

E0280 TECHNOLOGIE A NÁSTROJE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ II

Bioremediace

RNDr. Mgr. Michal Bittner, Ph.D.

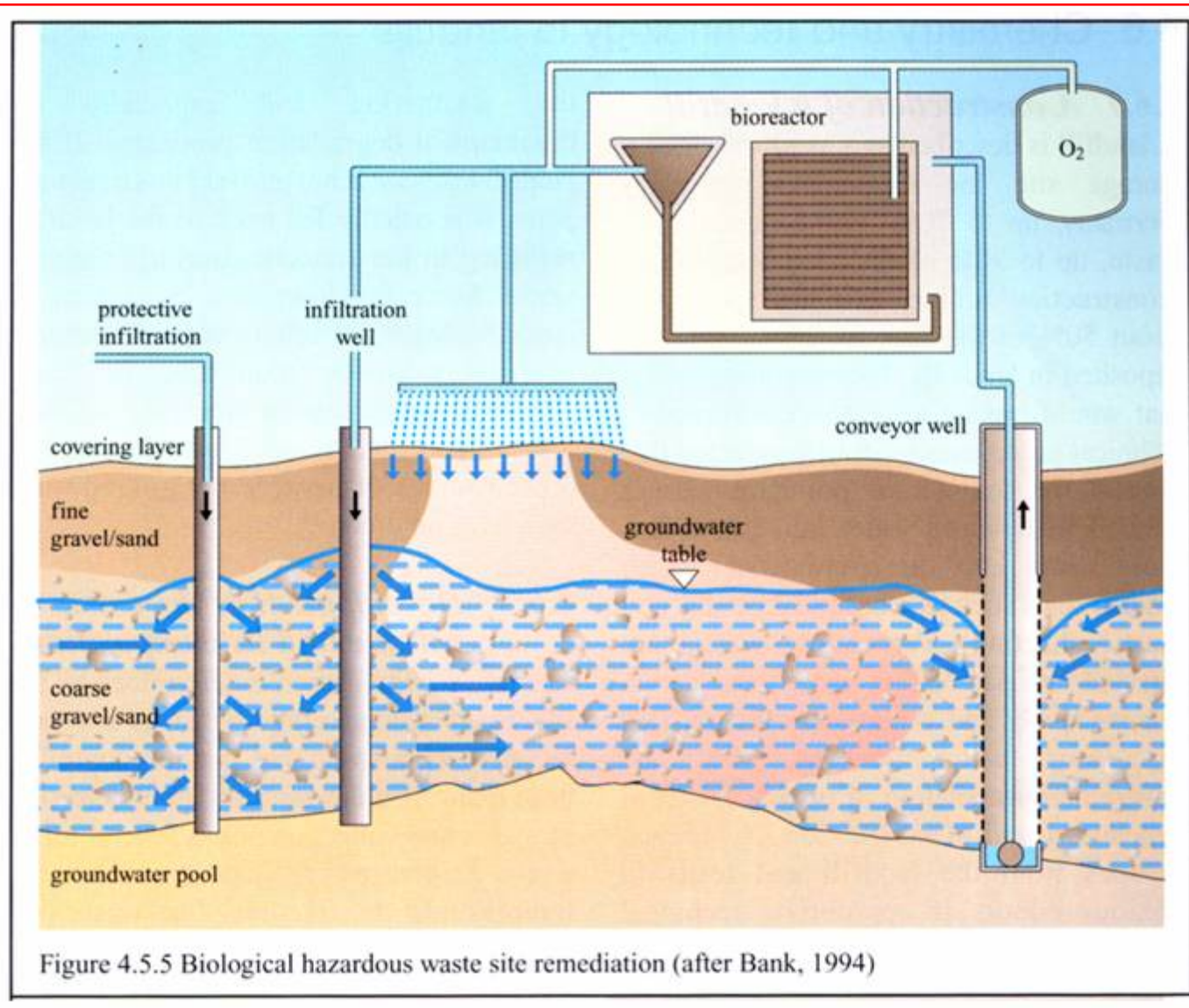
Remediační technologie

↪ Termické

↪ Fyzikální, chemické, fyzikálně-chemické

↪ Biologické

Biologické remediační technologie



Biodegradace, bioremediace

Cílem bioremediace: degradace organických polutantů tak, aby jejich koncentrace byla buď pod hranicí detekčního limitu nebo taková, že by nepřevyšovala koncentrační limit daný příslušnou vyhláškou.

Bioremediace lze využít pro čištění půdy, spodních vod, odpadních vod, kalů a plynů.

Vzhledem k závažnosti účinků některých polutantů na zdraví nebo ekologické riziko se bioremediační technologie v současnosti soustředují zejména na degradaci ropy a ropných produktů, PAHs, chlorovaných aromatických a alifatických uhlovodíků a polychlorované uhlovodíky.

Biodegradace, bioremediace

Praktické využití biodegradčních procesů je však limitováno řadou faktorů, které vlastní proces bioremediace v konkrétním prostředí ovlivňují.

Faktory, které ovlivňují úspěšnost použité bioremediační technologie jsou následující:

- ↪ přítomnost organismů (mikroorganismů, rostlin), které jsou schopné efektivně degradovat polutant
- ↪ schopnost těchto organismů transformovat organický polutant akceptovatelnou rychlostí na výslednou koncentraci polutantu povolenou zákonem
- ↪ při degradaci vznik látek (meziproduktů), které by v dosažené koncentraci byly toxické

Biodegradace, bioremediace

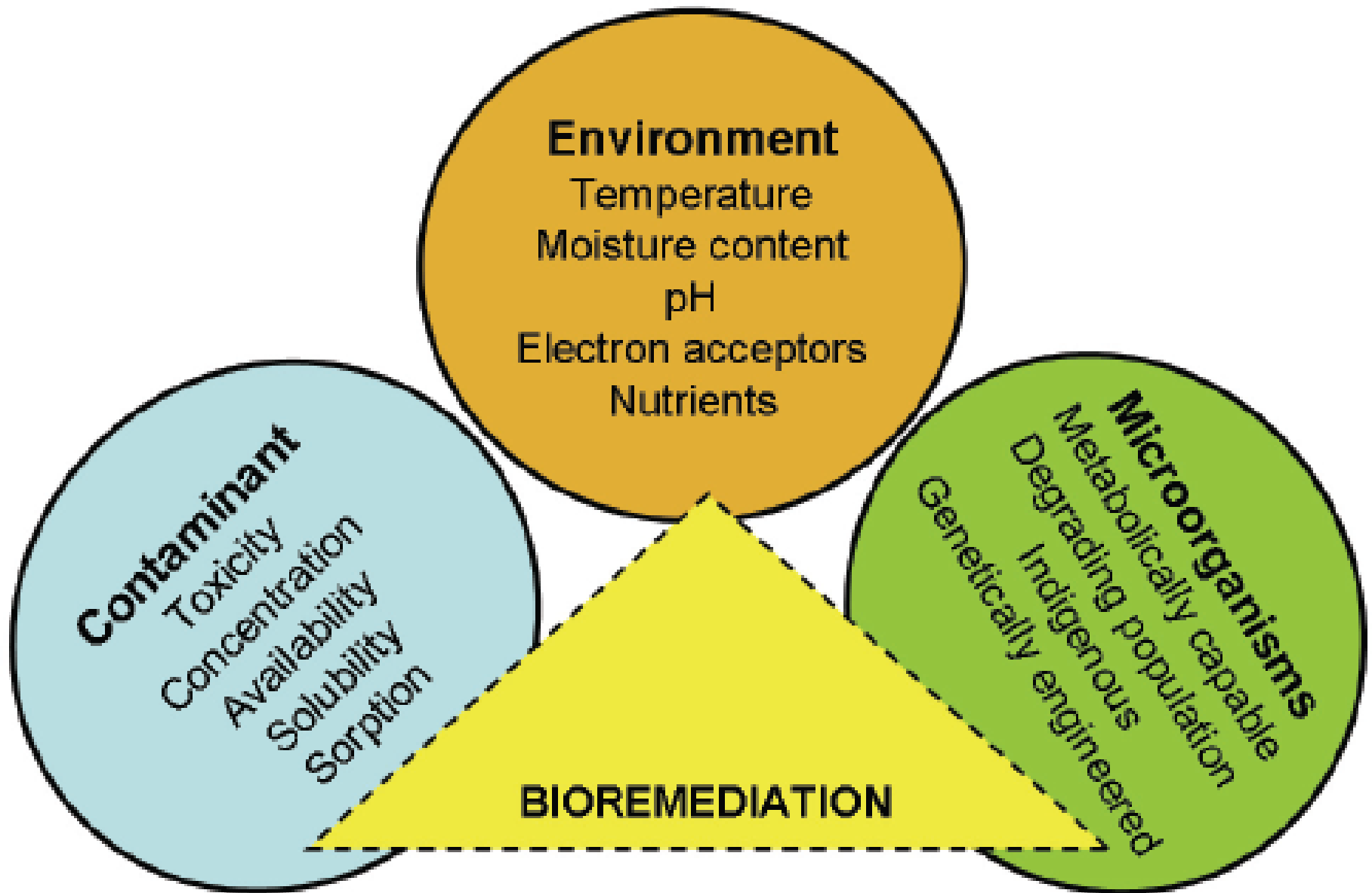
- ↪ na zkontaminované lokalitě přítomnost dalších chemických látek nebo jejich směsí, které by potlačovaly růst a metabolickou aktivitu degradační mikroflory
- ↪ dostupnost polutantů mikroorganismům
- ↪ na lokalitě zajištění nezbytných podmínek stimulujících růst a degradační metabolismus použitých organismů např. anorganické živiny, kyslík nebo vhodné akceptory elektronů, stopové prvky, vlhkost prostředí, odpovídající teplota, pH, zdroj uhlíku a energie pro růst, induktor katabolické dráhy
- ↪ **cena technologie** musí být nižší nebo při nejhorším stejná jaké cena jiné technologie schopné destruovat cílový polutant.

Biodegradace, bioremediace

Smysl bioremediace - využít přirozené biodegradační pochody s cílem vyčistit kontaminované lokality.

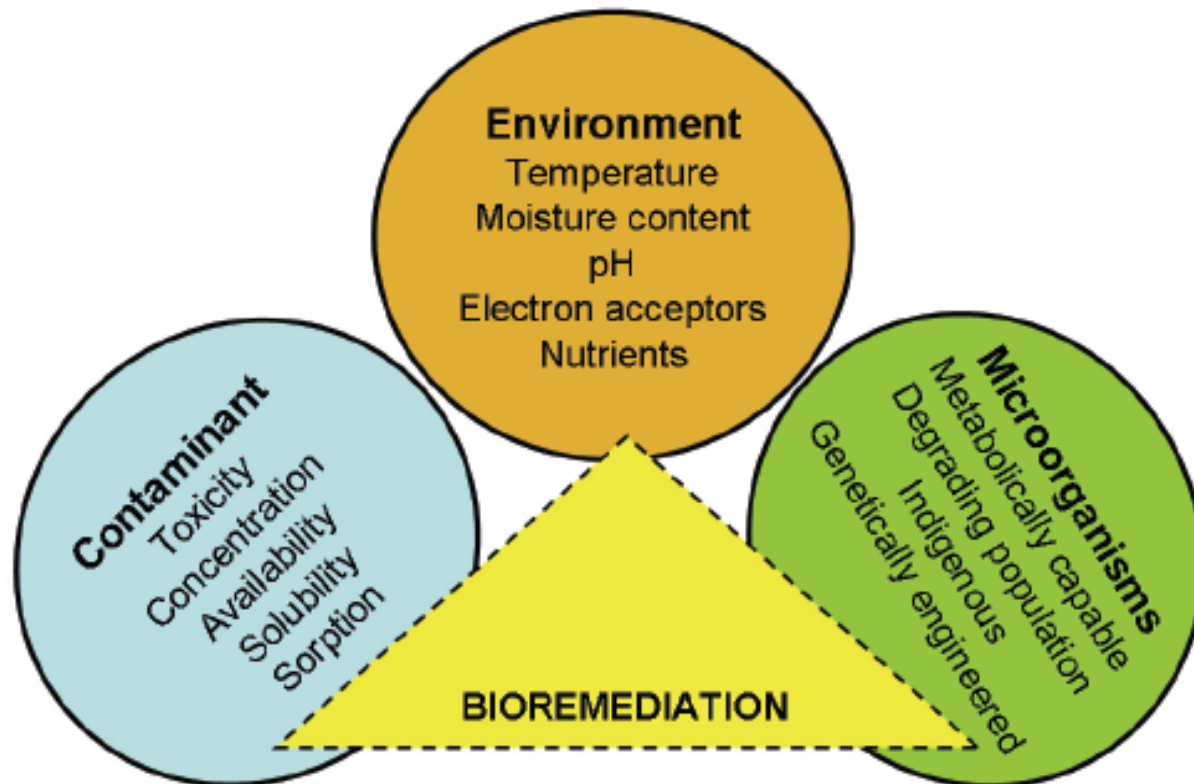
System, kdy se do půdy navrácí ekologická funkce, kterou plní mikroorganismy

Bioremediation Triangle



Bioremediace – co musíme znát ???

