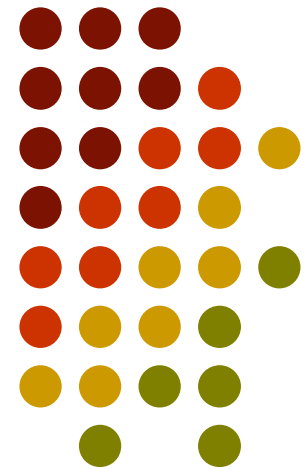


A települési felszín szennyezettsége

Budai Péter

Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest, 2017





Települési felszín típusai

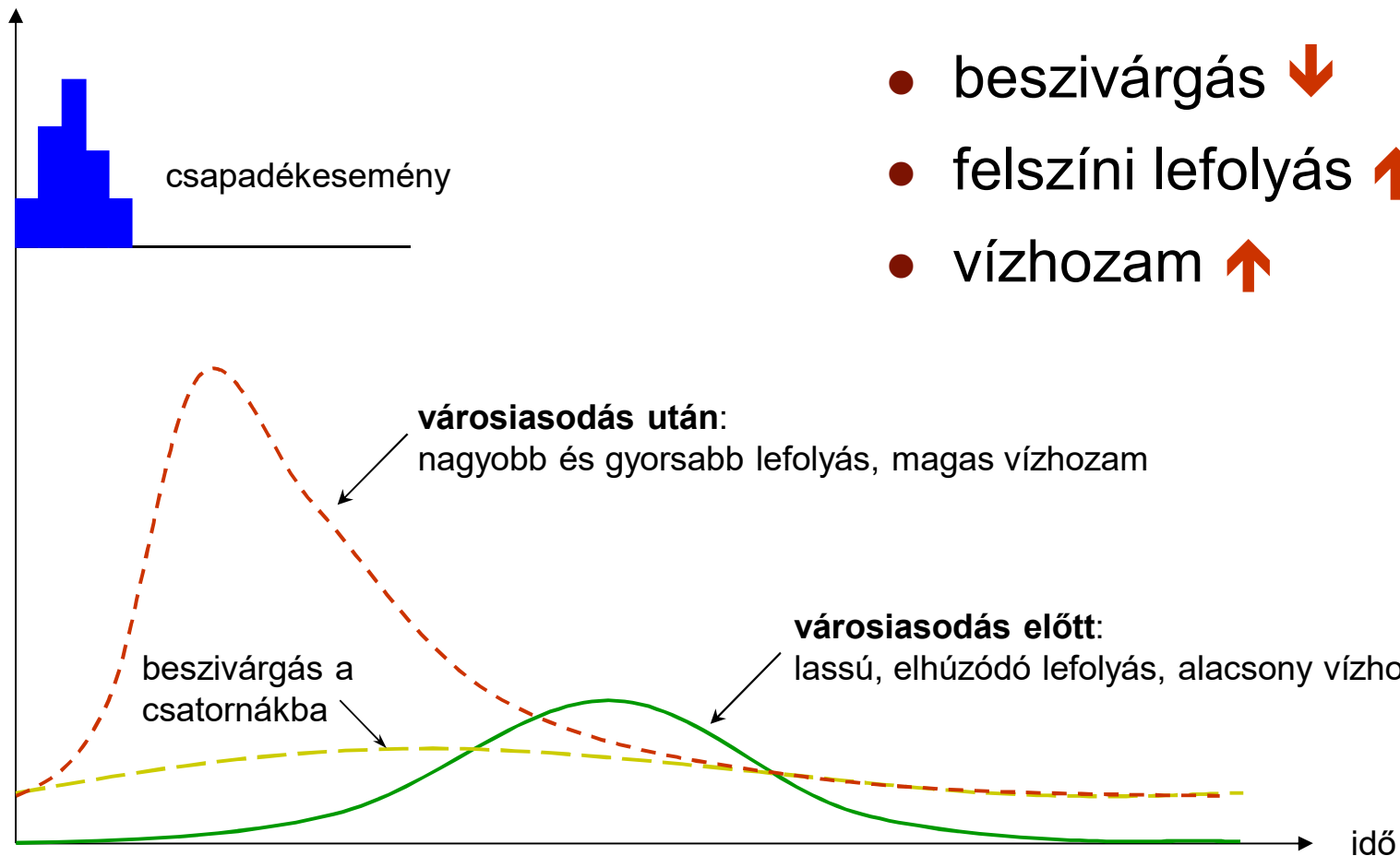
- burkolt felületek
 - tetők
 - utak, parkolók
- burkolatlan felületek
 - parkok, zöldterületek
 - füves/salakos sportpályák
 - építkezések



Burkolt felületek megnövekedett arányának hatása a lefolyásra



vízhozam



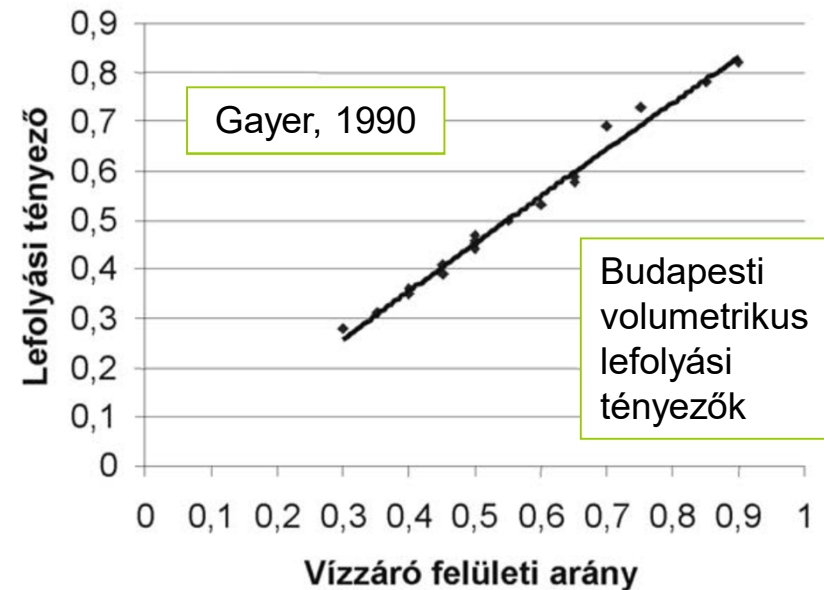
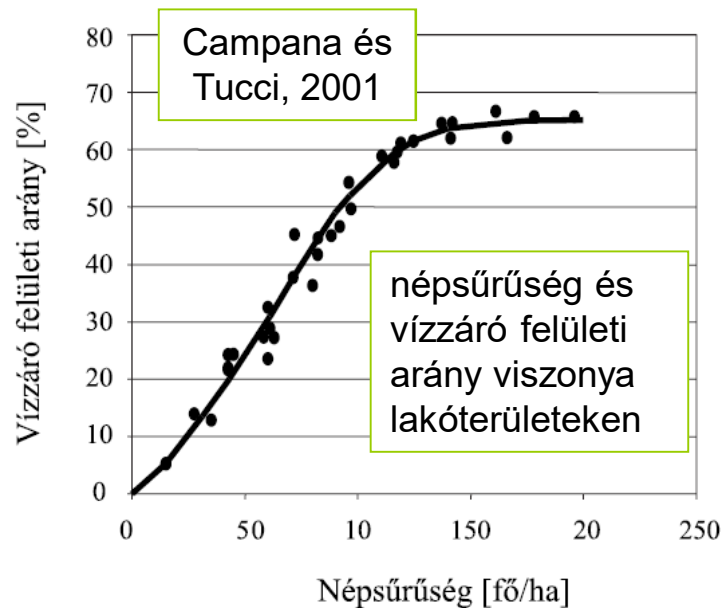
Burkolt felületek megnövekedett arányának hatása a lefolyásra



A terület jellege	Vízzáró felületi arány (R_f)
Falusi település	0,15 – 0,30
Családi házas városrész	0,20 – 0,40
Társasházias városrész	0,30 – 0,50
Tömbös lakótelep	0,40 – 0,70
Városközpont, kereskedelmi övezet	0,60 – 0,90
Régi belváros, ipartelep	0,80 – 0,95

átlagos vízzáró felületi arányok településeken

Wisnovszky, 1975



Burkolt felületek megnövekedett arányának hatása a lefolyásra



- „racionális módszer” a csúcsvízhozam meghatározására

$$q_{cs} = C \cdot I_r \cdot A$$

q_{cs} felszíni lefolyás
csúcsvízhozama [L/min]

C összegyülekezési
idő alatti átlagos
csapadékintenzitás
[mm/min]

I_r lefolyási együttható [-]

A vízgyűjtő területe [m²]

4. táblázat Lefolyási együtthatók a racionális módszerhez, városi területekre ¹ .		
A terület meghatározása		Lefolyási együttható
Üzleti negyed	Belvárosi	0,7–0,95
	Belvároshoz közeli	0,5–0,7
Lakóövezet	Családi házas	0,3–0,5
	Sorházas (különálló)	0,4–0,6
	Sorházas (összefüggő)	0,6–0,75
	Elővárosi	0,25–0,4
	Bérházas	0,5–0,7
Ipari	Könnyű	0,5–0,8
	Nehéz	0,6–0,9
Útburkolatok	Aszfalt vagy beton	0,7–0,95
	Tégla	0,7–0,95
Tetők		0,75–0,95
Gyepek (homokos talajon)	Lapos (lejtés<2%)	0,05–0,10
	Átlagos, (2%< lejtés <7%)	0,10–0,15
	Meredek, (lejtés>7%)	0,15–0,20
Gyepek (tömör talajon)	Lapos (lejtés<2%)	0,15–0,17
	Átlagos, (2%< lejtés <7%)	0,18–0,22
	Meredek, (lejtés>7%)	0,25–0,33

¹Forrás: Novotny et al., (1995) (eredeti: ASCE-WPCF Manual No. 9, ASCE, 1982).

Települési felszín szennyezőanyagainak jellemzői



- halmazállapot
 - szilárd por és szemét (szabadon / felülethez kötötten) → **szemcseméret!**
 - folyadékok (szabadon / szilárd szemcsékhez kötötten)
- kémia
 - **szervetlen szennyezők**
 - talajszemcsék, homok, fémek, ásványi rostok, cianidok, oldott sók
 - **szerves szennyezők**
 - biológiai eredetű szerves anyagok, olajok, zsírok
 - különféle fosszilis eredetű és szintetikus szénhidrogén vegyületek: korom, fagyálló adalékok, üzemanyag, kenőanyagok, növényvédő szerek
 - nem önállóan vannak jelen, hanem keverék formájában!
- mennyiség és toxicitás
 - „**mikroszennyezők**”: kis koncentrációban is mérgező hatásúak!
 - felhalmozódhatnak a szervezetben (pl.: nehézfémek)
 - rákkeltők (pl.: PAH-ok)

Városi felszín szilárd szemcsés szennyezőinek szemcsemérete



Melyik tesz ki nagyobb tömeget?

Melyik jelent nagyobb veszélyt?

- **szemét**

- durva frakció: $2 \text{ mm} <$ törött üvegek, építési törmelék, cigaretta csikkek, papír, növényi részek stb.
- finom frakció: $60 \text{ }\mu\text{m} < 2 \text{ mm}$ jellemzően a durva frakció aprózódásával jön létre

- **por**

- durva frakció: $10 \text{ }\mu\text{m} < 60 \text{ }\mu\text{m}$ jellemzően kopási folyamatok során keletkeznek, könnyen ülepednek
- finom frakció: $< 10 \text{ }\mu\text{m}$ jellemzően égésből és kopásból származnak, nehezen ülepednek

Tetőfelületekről származó szennyezőanyagok



- **Külső forrás:** légköri kiülepedés
 - környező területek finom szemcseméretű porkibocsátásaiból származik, száraz és nedves ülepedéssel kerül a tetőkre
 - mérték és összetétel szempontjából nagy területen homogénnek tekinthető, ill. időben is lassan változik
 - uralkodó szélirány befolyásolja
- **Közvetlen kibocsátások:** tető anyagvesztéség
 - tető anyagi minősége és kora meghatározó (cseréptetők, bitumenes tetők, fém tetők)
 - esetenként a környezeti tényezők is fontosak (hőmérséklet, UV-besugárzás, csapadék pH)



Tetőfelületekről származó szennyezőanyagok



- **Fontosabb vízminőségi paraméterek**
 - pH
 - vezetőképesség
 - lebegőanyag tartalom
 - szervesanyag tartalom
 - PAH
 - nehézfémek (Zn, Cu, Pb)
 - kórokozók
- **További felhasználástól függően tisztítás szükséges!**



