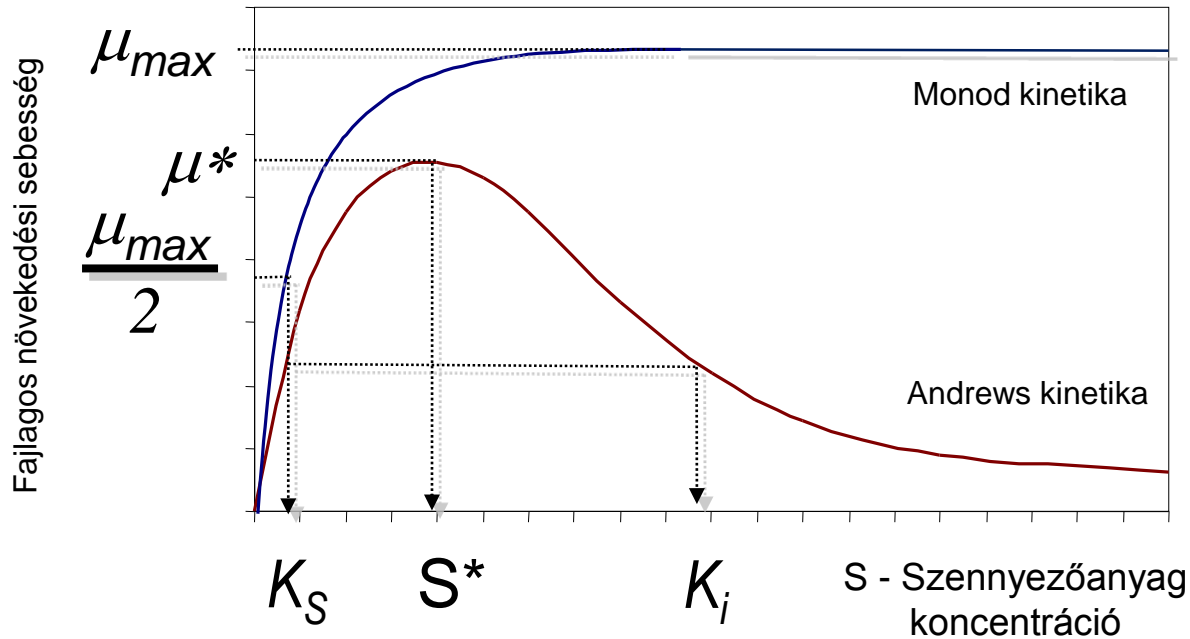
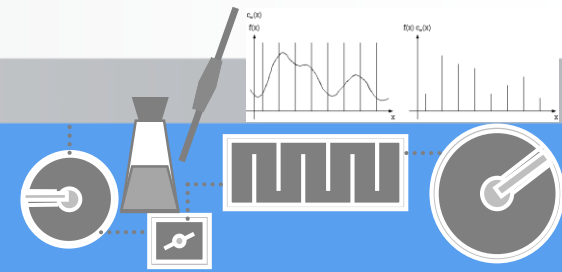
# Szubsztrát-inhibíciós (Andrews) kinetika



$$\mu^* = \frac{\mu_{\max}}{2(K_S / K_i)^{0,5} + 1}$$

$$S^* = (K_S \cdot K_i)^{0,5}$$

# Monod és Andrews kinetika grafikus megjelenítése és értelmezése



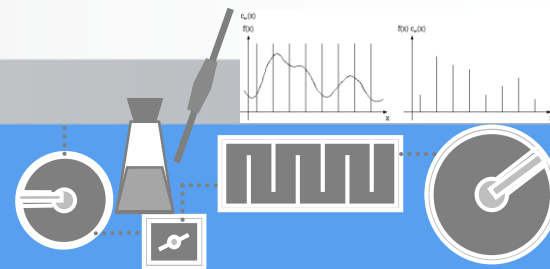
## Monod kinetika

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S}$$

## Andrews kinetika

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

A Monod kinetika az Andrews kinetika azon határesetének tekinthető, amely esetén az inhibíciós koefficiens ( $K_i$ ) kisebb a vizsgálati  $S$  koncentráció tartományból (azaz  $K_i \gg S$ )

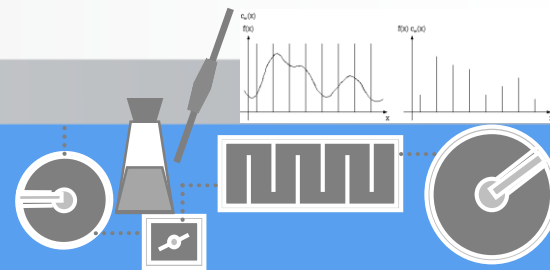


## II. Mikroszennyezők általános jellemzői, szabályozási jogi háttér





# Mi van a szennyvízben?



- MI NINCS BENNE?**

Ipari kibocsátók



Házartások



Természetes befogadó



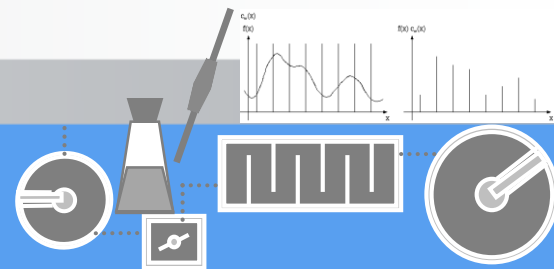
Szennyvíztisztító Telep



Emésztés, lebontás



# Mik azok a mikroszennyezők?



**Mikroszennyező:** olyan szerves vagy szervetlen szennyezőanyag, amely nagyon kis koncentrációban is komoly akut vagy krónikus káros hatást válthat ki az ökoszisztémában és az egyes élő szervezetekben

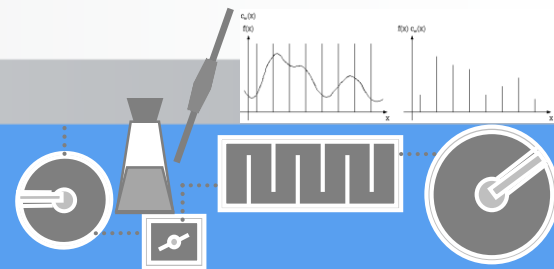
- Nyomnyi mennyiség ( $\mu\text{g/L}$ ,  $\text{ng/L}$ )
- $\text{ng/L}$ : egy kockacukor feloldva egy 50 m-es versenymedencében ( $2,7 \text{ g}$  egy  $2,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  térfogatú víztestben)
- Balaton ( $1,9 \text{ km}^3$ )

**Potenciális kockázatok:**

- Biológiailag aktív
- A környezetben mobilis
- Nem vagy nagyon nehezen biodegradálható
- Nagyon sokféle vegyület



# Milyen termékekből származnak?



## Szerves mikroszennyezők (Organic Micropollutants, OMPs)

- Gyógyszermaradványok, antibiotikumok
- Kozmetikai szerek
- Fertőtlenítő szerek
- Peszticidek (növényvédő szerek)
- LABS (Linear alkylbenzene sulfonates) - detergensek
- Endokrin-romboló anyagok (endocrine disruptors)
- Oldószerek, kőolaj származékok és adalékok, perfluoro-alkilvegyületek, faápoló szerek, gyúlésgátló anyagok

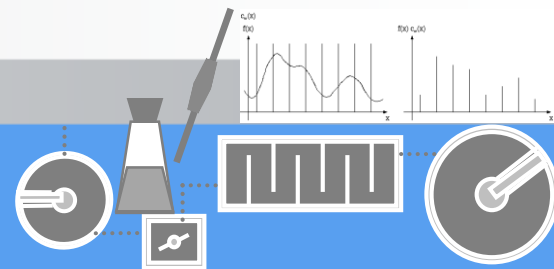
## Szervetlen mikroszennyezők

- Fémek
- Peszticidek

**Több száz vegyület**

**Másodlagos és harmadlagos formák**

# Szerves mikroszennyezők (OMPs)



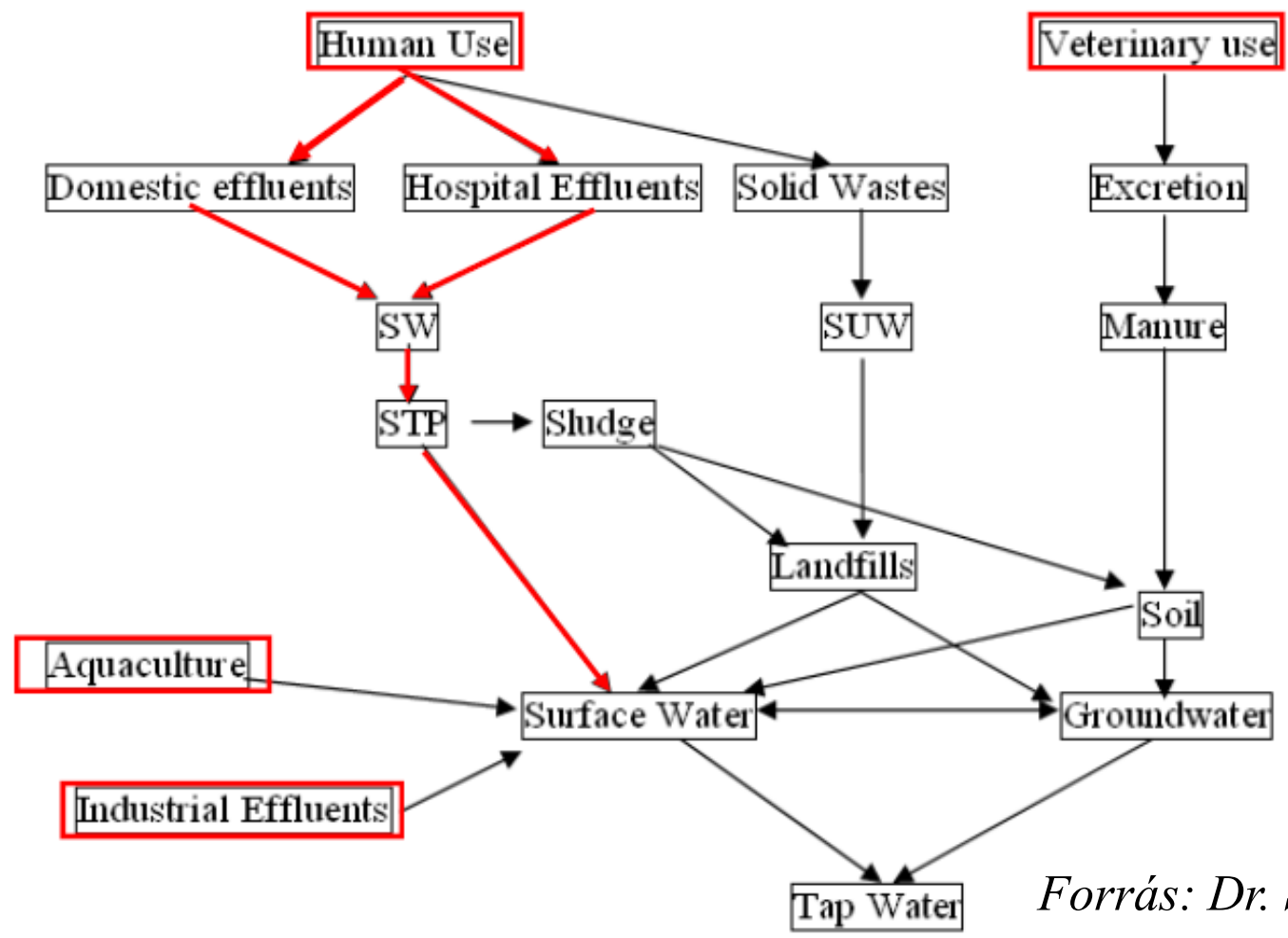
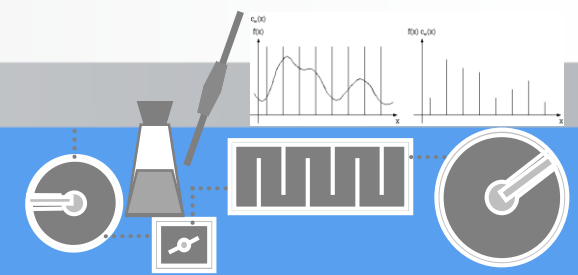
**Széntartalmú vegyületek, nagyrészt xenobiotikumok, amelyek ipari folyamatok révén állnak elő.**

- **Gyógyszermaradványok (Pharmaceutically Active Compounds , PhACs)**
  - Terápiai osztályok szerint
- **Kozmetikai szerek (Personal Care Products, PCPs)**
  - Nagyrészt háztartásokból származnak

## Pharmaceutical and Personal Care Products (PPCPs)

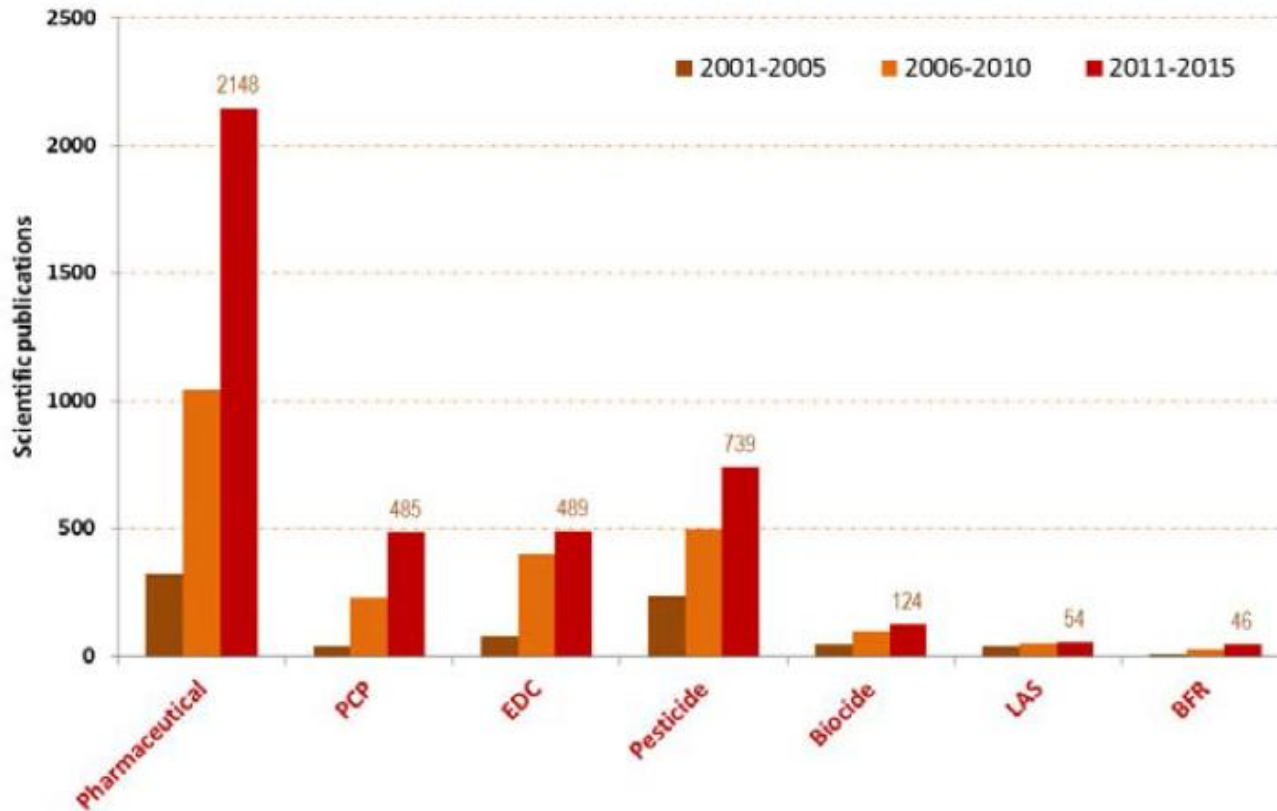
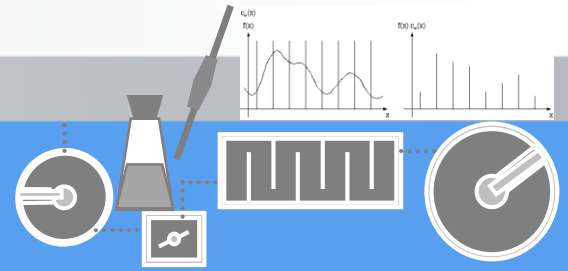
- **Endokrin-romboló vegyületek (Endocrine Disrupting Compounds, EDCs)**
  - Természetes és szintetikus vegyületek, amelyek hormonként működhetnek

# Keletkezésük forrásai és környezetbe kerülésük



*Forrás: Dr. Sonia Suarez, course material, 2018*

# Kutatási érdeklődés a szerves mikroszennyezők iránt

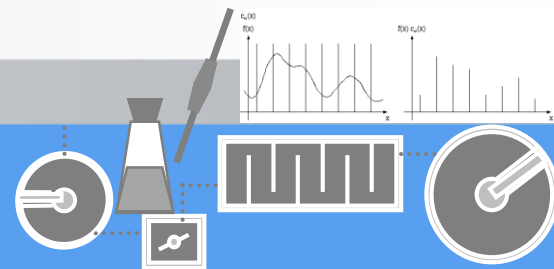


(source: Scopus, July 2017; GS: wastewater; SS: group of OMP).