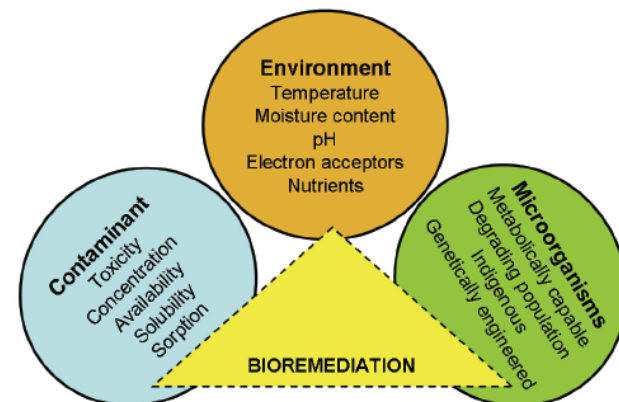
- ↪ Z pohledu degradované látky či spíše směsi látek
- ↪ Z pohledů využívaných mikroorganismů
- ↪ Z pohledu prostředí, ve kterém se má proces realizovat



Bioremediace – co musíme znát ???

Z pohledu degradované látky či spíše směsi látek:

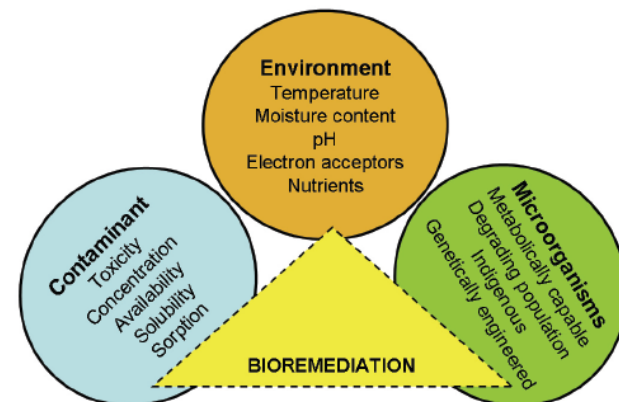
- ↪ Strukturu zájmové látky či směsi látek
- ↪ Fyzikálně-chemické vlastnosti – persistenci/reaktivitu, rozpustnost, těkavost, tendenci ke kumulaci v abiotickém prostředí a potenciál pro bioakumulaci
- ↪ Její/jejich koncentrace
- ↪ Produkty degradace a jejich vlastnosti
- ↪ Biodostupnost v daném prostředí



Bioremediace – co musíme znát ???

Z pohledů využívaných mikroorganismů

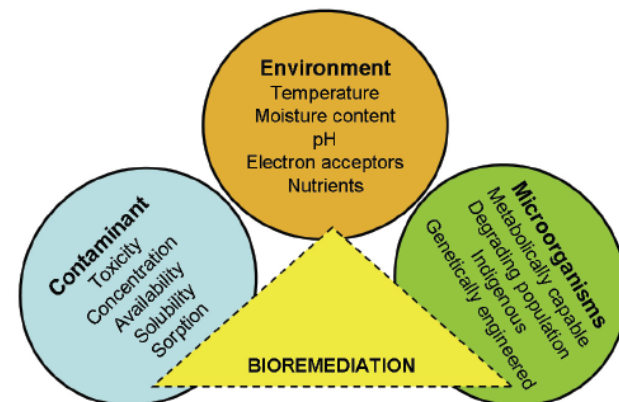
- ↪ Jejich schopnost degradovat danou látku či směs látek
- ↪ Životní optimální podmínky – živiny, vlhkost, pH, kyslík
- ↪ Přítomnost látek toxických pro používané mikroorganismy nebo jejich konsorcia



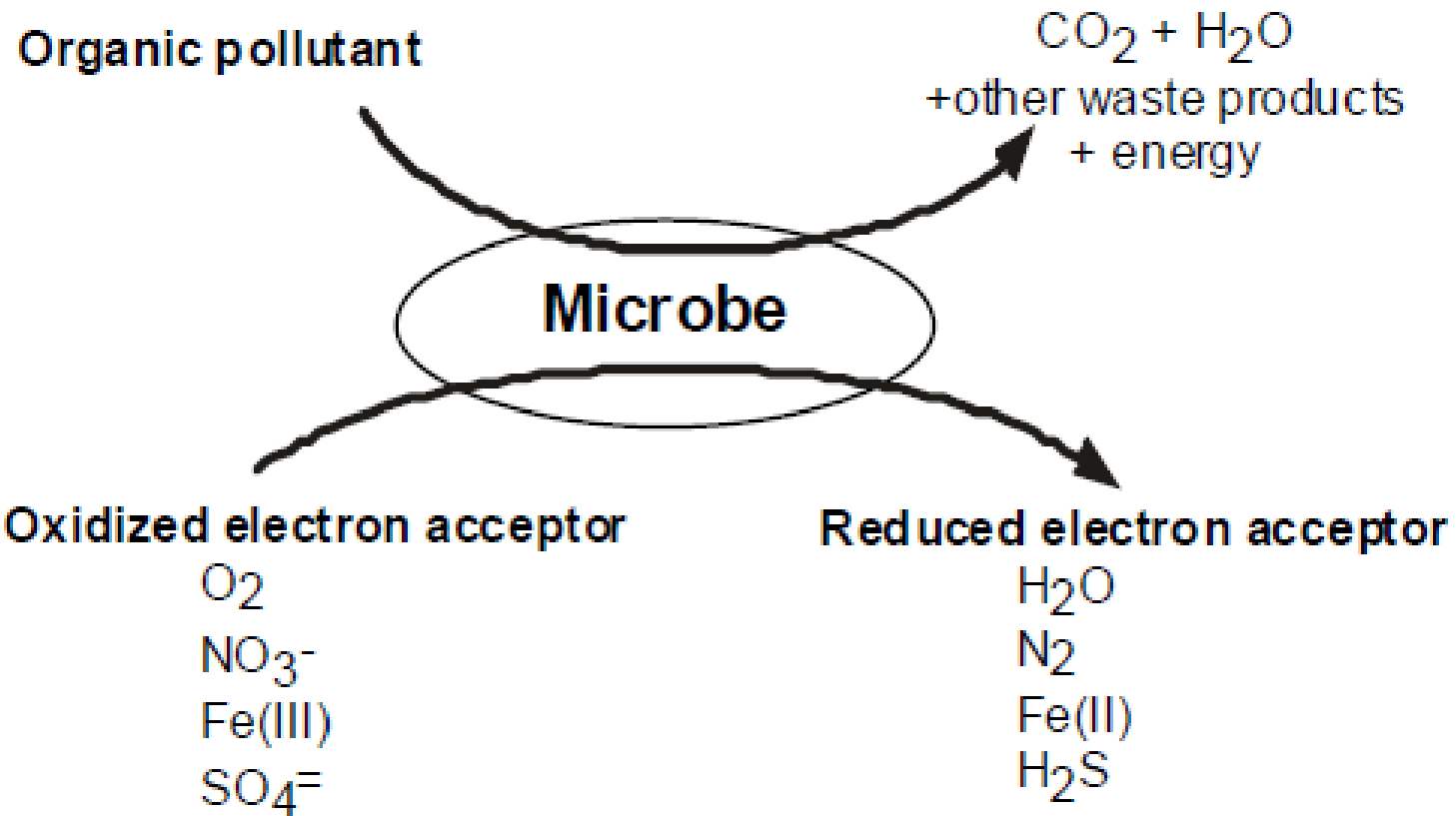
Bioremediace – co musíme znát ???

Z pohledu prostředí, ve kterém se má proces realizovat

- ↪ Sorpční schopnosti – ovlivnění biodostupnosti
- ↪ Fyzikálně-chemické vlastnosti
- ↪ Mechanické vlastnosti
- ↪ Toxicita prostředí

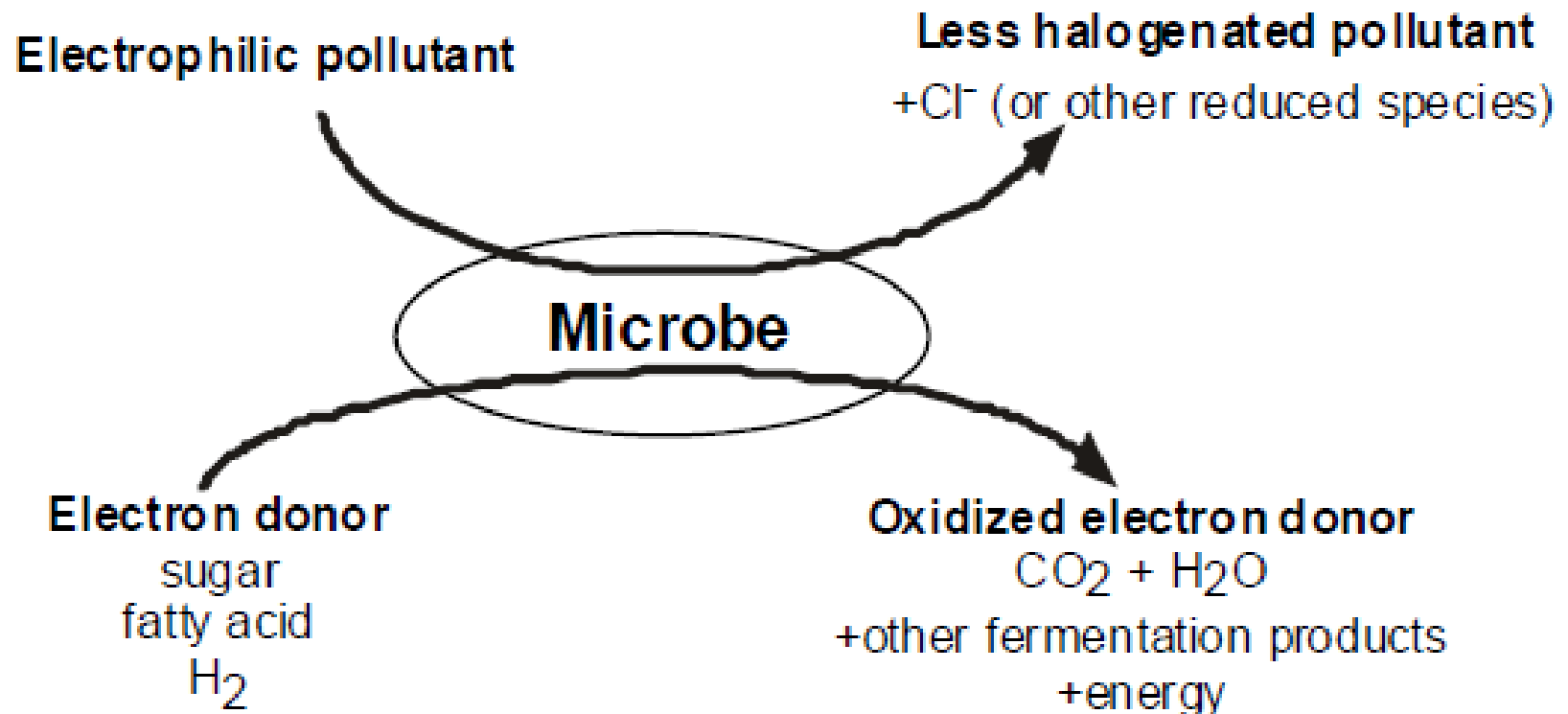


Aerobic degradation



Oxidative Biodegradation

Anaerobic degradation



Reductive Biodegradation

Biodegradability

Table 2: Compilation of degradability (mineralization, humification) and transformability of some contaminants

contaminant	microbial degradability			preferred conditions
	high	low	no	
mineral oil hydrocarbons				
short-chain mineral oil hydrocarbons	+			aerobic
long-chain/branched mineral oil hydrocarbons		+		aerobic
cycloalkanes		+		aerobic
monoaromatic hydrocarbons				
AHs	+			aerobic
phenols	+			aerobic
cresols		+		aerobic
catechols	+			aerobic
polycyclic aromatic hydrocarbons				
2- to 3-ring-PAHs (e.g. naphthalene)	+			aerobic
4- to 6-membered ring PAHs (benzo(a)pyrene)		+		aerobic
chlorinated aliphatic hydrocarbons				
tetrachloroethylene, trichloroethane	+			anaerobic
trichloroethylene, dichloroethane	+			anaerobic/aerobic

Biodegradability

nitroaromatic compounds				
mono- and dinitroaromatics	+			aerobic/anaerobic
trinitrotoluene (TNT)	+			aerobic/anaerobic
trinitrophenol (picric acid)		+		aerobic/anaerobic
nitroaliphatic compounds				
glycerol trinitrate	+			aerobic
pesticides				
g-hexachlorocyclohexane (lindane)	+			aerobic/anaerobic
b-hexachlorocyclohexane (lindane)		(+)	+	aerobic/anaerobic
atrazins	+			aerobic
„dioxins“				
PCDD/F (several)		+		anaerobic
2,3,7,8-PCDD/PCDF			+	
xenobiotic polymers	+	+		
inorganic compounds				
free cyanides		+		aerobic
complex cyanides		+		
ammonium	+			aerobic/anaerobic
nitrate	+			anaerobic
sulphate	+			anaerobic
heavy metals*		+		
radioisotopes*		+		

*) Microbially transformable, yet not "degradable"

From: Manual for Biological Remediation Techniques, 2006)

Biodegradability

Table 2. Mode of bioremediation for several organic soil pollutants amenable to biodegradation.