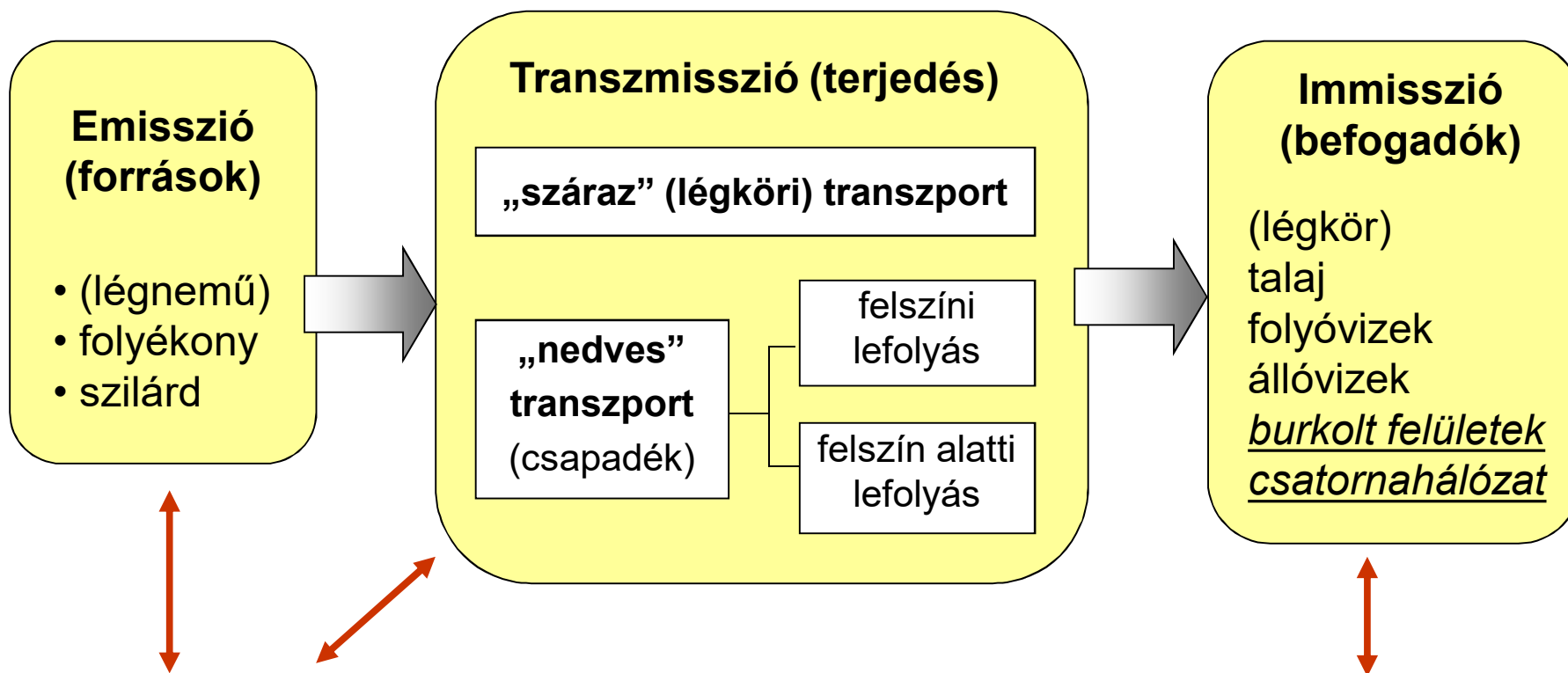
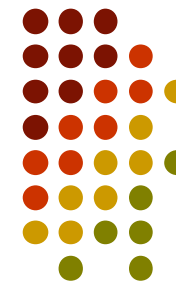
Közlekedési felületekről származó szennyezőanyagok



- **Külső forrás:** légtörő kiülepedés
- **Közvetlen kibocsátások:** igen összetett forrásmátrix

	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Cr	Sb	Fe	Ba	Ti	V	TPH	CN	Cl
fékbetét	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
gumiabroncs	✓		✓	✓								✓		
útburkolat	✓	✓	✓		✓	✓					✓	✓		
motorolaj	✓	✓	✓	✓	✓							✓		
égéstermék	✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓		
karbantartás		✓											✓	✓
galvanizált felületek	✓	✓			✓	✓		✓						

Szennyezőanyagok sorsa



emberi tevékenységek szerepe:

- növekvő kibocsátás
- terjedési útvonalak módosítása

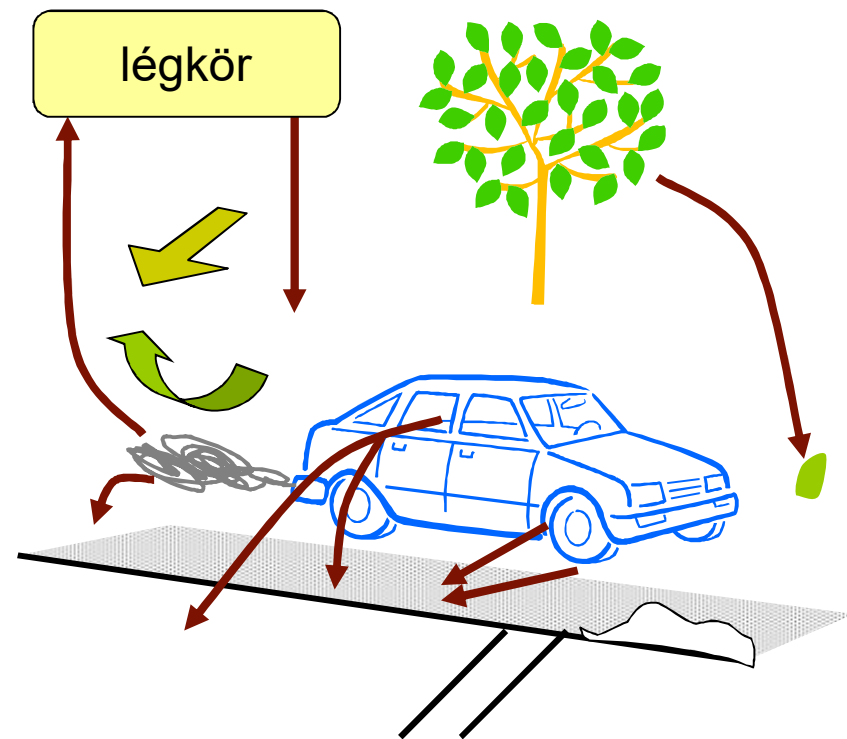
élővilágra gyakorolt hatások:

- felvétel légzéssel vagy táplálékkal
- toxikus vegyületek felhalmozódása

Száraz időszakban lejátszódó folyamatok

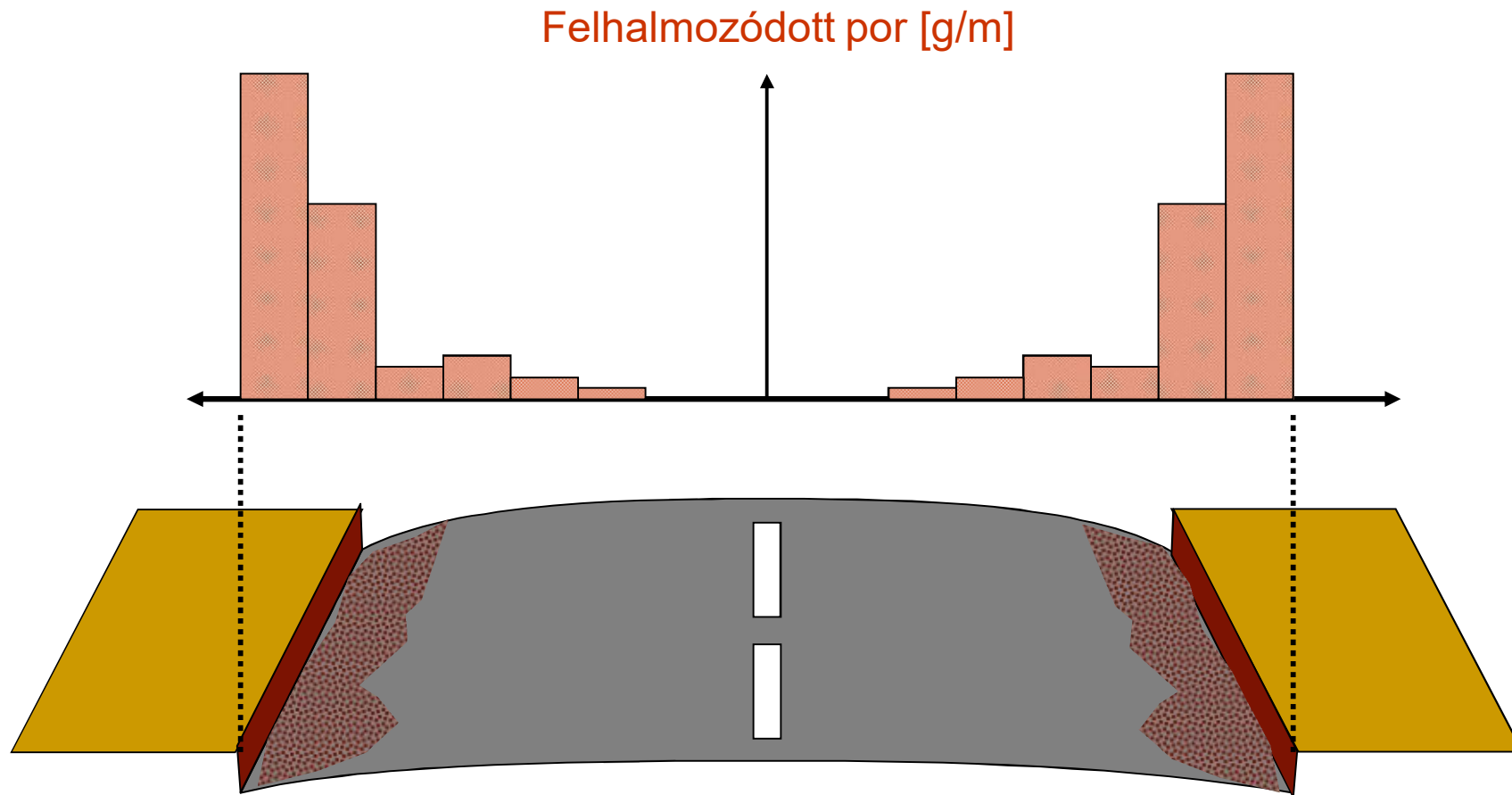


- Szennyezőanyagok forrásai
 - belső égésű motorok, fűtőművek (szilárd égéstermékek)
 - szemetelés, növényi hulladékok
 - korrózió, épített környezet mállása
 - közlekedés kopási folyamatai (fékbetét, gumiabroncs, útburkolat)
 - síkosságmentesítés
- Terjedési utak
 - szálló por, kiülepedés
 - szél, menetszél (felkeverés)
- Befogadók
 - léggör
 - útburkolat, tető, hó, talaj
 - járművek karosszériája



dinamikus egyensúly!

Szilárd szemcsés szennyezők térbeli eloszlása útfelületen



Az ülepedő por kb. 90%-a a padkától számított 1-1,5 m-en belül gyűlik össze!

Szilárd anyagok felhalmozódása útpadka mentén



- félempírikus leírás (*Novotny és Olem, 1994*)

$$\frac{dP}{dt} = I - \alpha \cdot P$$

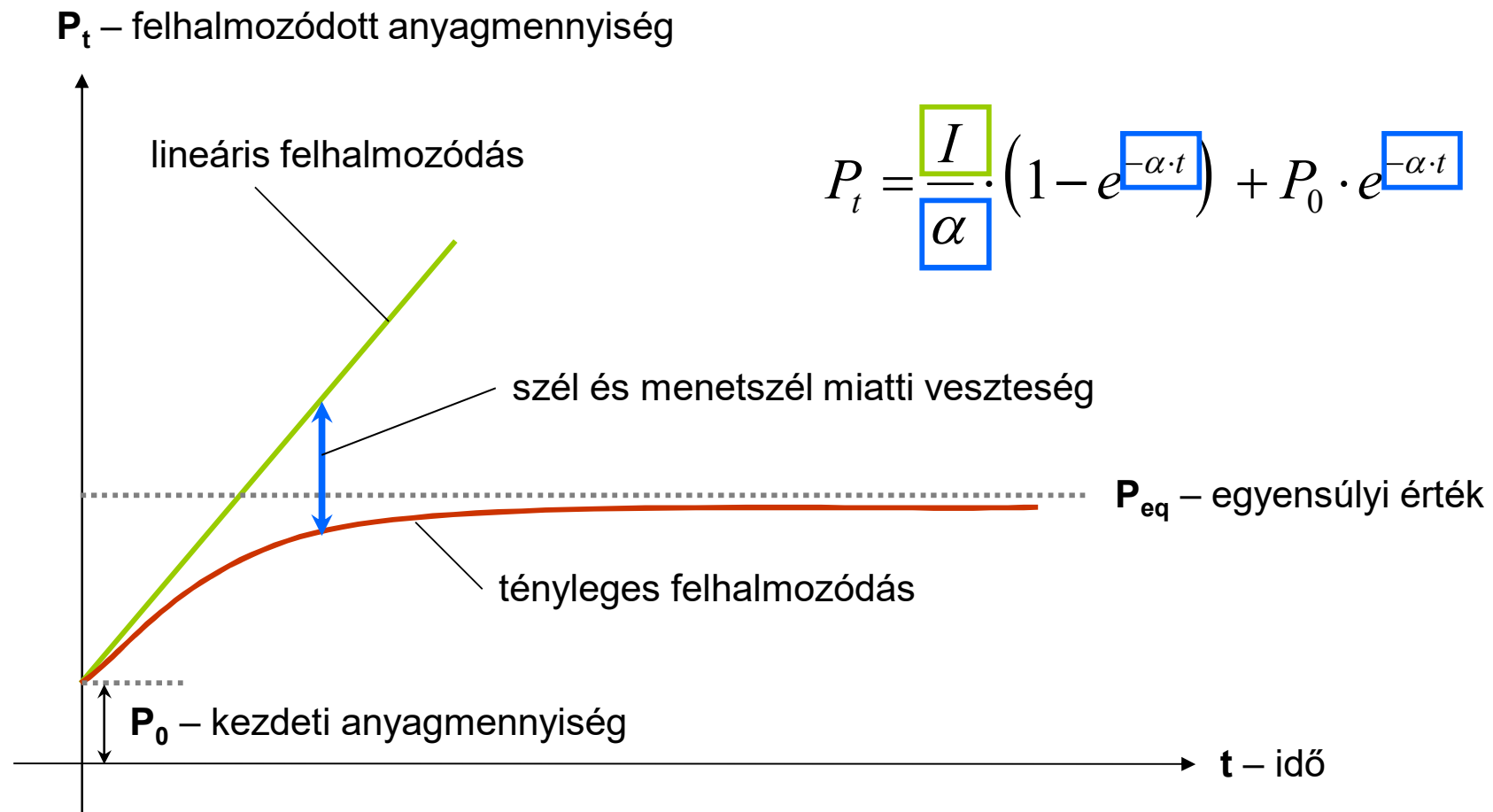
$$P_t = \frac{I}{\alpha} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t}) + P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