**Élen járó országok: Németország, Svájc, USA**

*Forrás: Dr. Sonia Suarez, course material, 2018*

# A környezeti kockázatok észlelése



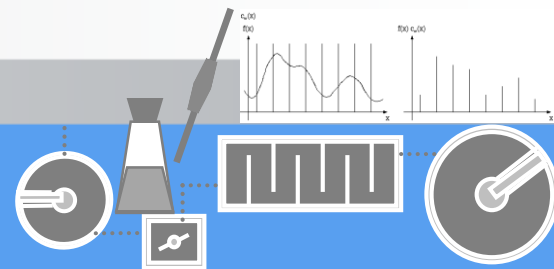
1. szint: Tudomást sem veszünk róla (ignorance)
2. szint: Tagadás (denial)
3. szint: Elfogadás (acceptance)

**Mi a helyzet a mikroszennyezőkkel?**

**Ma a világ legtöbb országában a tagadás szintjén állunk, mivel a reprezentatív mérés technikailag nem megoldott, ill. a megoldás keresés nagyon drága, anyagilag nem fedezhető.**

*Forrás: B. Gy. Plósz et al., 2013*

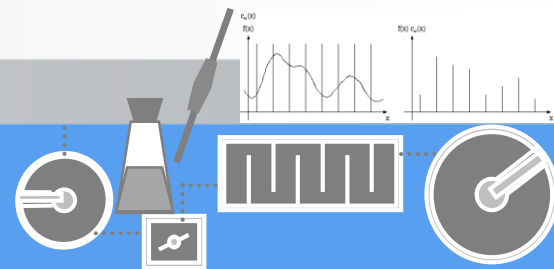
## Szabályozás (és annak hiánya)



- A környezeti felelősségről szóló EU irányelv (Environmental Liability Directive, 2004/35/EU) és a Víz Keretirányelv (Water Framework Directive, WFD, CEC 2000; 2000/60/EU) a jogi korlátozás helyett proaktív megközelítést alkalmaz a természetes vízbázisok jó ökológiai állapotának megőrzésére.
- Környezeti határértékek (Environmental Quality Standards, EQS) kerültek megállapításra 33 vegyületcsoport esetében (2455/2001/CE), ehhez jött még 8 (76/464/EEC), majd még 4 db 2013-ban (2013/39/EU): Σ45 vegyületcsoport.
- **Ez nem tartalmaz egyetlen gyógyszermaradványt vagy hormont sem!** (2012-ben az Európai Bizottság sikertelenül próbálta bevezetni a 17 $\alpha$ -ethinylestradiol, 17 $\beta$ -estradiol és diclofenac vegyületeket.)
- Regionális környezeti kockázat elemzés szükségessége

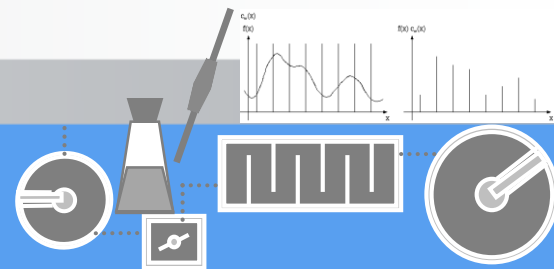


# Szabályozás (és annak hiánya)



- **2000/60/EU: First priority list of substances**
- **2008/105/EEC: 33 vegyületcsoport**
  - Alaklór, antracén, atrazin, benzol, brómozott difenil-éter, kadmium és vegyületei, klórozott alkánok(C10-C13), klórfenvinfosz, klórpirifosz, 1,2-diklóretán, diklór-metán, di(2-etilhexil)ftalát(DEHP), diuron, endoszulfánok, hexaklórbenzol, hexaklórbutadién, hexaklórciklohexán(Lindán), izoproturon, ólom és vegyületei, higany és vegyületei, naftalin, nikkel és vegyületei, nonilfenolok, oktilfenolok, pentaklórbenzol, pentaklórfenol, többgyűrűs aromás szénhidrogének (beleértve a benzpiréneket, benzperiléneket, fluoronténeketés piréneket), simazin, tributil-ónvegyületek, triklórbenzolok, triklórmetán(kloroform), trifluralin.
- **2013/39/EU: 45 vegyületcsoport**
  - Fentiekén kívül még: Dikofol, Perfluoroktán-szulfonátés származékai (PFOS), Kinoxifen, Dioxinok és dioxin jellegű vegyületek, Aklonifen, Bifenox, Cibutrin, Cipermetrin, Diklórfosz, Hexabrom-ciklododekánok(HBCDD), Heptaklórés heptaklór-epoxid, Terbutrin.

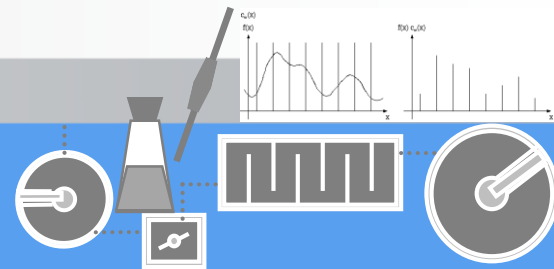
## Szabályozás (és annak hiánya)



- A települési szennyvíz kezelésére vonatkozó irányelv (Urban Waste Water Treatment Directive, 91/271/EEC) szabályozza (i) a háztartási és városi szennyizek gyűjtését és kezelését; (ii) az ipari szennyvizek előkezelését és (iii) a szennyvíziszap elhelyezését.
  - **Ez nem tartalmazza a mikroszennyezők eltávolítását**
- Műszakilag megfelelő mikroszennyező eltávolítási technológiák már elérhetőek.
- A sokféle mikroszennyező nem pontosan ismert káros környezeti hatása miatt a megelőzés elvét kell követni (Joss et al., 2008)

*Forrás: B. Gy. Plósz et al., 2013*

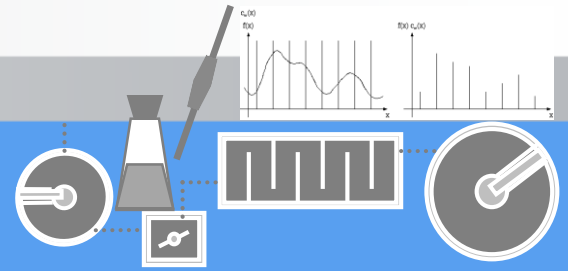
# EU Víz Keretirányelv – vegyületek priorizálása



- **Veszélyes elsődleges szennyezők (Dangerous Priority Substances)**
- **Elsődleges szennyezők (Priority Substances)**
- **Ún. „Watchlist” (2018-ban frissítve utoljára)**
  - 10 vegyület (növényvédőszeres, gyógyszermaradványok – diklofenák és antibiotikumok)
  - Időről időre frissítik (bővíülhet is, szűkülhet is)
- **Vízgyűjtő specifikus szennyezőanyagok (River Basin Specific Pollutants, RBSP)**
  - Pl. Duna esetében: As, Cr, Cu, Zn, stb.

*Forrás: M. Pomies, course material, 2018; A. Clement, 2019*

# EU watchlists (WFD) – felszíni vizek monitorozása (VKI)



## 1st Watch List 2015

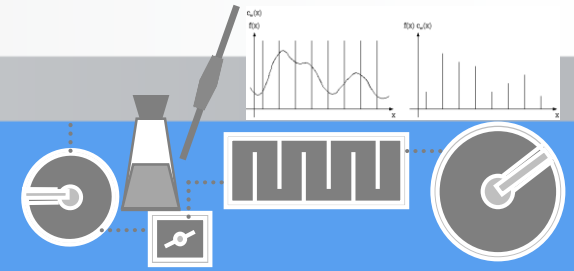
1. 17-Alpha-ethinylestradiol (EE2)
2. 17-Beta-estradiol (E2), Estrone (E1)
3. Diclofenac (painkiller)
4. 2,6-Ditert-butyl-4-methylphenol (industrial compound)
5. 2-Ethylhexyl 4-methoxycinnamate (sunscreen ingredient)
6. Macrolide antibiotics
7. Methiocarb
8. Neonicotinoids
9. Oxadiazon (herbicide)
10. Tri-allate (herbicide)

## 2nd Watch List, July 3rd 2018

1. 17-Alpha-ethinylestradiol (EE2)
2. 17-Beta-estradiol (E2), Estrone (E1)  
~~Diclofenac (painkiller)~~  
~~2,6-Ditert-butyl-4-methylphenol (industrial compound)~~  
~~2-Ethylhexyl 4-methoxycinnamate (sunscreen ingredient)~~
3. Macrolide antibiotics
4. Methiocarb
5. Neonicotinoids  
~~Oxadiazon (herbicide)~~  
~~Tri-allate (herbicide)~~
6. Metaflumizone (pesticide)
7. Amoxicillin (antibiotic)
8. Ciprofloxacin (antibiotic)

*Forrás: Florence Metz, course material, 2018*

# Megelőzés elve – kibocsátások csökkentése



site : [www.energie-environnement.ch](http://www.energie-environnement.ch)

## • **Kampány Strasbourg-ban**

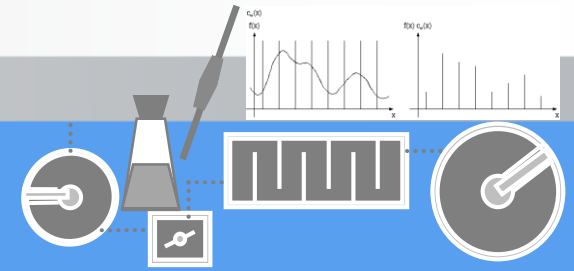
# LUMIEAU-STRA

Lutte contre les micropolluants  
dans les eaux urbaines  
à Strasbourg

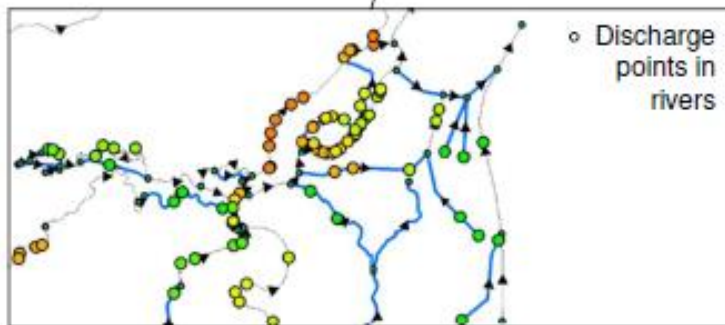


*Forrás: M. Pomies, course material, 2018*

# Általános megközelítés a megoldás kereséshez



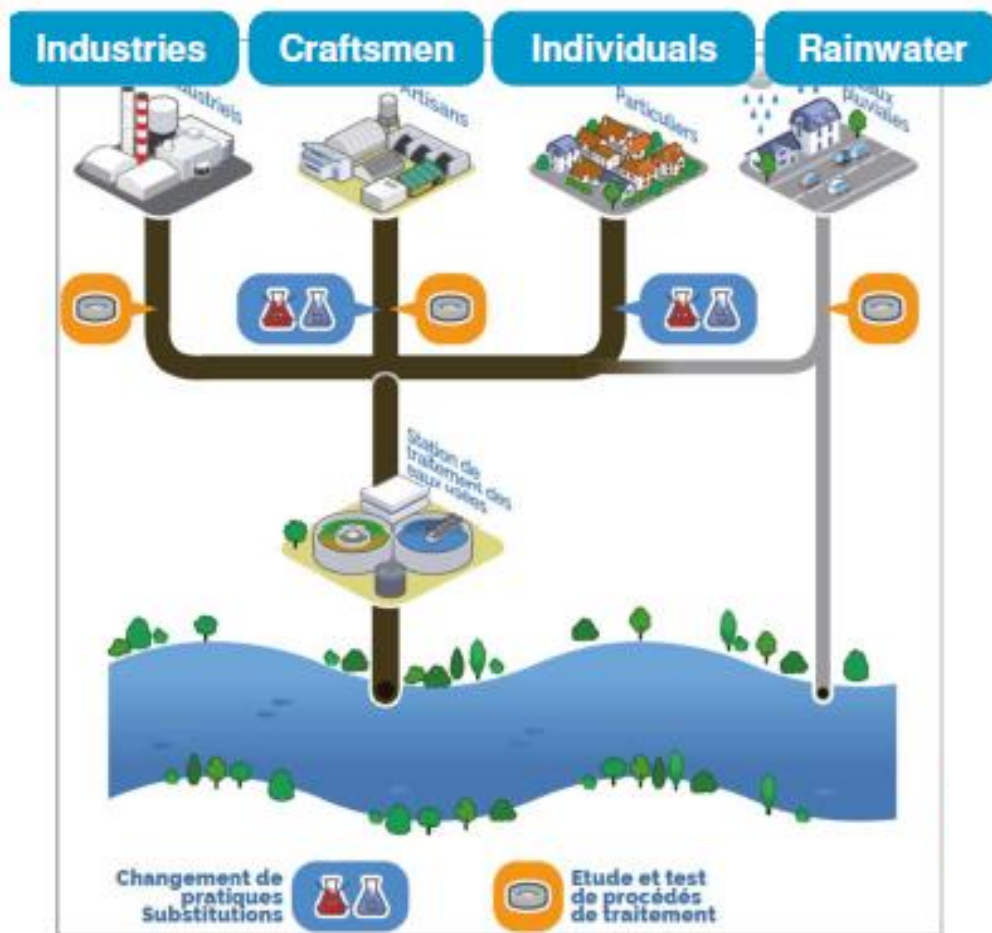
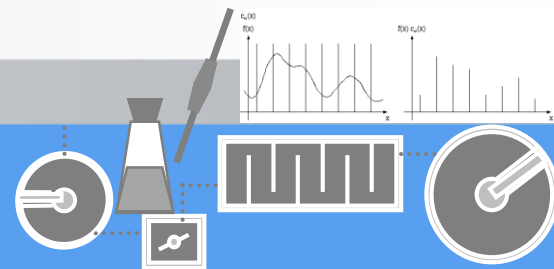
Most impacting discharge points



- Kibocsátók azonosítása
- Priorizálás
- A kibocsátás visszaszorítása a szennyező forrásnál

*Forrás: M. Pomies, course material, 2018*

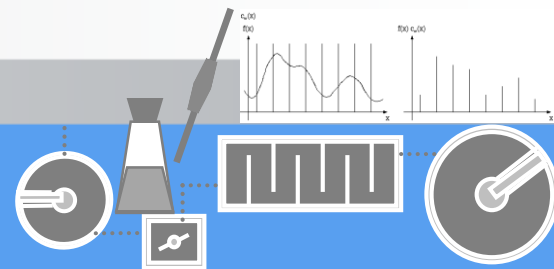
# A főbb kibocsátási pontok feltérképezése



- **Diagnózis: városi szennyezőforrások feltérképezése**
  - Területek és szennyezők prioritizálása
- **Teszt-megoldások**
  - Gyakorlat megváltoztatása
  - Tájékoztatás, képzés, tanulás
- **Módszertani szempontok**
  - Műszaki
  - Gazdasági
  - Társadalmi

**Megfelelő eszközök kidolgozása a víziközmű rendszerek döntéshozói számára**

# Modellezés szerepe



- **Környezeti koncentráció becslése (Predicted environmental concentration, PEC) modellező szoftverek segítségével.**

Befogadó modell

SzVTT modell

Vízgyűjtő (hálózat) modell

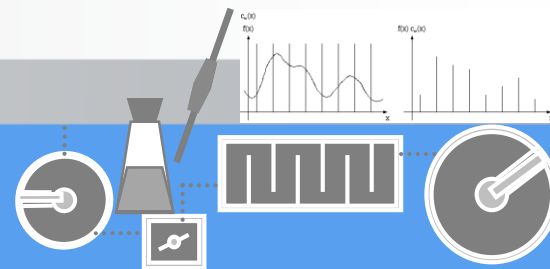
Fogyasztási  
adatok

Természetes  
befogadó  
PEC



Milyen bonyolultságú SzVTT modell szükséges ahhoz, hogy a törvény- és a döntéshozók megfelelően előírhassák a hatékonyság növelési kötelezettséget?