Compound Class	Bioremediation mode	Representative microorganism(s)	Established technology?
Petroleum hydrocarbons	Primary: aerobic oxidation	<i>Pseudomonas</i> spp., multiple aerobic heterotrophs	Yes
PAHs	Primary: aerobic oxidation	Many species of aerobic heterotrophs	Yes
	Secondary: fungal/anaerobic	<i>Cunninghamella elegans</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	No
Petroleum hydrocarbons: BTEX	Primary: aerobic oxidation	Multiple aerobic heterotrophic spp.	Yes
	Secondary: anaerobic oxidation	TOL4 and other denitrifying spp.; sulfate reducing spp.	Some
Chlorinated aliphatics	Primary: anaerobic reductive dehalogenation	Mixed anaerobic cultures. Complete dechlorination of PCE/TCE requires the presence of <i>Dehalococcus ethenogenes</i>	Yes

From: Rockne and Reddy, 2003)

Biodegradability

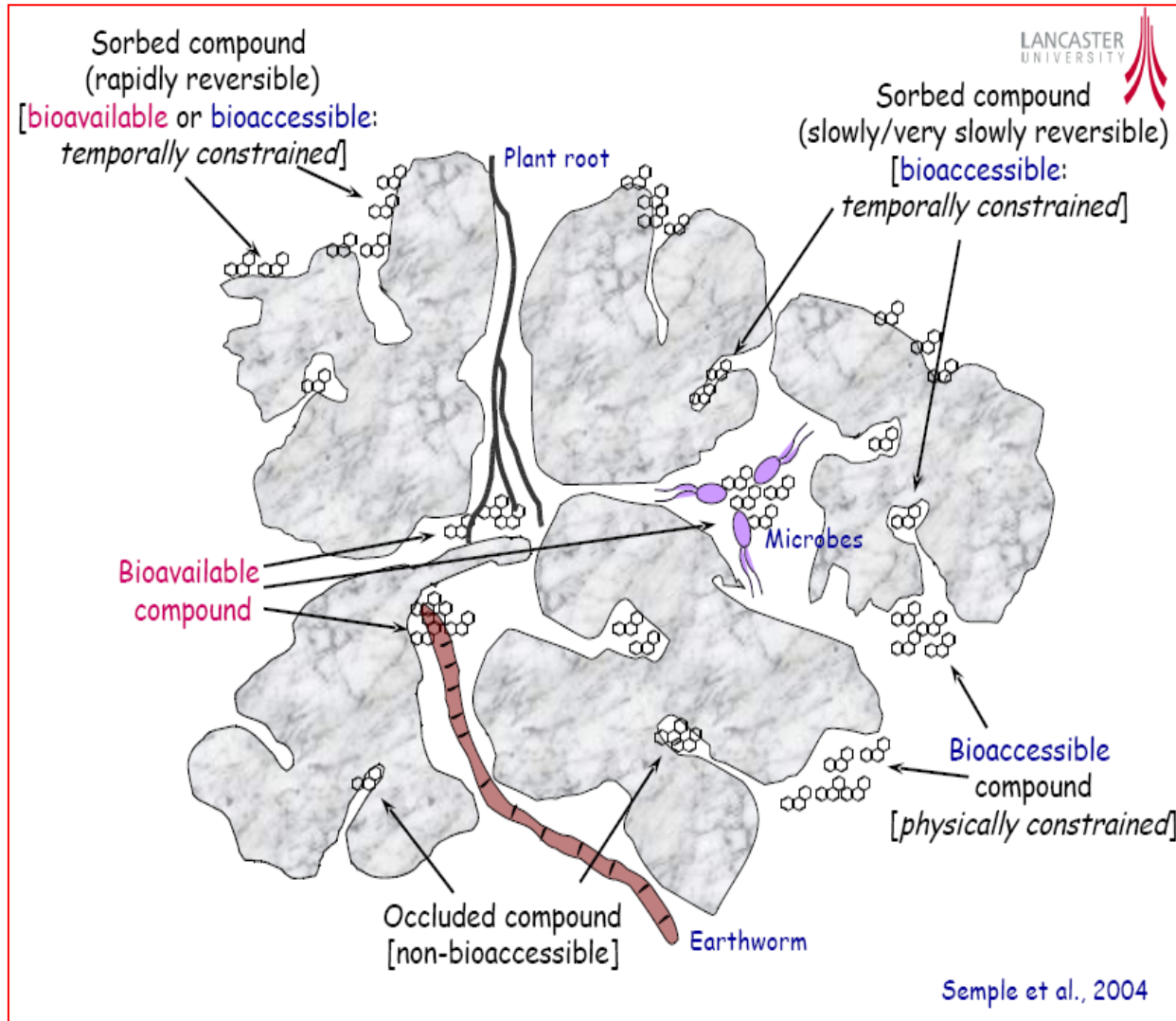
	Secondary: cometabolic aerobic oxidation	<i>Methylosinus</i> and <i>Methylococcus</i> spp (methane) <i>Pseudomonads</i> (toluene and phenol) <i>Nitrosomonas</i> spp. (ammonia)	Some
Highly chlorinated PCBs	Primary: reductive dechlorination	Mixed anaerobic consortia	No
Mono- and di-chlorinated PCBs	Primary: aerobic oxidation	<i>Burkholderia</i> Str. LB400	Some
Explosives	Primary: reduction of nitro groups	Mixed anaerobic consortia	Yes
Pesticides and herbicides	Multiple modes; primarily aerobic for organo-phosphates and non-chlorinated compounds	Multiple aerobic and anaerobic heterotrophs; <i>Flavobacterium</i> spp., <i>Arthrobacter</i> spp.	Yes

From: Rockne and Reddy, 2003)

Zásady pro využívání mikrobiálních technologií

- ↪ Mikroorganismy pro nás nepracují proto, že my chceme, ale proto, že jim to přináší různé výhody, především energii pro množení a tvorbu biomasy a pro nezbytné fyziologické pochody
- ↪ Pokud jim zlepšíme podmínky v prostředí, pracují o to lépe.

Biodostupnost polutantů



Podpora přenosu hmoty

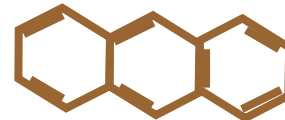
Zpřístupnění molekul polutantů pro buňky:

- ↪ Přídavkem neionogenní povrchově aktivní látky (NPAL)
- ↪ Částečná chemická oxidace

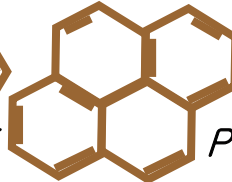


DIESEL

PHENANTHRENE



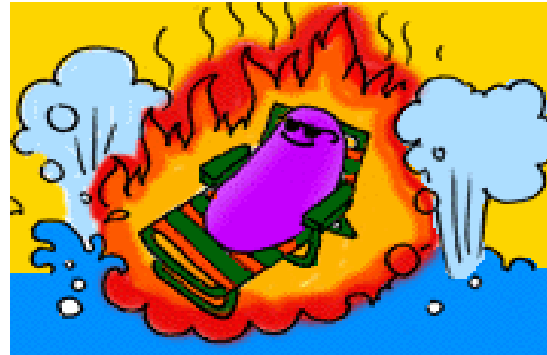
ANTHRACENE



PYRENE

Podpora přenosu hmoty

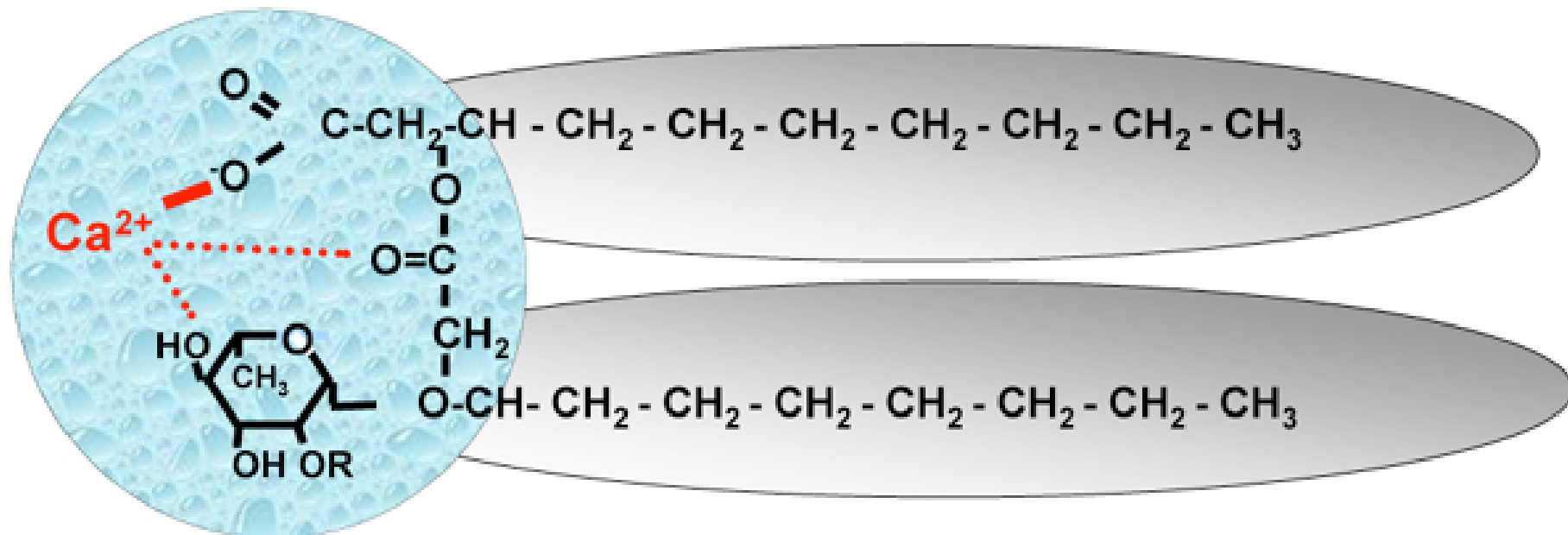
- ↪ Ohřev horninového prostředí (odporové ohřívání, vhnání páry.....)