$$\alpha = a \cdot f(v_{forg}, v_{szél}) \cdot e^{-b \cdot H}$$

$$\alpha = 0,0116 \cdot (v_{forg} + v_{szél}) \cdot e^{-0,08 \cdot H}$$

P_t	padka menti terhelés [g/m]
I	lineáris felhalmozódás [g/m/nap]
α	eltávolítási együttható [nap ⁻¹]
t	idő [nap]
v_{forg}	forgalomsebesség [km/h]
$v_{szél}$	szélesebesség [km/h]
a, b	együtthatók (kalibrálandók)
H	padka magassága [cm]

Szilárd anyagok felhalmozódása útpadka mentén



Kibocsátás adatok az útmenti por két jelentős forrására



I = f (forgalom, járműtípus, dinamika, útállapot)

1. táblázat. Fajlagos fékkopás emissziók (mg/jármű-km).

Adatforrás	személyautók	kistehergépjárművek	tehergépjárművek
Legret és Pagotto (1999) ^a	20	29	47
Garg et al. (2000) ^b	11–17	29	-
Luhana et al. (2004) ^c	9 (2–21)	-	-
Westerlund K-G (2001)	17	-	84

^a Gyártó által megadott adatok alapján becsült értékek.

^b Fékbetétek élettartama, átlagos tömege és lekopó hányada alapján becsült érték.

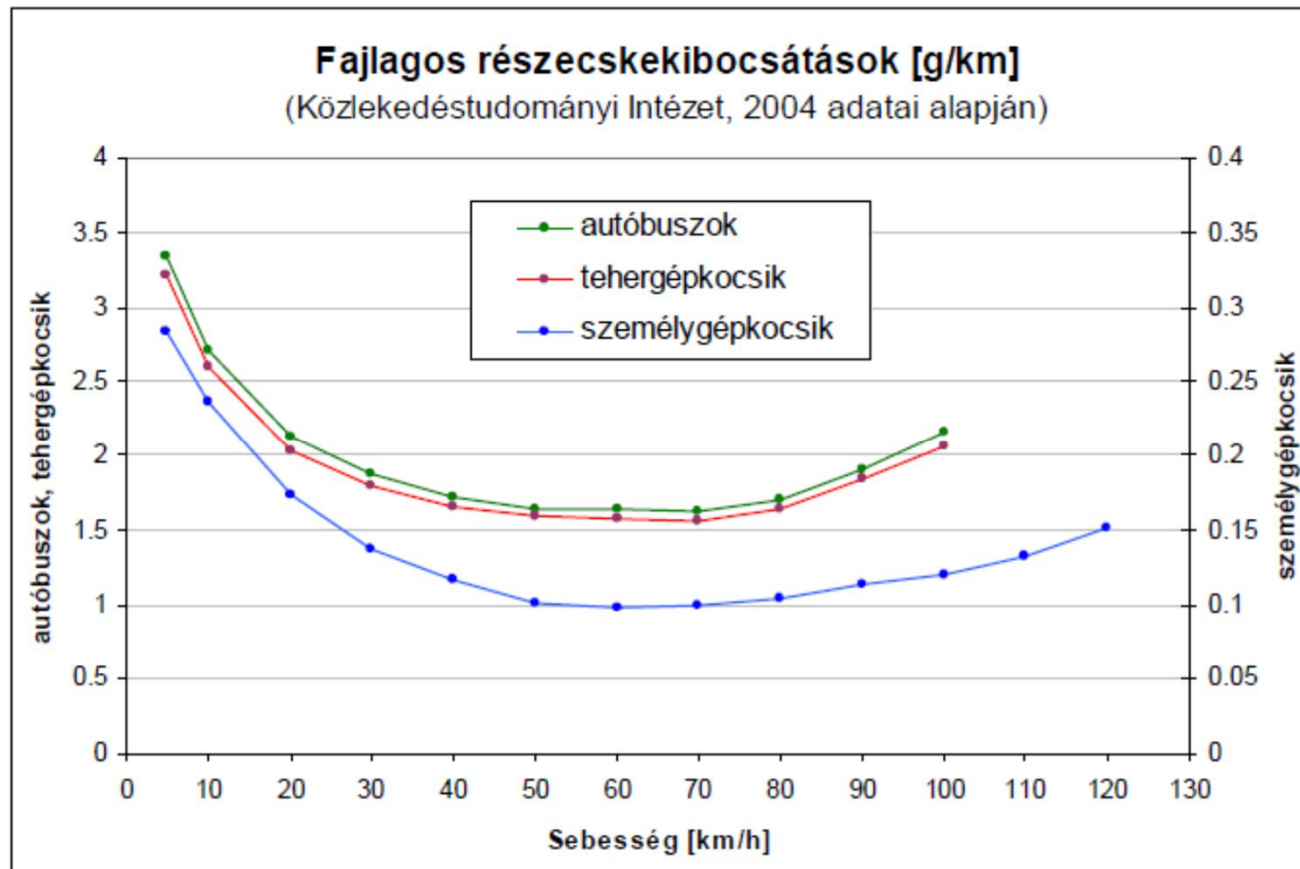
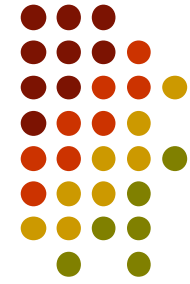
^c Öt különböző személyautó használat során bekövetkezett fékbetét tömegveszteségének mért értékei.

2. táblázat. Gumiabroncs kopás emissziók könnyű járművek (személygépkocsik) esetén.

forrás	módszer	fajlagos abroncs kopás (mg/jármű-km)
Luhana et al. (2004)	mért	97
Kolioussis és Pouftis (2000)	mért	40
Sakai (1996)	mért	92 / 168 / 292 (óvatos / normál / agresszív vezetési stílus)
Council et al. (2004)	becsült	100–200
Legret és Pagotto (1999)	becsült	68

(Budai Péter, 2011)

Kipufogó eredetű részecske emissziók



sebességfüggés

**járműtípusonként
eltérő értékek**

részecskeméret !

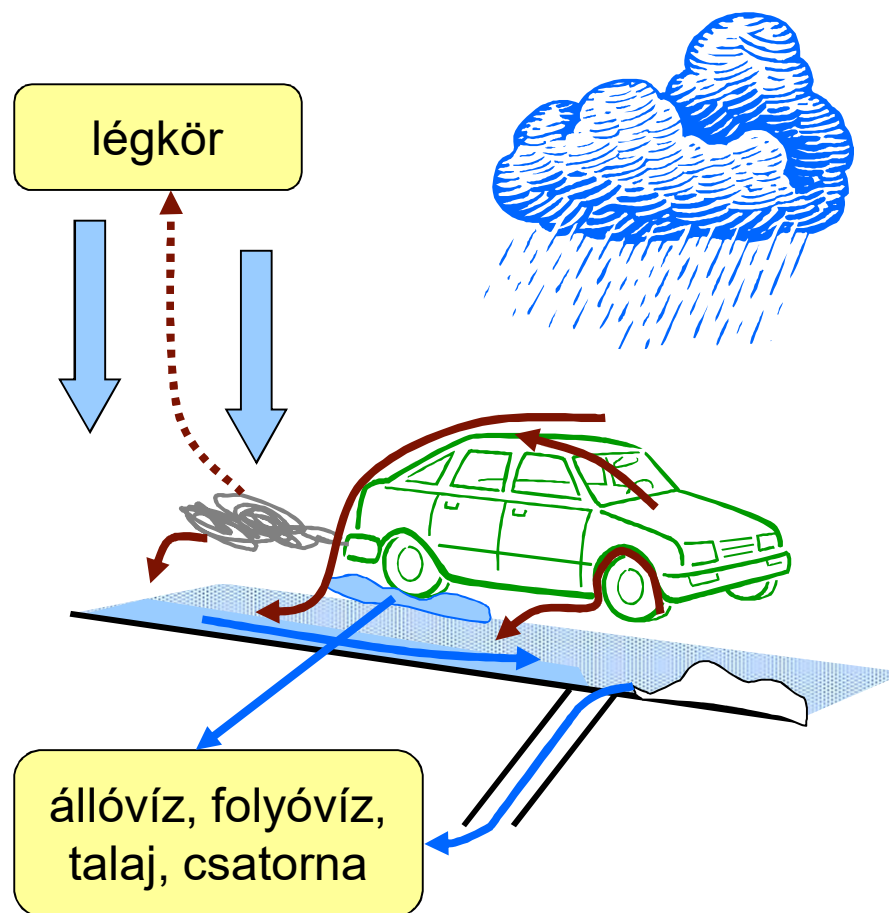


**üledő hányad
részaránya kicsi**

Csapadékos időszakban lejátszódó folyamatok



- További források
 - nedves kiülepedés
 - útburkolat lemosódás
 - kerék és alváz lemosódás
 - karosszéria lemosódás
 - olvadó hó
- További terjedési utak
 - felszíni lefolyás
 - fröcskölés, permetezés
- További befogadók
 - szennyvíztelep, talaj, folyó-, vagy állóvíz (gyakran művi)



Szilárd anyagok lemosódása útpadka mellől



- félempírikus leírás (*Sartor és Boyd, 1972*)

$$\frac{dP}{dt} = -K_U \cdot r \cdot P$$

$$P_t = P_0 \cdot \left(1 - e^{-K_U \cdot r \cdot t}\right)$$

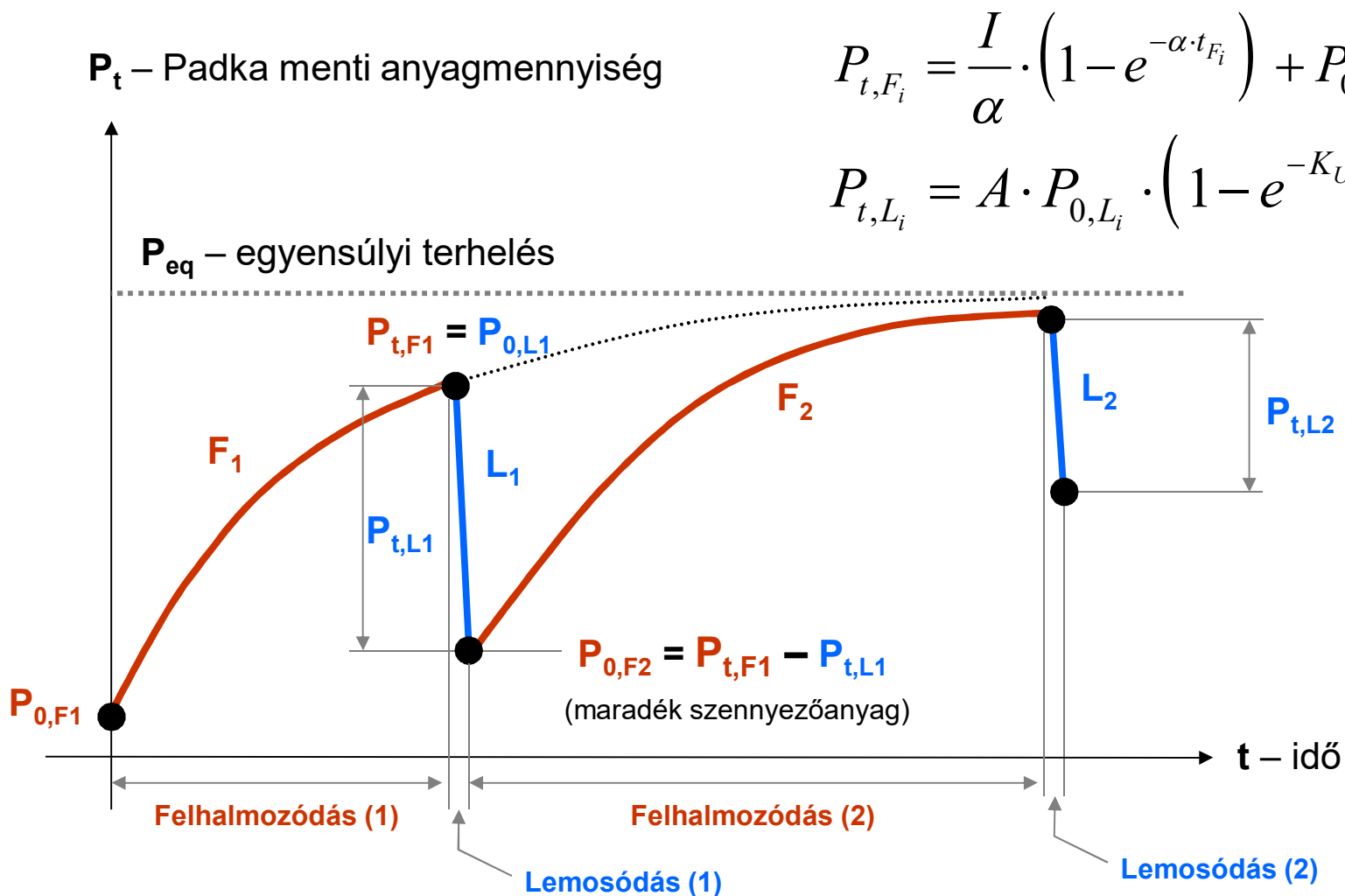
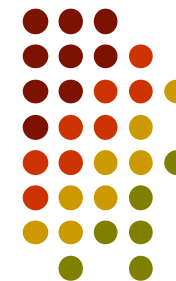