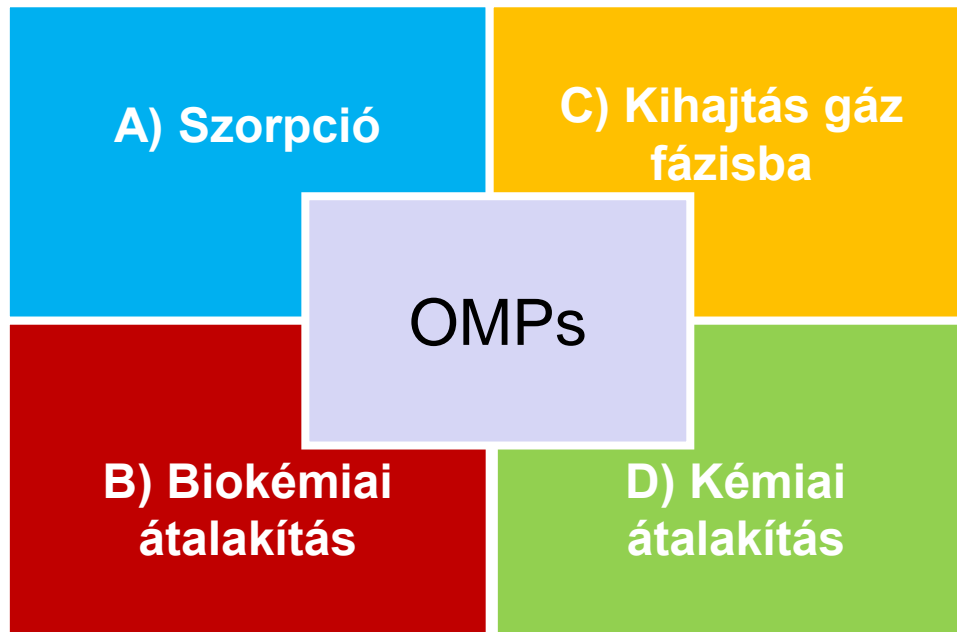
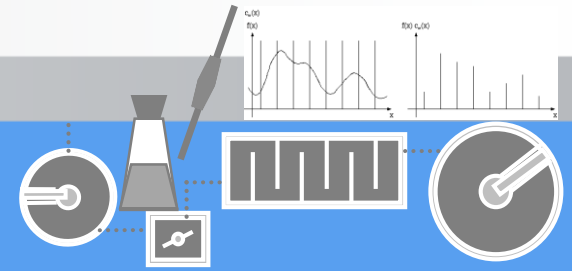




### III. Mikroszennyezők eltávolítása – folyamatok és mechanizmusaik leírása, modellezése

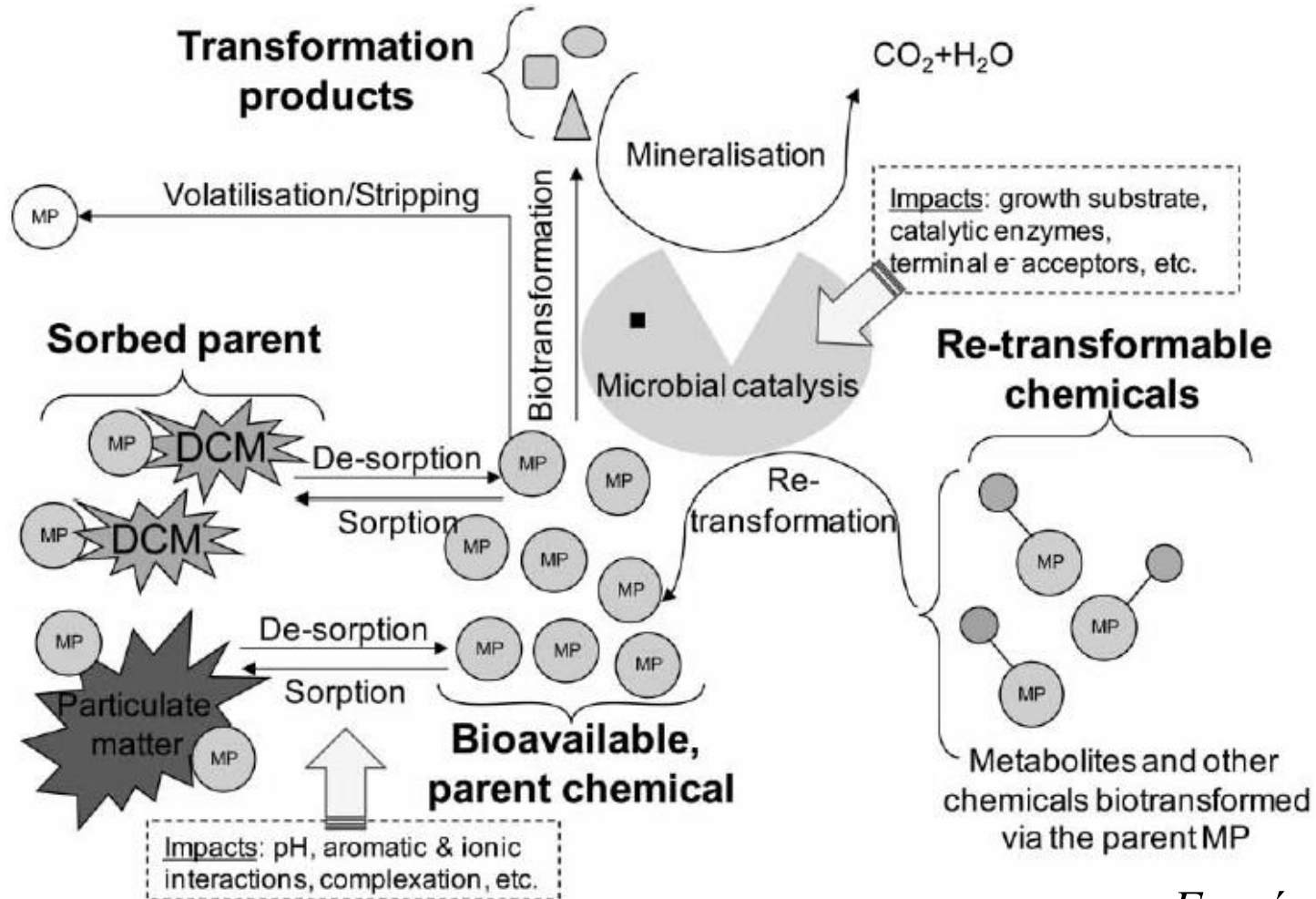
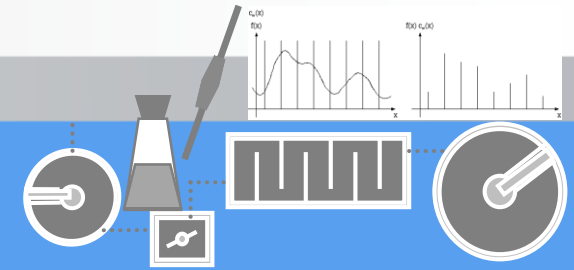


# Szerves mikroszennyezők főbb eltávolítási mechanizmusai

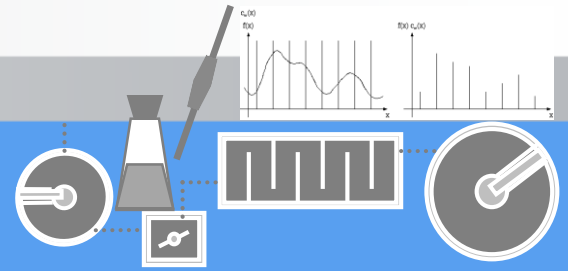


*Forrás: Dr. Sonia Suarez, course material, 2018*

# Szerves mikroszennyezők eltávolítási mechanizmusai

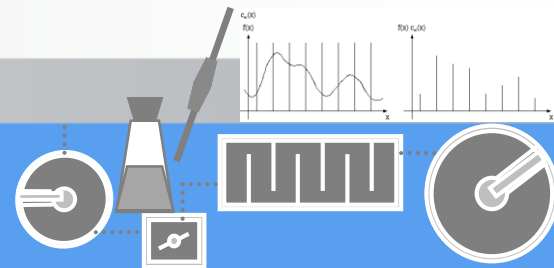


# Az eltávolításban résztvevő folyamatok befolyásoló tényezők



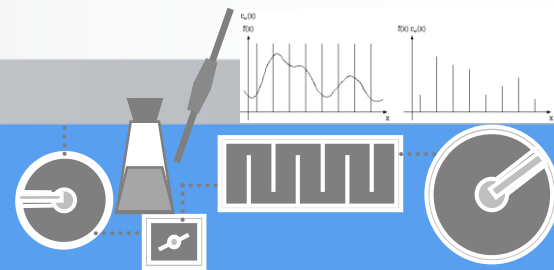
- **Jól biodegradálható szubsztrátok (ún. „growth substrates”) jelenléte: kometabolizmus (Grady et al., 1999)**
- **Aerob vagy anoxikus környezet eltérő hatékonysága (terminális elektron akceptor elérhetőség)**
- **Komplex képzés fém ionokkal (pl. Fe, Al)**
- **Mikroorganizmus (fenotípus, genotípus, adaptáció, metabolikus aktivitás)**

## A) Szorpciós folyamatok jellemzői



- A mikroszennyezők (micropollutant, MP) abszorbeálódhatnak mikrobák membránjában vagy adszorbeálódhatnak szilárd szemcsék felületén (ún. lebegőanyag – particulate matter) vagy kolloidokon (dissolved and colloid matter, DCM).
- Az megkötött mikroszennyezők nem elérhetők a biokémiai transzformációs folyamatok számára.
- A kisebb szabad MP koncentráció csökkenti a biokémiai lebontó folyamatok sebességét.
- Hidrolízissel a adszorbeált MP elérhetővé válhat a mikrobák számára.

# Szorpciós folyamatok jellemzői



- **2 fő szorpciós folyamat**

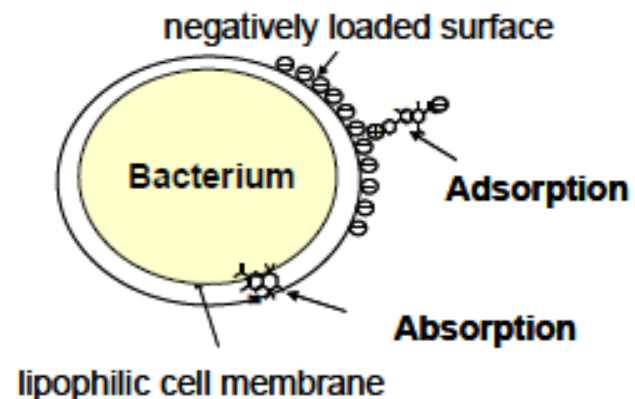
- **Abszorpció:** az eleveniszap foszfolipid membránjával történő interakció ( $K_{ow}$  – oktanol-víz megoszlási hányadossal jellemezhető)
- **Adszorpció:** elektrosztatikus kölcsönhatás a pozitív töltéssel rendelkező vegyületek és a negatív töltésű felszínnel rendelkező mikrobák között ( $pK_a$  és pH)

- **Az egyensúlyt alapvetően az adszorpciós koefficiens ( $K_D$ , L/kg) határozza meg**

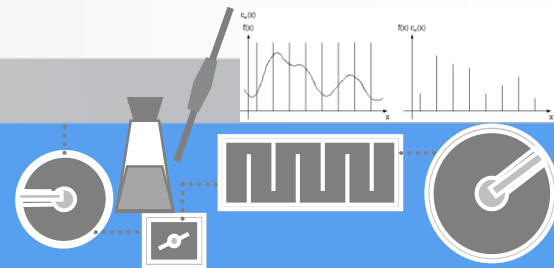
$$K_D = \frac{C_{SL}/X_{SS}}{C_{LI}} = \frac{C_{SL}^*}{C_{LI}}$$

- $C_{SL}^*$ : a szilárd felületen adszorbeált anyag konc.,  $\mu\text{g/g}$
- $C_{SL}$ ,  $C_{LI}$ : az adszorbeált és az oldott anyag konc.,  $\mu\text{g/L}$
- $X_{SS}$ : szilárdanyag konc.,  $\text{kg/L}$

$X_{ss}$ : TSS (Total Suspended Solids, összes lebegőanyag)  
MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids, iszapkoncentráció)



*Forrás: Sonia Suarez,  
course material, 2018*



## B) A biokémiai átalakítás folyamatai

- **Metabolizis:** a mikroba a szennyezőt hasznosítja elsődleges szén és tápanyag (N és P) forrásként sejtnövekedésre és energia termelésre.
- **Ko-metabolizis:** az adott szennyező enzimek révén átalakul, de a mikroba növekedés egy másik szubsztrát (ún. growth substrate) felhasználásával történik. **Elsődleges szubsztrát jelenléte elősegítheti, de gátolhatja is a mikroszennyező lebontását!** Elsősorban hidrofób mikroszennyezők esetében hatékony.
- Kis MP koncentráció esetén ún. pseudo-elsőrendű kinetika a jellemző a lebontásra

$$\frac{dC_{i,total}}{dt} = -k_{Bio} \cdot X_{SS} \cdot C_{i,LI}$$

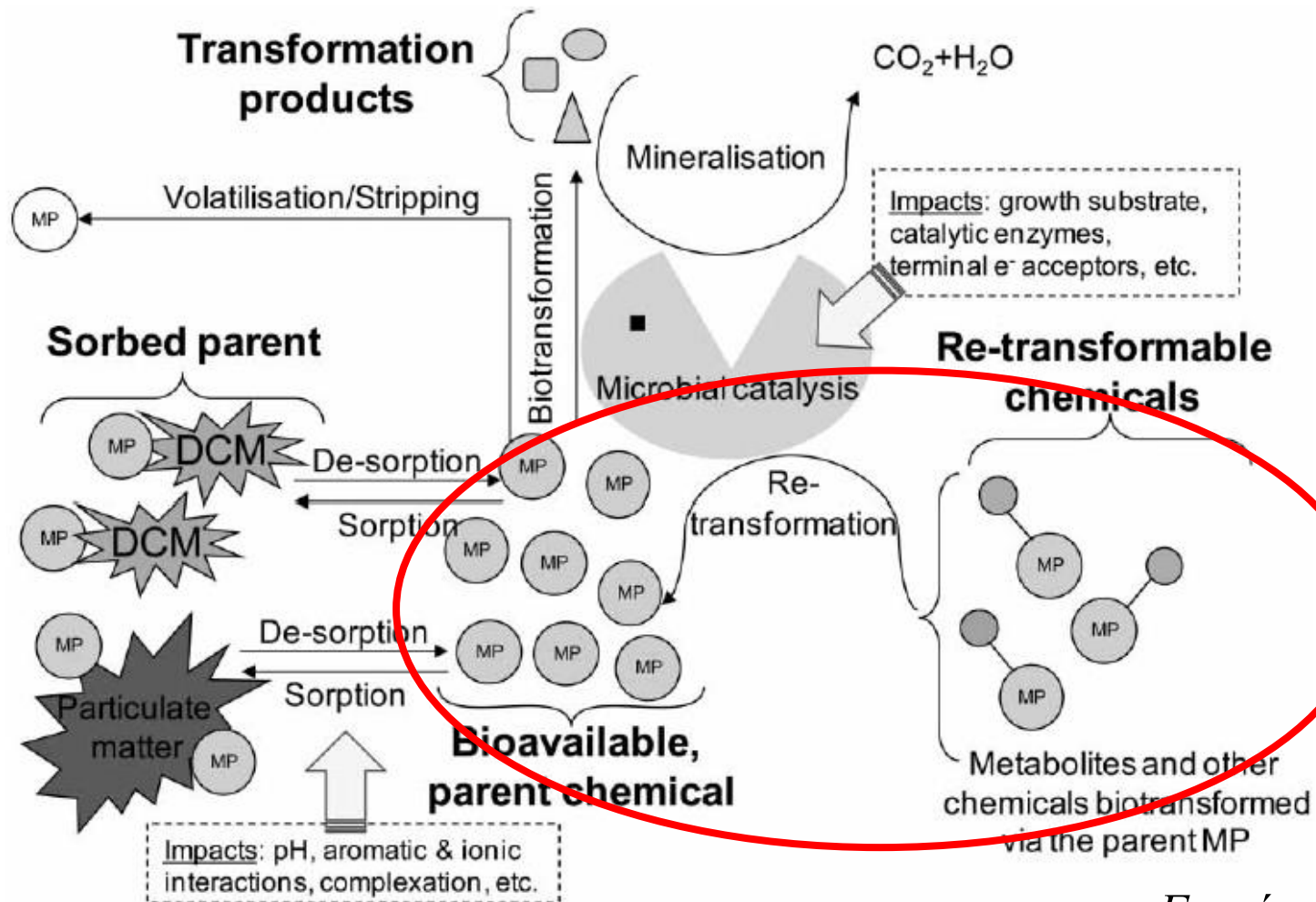
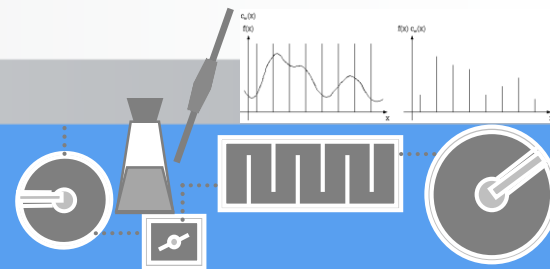
$C_i$ : mikroszennyező koncentrációja, mg/L