- ↪ Uvolnění sorpčních vazeb molekul polutantů ultrazvukem
- ↪ Podpora tvorby biosurfaktantů

Podpora přenosu hmoty – tvorba biosurfaktantů

The bacterium *Pseudomonas aeruginosa* produces a nontoxic, degradable biosurfactant (detergent) called rhamnolipid

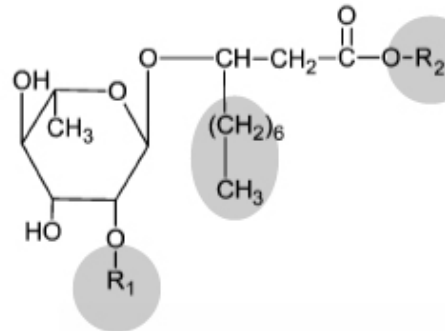


Courtesy Raina M. Maier

Biosurfaktanty

Glycolipids

rhamnolipids,
sophorolipids,
trehalolipids



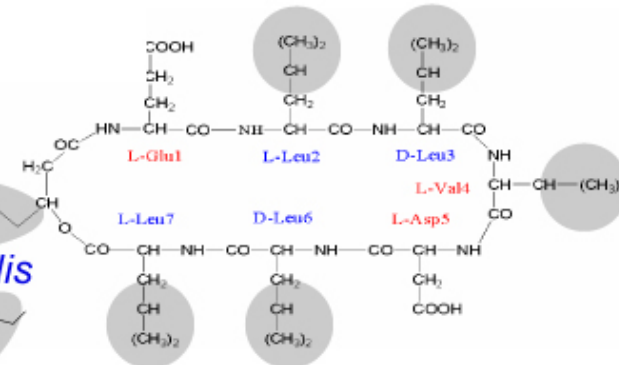
rhamnolipid
from *Pseudomonas sp.*

Lipopeptides

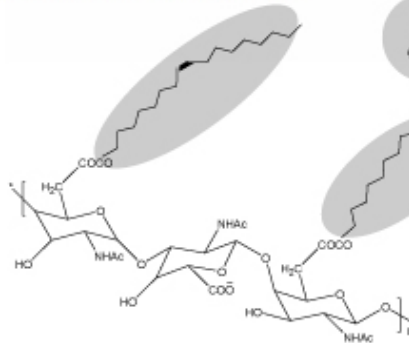
surfactin,
iturin,
fengycin

surfactin

from *Bacillus subtilis*



Polymeric surfactants



bioemulsan
from *Acinobacter sp.*

Other surface active biomolecules in natural and man-made use, especially in food products

Phospholipids

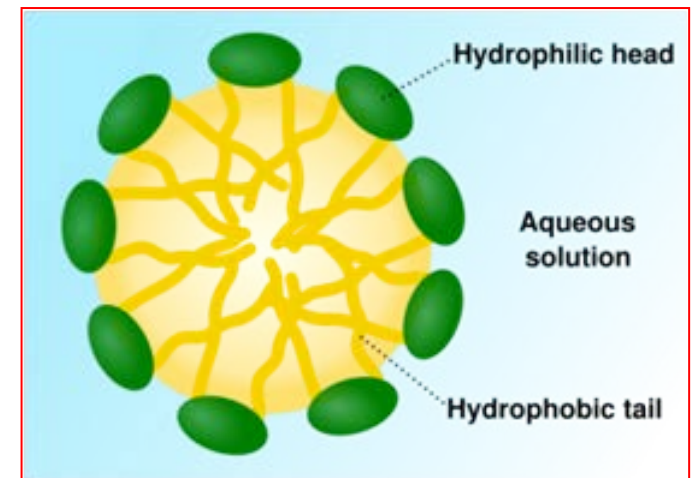
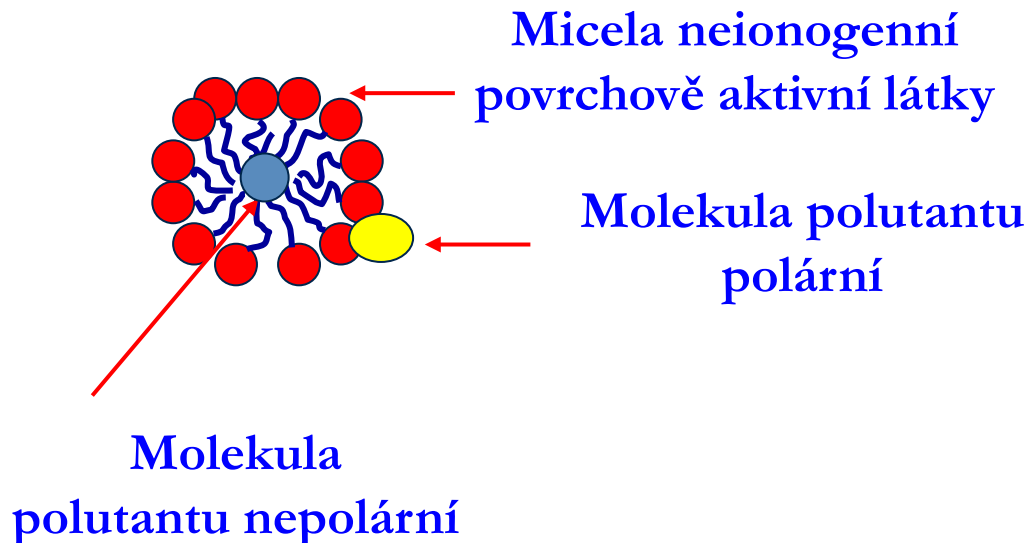
e.g. lecithin

Proteins

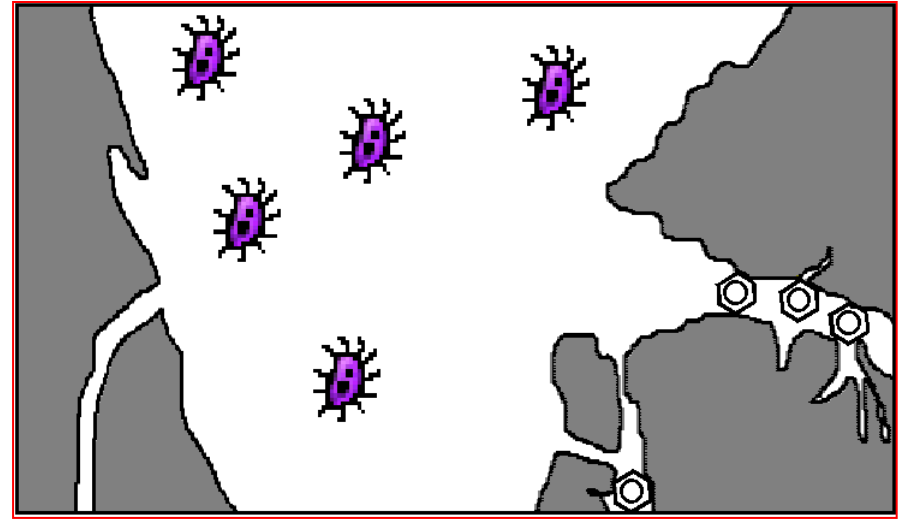
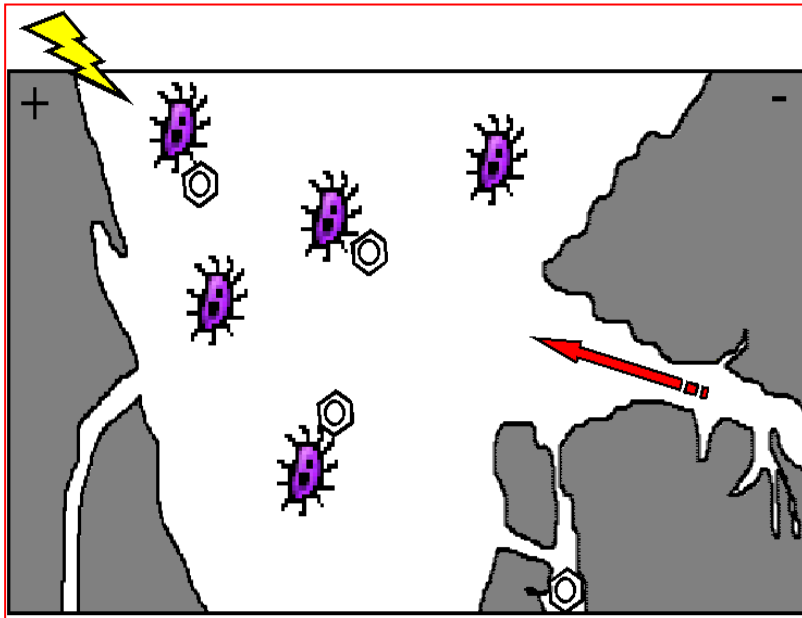
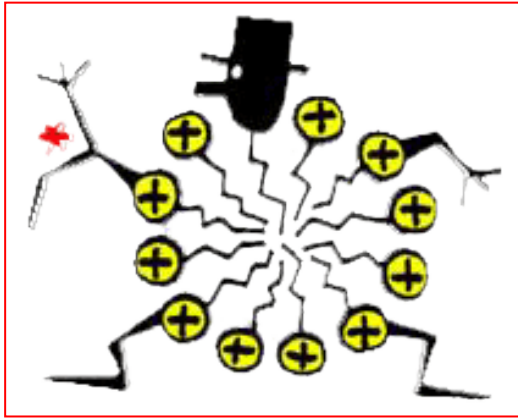
e.g. b-casein

Biosurfaktanty

- ↪ Všechny bakterie, které jsou schopné využívat nepolární substráty, mají schopnost biosurfaktant vytvářet a uvolňovat do prostředí
- ↪ Bez biosurfaktantu by nebyly schopné dopravit substrát do buňky

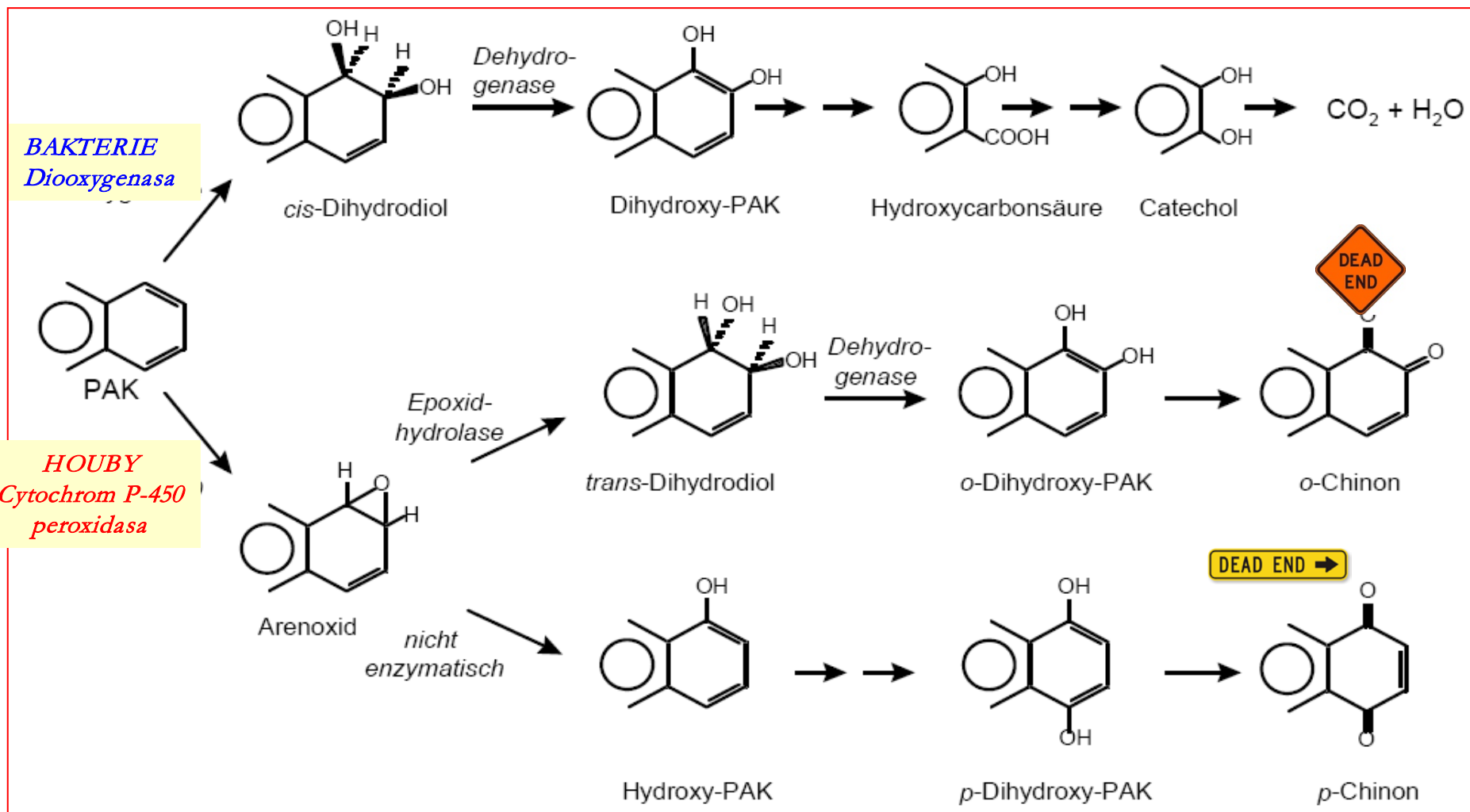


Podpora vymytím

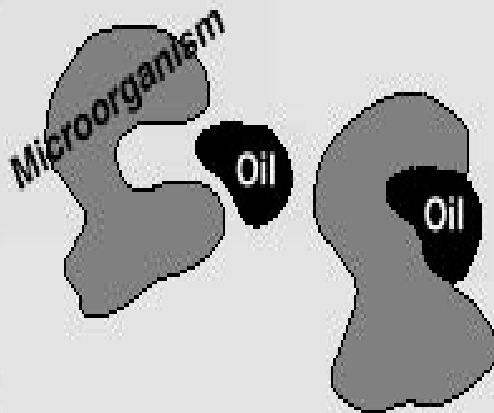


Vymytí povrchově aktivní látkou

Odbourávání PAHs



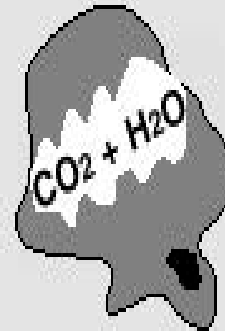
Biodegradace x biotransformace



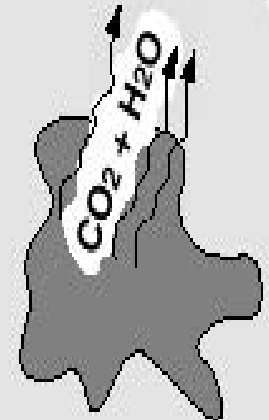
Microorganisms eat oil
or other organic
contaminant