*Hydrologic Engineering
Center, 1975*

$$P_t = A \cdot P_0 \cdot \left(1 - e^{-K_U \cdot r \cdot t}\right)$$

P_t	szennyezőanyag mennyisége [g/m]
K_U	városi lefolyási együttható [mm^{-1}]
r	csapadékintenzitás [mm/h]
t	idő [h]
P_0	a csapadékesemény kezdetekor rendelkezésre álló anyagmennyiség [g/m]
P_t	a csapadékesemény során <u>lemosott</u> anyagmennyiség [g/m]
A	elérhetőségi tényező [-]

Szilárd anyagok lemosódása útpadka mellől



$$P_{t,F_i} = \frac{I}{\alpha} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t_{F_i}}) + P_{0,F_i} \cdot e^{-\alpha \cdot t_{F_i}}$$

$$P_{t,L_i} = A \cdot P_{0,L_i} \cdot (1 - e^{-K_U \cdot r_{L_i} \cdot t_{L_i}})$$

Szennyezőanyagok sorsa a csapadékvíz lefolyásban



- fizikai transzport vízáramlás hatására
 - szemcsék elsodrása és görgetése
 - ülepedés / felúszás

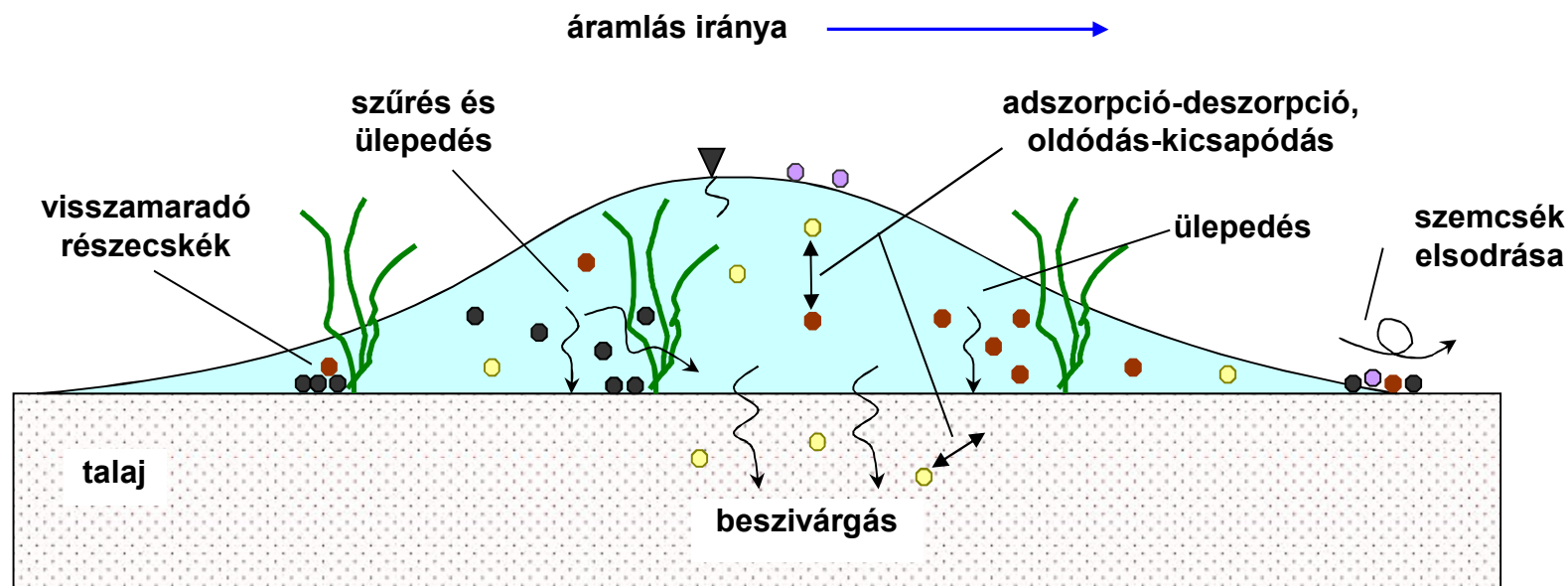
} csapadék intenzitása, áramlás sebessége, szemcsék fajsúlya, mérete
- kémiai folyamatok a lefolyásban
 - adszorpció / deszorpció
 - oldódás / kicsapódás

} pH, redox potenciál, kontaktidő, telítési koncentráció, hőmérséklet
- fizikai transzport gördülő kerekek hatására
 - erőteljes nyomó- és szívóerők → forgalom nagysága és sebessége
- fizikai-kémiai folyamatok vízáteresztő felületeken
 - szűrés, adszorpció/deszorpció → anyagok fiziko-kémiai minősége

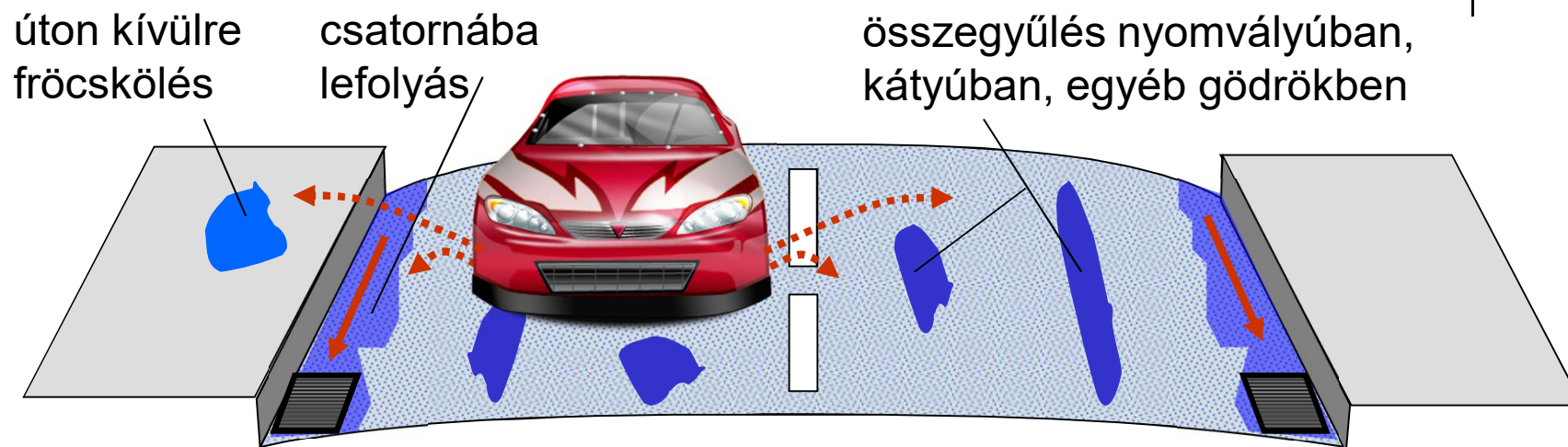
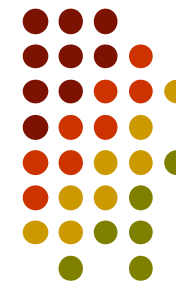
Szennyezőanyagok sorsa nedves transzport során



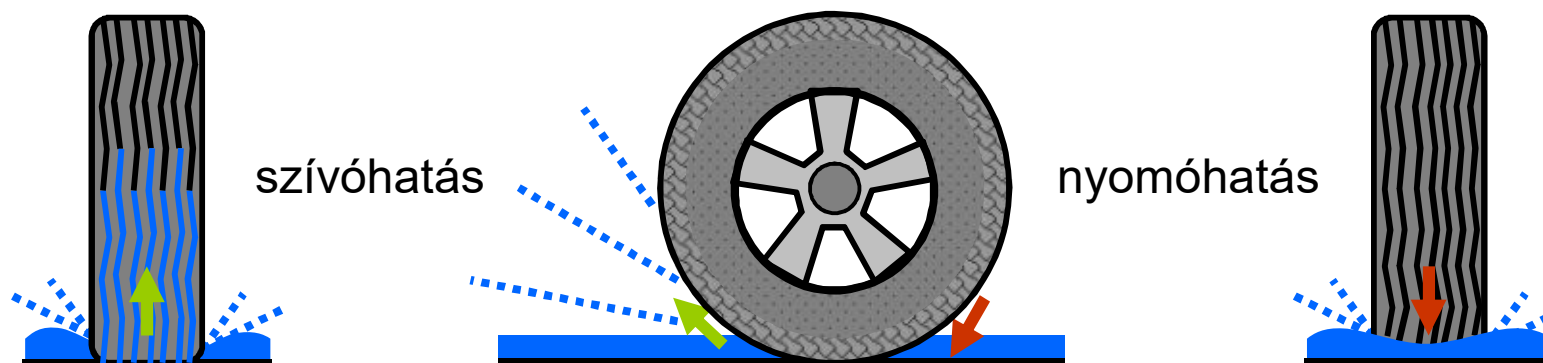
- szemcsék elsodrása (erózió)
 - ülepedés, szűrés (szilárd részecskék)
 - beszivárgás (oldott anyagok)
 - adszorpció és deszorpció
 - oldódás és kicsapódás
- Szemcsés anyagok (nehéz frakció)
 - Szemcsés anyagok (könnyű frakció)
 - Oldott anyagok
 - Úszó anyagok



Szennyezőanyagok sorsa a csapadékvíz lefolyásban



A csapadékesemény idején közlekedő járművek jelentős hatást gyakorolnak a csapadékvíz lefolyás szennyezettségére. Az útfelület minősége is fontos tényező.