$k_{Bio}$ : biodegradációs sebességi állandó, L/g $X_{SS}$  d

$X_{SS}$ : eleveniszap koncentráció, g/L

*Forrás: Sonia Suarez course material;  
Joss et al., 2006*

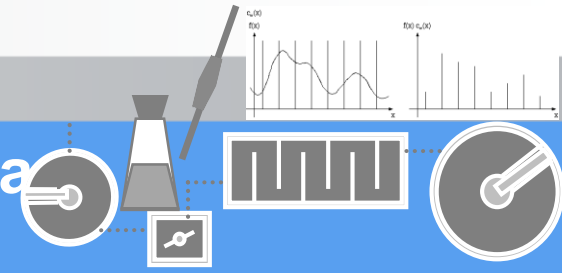
# Anyavegyületek (újra)képződése





# Az anyavegyület (újra)képződés koncepciója

## Parent compound concept



- **Adszorpciós koefficiens**

$$K_D = \frac{C_{SL}}{X_{SS} \cdot C_{LI}}$$

- **Összes MP koncentráció**

$$C_{total} = C_{LI} \cdot (1 + X_{SS} \cdot K_D)$$

- **Anyavegyület képződés**

$$\frac{dC_{CJ}}{dt} = -k_{Dec} \cdot X_{SS} \cdot C_{CJ}$$

- **Összes MP koncentráció**

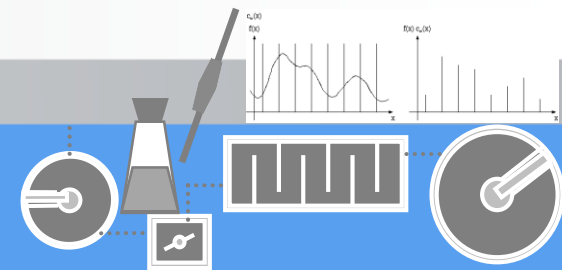
$$C_{total} = C_{LI} + C_{SL}$$

$C_{CJ}$ : anyavegyületen keresztül képződött szennyező koncentrációja, mg/L

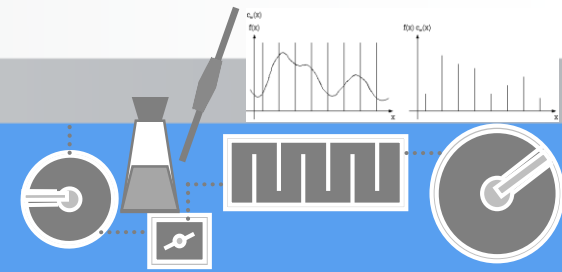
$k_{Dec}$ : sebességi állandó, L/g $X_{SS}$  d

$X_{SS}$ : eleveniszap koncentráció, g/L

# Sztöchiometriai mátrix



component $\rightarrow i$ / process $\downarrow$	1 $C_{Li}$	2 $C_{Cj}$	3 $C_{SL}$	process rate
desorption	1		-1	$k_{Des} \cdot C_{SL}$
aerobic processes				
sorption	-1		1	$k_{Des} \cdot K_{D,Ox} \cdot C_{Li} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{SS}$
parent compound formation	1	-1		$k_{Dec,Ox} \cdot C_{Cj} \frac{K_S \cdot \eta_{Dec}}{K_S \cdot \eta_{Dec} + S_S} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{SS}$
biodegradation	-1			$k_{Bio,Ox} \cdot C_{Li} \frac{K_S \cdot \eta_{Bio}}{K_S \cdot \eta_{Bio} + S_S} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{SS}$
anoxic processes				
sorption	-1		1	$k_{Des} \cdot K_{D,Ax} \cdot C_{Li} \frac{K_O}{K_O + S_O} X_{SS}$
parent compound formation	1	-1		$k_{Dec,Ax} \cdot C_{Cj} \frac{K_S \cdot \eta_{Dec}}{K_S \cdot \eta_{Dec} + S_S} \frac{K_O}{K_O + S_O} X_{SS}$
biodegradation	-1			$k_{Bio,Ax} \cdot C_{Li} \frac{K_S \cdot \eta_{Bio}}{K_S \cdot \eta_{Bio} + S_S} \frac{K_O}{K_O + S_O} X_{SS}$



- **Metabolízis**

$$\frac{dC_{LI}}{dt} = -k_{Bio} \cdot X_{SS} \cdot C_{LI}$$

- **Kometabolízis**

$$\frac{dC_{LI}}{dt} = - \left( q_C \frac{S_S}{K_S + S_S} + k_{Bio} \right) \cdot C_{LI} \cdot X_{SS}$$

$C_{LI}$ : oldott MP koncentrációja, mg/L

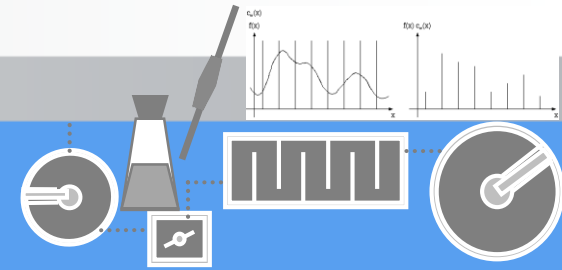
$k_{Bio}$ : biodegradációs sebességi állandó,  $L/gX_{SS} \cdot d$

$K_S$ : elsődleges (growth) szubsztrátra vonatkozó féltelítési állandó, mg/L

$q_C$ : a másodlagos szubsztrát maximális fajlagos kometabolikus átalakulási sebessége elsődleges (growth) szubsztrát jelenlétében

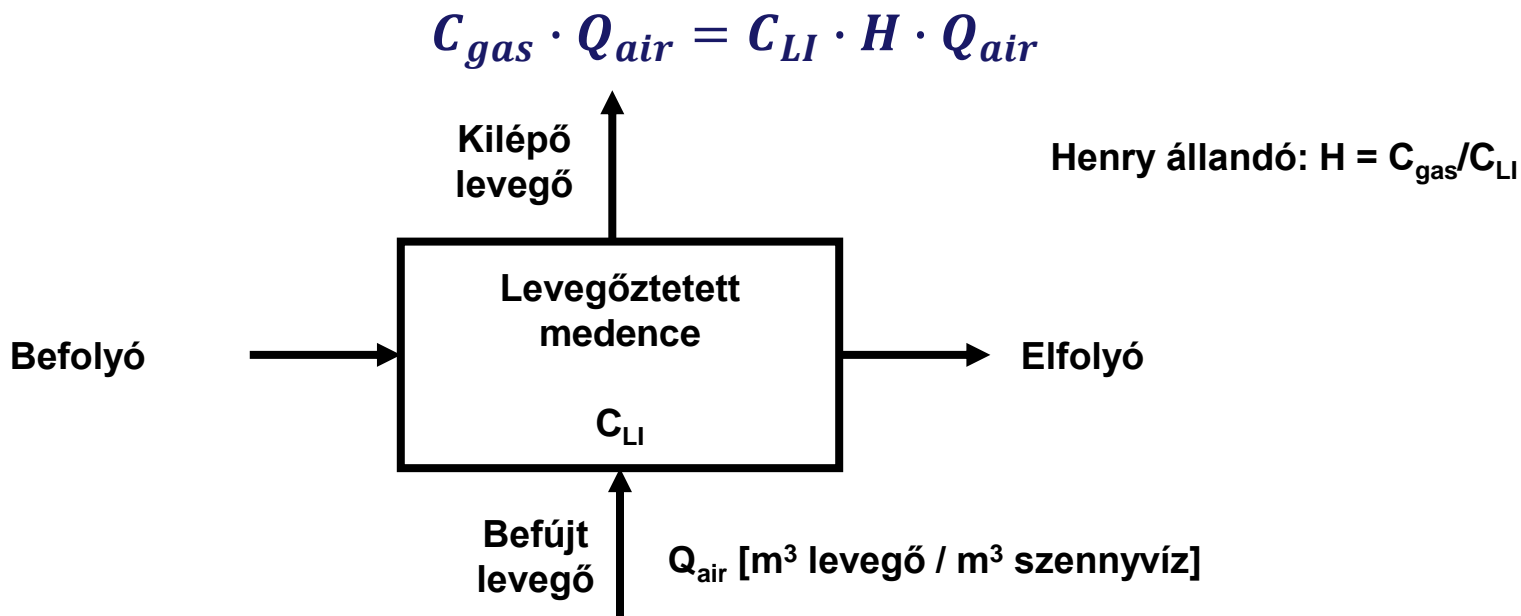
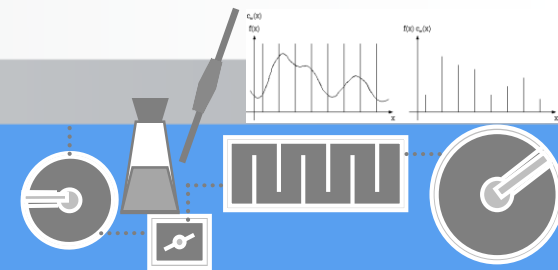
$X_{SS}$ : eleveniszap koncentráció, g/L

# ASM-X, ASM model „Gujer-mátrixa” szerves mikroszennyezőkre



Component $\rightarrow i$	1	2	3	4		
$j$ Process $\downarrow$	$C_{LI}$	$C_{CJ}$	$C_{SL}$	$C_{SL,I}$	Process rate	
De-sorption	1		-1		$k_{Des} C_{SL}$	
Aerobic processes						
Sorption	-1		1		$k_{Des} K_{D,Ox} C_{LI} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{SS}$	
Parent compound retransformation	1	-1			$k_{Dec,Ox} f(S_S) \times C_{CJ} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{SS}$	
Biotransformation	-1				$[q_{C,Ox} f(S_S) + k_{Bio,Ox}] C_{LI} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{SS}$	
Anoxic processes						
Sorption	-1		1		$k_{Des} K_{D,Ax} C_{LI} \frac{K_O}{K_O + S_O} X_{SS}$	
Parent compound retransformation	1	-1			$k_{Dec,Ax} f(S_S) C_{CJ} \frac{K_O}{K_O + S_O} X_{SS}$	
Biotransformation	-1				$[q_{C,Ax} f(S_S) + k_{Bio,Ax}] C_{LI} \frac{K_O}{K_O + S_O} X_{SS}$	
					Impact of SRT on biotransformation	
					Impact of growth substrate, $f(S_S)$ , on	
Parent compound re-transformation	No observed impact				Diclofenac	Carbamaz.
Biotransformation	$\frac{S_S}{K_S + S_S}$		0-6		SRT (day)	No observed impact
			—		6-20	>20
					$k_{Bio,SRT < 20}$	$k_{Bio,SRT > 20}$

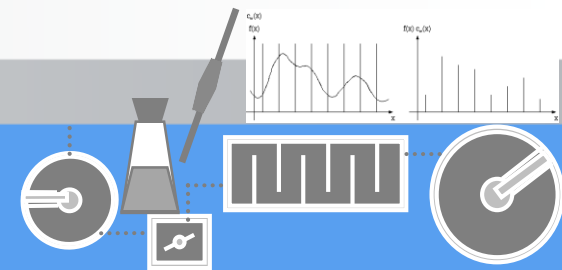
## C) Gáz fázisba történő kihajtás



$\Phi$ : kihajtott mikroszennyező hányad

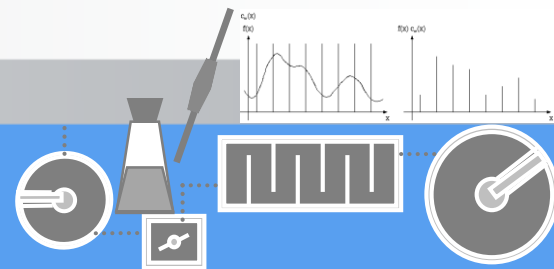
$$\Phi = \frac{C_{LI} \cdot H \cdot Q_{air}}{C_{LI} + C_{LI} \cdot H \cdot Q_{air} + C_{LI} \cdot K_D \cdot X_{ss}} = \frac{H \cdot Q_{air}}{1 + H \cdot Q_{air} + K_D \cdot X_{ss}}$$

## D) Kémiai transzformáció



- **Foto-degradáció: csak kis turbiditású víz-mátrix esetén**
- **Dekonjugáció (visszaalakulás az eredeti formába): általában már a csatornahálózatban, vagy a SzVTT-re beérkezve már a technológia elején lejátszódik.**
- **Más kémiai transzformációk az utókezelés során (pl. ozonizálás, UV besugárzás, stb.)**

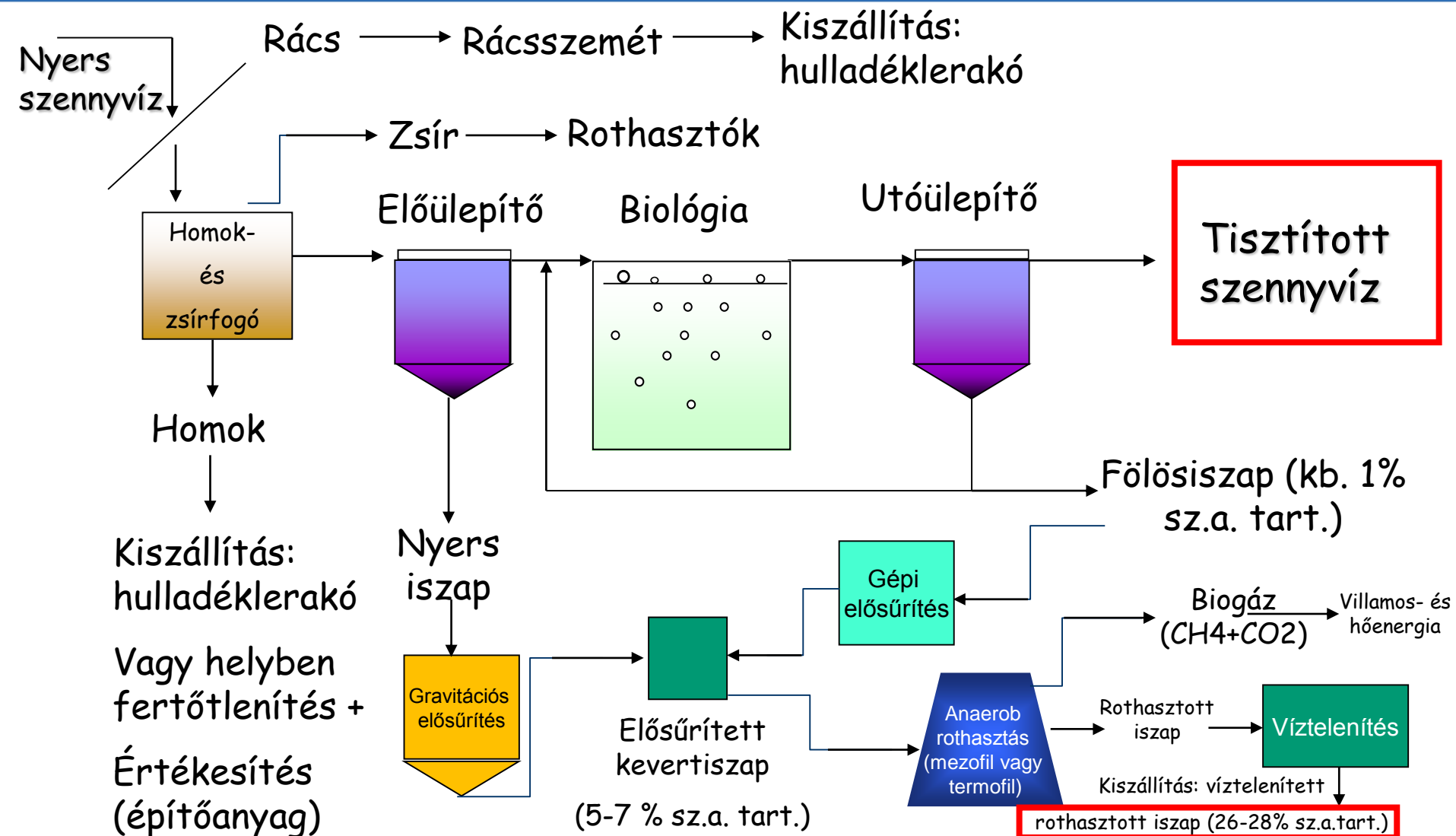
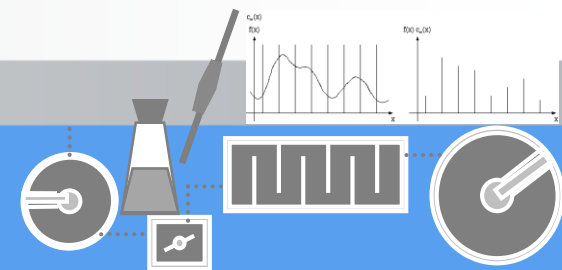
*Forrás: Fatta-Kassinou, Bester, Kümmerer: Xenobiotics in the Urban Water Cycle: Mass Flows , Environmental Processes; Sonia Suarez, course material, 2018*