Microorganisms digest oil and
convert it to carbon dioxide (CO₂)
and water (H₂O)



Microorganisms
give off CO₂ and
H₂O



Biotransformace (vs. Biodegradace)

- ↪ **Nedochází k rozkladu až na H_2O , CO_2 , k tvorbě biomasy a energie.**
- ↪ **Dochází jen k biotransformaci molekul polutantu na nové sloučeniny, které jsou buď dead-end produkty, nebo nemohou být dále rozkládány vzhledem k podmínkám v prostředí**
- ↪ **Tyto meziprodukty mohou mít mnohem nepříznivější vlastnosti pro životní prostředí než původní polutanty**

Tvorba dead-end produktů

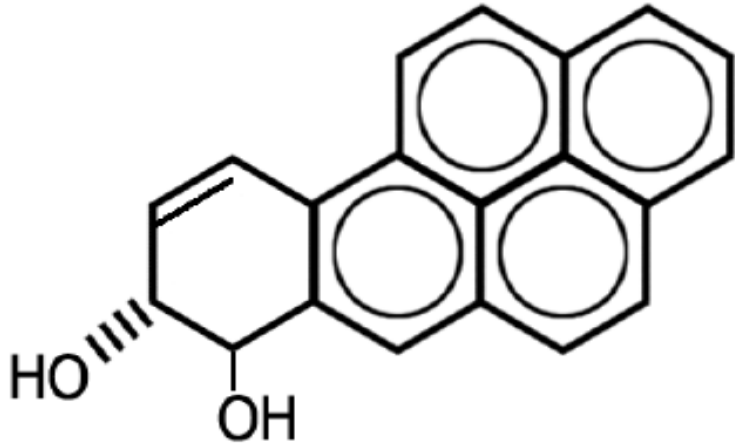
1. PROBLÉM

- ↪ Stanovení PAHs po extrakci nepolárními rozpouštědly
- ↪ Biotransformační produkty jsou polární – nestanoví se, nastává pokles koncentrace PAHs - je to vyřešení problému ???

Skutečnost

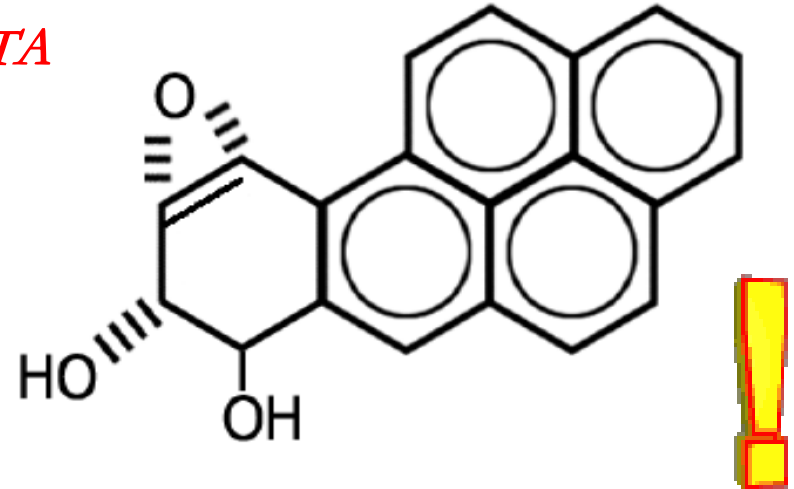
- ↪ Biotransformační produkty a dead-end produkty jsou ve vodě mnohem rozpustnější a tedy mobilnější, jsou však často i toxičtější než původní PAHs, takže zemina se sníženou koncentrací PAHs po biodegradaci je z hlediska životního prostředí mnohem škodlivější, má podstatně vyšší ekotoxicitu a genotoxicitu

Biotransformace místo biodegradace



*Benzo[a]pyrene
7,8-dihydrodiol*

TOXICITA



*Benzo[a]pyrene 7, 8-
dihydrodiol-9, 10-epoxide*

Biologické procesy

Výhody:

- ↪ Využitelné pro široký rozsah organických látek
- ↪ Využitelné pro všechna media
- ↪ Rezidua jsou velmi nízká nebo žádná
- ↪ Častá je flexibilita v designu systému
- ↪ Nižší ceny než jiné technologie

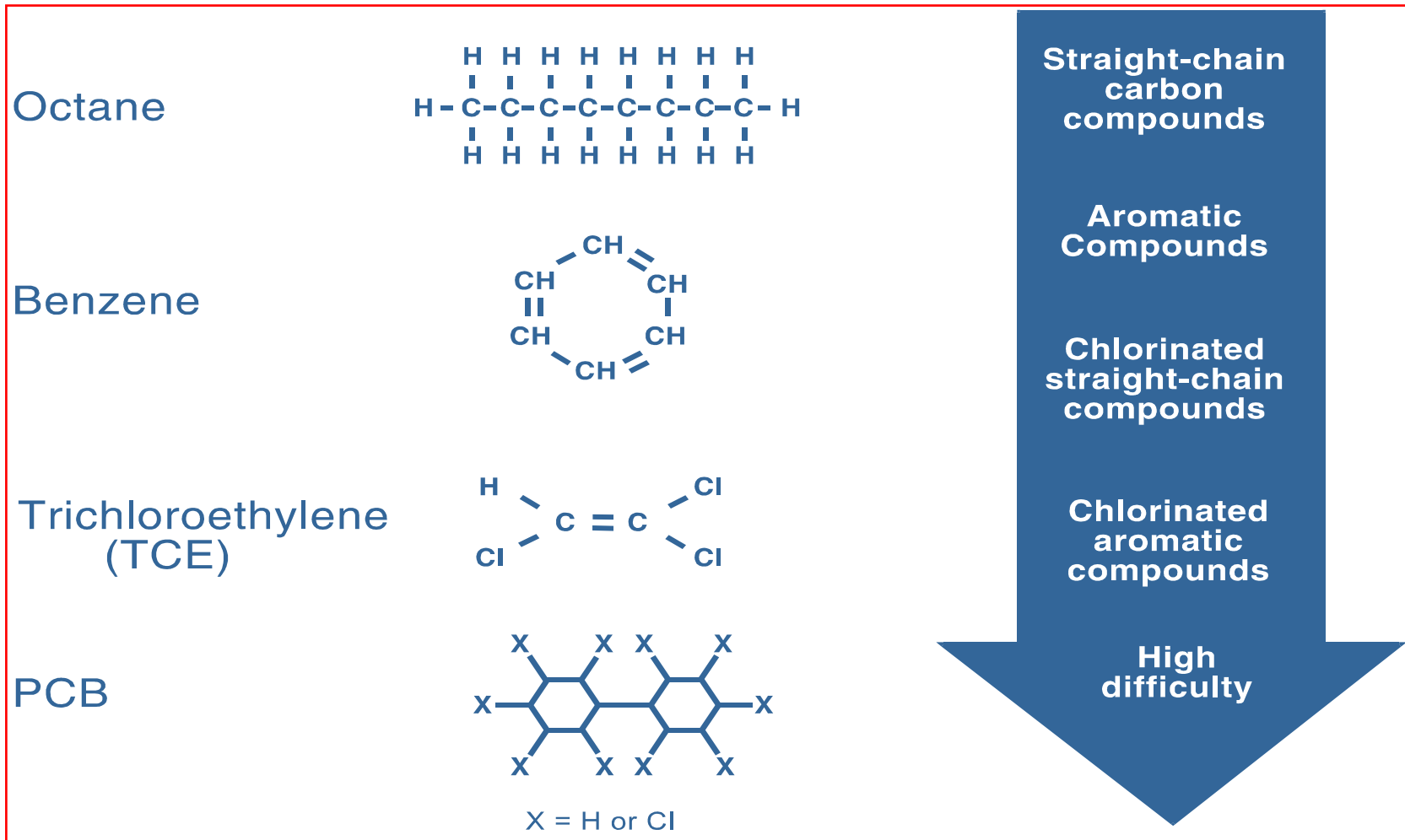
Biologické procesy

Omezení:

- ↪ **Není obecně aplikovatelné pro anorganické látky**
- ↪ **Dlouhá doba čištění**
- ↪ **Je požadována důsledná charakterizace lokality**
- ↪ **Je omezena charakteristikami lokality**

Bioremediace

Aerobní degradační potenciál



Rozdělení bioremediačních technologií

Bioremediační technologie lze rozdělit dle místa jejich aplikace na:

- ↪ **in situ**, které jsou aplikovány přímo na zkontaminované lokality; jsou relativně levné, ale jejich průběh je obtížně kontrolovatelný
- ↪ **ex situ**, ve kterých je kontaminovaný materiál odstraněn z původní lokality a buď k degradaci dochází na místě odstranění (**on site**) nebo je odstraněná kontaminovaná matrice převezena na jiné místo kde probíhá vlastní biodegradační proces na dekontaminační ploše nebo v bioreaktoru (**off site**). Přemístování kontaminované zeminy či spodní vody sice značně zvyšuje celkové náklady, ale proces je velmi dobře kontrolovatelný.

Ex-situ vs In-situ

Table 15–1 Comparison of In situ and Ex situ Strategies for Engineered Bioremediation Systems

	In Situ	Ex Situ
Location	In the landscape	In a controlled bioreactor
Requirements	Engineer the landscape to resemble a laboratory flask	Move contaminants from landscape to on-site bioreactors
Characteristics	Relatively poor control of biodegradation process	Greater control
Obstacles	Complexities of landscape that may prevent success Pollutant mixtures Unknown site histories Mass balances uncertain Biotic versus abiotic processes Incompatibility of site characteristics and microbiological processes Production of pollutants by microorganisms How clean is clean?	Complexities of landscape partially overcome Pollutant mixtures Unknown site histories Decent bioreactor mass balances Biotic processes defined in bioreactor Incompatibility of site characteristics and microbiological processes Production of pollutants by microorganisms How clean is clean?

Bioremediační technologie

- ↪ Bioprovzdušnění (Bioventing) (in)
- ↪ Podpořená bioremediace (Enhanced bioremediation) (in)
- ↪ Monitorovaná přirozená atenuace (Monitored natural attenuation - Intrinsic bioremediation) (in)
- ↪ Fytoremediace (Phytoremediation) (in)
- ↪ Bioremediace v suspenzním systému (Slurry-phase bioremediation – Bioslurry) (ex)
- ↪ Biohromady (biopiles) (ex)
- ↪ Kompostování (Composting) (ex)
- ↪ Bioremediace v tuhé fázi (Solid-phase bioremediation – Landfarming) (ex)

Bioremediační technologie

Technology	Main Target Contaminants
Bioventing (<i>in</i>)	SVOCs, VOCs, X-SVOCs, X-VOCs, PAHs
Enh. bioremediation (<i>in</i>)	SVOCs, VOCs, Pest.
Natural attenuation (<i>in</i>)	SVOCs, VOCs,
Phytoremediation (<i>in</i>)	SVOCs, VOCs, Inorg., Heavy metals
Bioslurry (<i>ex</i>)	SVOCs, VOCs, X-SVOCs, X-VOCs, PAHs, Diox./Fur., Pest.
Biopiles (<i>ex</i>)	SVOCs, VOCs, X-SVOCs, X-VOCs, PAHs
Composting (<i>ex</i>)	SVOCs, VOCs
Landfarming (<i>ex</i>)	SVOCs, VOCs, X-SVOCs, X-VOCs, PAHs, Pest.