Ideálistól eltérő burkolat esetén előforduló „anomáliák”

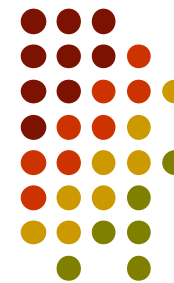


csapadék után visszamaradó lefolyástalan tócsa (Budafoki út)

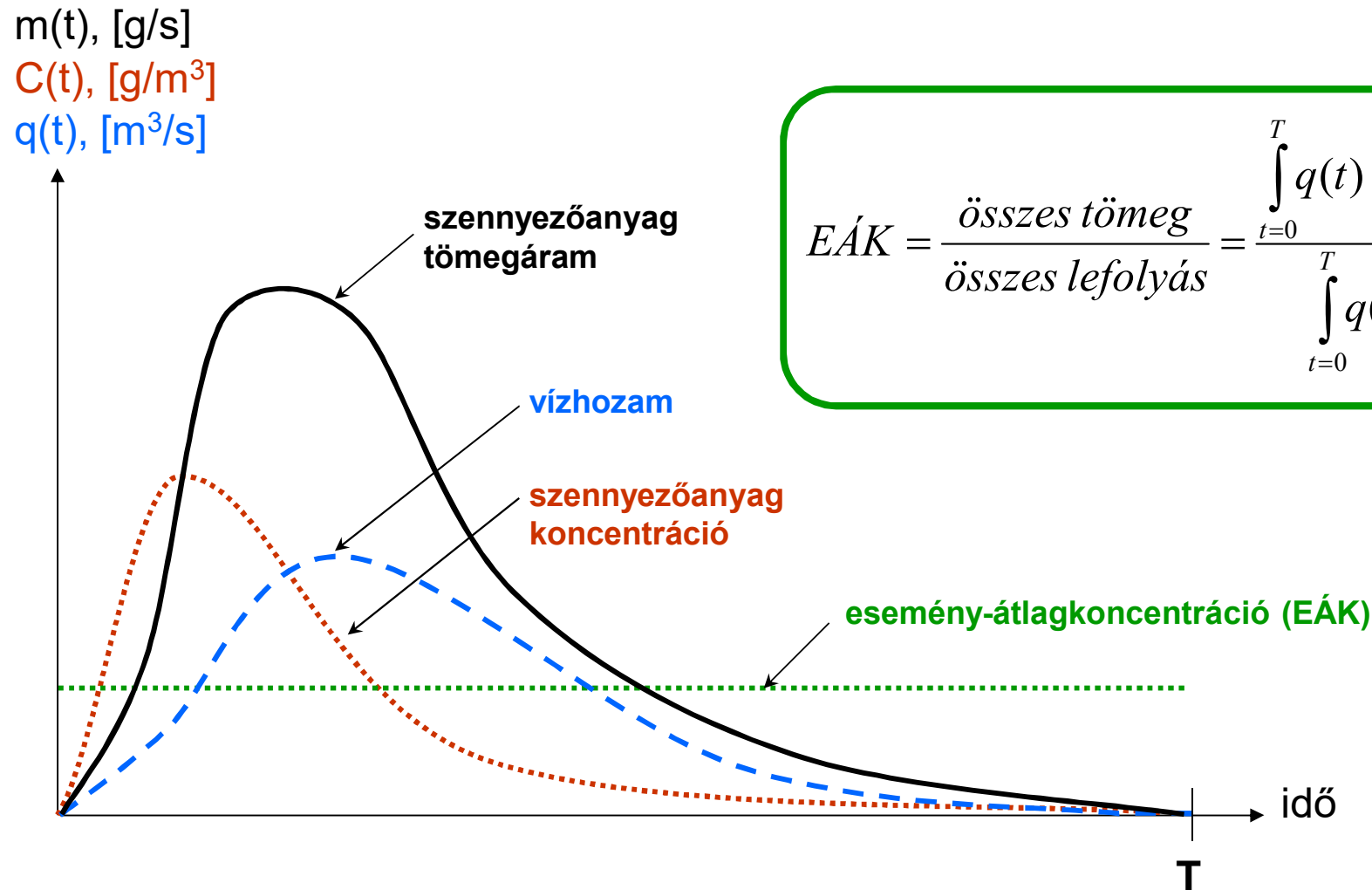
tócsából visszamaradt szennyezőanyag lerakódás (Budafoki út)



Néhány példa...

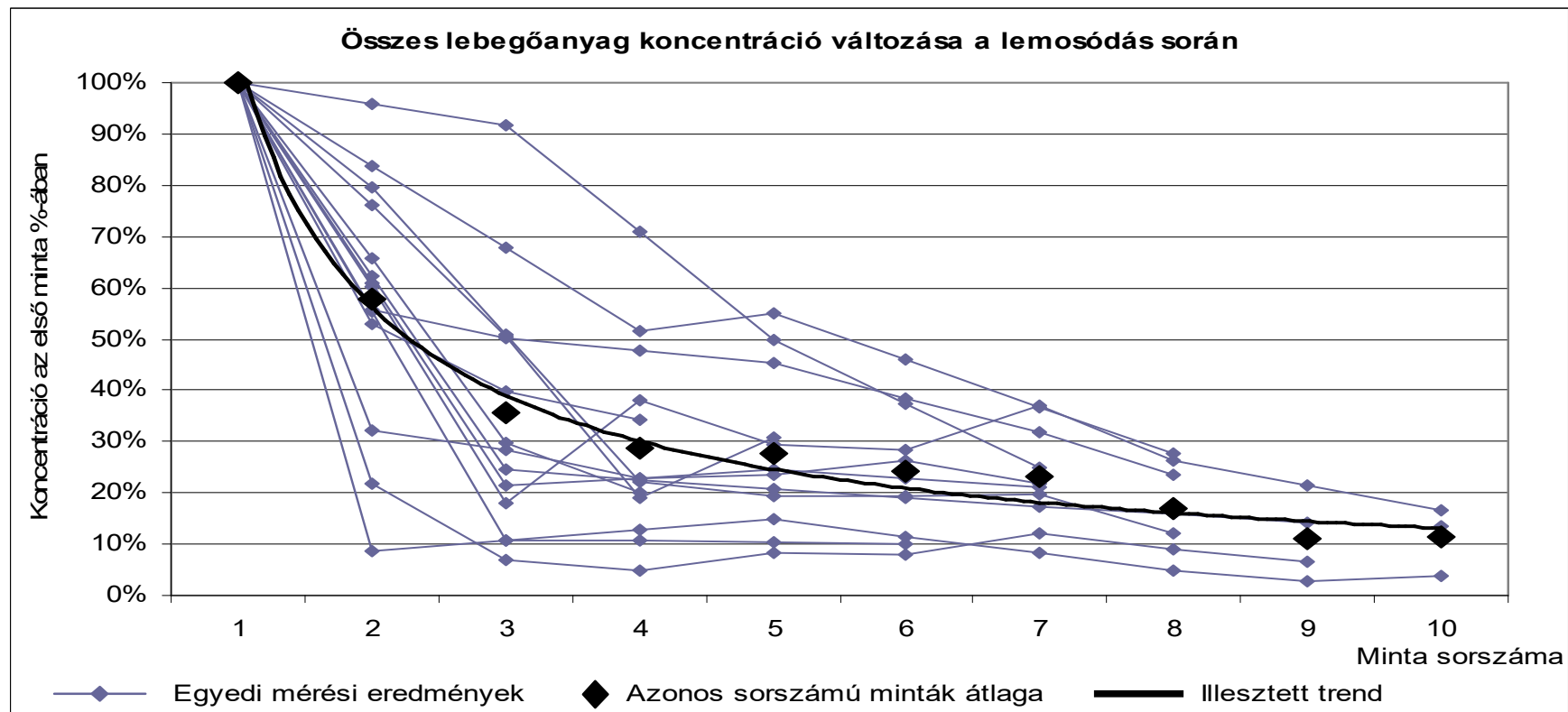


A „first flush” és az „esemény- átlagkoncentráció” fogalma



$$EÁK = \frac{\text{összes tömeg}}{\text{összes lefolyás}} = \frac{\int_{t=0}^T q(t) \cdot C(t) dt}{\int_{t=0}^T q(t) dt}$$

Tipikus „first flush” jelenség

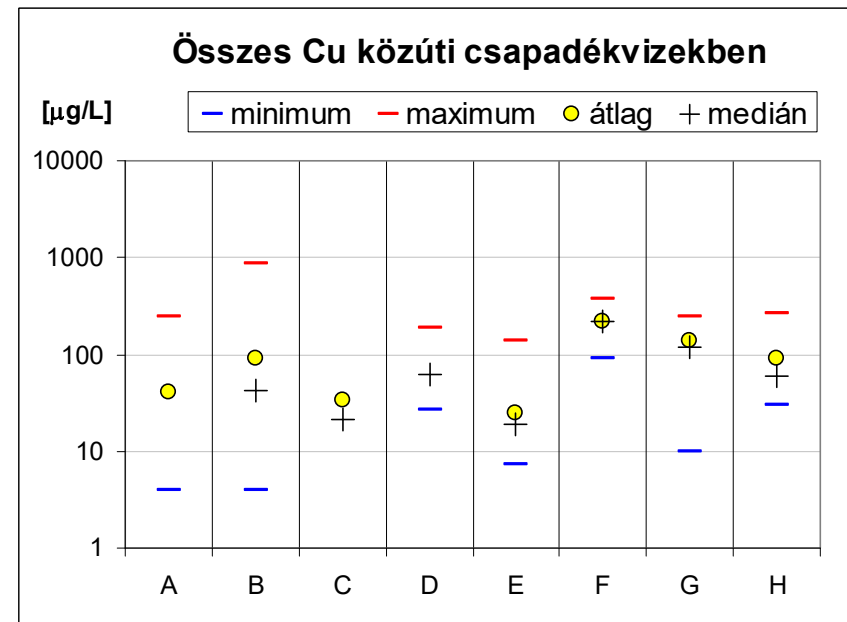
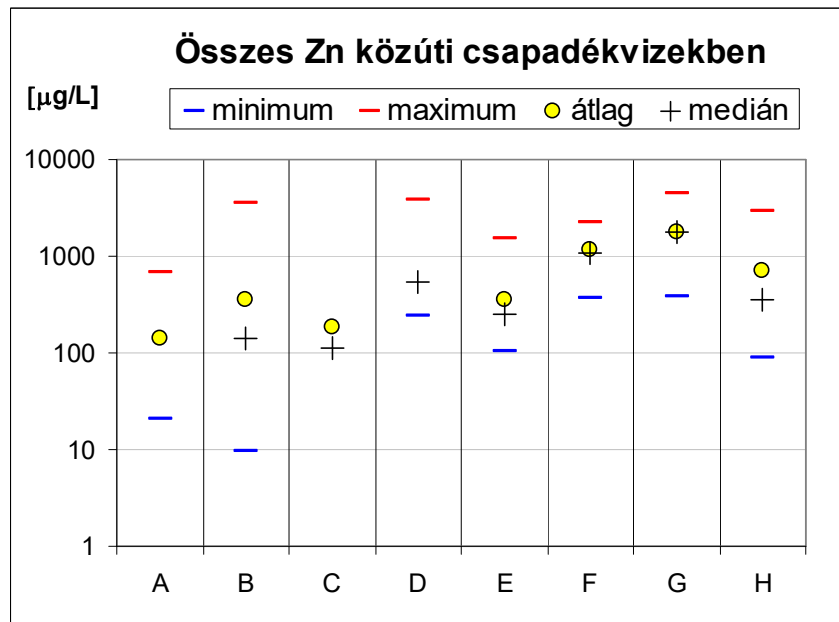


forrás: Buzás Kálmán, 2009

Csapadékvíz lefolyás nehézfém szennyezettsége



- nemzetközi mérési programok összehasonlítása
 - nagyságrendnyi különbségek (EÁK) – mi lehet az oka?

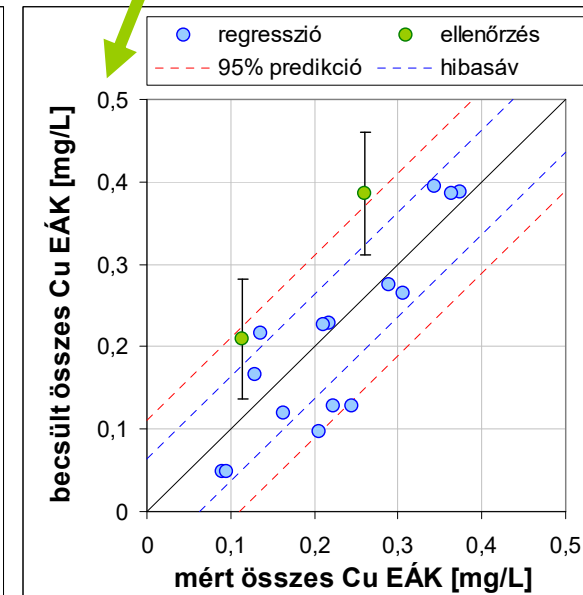
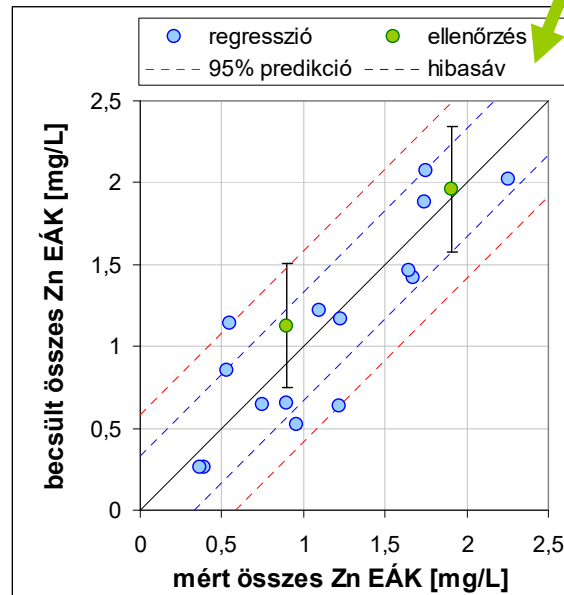


A lefolyás szennyezettségét befolyásoló tényezők



	Levegőanyag	KOI	TPH	PAH	Ö. Zn	Ö. Cu	Ö. Pb	Ö. Ni
Csapadékmagasság	●	●	●●					
Csapadékintenzitás	●	●						
Megelőző száraz időszak	●●	●●		●●	●●	●●	●●	●●
Aktuális forgalom	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●