## IV. Szennyvíztisztítási technológiák mikroszennyezők eltávolítására

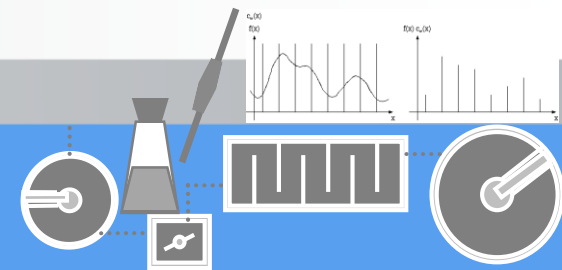


# Eleveniszapos szennyvíztisztítás



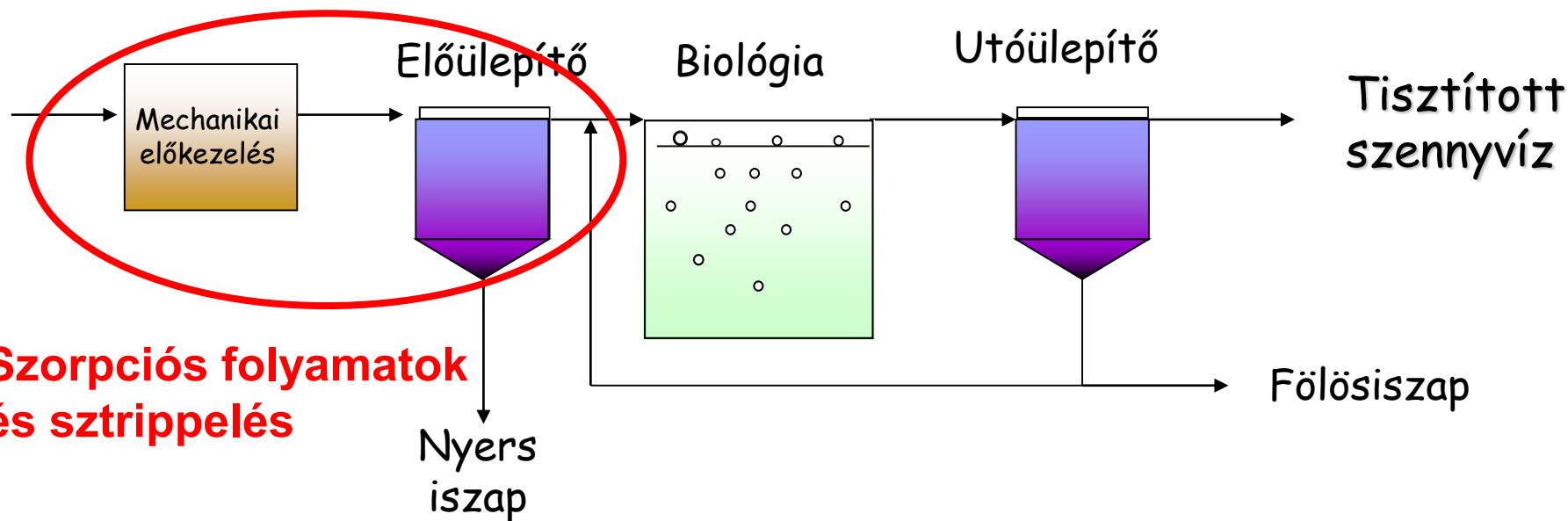
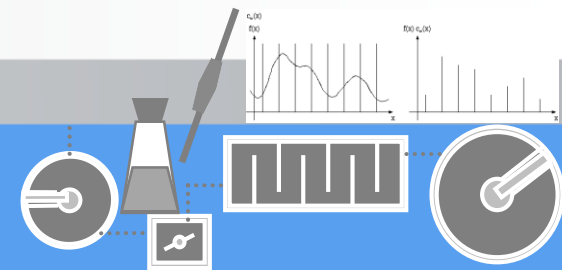


# A szennyvíztisztítás „fokozatai”



- **I. tisztítási fokozat: mechanikai kezelés**
- **II. tisztítási fokozat: szerves szén eltávolítás**
- **III. tisztítási fokozat: tápanyag (N és P) eltávolítás**
- **IV. tisztítási fokozat: mikroszennyezők eltávolítása**

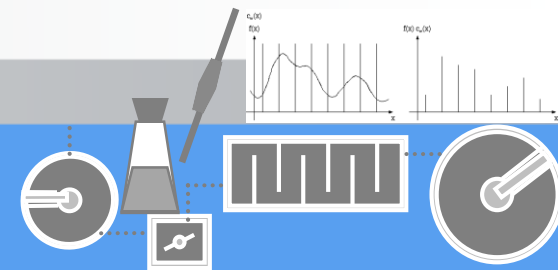
# Mechanikai és előkezelés



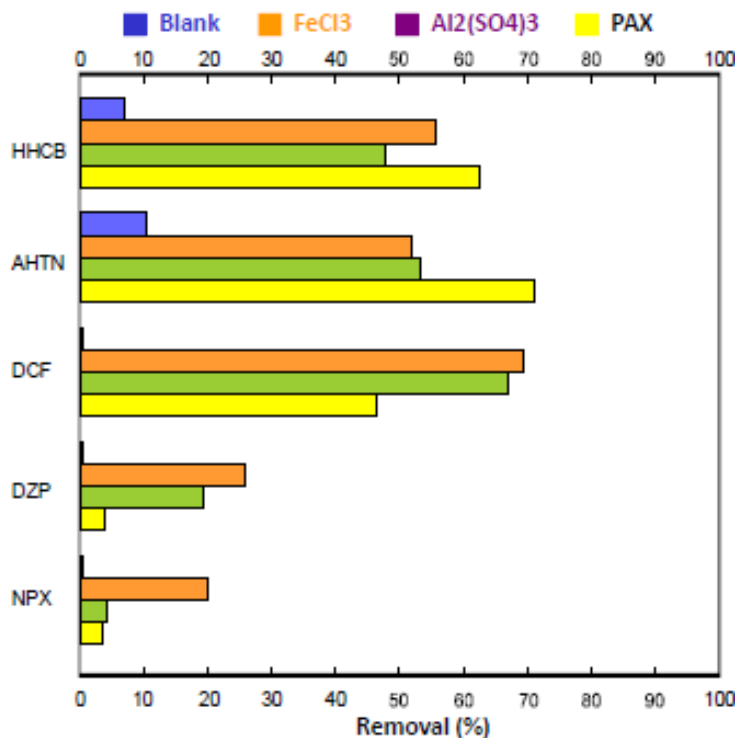
- **Főbb befolyásoló tényezők:**
  - Lebegőanyag koncentráció
  - Háromértékű kationok
  - Zsír- és olajtartalom
  - Hőmérséklet (enyhe hatás)

# Kémiaailag intenzifikált előkezelés

## Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT)



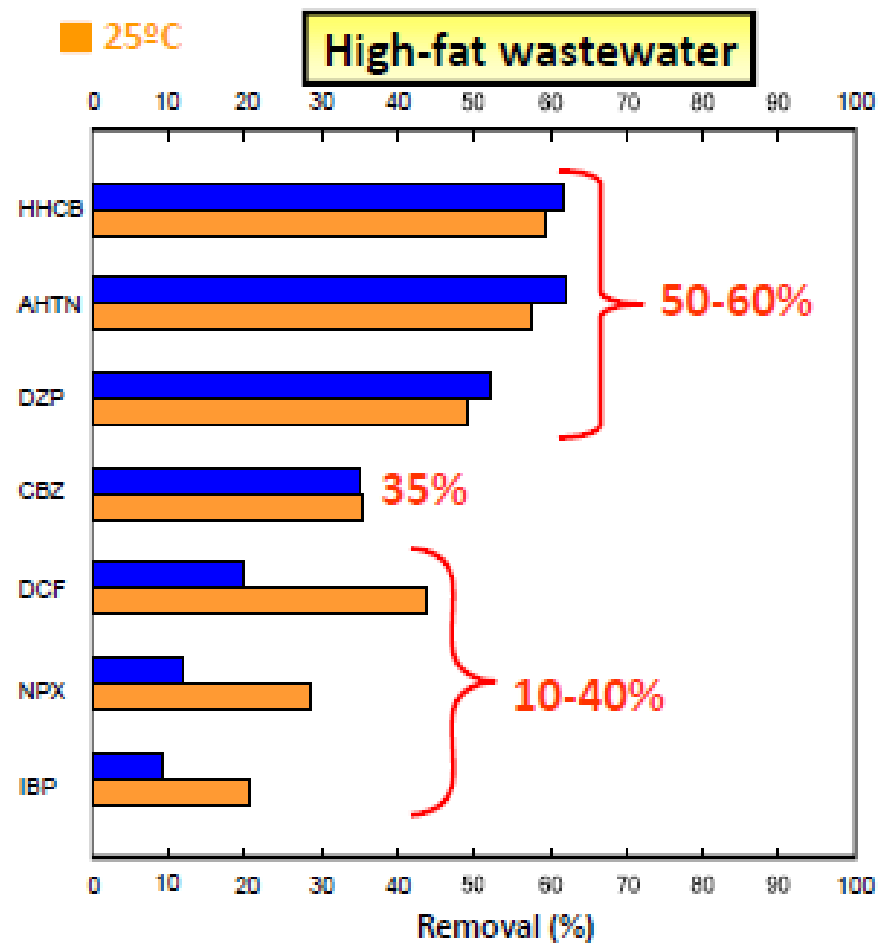
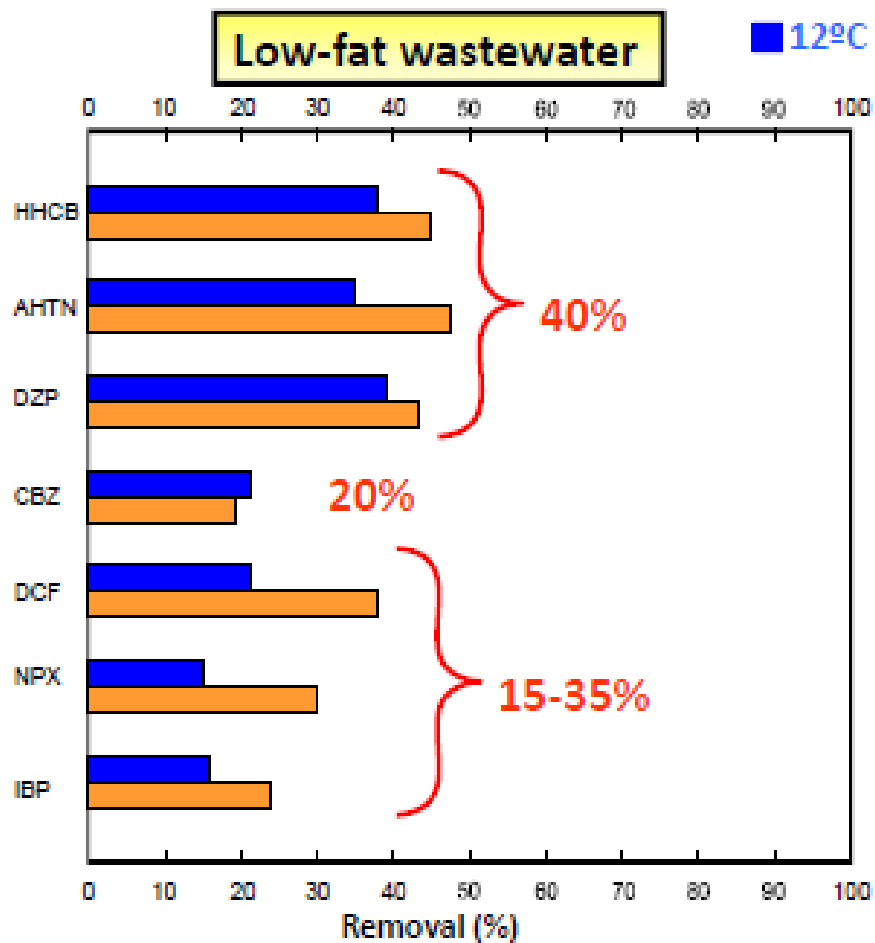
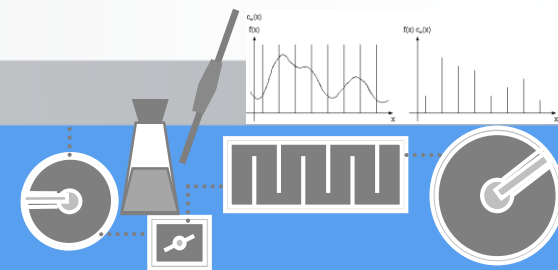
- **Vegyszeradagolás és/vagy levegőztetés**
  - Lebegőanyagok és kollidok eltávolítása
  - Töltéssel rendelkező molekulák eltávolítása
  - Zsír és olaj eltávolítás



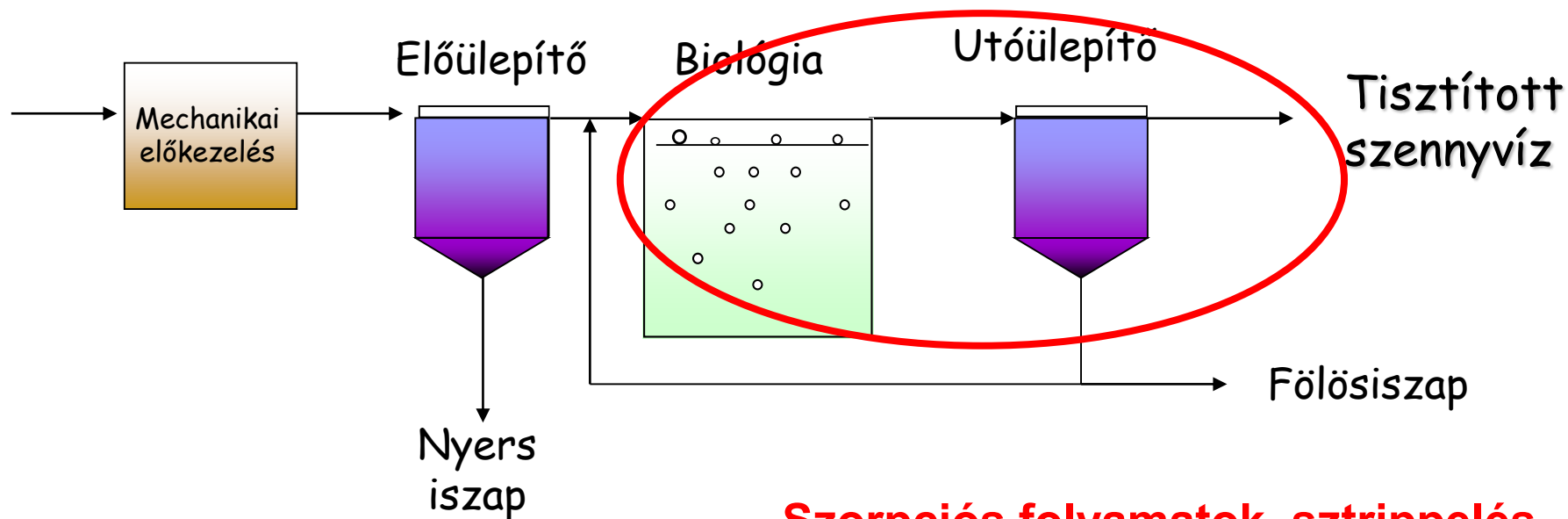
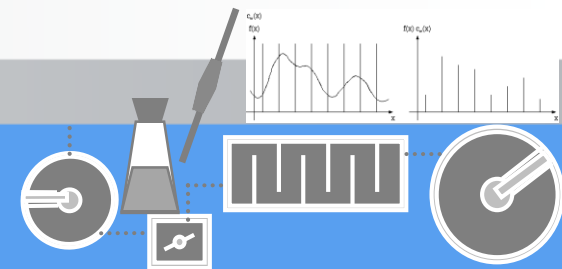
**Ún. koaguláló szerek alkalmazásával néhány vegyület eltávolítása hatékony lehet**

*Forrás: Carballa et al., Wat. Res., 2005*

# A szennyvíz zsírtartalmának szerepe

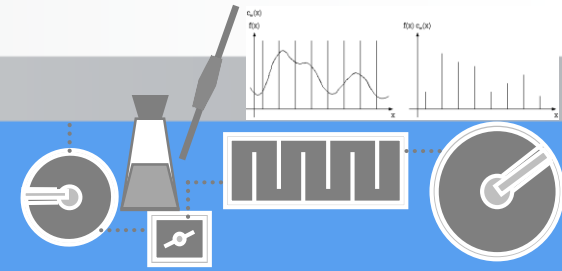


# Biológiai fokozat és utóülepítés



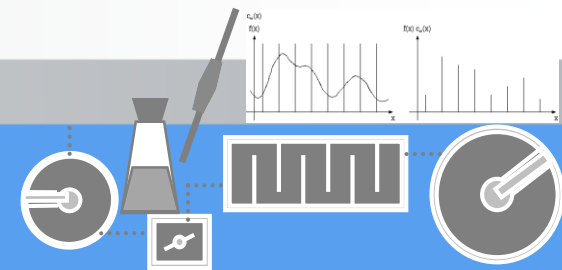
**Szorpciós folyamatok, sztrippelés, kémiai és biokémiai átalakítás**