Bioremediační technologie

Technology	Cost (US\$/ton)	Clean-up time*
Bioventing (<i>in</i>)	15-80	< 6 months
Enh. bioremediation (<i>in</i>)	25-100	6 to 12 months
Natural attenuation (<i>in</i>)	10,000/year	> 12 months
Phytoremediation (<i>in</i>)	50-150	> 12 months
Bioslurry (<i>ex</i>)	230-270	6 to 12 months
Biopiles (<i>ex</i>)	25-75	< 6 months
Composting (<i>ex</i>)	250-300	6 to 12 months or >
Landfarming (<i>ex</i>)	90-100	6 to 12 months or >

() Time referred to a standard mass of about 20000 tons*

Bioremediační technologie

- ↗ **Bioprovzdušnění**
- ↗ **Fytoremediace**
- ↗ **Bioslurping**
- ↗ *In situ* **remediace podzemní vody**
- ↗ **Přirozená atenuace**
- ↗ **Bioremediace v suspenzním systému**
- ↗ **Bioremediace v tuhé fázi**

Bioventing (bioprovzdušnění)

Cílové kontaminanty:

↪ VOCs

↪ SVOCs

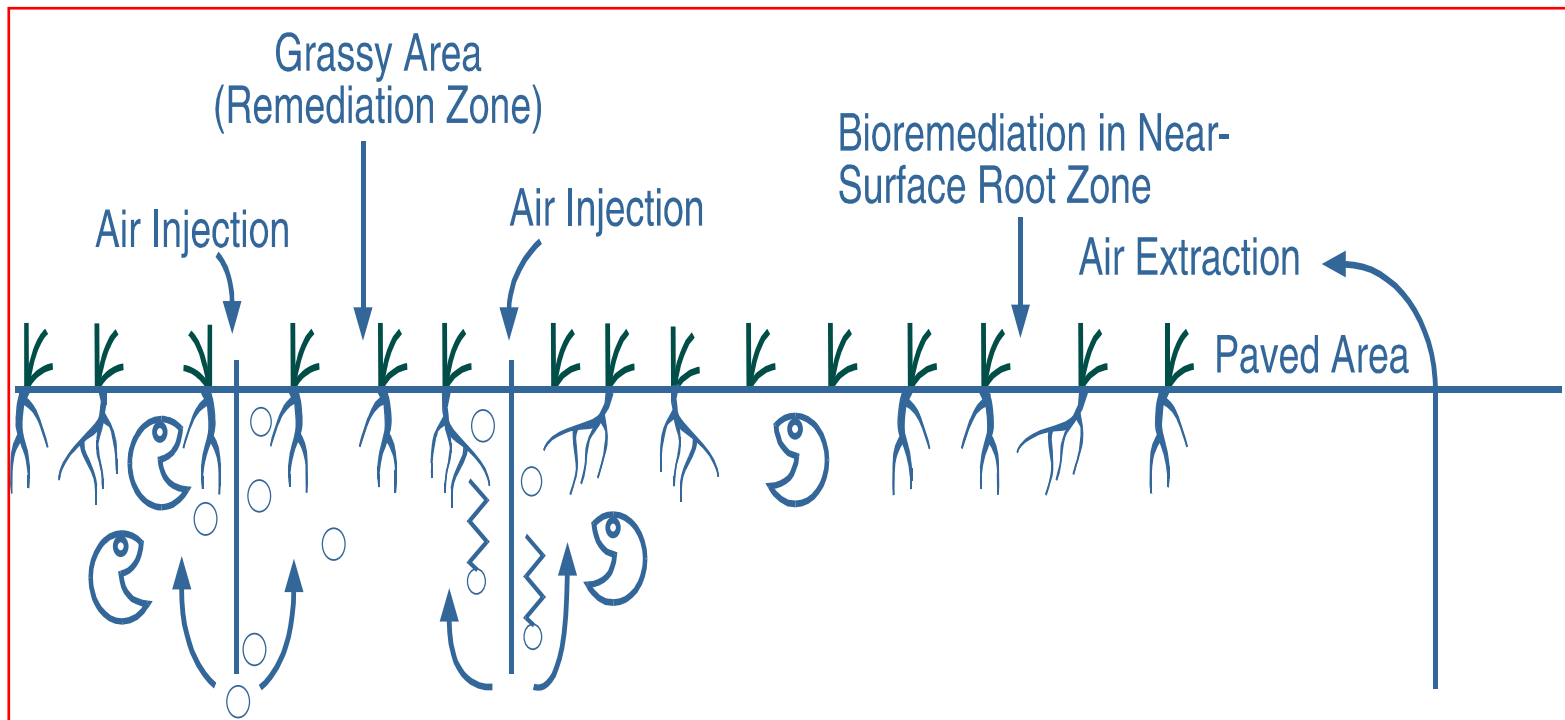
↪ X- VOCs

↪ X- SVOCs

↪ PAHs

Bioventing (bioprovzdušnění)

Přísun vzduchu do nenasycené zóny může být prováděn buď přes horizontální nebo vertikální vrty a v některých případech může být bioventing kombinován s extrakcí par z půd, což umožňuje zlepšit kontrolu toku zaváděného vzduchu.



Bioventing (bioprovzdušnění)

- ↪ Čištění ve vadózní zóně
- ↪ Kyslík je využit mikrobiálními populacemi pro zahájení biochemické konverze uhlovodíků

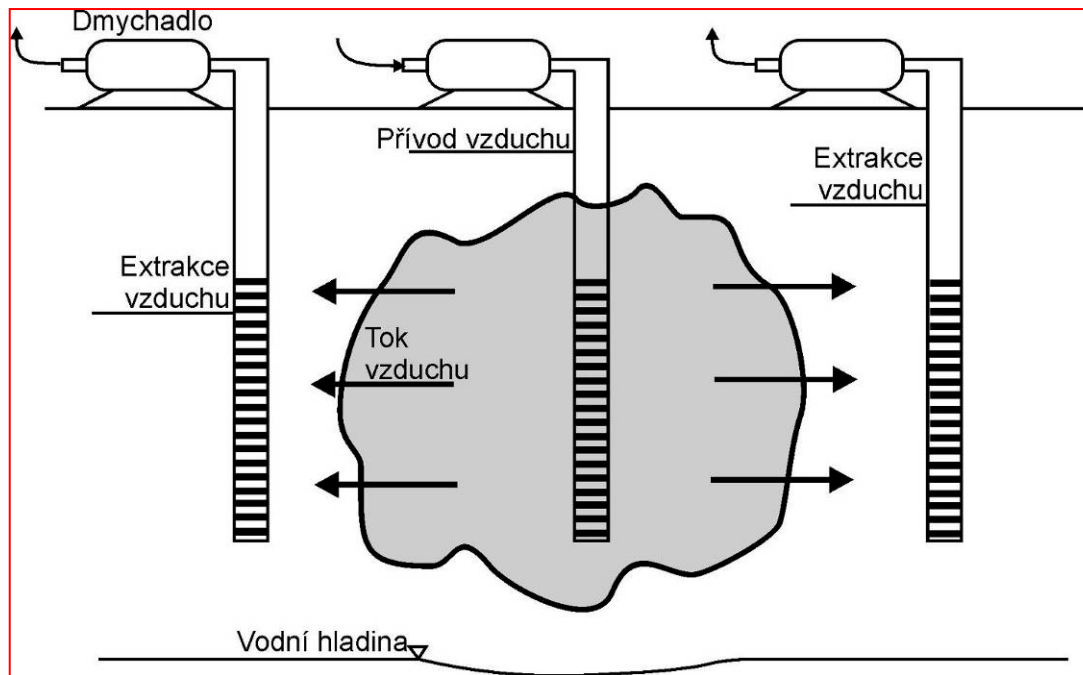
Bioventing (bioprovzdušnění)

Aplikace:

- ↪ Aplikace v prostupné nenasycené půdní zóně, tj. nad vrstvou vody
- ↪ Metoda je založena na zavádění vzduchu do půdy buď metodou přímé injektáže nebo cirkulací přes vakuový extrakční systém
- ↪ Teplota a pH půd ovlivňuje rychlost reakce
- ↪ Pouze pro aerobně biodegradovatelné kontaminanty, které mají tlak par nižší než 1 atm.
- ↪ VOCs, SVOCs a ropné uhlovodíky
- ↪ Těžké uhlovodíky nejsou odstraňovány
- ↪ Lehce těkající organické látky se spíše odpaří než by byly zdegradovány.

Schéma bioventingu

- ↙ Metoda je založena na vhánění vzduchu, jenž usnadňuje
těkání některých organických kontaminantů a souběžně
zajišťuje vhodné prostředí pro biodegradaci méně těkavých
látek buď metodou přímé injeckáže nebo cirkulací přes
vakuový extrakční systém.



Bioventing (bioprovzdušnění)

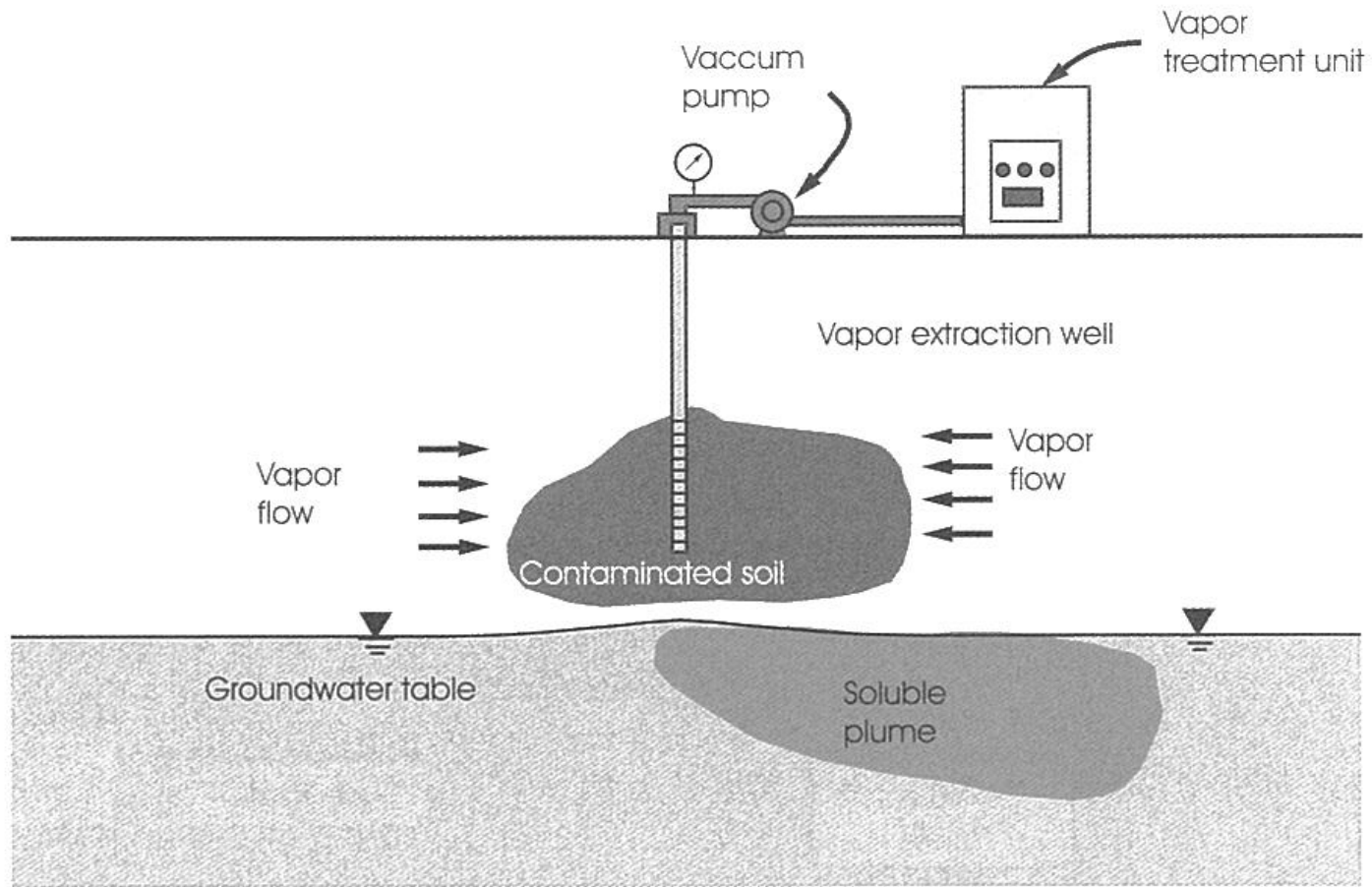


Fig. 12.5 Process scheme of bioventing.