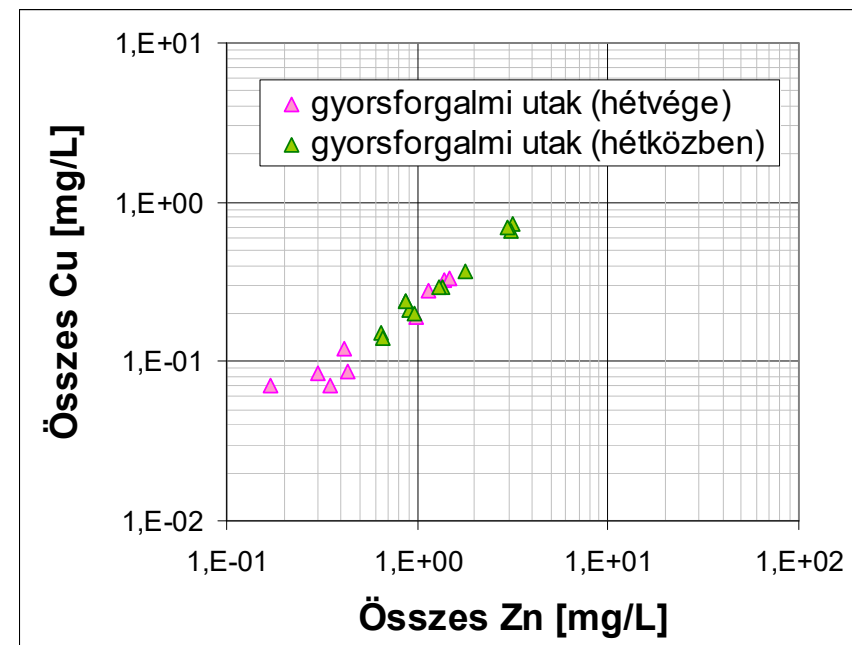
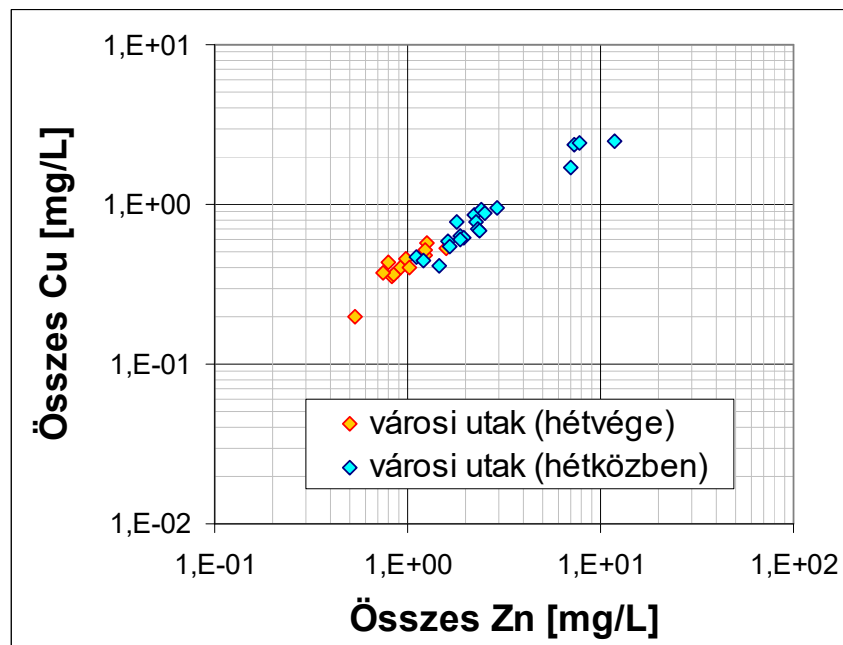
- fix helyszín (M0)
- másfél éves vizsgálat
- befolyásoló tényezők statisztikai elemzése (többváltozós lineáris regresszió)



Forgalom dinamika hatása a szennyezettségre

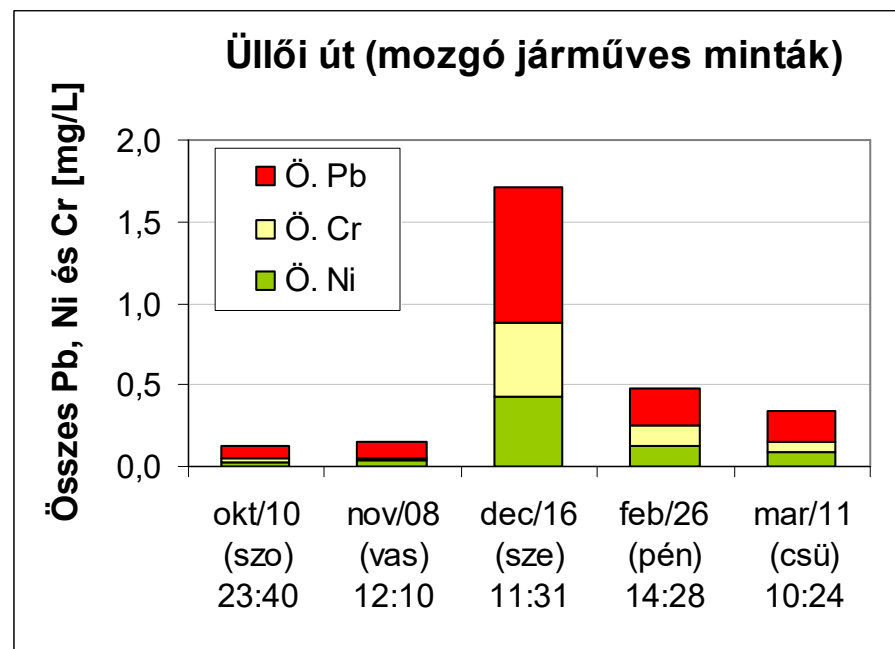
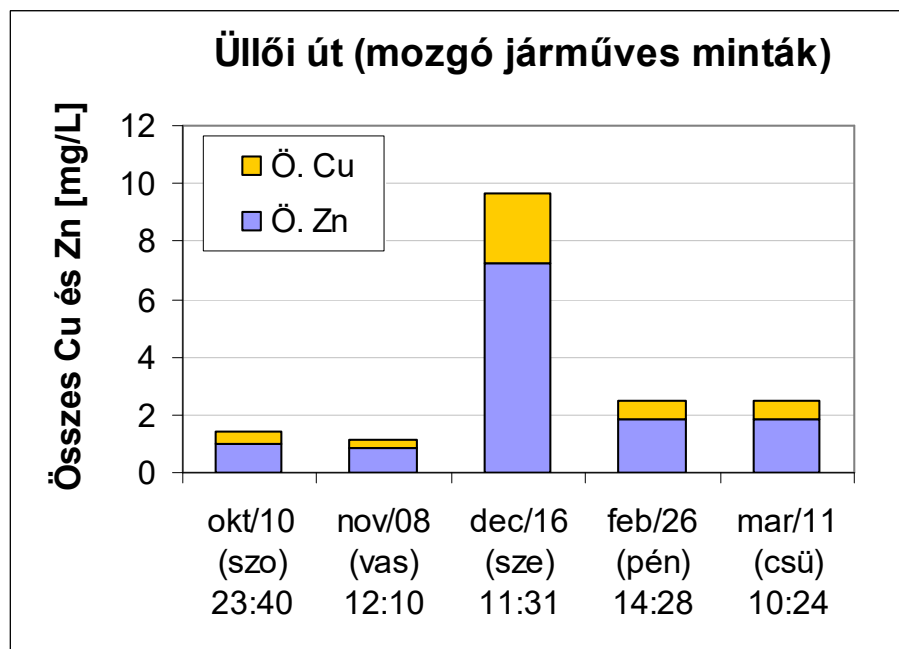


- belterületi és gyorsforgalmi utak eltérnek
 - településen belül gyakoribb a fékezés/gyorsítás és a kanyarodás
- hétköznapokon és hétvégén vett minták eltérnek
 - itt is megmutatkozik a forgalomteljesítmény szerepe



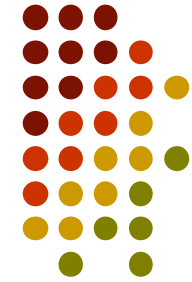
(Budai Péter, 2011)

A hó, mint átmeneti gyűjtőközeg szerepe

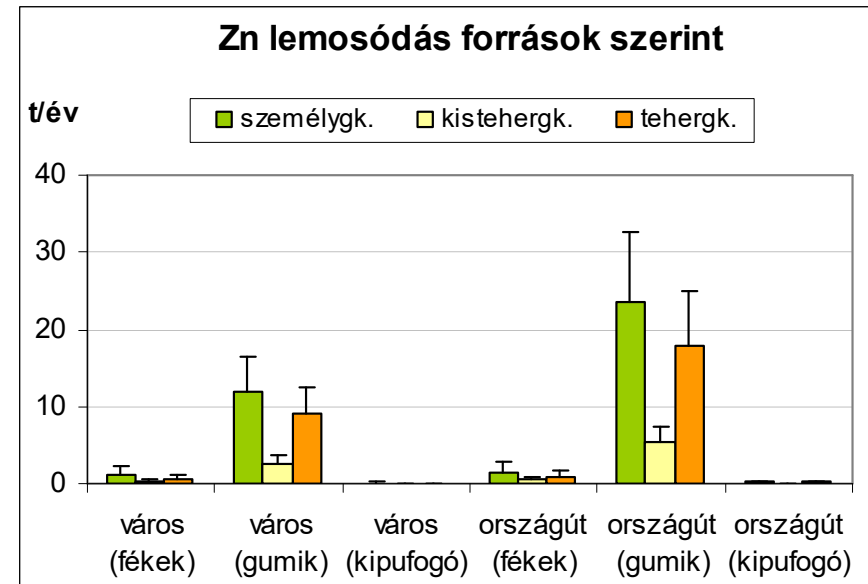
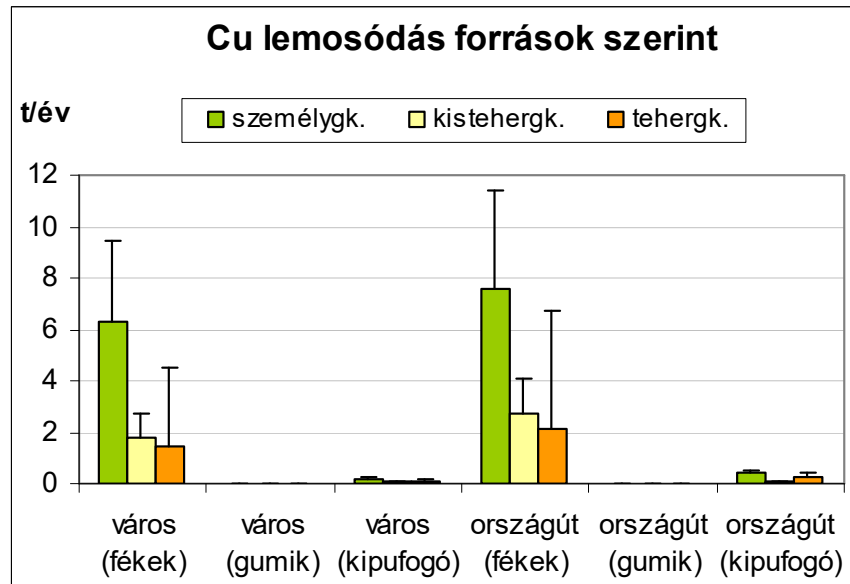


Hóléből származó minták nehézfém koncentrációi durván egy nagyságrenddel magasabbak a csapadék-lefolyásból vett mintákéinál

Közlekedési forrásból származó nehézfém lemosódás becslése



- országos szintű becslés eredményeiből
 - kibocsátó források szerepe
 - évente több 10 tonnás nagyságrendű nehézfém lemosódás



forrás: Budai Péter, 2011

Települési felszín és csapadékvíz lefolyás szennyezettségét befolyásoló tényezők – összegzés



- légszennyezettség mértéke
- beépítettség és átszellőzés
- csapadék intenzitása, mennyisége és pH értéke
- épített környezet (különösen a tetők) anyagösszetétele
- útburkolat anyaga (aszfalt/beton) és állapota
- járművek típusa (könnyű/nehéz) és állapota
- kopó járműalkatrészek, üzemanyag, kenőanyagok összetétele
- forgalom nagysága és dinamikája a csapadékesemény során és az azt megelőző száraz időszakban
- az egyes tényezők fontossága szennyezőanyagonként eltérő

Szennyezés megelőzés és eltávolítás lehetőségei



- **beavatkozás helye szerint**

- kibocsátás csökkentése
- terjedés akadályozása, késleltetése
- környezetből való eltávolítás

nem súrlódáson alapuló fékek

- **beavatkozás módja szerint**

- műszaki megoldások
- egyéb intézkedések

forgalomszervezés

- **szilárd részecskék eltávolítása**

- ülepedés
- szűrés

lefolyást csökkentő és késleltető
vízelvezető rendszerek

- **oldott anyagok eltávolítása**

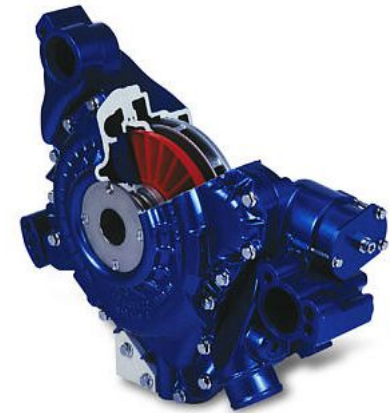
- adszorpció (felületi megkötés)
- kicsapás (vegyszeres)
- növényi felvétel

szennyezőanyagok leválasztása
a csapadék lefolyásból

Alternatív fékrendszerek (tartós fékek)