# A mikroszennyezők eltávolítási folyamatait befolyásoló üzemi tényezők



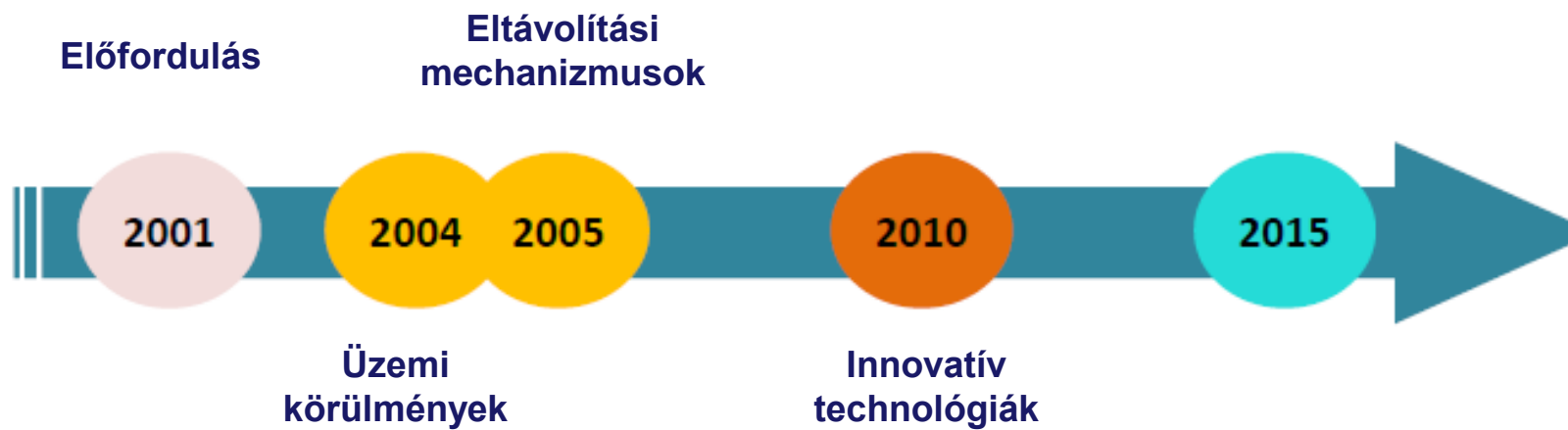
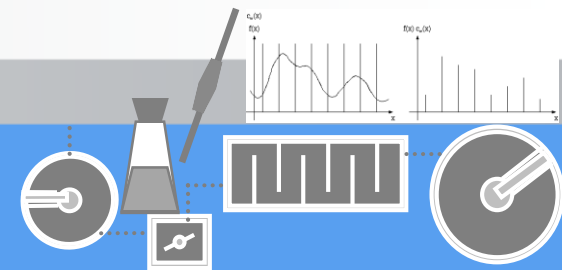
- **Hőmérséklet:** növekedése a biológiai aktivitást növeli, a szorpciós folyamatok sebességét csökkenti
- **Lebegőanyag és biomassza koncentráció**
- **Hidraulikai tartózkodási idő (HRT, Hydraulic Retention Time)**
- **Iszapkor (SRT, Sludge Retention Time) – min. 10-15 d**
- **Mikrobiális diverzitás és adaptáció**
- **Redox potenciál (aerob / anaerob környezet)**
- **Segédanyagok hozzáadása (pl. koaguláló szerek, aktívszén)**
- **Technológia flexibilitása**

# Technológia fejlesztés jelenlegi irányai



- **Különböző redox potenciálok kombinálása**
- **Bioreaktorok eltérő kialakítása, különböző mikroba tenyészetek létrehozása (szuszpendált, granulált, biofilm)**
- **Membránszűrés alkalmazása**
- **Vegyszerek, koaguláló szerek és segédanyagok adagolása**
- **A biológiai tisztítás nagyhatékonyságú kémiai (utó)kezeléssel való kombinálása**
- **Üzemeltetési paraméterek optimalizálása (VSS, HRT, SRT, stb.)**

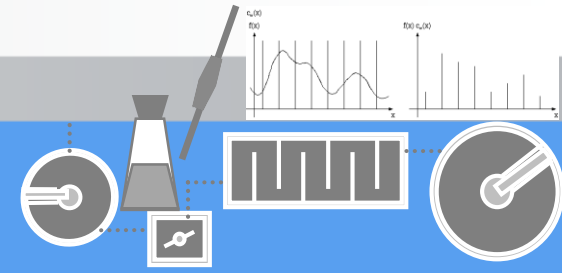
# A kutatási trendek alakulása



*Forrás: "Trends in organic micropollutants removal in secondary treatment of sewage"  
accepted for publication in Reviews in Environmental Science and Bio/Technology; Sonia Suarez, course material, 2018*

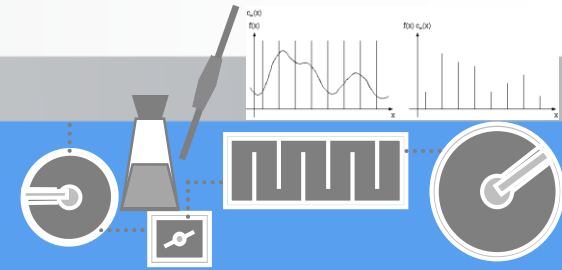


# Szennyvíztisztító telepek XXI. századi kihívásai



- „Lábnyom” (footprint) csökkentés - terület, energia, iszap, GHGs
- Körforgásos gazdaság (circular economy) – tápanyag (N és P) és energia visszanyerés, újrahasznosítás, víz visszaforgatás
- Centralizált/decentralizált rendszerek
- Mikroszennyezők eltávolítása

# Eleveniszapos bioreaktor + membránszűrés + PAC



**Aerob reaktor**



**Membránszűrés**



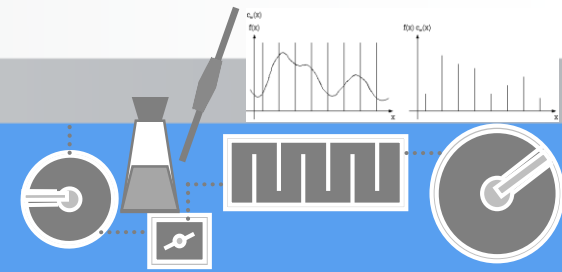
**Adszorpció porított aktívszénen**

- Jó elfolyó minőség
- Aerob körülmények elősegítik a MP-k eltávolítását
- Teljes mikroba visszatartás
- Igen jó elfolyó minőség
- Membrán biofilmesedést csökkenti (ún. biofouling)
- Toxicitás negatív hatásait csökkenti
- Mikrobiális diverzitást növeli

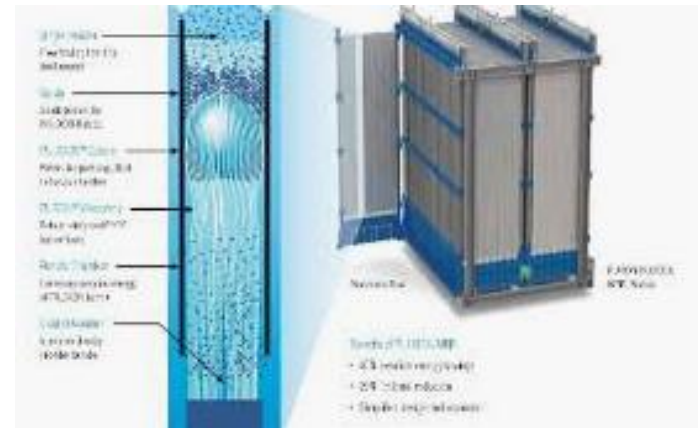
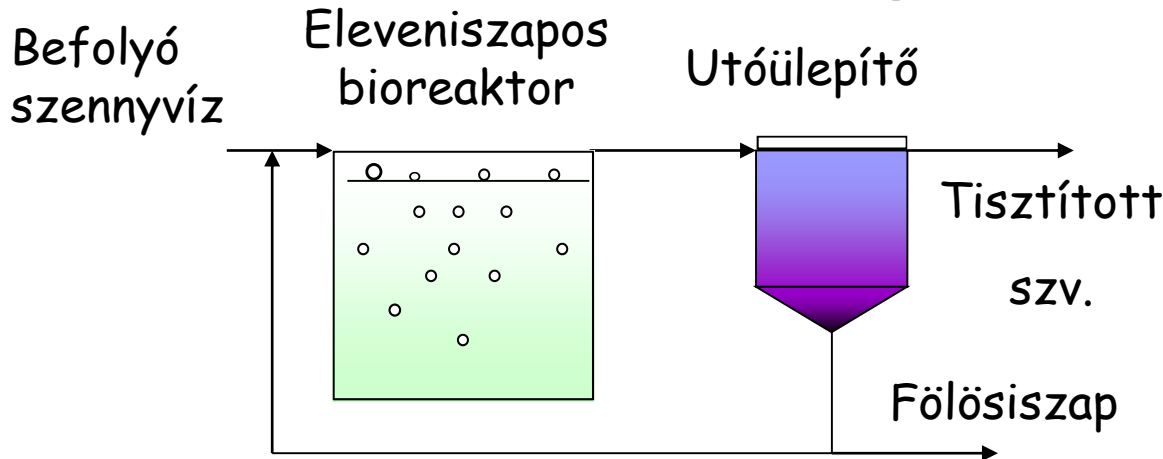
## Mikroszennyezők eltávolítása

- Aerob körülmények elősegítik a MP-k eltávolítását
- Fokozottabb lipofil abszorpció
- Rekalitráns MP-k eltávolítását fokozza

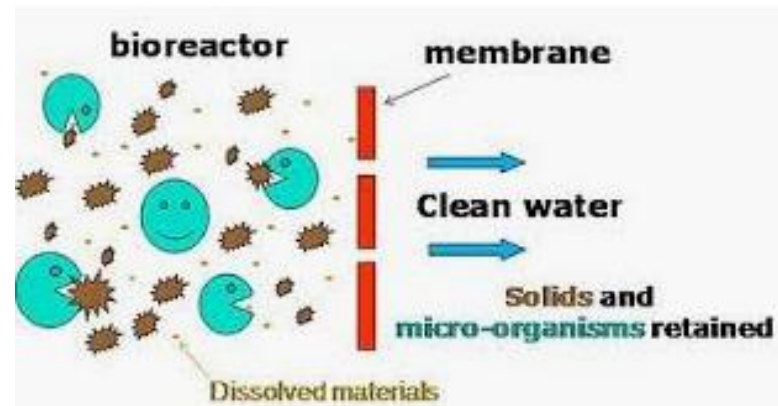
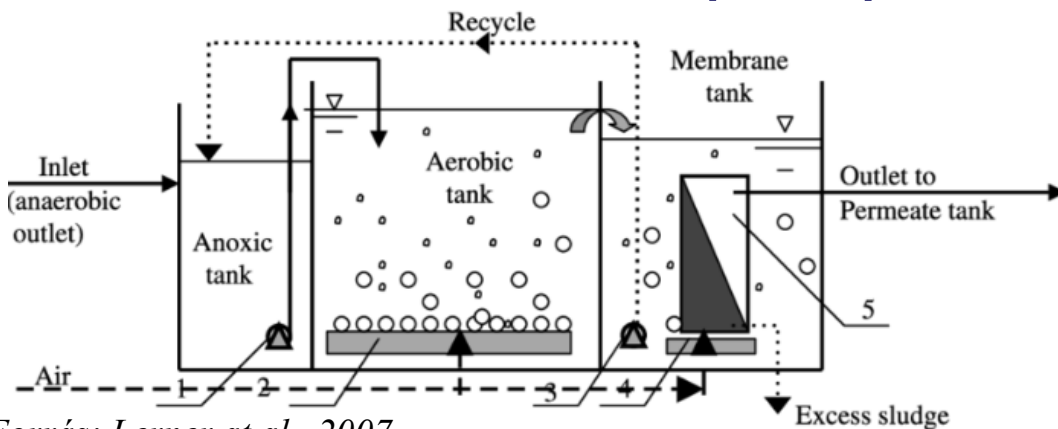
# Hagyományos eleveniszapos és membrán bioreaktor rendszerek



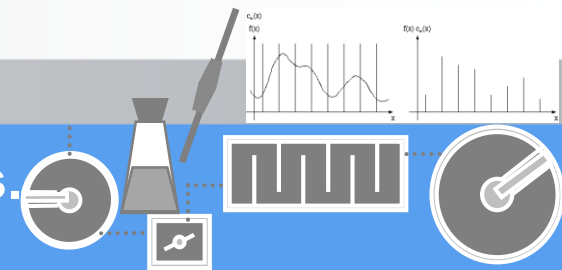
## Conventional activated sludge (CAS)



## Membrane bioreactor (MBR)



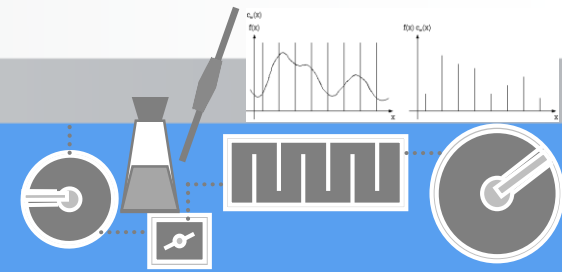
## Membrán bioreaktor (Membrane Bioreactor, MBR) vs. Eleneviszapos rendszer (Activated Sludge, AS)



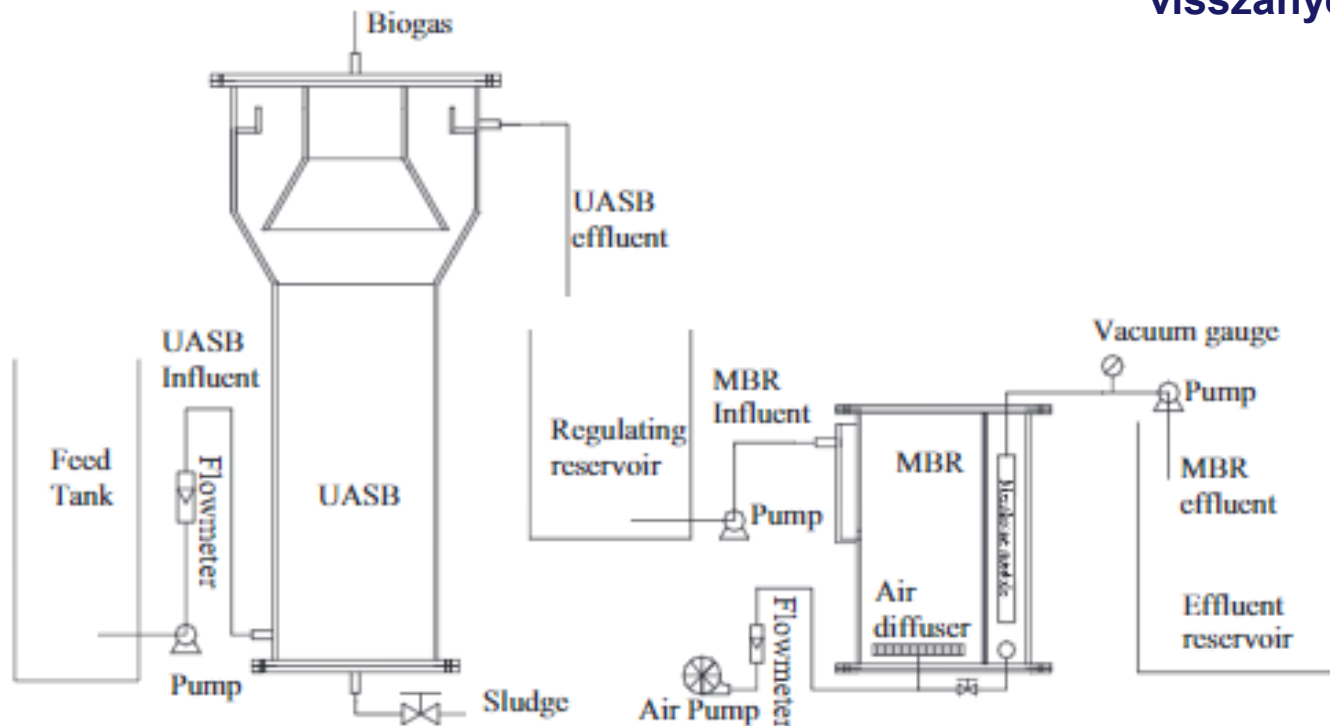
- A membránszűrés nem játszik szerepet a OMP-k méret alapján történő visszatartásában.
- A AS és a MBR rendszerek hasonló OMP eltávolítási eredményeket mutatnak hasonló üzemi körülmények között.
- A MBR rendszerek nagyobb iszapkoncentráció mellett üzemelnek, ami kedvez a OMP-k eltávolításának.