- részben ma is alkalmazzák ezeket
- típusai
 - motorfékek (motorfék, kipufogófék)
 - visszafojtás
 - hidraulikus (hidrodinamikus) fékek
 - folyadék súrlódás
 - örvényáramú fékek
 - elektromágneses ellenhatás
- nem egyenletes fékhatás



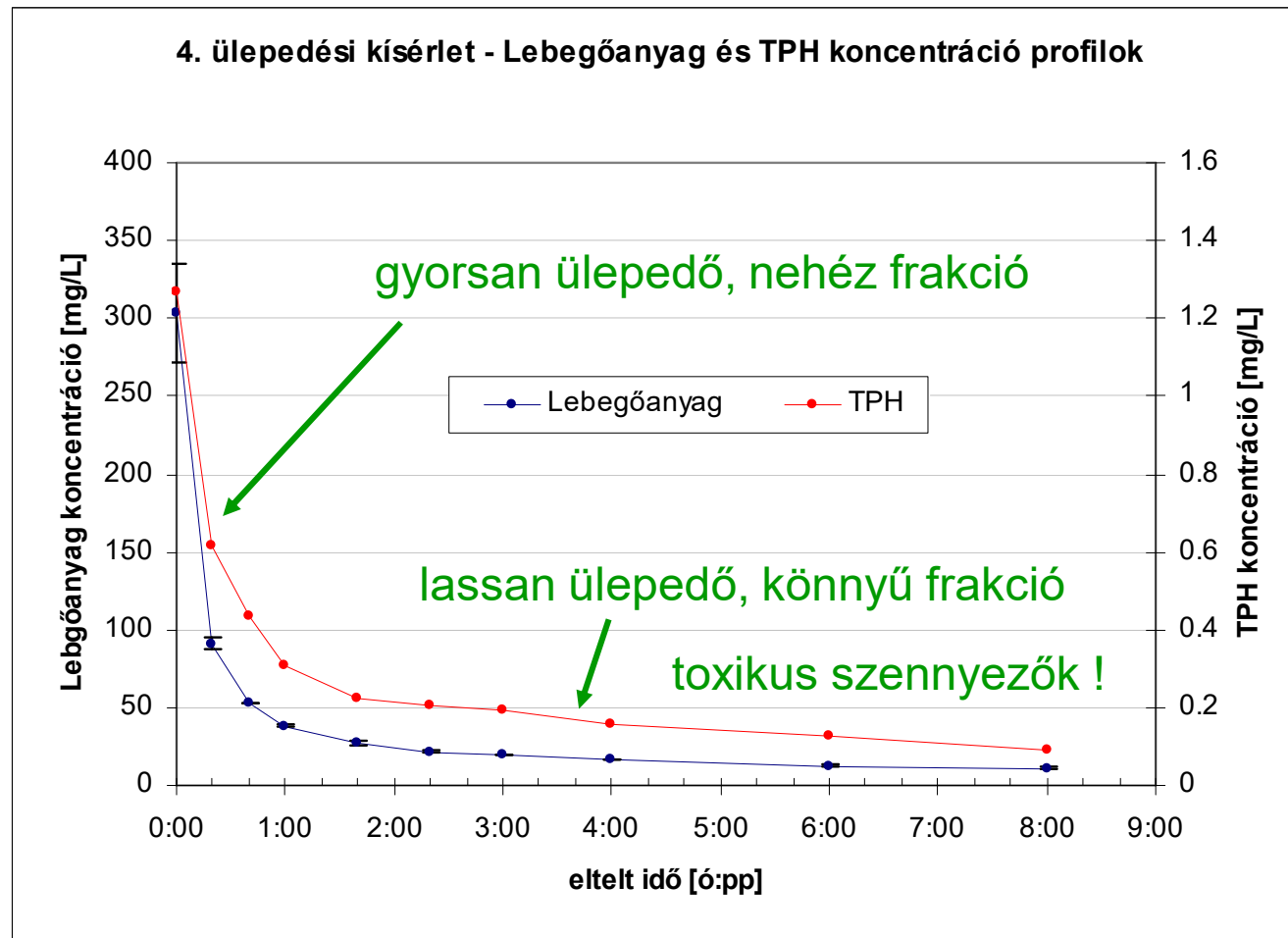
nagy méret és súly
hűtést igényelnek,
költségesek

Kibocsátott szennyezőanyagok terjedésének megakadályozása



- légszennyező anyagok esetében nincs erre lehetőség
- burkolt felületeken felhalmozódó anyagok
 - utcaseprő gépek (emberek)
 - a finom por frakciót illetően kis hatékonyságú módszer
 - rendszerességtől függ
(naponta végezve: ~50%-os hatásfok; 2-4 hetente: ~5%; nagy átlagban: ~10%)
 - útmosás
 - a finom port is eltávolítja, de az útfelülethez tapadt anyagmennyiséget nem, szennyezett lefolyást eredményez
- csapadékvíz/útmosás által lemosott szennyezőanyagok
 - kiülepedés burkolt/zöldfelületen, mederben vagy csatornában
 - beszivárgás talajba, felszáradás utáni visszakeveredés
 - élőlények általi felvétel (spec. eset: szennyvíztelep iszapja)

Csapadékvíz kezelés (szabad ülepedés)

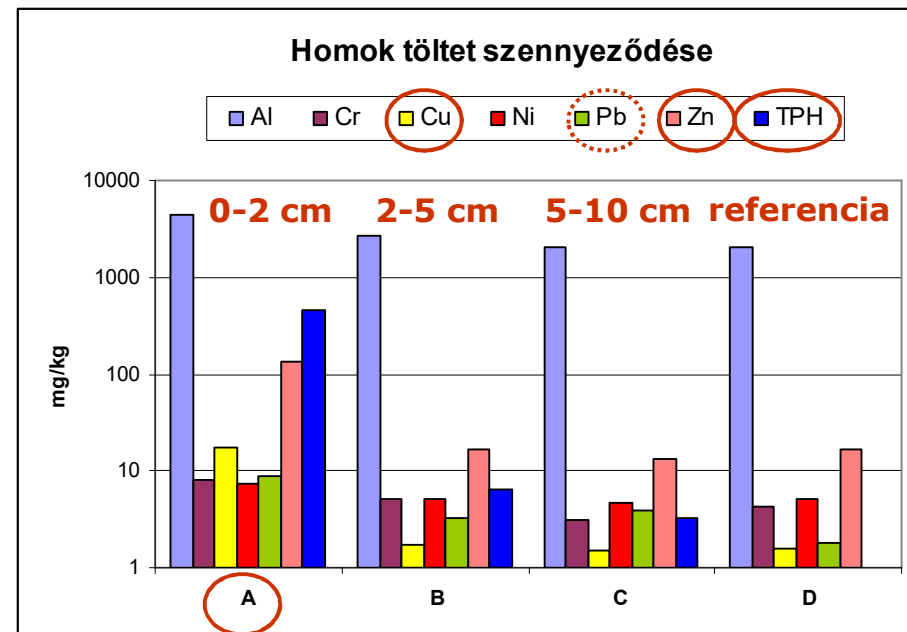


(Budai Péter, 2008)

Csapadékvíz kezelés (szűrés homok tölteten)



	TPH mg/kg	T. PAH mg/kg	Al mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
A	447	0.474	4370	7.95	17.4	7.36	8.95	134
B	6.3	nd	2740	5.12	1.74	5.14	3.2	16.3
C	3.2	nd	2000	3.06	1.49	4.64	3.94	13.1
D	-	-	2040	4.24	1.57	5.04	1.83	16.9

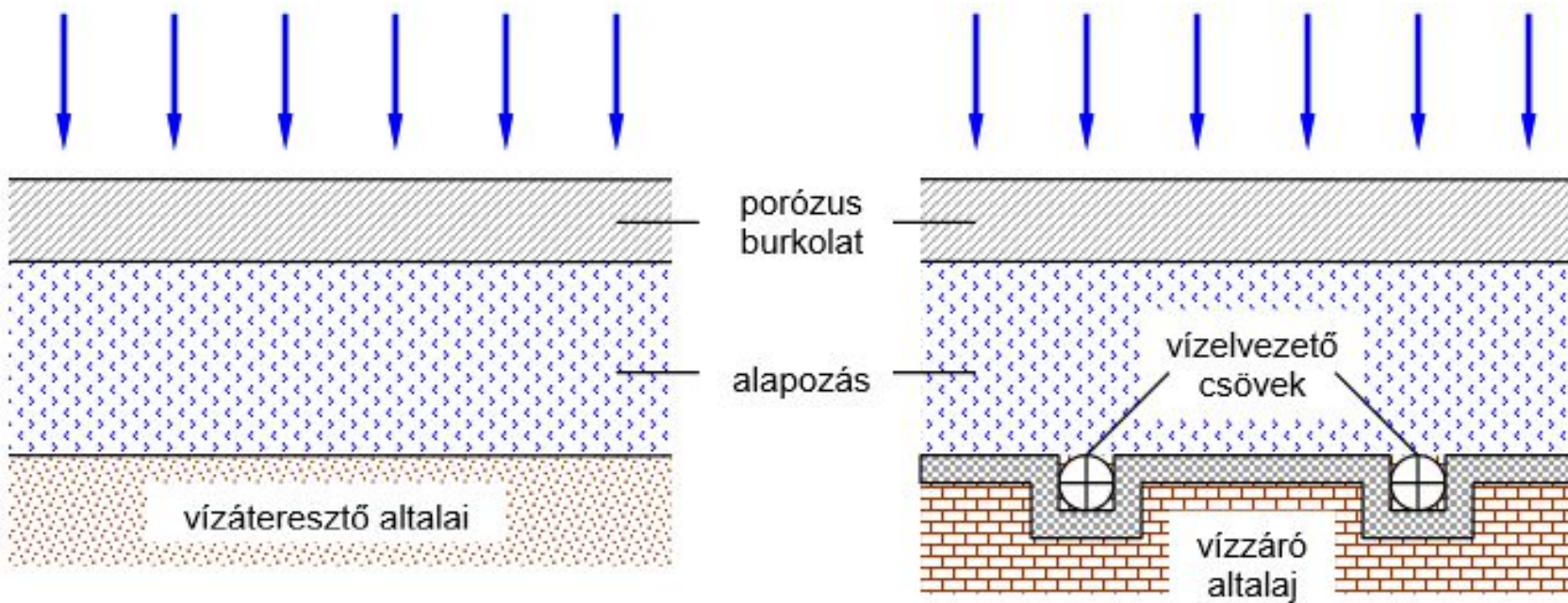


Vízáteresztő burkolatok



- **térköves burkolatok**
 - kis terhelhetőség → csak korlátozottan alkalmazható
- **porózus aszfalt**
 - közúzalékból kihagyják a finom szemcseméretű frakciót → nagy hézagterefogatú, vízáteresztő burkolat jön létre (ZOAB)
- **„porózus aszfalt” előnyei**
 - a csapadékvíznek csak kb. 20%-a folyik le az út felszínén
 - a pórusos anyagszerkezet szűrő-adszorber szerepet is betölt → a beszivárgott víz szennyezőanyag tartalmának egy részét „helyben tisztítja” → alacsonyabb elfolyó koncentrációk
 - zajterhelés is csökken
- **„porózus aszfalt” hátrányai**
 - dinamikus igénybevételt kevésbé bírja → parkolók, gyorsforgalmi utak
 - eltömődés (jellemzően több év intenzív használat után) → tisztítani kell