**Az üzemeltetési körülmények sokkal inkább számítanak, mint maga a technológia.**

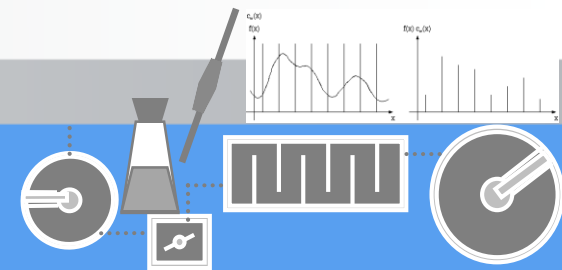
# Anaerob rendszerek – Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)



- **Az anaerob rendszerek előnyei:**
  - Kiseb energia fogyasztás
  - Biogáz termelés
  - Kiseb biomassza szaporulat
- **Jó tapasztalatok UASB – MBR**
  - 95-99%-os KOI eltávolítás
  - Lebegőanyag nélküli elfolyó
  - Tápanyagok (N és P) visszanyerhetősége



## Utókezelés (polishing treatment)

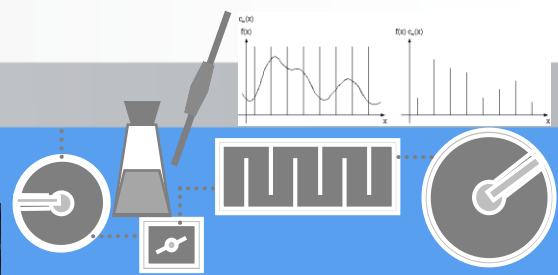


- **Aktívszénen történő adszorpció (GAC vagy PAC)**
- **Reverz ozmózis (reverse osmosis)**
- **Oxidálás ózonnal**
- **Nagyhatékonyságú utóülepítés**
- **Homokszűrő**
- **UV fertőtlenítés**
- **Utókezelő tó (polishing pond)**
- **Szikkasztó árkok**
- **Gyökérszónás természetközeli rendszerek (constructed wetlands)**

# GAC vagy PAC

## Példa: SeMPAC technológia

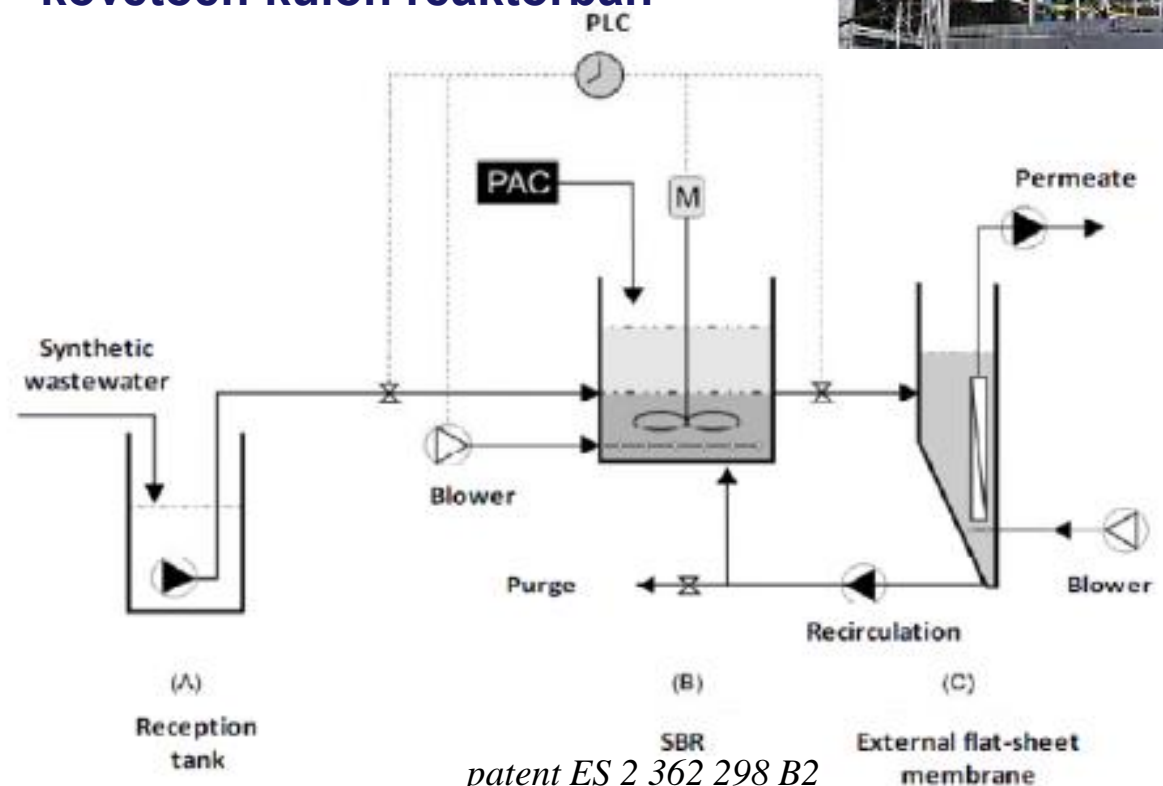
- Nagy üzemeltetési pluszköltség
- 1 medencében vagy az eleveniszapos medencét követően külön reaktorban



**SBR (Sequencing Batch Reactor)**

**Membrán bioreaktor**

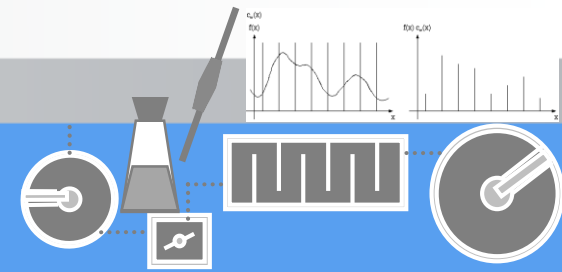
**Porított aktív szén (Powdered Activated Carbon, PAC)**



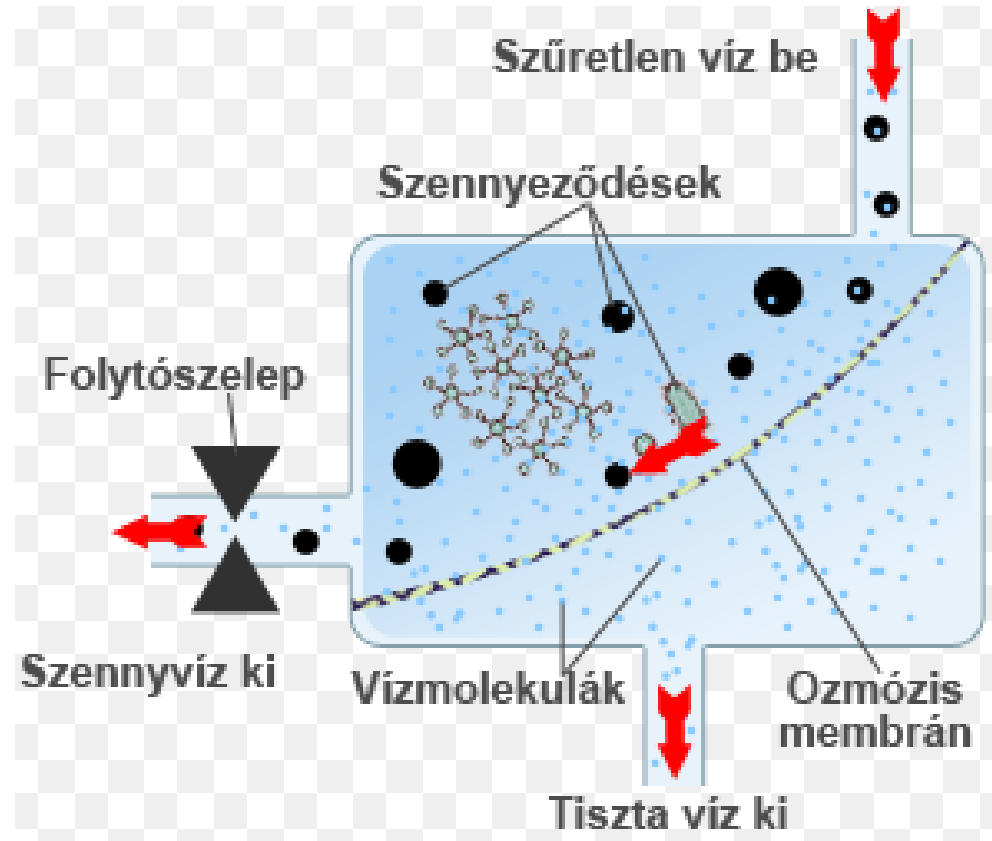
*patent ES 2 362 298 B2*  
*European Patent application EP12777603.7*

# Reverz/Fordított ozmózis

## Reverse osmosis (RO)

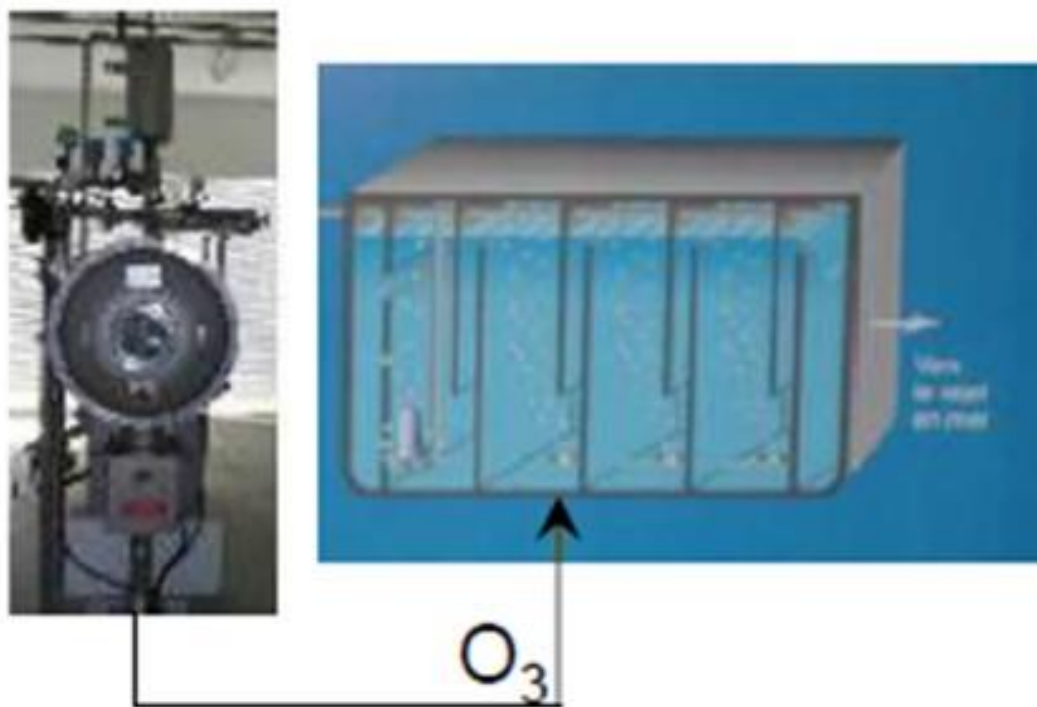
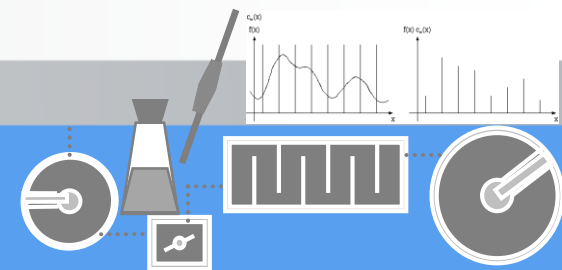


- A töményebb oldatra az ozmózisnyomásnál nagyobb nyomás hat



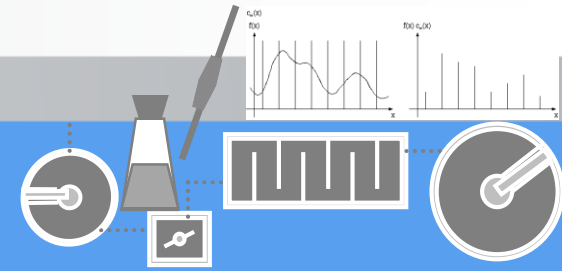


# Oxidálás ózonnal



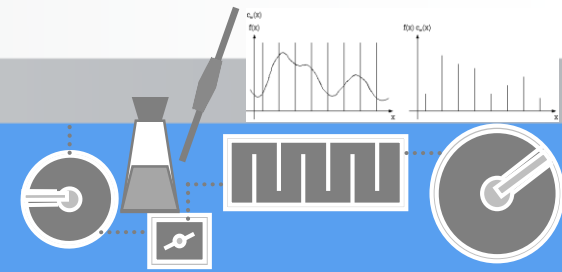
- **3 – 10 g/m<sup>3</sup> dózis)**
- **Nagyon nagy energiaigénye van!**
- **Általában homoszűrő követi, mivel az oxidáció nem teljes**

# Összehasonlító értékelés



Folyamat	Eltávolítási hatékonyság	Gyengeség	Többlet-költség
Oxidálás ózonnal	++ (kivéve fémek)	Energiafogyasztás Melléktermékek	0,1 EUR/m <sup>3</sup>
Adszorpció aktív szénen	++ (kivéve fémek)	Dugulásveszély, regenerálás, költségesség	0,3 EUR/m <sup>3</sup>
Reverz ozmózis	++	Költségesség, energiaigény, retentát kezelése	0,4 EUR/m <sup>3</sup>

# Mennyire hatékonyak a korszerű fiziko-kémiai kezelési eljárások?



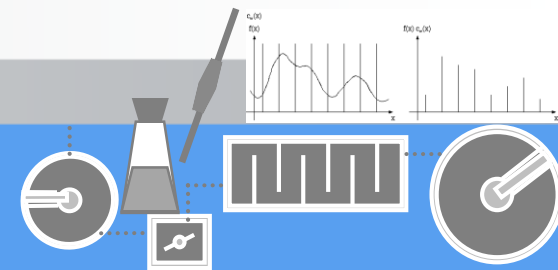
Forrás: J-M. Choubert, course material

Removal < 30 % ■  
 Removal 30 - 70 % ■  
 Removal > 70 % ■

Family	Substances	Maximum removal efficiency (%)					
		Preliminary treatments			Advanced treatments		
		Tertiary settling	Sand filtration	Stabil. pond	Reverse osmosis	Ozone	Activated carbon
VOCs	dichloromethane, trichloromethane, tetrachloromethylene	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Pesticides	glyphosate	Green	Green	Red	Green	Green	Green
	AMPA	Red	Green	Red	Green	Green	Green
	atrazine, simazine	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Chlorophenols	dioxin, isoproturon	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	dichlorophenols, tetrachlorophenols	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Phthalates	DEHP	Red	Red	Red	Green	Green	Green
PAH	fluorethene	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Industrial additives	benzothiazoles	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Metals	Li, Ti, V, Se, Ba	Green	Green	Red	Green	Green	Green
	As	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Cu, Sn	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	B	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Fe	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Cr, Zn	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Ni, Co, Rb, Mo, St, U	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Hg	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Ag, Cd	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Pb, Al	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Alkylphenols	nonylphenols	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	octylphenols, NP2EO	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	NP1EO, Alkylphenol carboxylates	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Hormones	Estrone, ethinyl estradiol	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	oxprenolol, bisoprolol, atenolol, sotalol	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	paracetamol, diclofenac, gemfibrozil	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	timolol, nadolol	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	propranolol	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Pharmaceuticals	carbamazepine, diazepam, nordiazepam, alprazolam, fluoxetine, acebutolol, ibuprofen, naproxene, terbutaline	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	amitriptyline, metoprolol, erythromicine	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	ketoprofene, salbutamol	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	aspirin	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	sulfamethoxazole, bromazepam	Red	Red	Red	Green	Green	Green

**Hagyományos kezelések (pl. homokszűrés)**  
 30-70%-os eltávolítás a komponensek kevesebb mint 20%-a esetében

**Korszerű kezelések (pl. reverz ozmózis, ózonos oxidáció, PAC)**  
 90%-os eltávolítás a komponensek 80%-a esetében



## Szikkasztó árok

80 m hosszú, HRT  $\approx$  1 d



## „Szépítő” tó

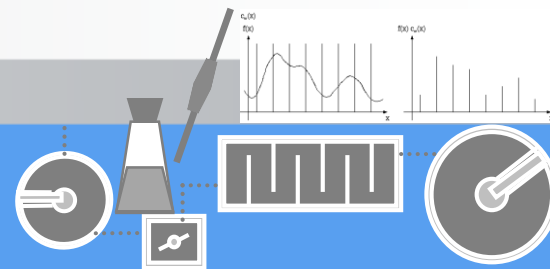
HRT  $\approx$  15 d



## Gyökérzónás rendszerek adszorpcióval

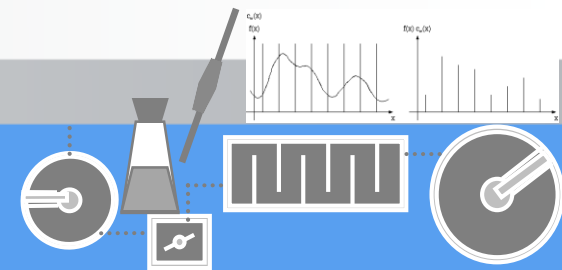
HRT  $\approx$  24 h + 1,5 h GAC





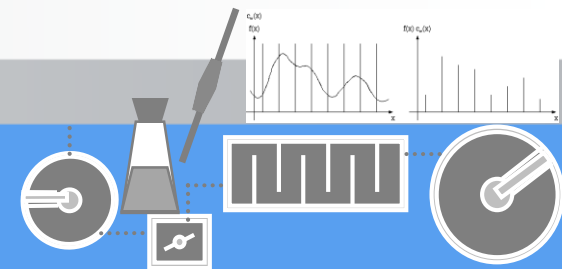
**V. Szennyvíziszap és a használtvíz  
(mezőgazdasági) újrahasznosítása  
a mikroszennyezők tükrében,  
felmerülő kockázatok**





- **50/2001. (IV. 3.) Korm. Rendelet a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól**
- **Szennyvíziszap elhelyezésének lehetőségei:**
  - Komposztálás
  - Mezőgazdasági hasznosítás
  - Rekultiváció
  - Lerakás
  - Égetés

# Biominomítók (Biorefineries)



Mezőgazdasági iparok



Városi szerves hulladék



Mezőgazdasági melléktermékek



Szennyvíz-  
iszap



Új biomassza  
fajták (pl. alga)



Kémiai és  
mikrobiológiai  
hulladékok

CH<sub>4</sub> és/vagy H<sub>2</sub>



Hő, energia,  
bioüzem-  
anyag,  
biogáz

Platform  
molekulák



Szerves  
illósavak  
(VFAs), etanol,  
stb.

Műtrágyák



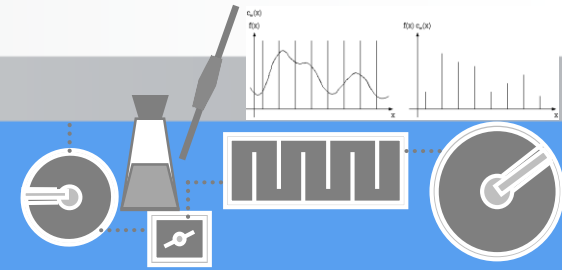
N, P, K,  
szerves-  
anyag

Víz



Visszaforogatás,  
öntözés

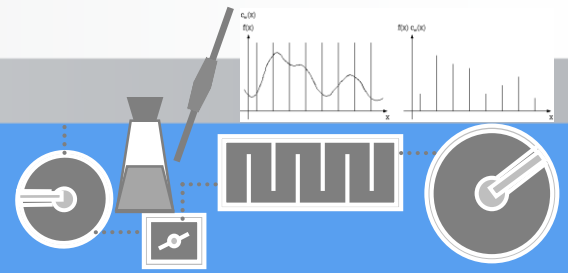
# „Aggodalomra okot adó anyagok” CEC: Contaminants of Emerging Concern



## Jövőbeli feladatok:

- A CEC anyagokra vonatkozó határértékek meghatározása (öntözővízben, talajban, élelmiszernövényben, élelmiszerekben és késztermékekben)
- Analitikai módszerek fejlesztése
- A talajból való felvehetőség csökkentése
- **A szennyezőanyagok környezetbe, termőföldbe kerülésének megelőzése.**

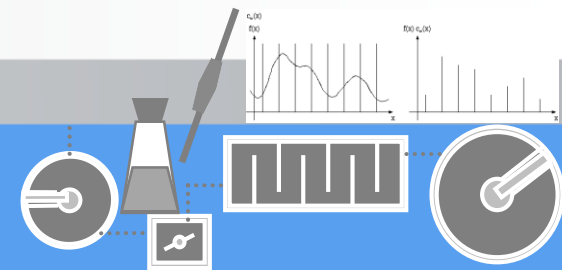




## VI. Antibiotikum rezisztencia

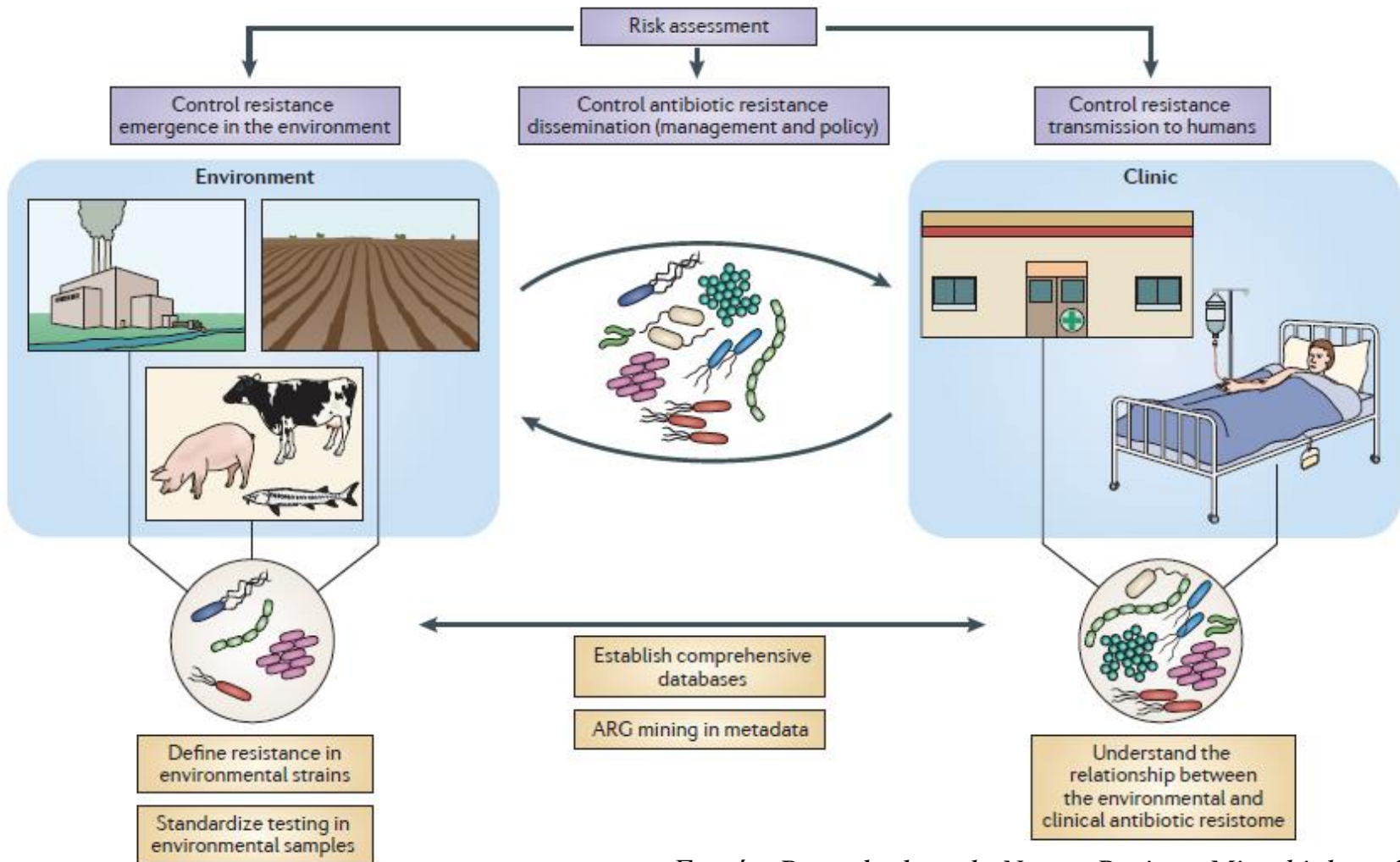
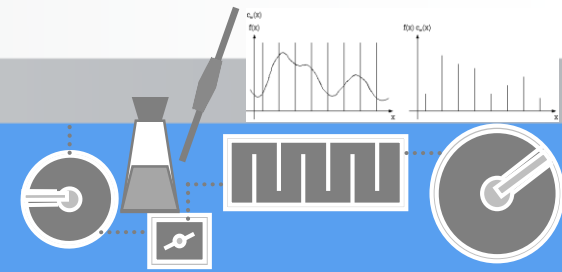


# Világméretű probléma

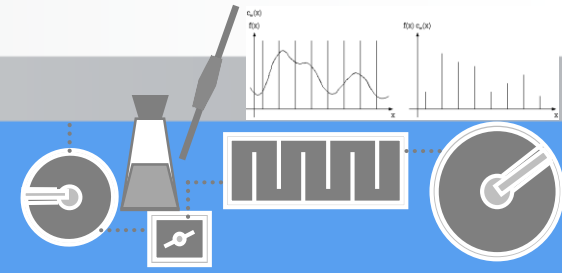


- Ma évente 700 ezer ember hal meg antibiotikum rezisztenciával kapcsolatos egészségi problémák miatt
- Ez a szám 2050-re várhatóan 10 millióra emelkedik.
- Sok kutatás foglalkozik a témával
- Vízhiány és természetes vizeink elszennyeződése – antibiotikum rezisztencia terjedése a vizes rendszerekben

# Kihívások a kutatásban és a kockázat értékelésben



# Néhány rövidítés, alapfogalom



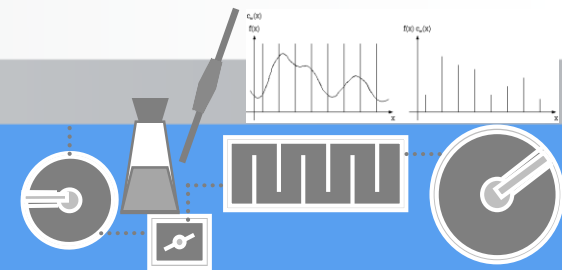
**AMR: Antimicrobial Resistance**

**ARG: Antibiotic Resistance Gene**

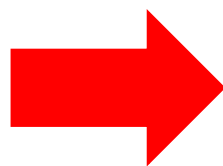
**ARB: Antibiotic Resistance Bacteria**

**HGT: Horizontal Gene Transfer**

# A kialakulás mechanizmusai



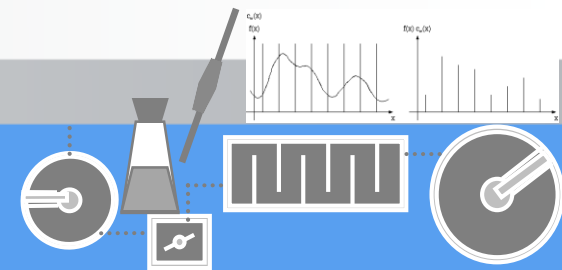
- **Traszformáció**
- **Traszdukció**
- **Konjugáció**



**Kromoszóma mutáció**

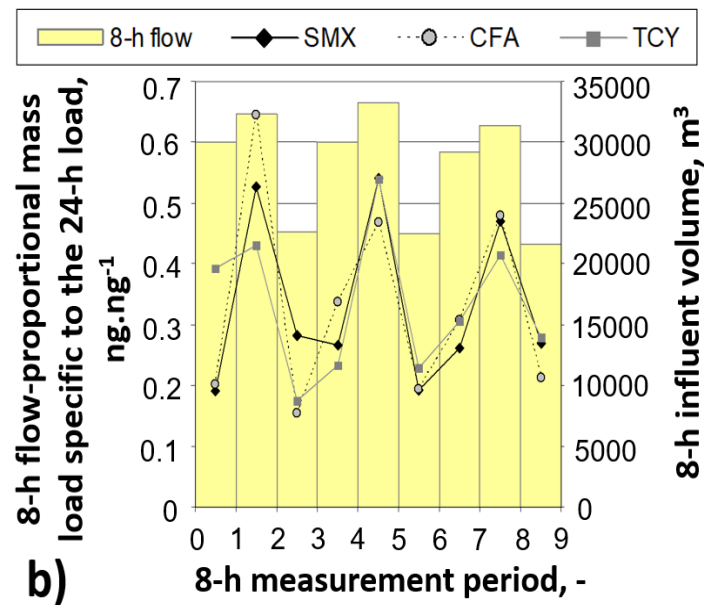
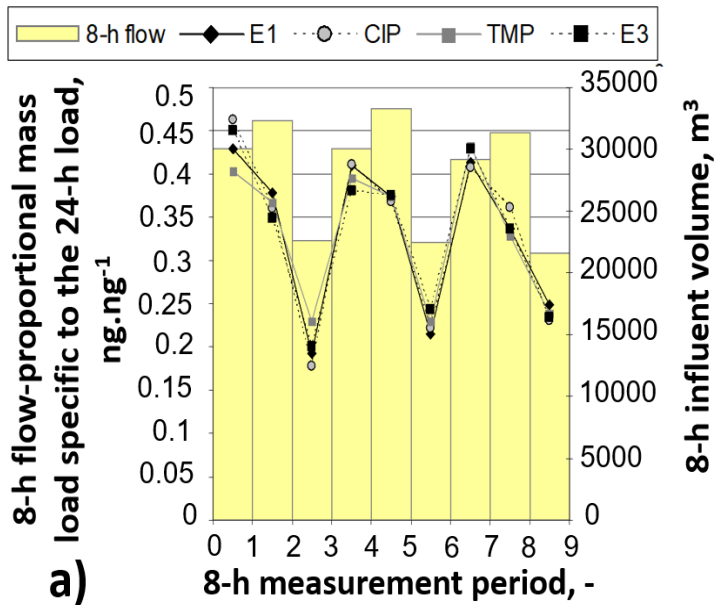
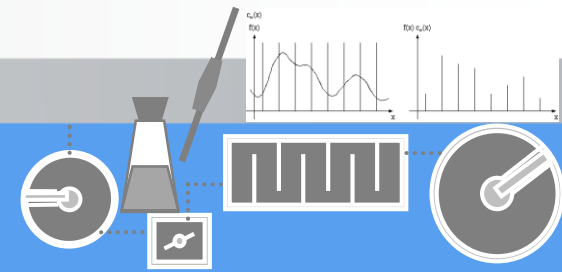
- **Traszformáció:** gén bejuttatása egy recipiens szervezetbe tisztított DNS segítségével (DNS-bontó enzimek gátolják)
- **Traszdukció:** az egyik baktériumsejtből vírus vagy vírus vektor segítségével DNS jut át a másikba (nem szükséges a baktérium sejtek között fizikai kontaktus, DNS-bontó enzimek nem gátolják)
- **Konjugáció:** két baktérium ún. konjugációs piluson keresztül kapcsolódik egymáshoz, és örökítő anyag kerülhet át a donorból a recipiensbe.

# Antibiotikumok csoportjai



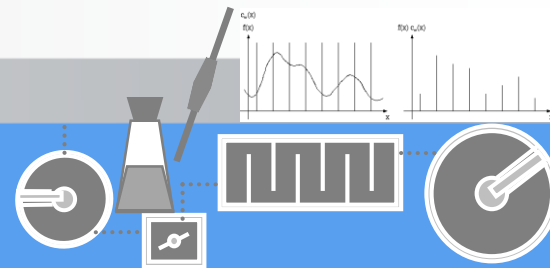
- **Béta-laktámok** (pl. penicillinek)
- **Gliko-peptidek**
- **Aminoglikozidok**
- **Makrolidok**
- **Tetraciklinek** (pl. tetraciklin)
- **Amfenikol**
- **Szulfonamidok** (pl. szulfametoxazol)
- **Kinolonok** (pl. ciprofloxacín)
- **Antituberkulotikumok**

# Sokféle vegyület, változó koncentrációban és változó körülmények között



**Abbreviations used in the figure:**

estrone (E1),  
 estriol (E3),  
 ciprofloxacin (CIP),  
 trimethoprim (TMP),  
 sulfamethoxazole (SMX),  
 tetracycline (TCY)

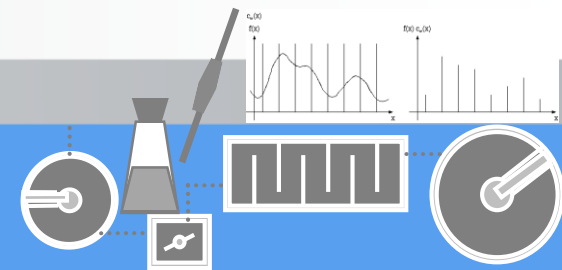


## VII. Konklúziók



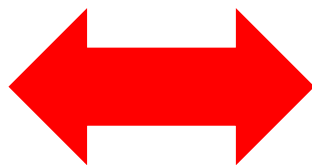


## Kihívások, kitekintés



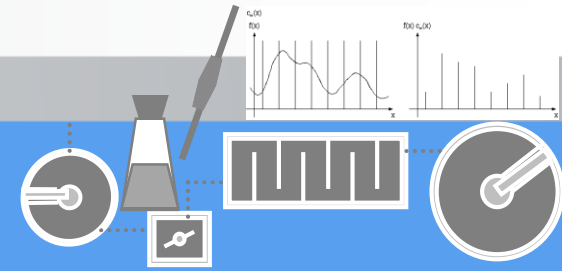
- **Bonyolult és költséges analitikai technikák szükségesek a reprezentatív adatok szolgáltatásához.**
- **Minél többet tudunk, annál több kérdés merül fel.**
- **Hol avatkozzunk be? (Megelőzés vagy „end-of-pipe” megoldások?)**
- **Modellezés és regionális kockázatértékelés fontossága**

Mikroszennyezők



WWTP (Wastewater  
Treatment Plant)  
↓  
WRRF  
(Water Resources Recovery  
Facility)

# Kapcsolódó, felhasznált és ajánlott tudományos cikkek



- Berendonk, T.U., Manaia, C.M., Merlin, C., Fatta-Kassionos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Bürgman, H., Sorum, H., Norström, M., Pons, Marie-Noel, Kreuzinger, N., Huovinen, P., Stefani, S., Schwartz, T., Kisand, V., Baquero, F. and Martinez, J.L. (2015). Tackling antibiotic resistance: the environmental framework, *NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY*, 13, 310-317.
- Henze, M., Grady, Jr., C.P.L., Gujer, W., Marais, G.V.R. and Matsuo, T. (1987). A general model for single-sludge wastewater treatment systems, *WATER RESEARCH*, 21(5), 505–515.
- Lerner, M., Stahl, N. and Galil, N.I. (2007). Comparative study of MBR and activated sludge in the treatment of paper mill wastewater, *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 55(6), 23-29.
- Plósz, B.G., Leknes, H.; Liltved, H.; Thomas, K.V. (2010). Diurnal variations in the occurrence and the fate of hormones and antibiotics in activated sludge wastewater treatment in Oslo, Norway. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 408 (8), 1915-1924.
- Plósz, B.G. , Langford, K.H., Thomas, K.V. (2012). An activated sludge model for trace xenobiotic chemicals (ASM-X): Assessment of diclofenac and carbamazepine. *BIOTECHNOLOGY & BIOENGINEERING* 109(11), 2757-2769.
- Plósz, B.G., Benedetti, L., Daigger, G.T., Larsen, H. F., Monteith, H., Ort, C., Seth, R., Steyer, J.-P., Vanrolleghem, P.A. (2013). Modelling micro-pollutant fate in wastewater collection and treatment systems: status and challenges. *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY* 67(1), 1-15.
- Qiu, G., Song, Y., Zeng, P., Duana L., Xiao, S. (2013). Combination of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and membrane bioreactor (MBR) for berberine reduction from wastewater and the effects of berberine on bacterial community dynamics, *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS*, 246-247, 34-43.