Kialakítási lehetőségek

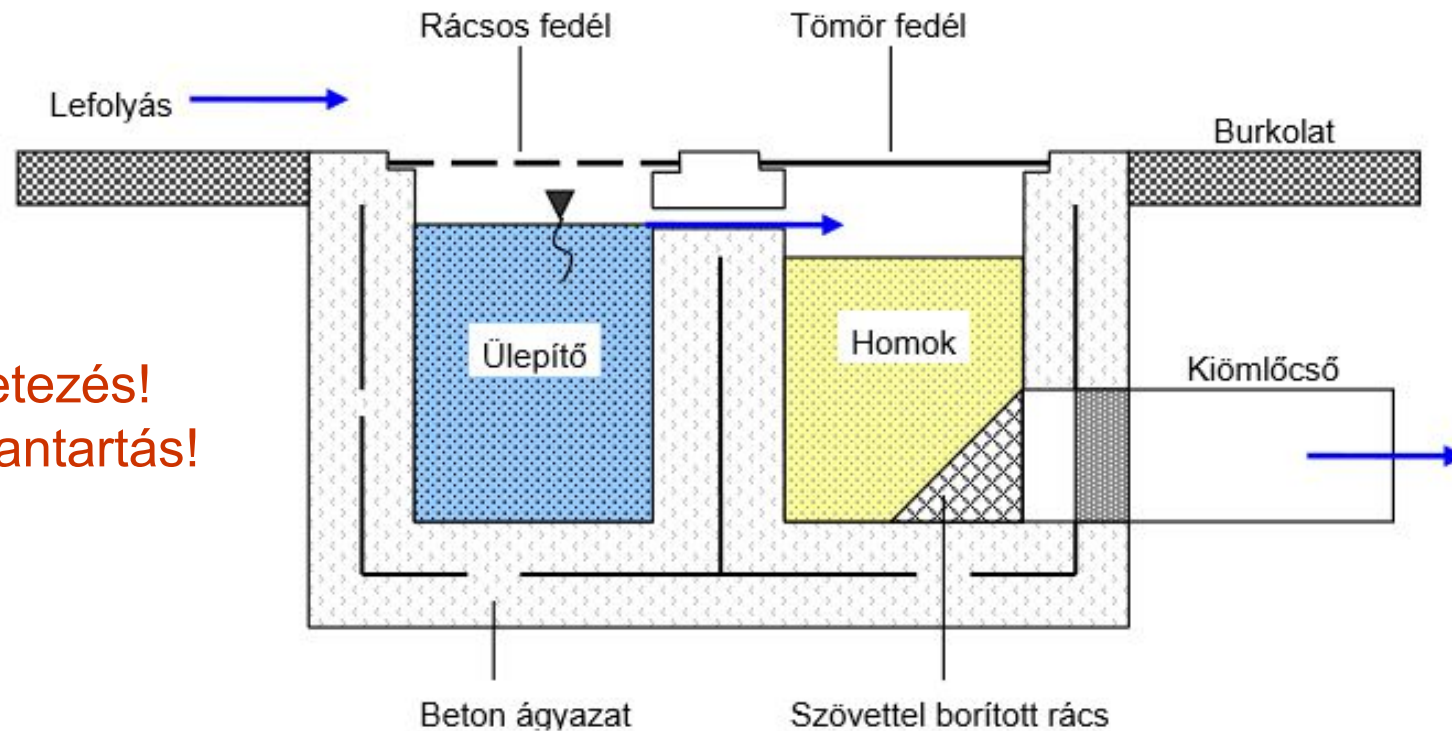


forrás: Novotny és Olem, 1994

Módosított (vízminőség-javító) csatorna beömlők



- méretezés!
- karbantartás!

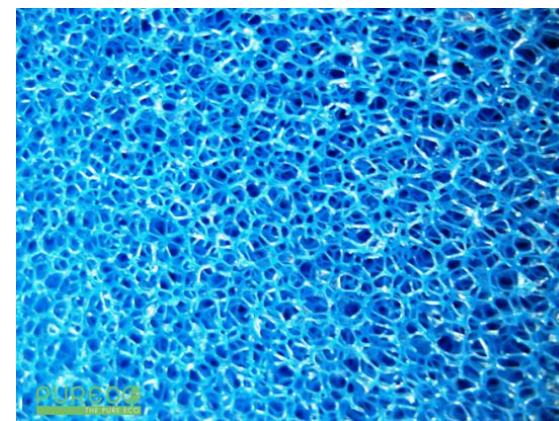


forrás: Novotny, 1995

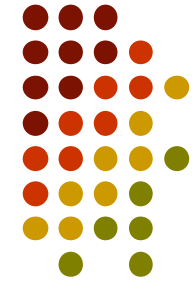
Olajfogók



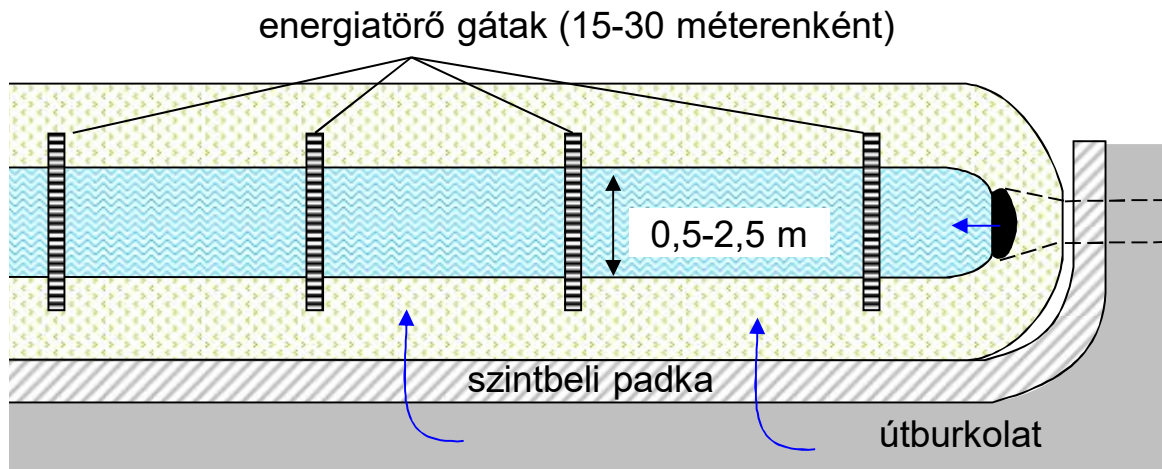
- a víz felszínén úszó olaj és zsír szennyeződések megkötése
 - oleofil töltetek és szűrőbetétek
- csapadékvíz kényszerpályára irányítása
 - kisebb vízhozamok esetén: átfolyatás a szűrőtölteten
 - nagyobb vízhozamok: vízvezető csatornába / tározóba épített bukó
- jellemzően havária eseményekre



Füvesített vízelvezető árkok (grass swales)

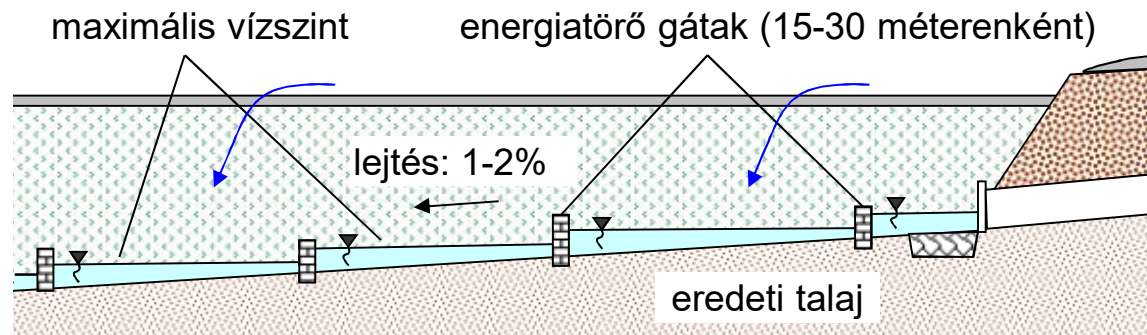


felülnézet



Fotó: Virginia Stormwater Management Program

oldalnézet



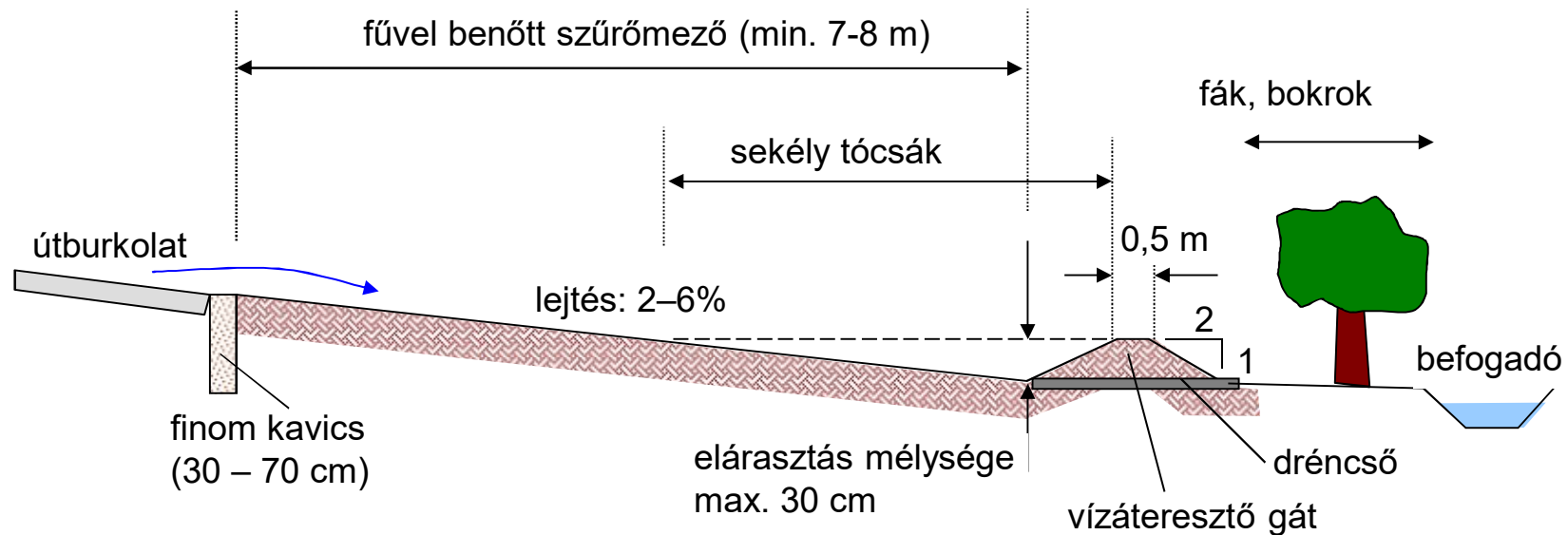
Fotó: State of Delaware Stormwater Quality Program

(Claytor és Schueler, 1996 nyomán)

Pufferzónák kialakítása (buffer strips)



- nagy helyigény → egyéb funkciók?



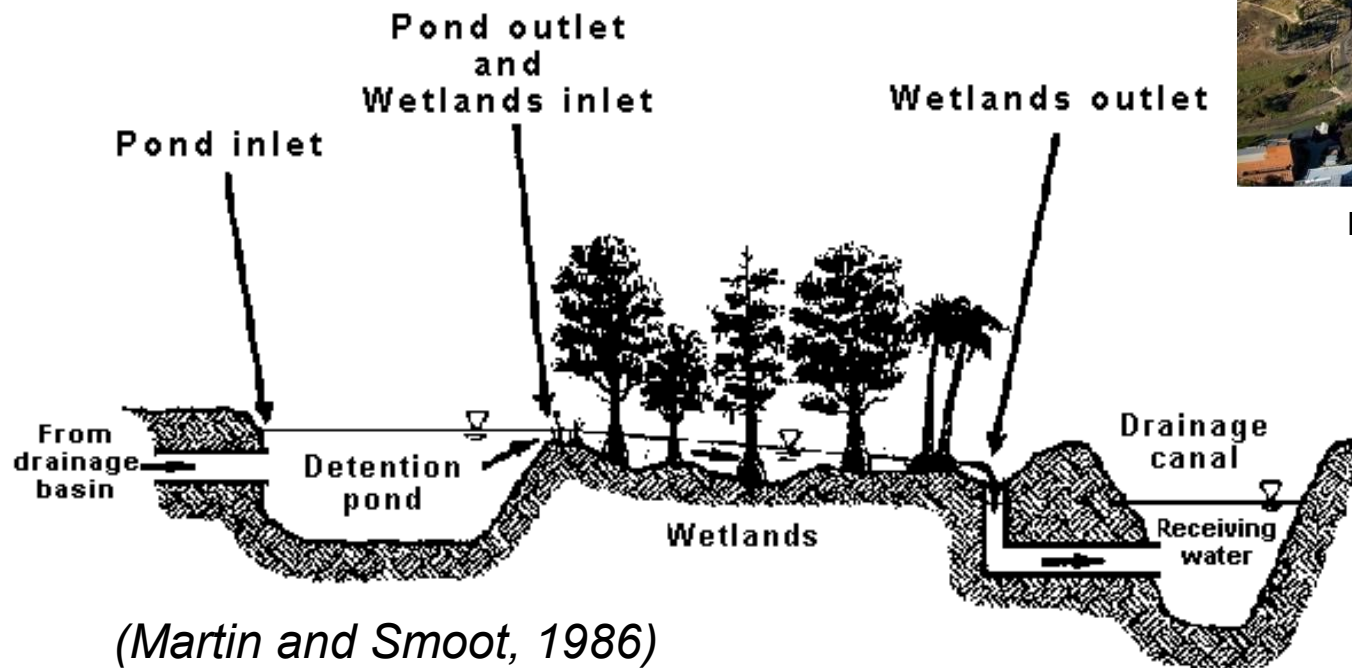
Tározó-szikkasztó tavak rendszere (constructed wetlands)



- oldott szennyezők eltávolítása
- hatékonyság, szezonális hatások?
- üzemeltetés szakszerűsége?
- közegészségügyi kérdések?



Fotó: Sustainable Melbourne



Szennyezés megelőzés és eltávolítás – összegző gondolatok



- kibocsátások csökkentése (lenne) a legjobb megoldás → **nehézségek, realitások**
- fizikai, kémiai és biológiai folyamatok kombinációja biztosítja a leghatékonyabb szennyezőanyag eltávolítást → **helyigény, üzemeltetés kérdése**
- szinte minden esetben a konkrét helyszínre szabott megoldásra van szükség → **tervezés fontossága, külföldi tapasztalatok begyűjtése és értékelése**