Bioventing (bioprovzdušnění)

Specifické výhody:

- ↪ Má schopnost biodegradovat semivolatilní nebo nonvolatilní organické látky, kde SVE neumožňuje čištění (stále ve stádiu výzkumu)
- ↪ Minimalizuje množství plynu vyžadujícího čištění
- ↪ Nevyžaduje drahá zařízení
- ↪ Nevyžaduje náročné provádění a udržování

Bioventing (bioprovzdušnění)

Specifická omezení:

- ↪ **Schopnost mikroorganismů biodegradovat kontaminant**
- ↪ **Propustnost půd**
- ↪ **Nízký obsah půdní vlhkosti**

Bioremediační technologie

- ↗ Bioremediace v tuhé fázi
- ↗ Fytoremediace
- ↗ Bioslurping
- ↗ *In situ* remediace podzemní vody
- ↗ Přírozená atenuace
- ↗ Bioremediace v suspenzním systému
- ↗ Bioprovzdušnění

Fytoremediace

Cílové kontaminanty:

- ↪ VOCs
- ↪ SVOCs
- ↪ X- SVOCs (*e.g. Populus deltoides, topol bavlníkový*)
- ↪ Těžké kovy (*e.g. Brassica juncea, brukev sítinovitá*)
- ↪ Pesticidy (*e.g. Populus sp., topoly*)
- ↪ Anorganické látky

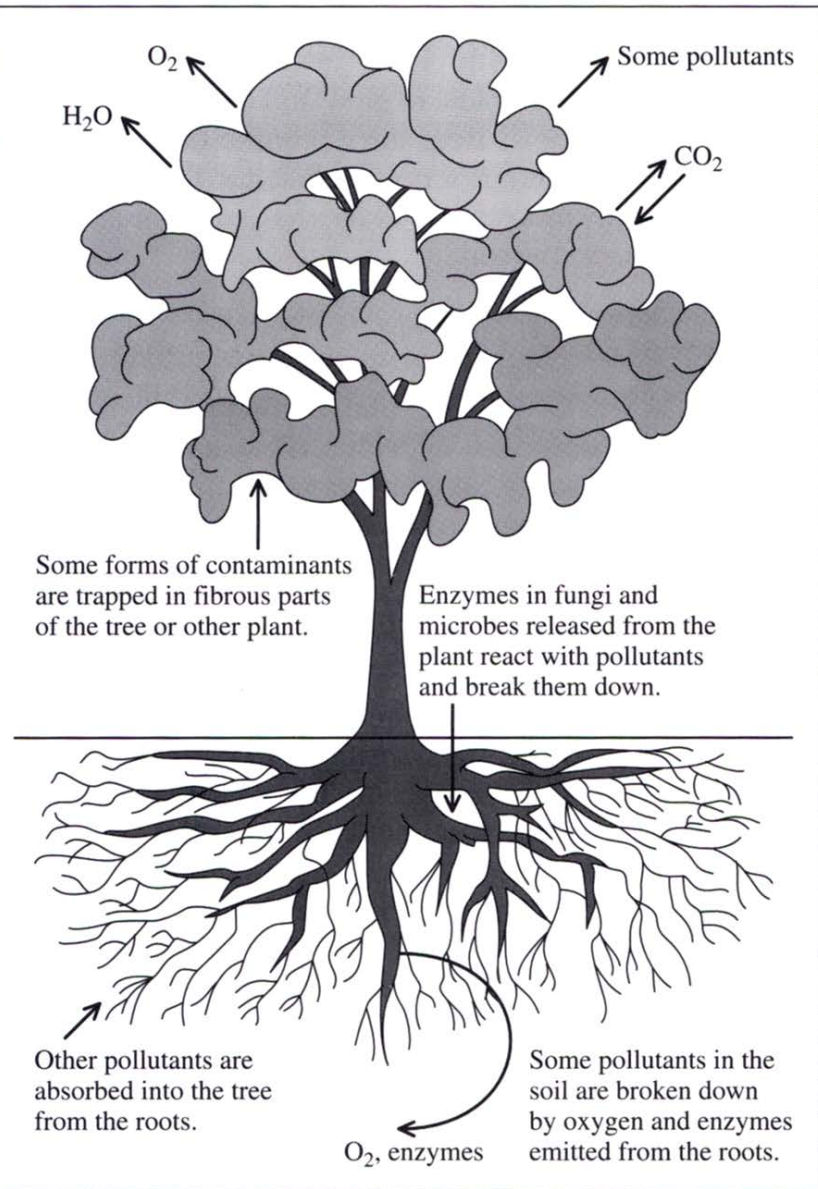


Figure 10-11
Mechanisms of
phytoremediation by a
plant.

In situ phytoremediation

Fytoremediace – popis procesu

- ↪ Pro účinnou fytoremediaci je důležité, aby znečišťující látky byly snadno dostupné kořenovému systému rostlin, který tyto látky dále transportuje do rostlinných tkání, kde jsou přeměňovány a ukládány
- ↪ Transportní systémy regulují příjem a distribuci kovů
- ↪ Ionty mohou být selektivně přijímány z půd
- ↪ Kořeny způsobují změny na rozhraní půda-kořen
- ↪ Na celém procesu se podílejí také mikroorganismy, které žijí v symbióze s rostlinami, zejména v oblasti rhizosféry – kořenové části rostlin.

Mechanismus fytořemediace

Rostliny při dekontaminaci uplatňují několik mechanismů:

1) přímou absorpci kořeny, následný přesun do rostlinné tkáně a akumulaci ve formě nefytotoxických metabolitů:

↪ některé rostliny absorbují organické látky přímo z kontaminované půdy;

↪ nerozpustné látky se většinou váží pevně na povrch kořenů, látky s vyšší rozpustností jsou transportovány přímo do rostlinných tkání, kde mohou být různými detoxikačními mechanismy přeměňovány na nefytotoxické sloučeniny a dále pak ukládány např. do vakuol nebo ve formě ligninu do buněčné stěny.

Mechanismus fytořemediace

2) Uvolňování enzymů do prostředí, které podporují mikrobiální aktivitu a biochemickou transformaci v půdě:

- ↪ Ve vzorcích půd z kontaminovaných míst bylo identifikováno pět enzymových systémů, které se pravděpodobně podílejí na transformaci organických látek v životním prostředí.
- ↪ Patří mezi ně dehalogenázy, reduktázy organických sloučenin, peroxidázy, lakáza (fenoloxidas) a nitrilázy.

Mechanismus fytoremediace

3) Zvýšenou mineralizací látek v rhizosféře, která je typická pro činnost hub a mikrobiálních konsorcií;

- ↪ V kořenovém systému rostlin je obvykle přítomno nejvíce bakterií (asi 10^6 - 10^8) a dále asi 10^5 aktinomycet a 10^3 hub na gram půdy.
- ↪ Rostliny napomáhají mikrobiální mineralizaci v rhizosféře tím, že uvolňují do půdy látky, které mohou sloužit mikroorganismům jako zdroj uhlíku a energie pro kometabolismus organických látek znečišťujících životní prostředí.
- ↪ Rostlinné exudáty obsahují hlavně enzymy, alifatické a aromatické látky (fenoly, terpeny, flavonoidy), aminokyseliny a cukry.
- ↪ Některé z těchto látek mohou působit též jako induktory bakteriálních drah degradace některých organických xenobiotik (např. PCBs).

Mechanismus fytořemediace

Rostliny používají pro transformaci polutantů, na rozdíl od mikroorganismů, zcela **odlišné mechanismy**. Ty můžeme rozdělit dle způsobu uplatnění:

4) Fytoextrakce (fytoakumulace) založená na schopnosti rostlin přijímat a akumulovat škodlivé látky ve svých kořenech i nadzemních částech.

Mechanismus fytořemediace

5) Transformace (fytodegradace) je přímá degradace organických polutantů na méně toxické nebo netoxické sloučeniny.

Mechanismus fytořemediace

6) Rhizosféřní degradace využívá činnosti rostlin a mikroorganismů.

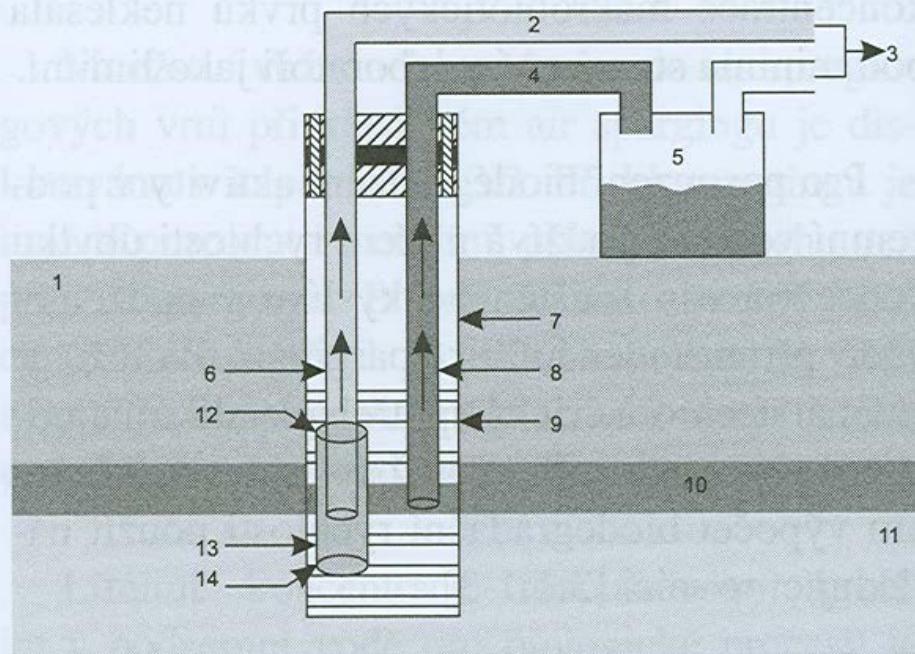
Mechanismus fytořemediace

- 7) **Převedení do plynné fáze**, kdy některé polutanty procházejí rostlinou do listů a vypařují se do atmosféry ve stejné nebo částečně modifikované formě.
- ↪ Jak bylo prokázáno u topolů, 90 % TCE (trichlorethylenu) odebraného z půdy bylo odpařeno.

Bioremediační technologie

- ↗ Bioprovzdušnění
- ↗ Fytoremediace
- ↗ **Bioslurping**
- ↗ *In situ* remediace podzemní vody
- ↗ Přirozená atenuace
- ↗ Bioremediace v tuhé fázi
- ↗ Bioremediace v suspenzním systému

Uspořádání bioslurpingového objektu



Obr. č. 3.1.1-2 Schéma uspořádání bioslurpingového objektu (Place a kol., 2003)

1 – povrch terénu, 2 – voda/půda-plyn, 3 – do vývěvy, 4 – palivo, 5 – oddělovací nádrž, 6 – odsávací potrubí pro suspenzi půdy ve vodě a plynu, 7 – výstroj PVC, 8 – odsávání paliva, 9 – perforace, 10 – volná fáze, 11 – hladina podzemní vody, 12 – půda-plyn, 13 – izolace bránící palivu ve vstupu do toho prostoru, 14 – uzavírací voda

Bioslurping

Složky systému:

- ↪ Slurp roura optimalizovaná pro LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL))
- ↪ Vakuová extrakční pumpa
- ↪ Separátor vody znečištěné ropnými látkami

Bioslurping

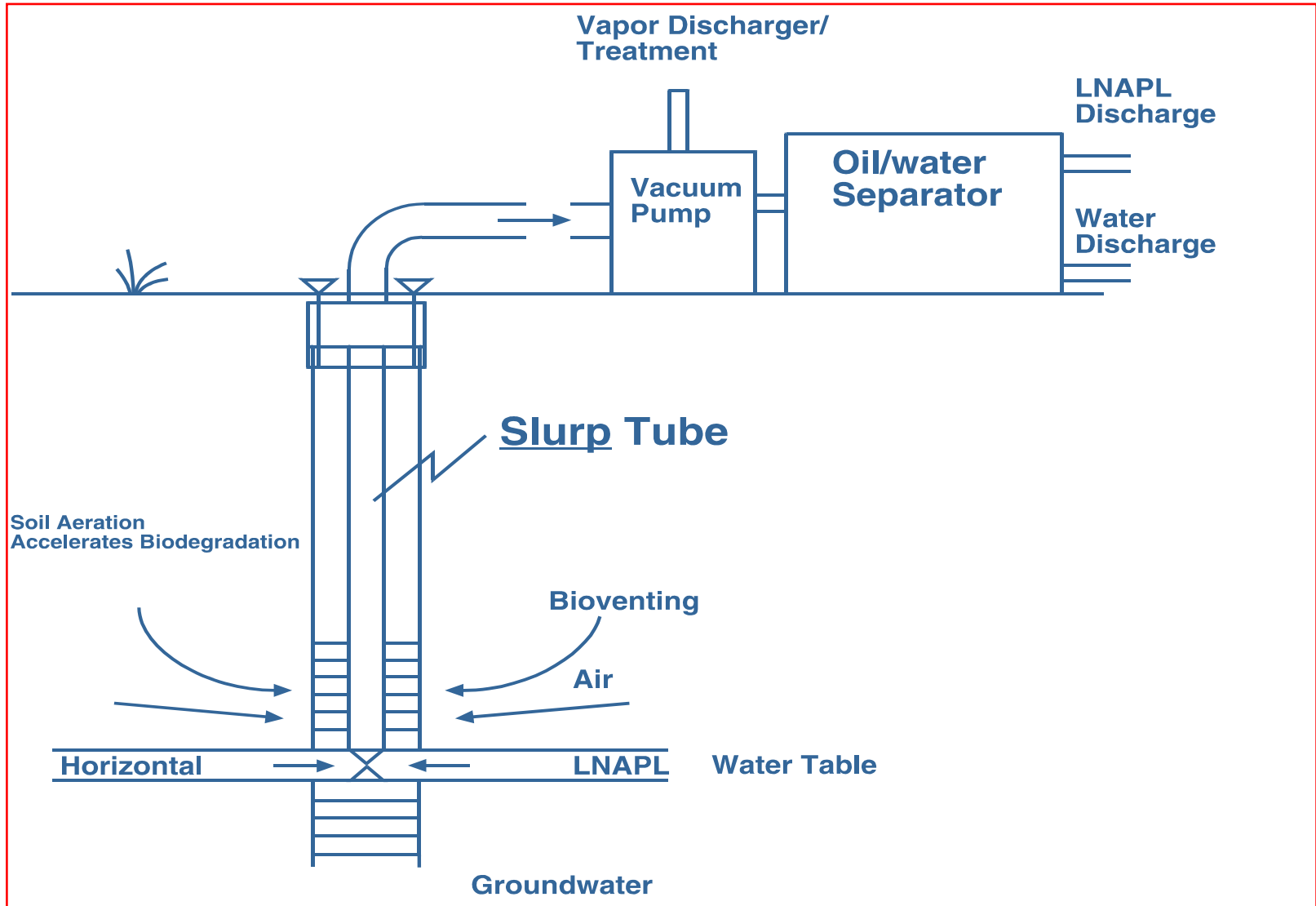
Odstraňované kontaminanty:

- ↪ LNAPLs/volně plovoucí ropné uhlovodíky
- ↪ Provzdušněná vadózní zóna

Bioslurping

- ↪ Produkt je vytahován ve formě: kolony, broků, kapek, par
- ↪ Přechází do separátoru ropa/voda
- ↪ Aerace prostřednictvím půdní plynné extrakce podporuje biodegradaci

Bioslurping



Bioslurping

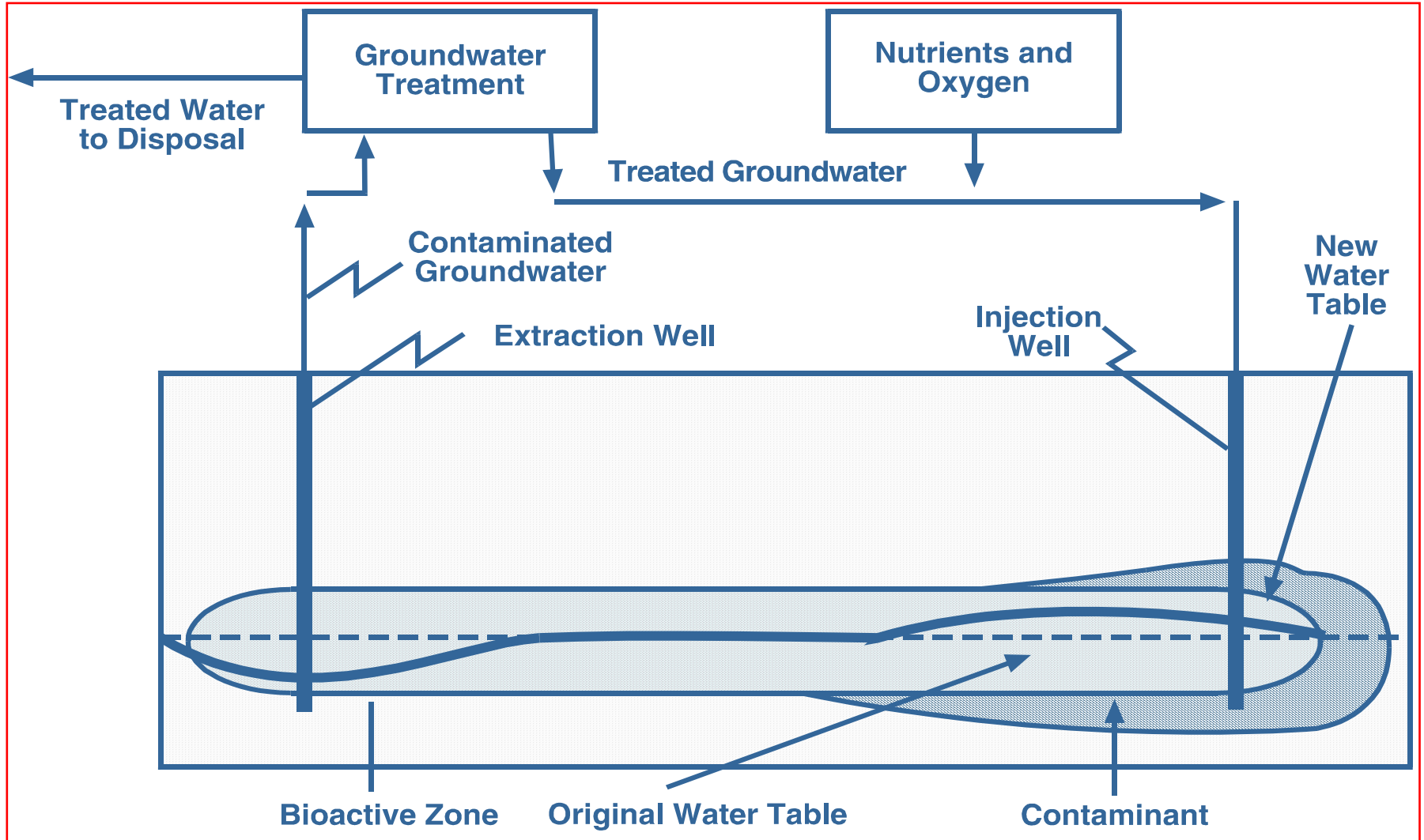
Výhody:

- ↪ Zvýšení účinnosti využitím podtlaku (vakua) má rozhodující význam
- ↪ Usnadnění biodegradace
- ↪ Minimální extrakce podzemní vody
- ↪ Systém může být upraven na bioventing

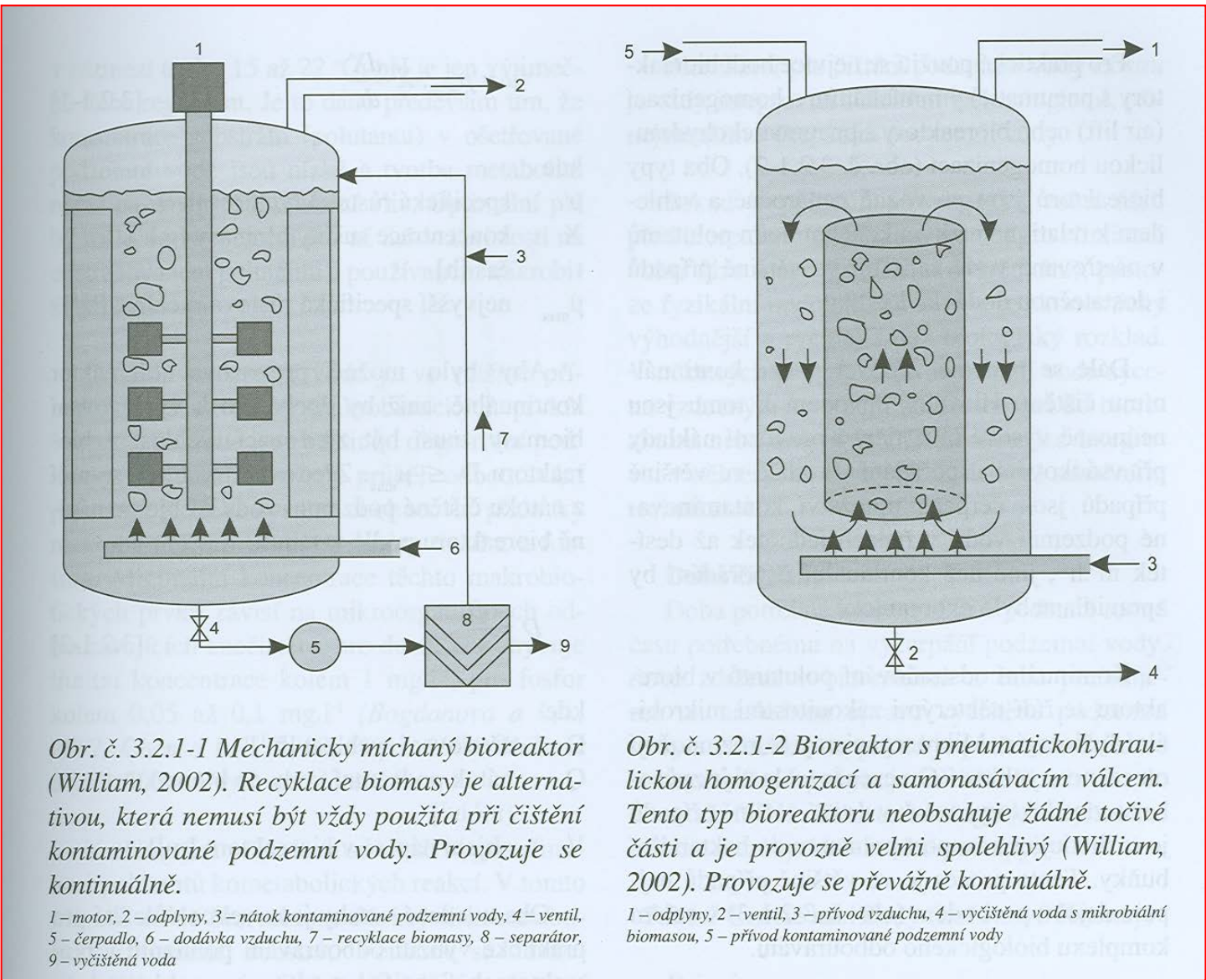
Bioremediační technologie

- ↗ Bioprovzdušnění
- ↗ Fytoremediace
- ↗ Bioslurping
- ↗ *In situ* remediace podzemní vody
- ↗ Přirozená atenuace
- ↗ Bioremediace v tuhé fázi
- ↗ Bioremediace v suspenzním systému

In situ remediate podzemní vody



Bioreaktory pro čištění podzemních vod



In situ remediace podzemní vody

Požadavky infiltrace:

- ↪ Vstřikovací vrty jsou většinou přímé, ale musí být pečlivě navrhovány
- ↪ Infiltrační galerie nebo povrchové aplikace stojí méně, ale jsou méně přímé
- ↪ Musí být dodány požadované koncentrace elektron akceptorů

In situ remediace podzemní vody

Potenciální příjemci elektronů (při 10 °C):

- ↪ Vzduchem saturovaná voda: 10 mg.l⁻¹ kyslíku
- ↪ Kyslíkem saturovaná voda: 40 mg.l⁻¹ kyslíku
- ↪ 200 mg.l⁻¹ H₂O₂: 94 mg.l⁻¹ kyslíku

In situ remediace podzemní vody

Požadované živiny

- ↪ **Kombinovaná přítomnost anorganických živin ovlivňuje rychlost biodegradace**
- ↪ **Potřeba dalších živin závisí na charakteristikách lokality**

In situ remediace podzemní vody

Specifické výhody:

- ↪ Široce aplikovatelná pro organické kontaminanty za vhodných podmínek
- ↪ Je obecně považována za přirozený proces a podporována veřejností
- ↪ Může být cenově přijatelnější než běžné pumpování a čisticí technologie

In situ remediace podzemní vody

Specifická omezení:

- ↪ **Kontaminanty musí být biodegradovatelné**
- ↪ **Vyžaduje extensivní charakterizaci lokality**
- ↪ **Pohyblivost kontaminantů může vyžadovat nezbytnost čistícího systému pro vodu nad hladinou podzemní vody**
- ↪ **Proces může vést k vytvoření anaerobních podmínek**

Bioremediační technologie

- ↪ Bioprovzdušnění
- ↪ Fytoremediace
- ↪ Bioslurping
- ↪ *In situ* remediace podzemní vody
- ↪ **Přirozená atenuace**
- ↪ Bioremediace v suspenzním systému
- ↪ Bioremediace v tuhé fázi

Přirozená atenuace

Princip:

- ↪ **Přirozená atenuace je založená na přirozených metabolických procesech, které probíhají v mikrobiálních a rostlinných buňkách.**
- ↪ **V průběhu těchto procesů se odstraňují organické polutanty z kontaminovaných míst.**
- ↪ **Přirozená atenuace byla demonstrována na několika případech čištění spodních vod.**

Přirozená atenuace

Faktory ovlivňující přirozenou atenuaci:

- ↪ **Přirozenou atenuaci** ovlivňuje řada faktorů jako je původ polutantu jeho biodegradabilita, rozpustnost, koncentrace a toxicita.
- ↪ **Dále pak celková charakteristika kontaminovaného místa:**
 - vlastnosti půdy
 - velikost částic
 - pH
 - teplota
 - přítomnost těžkých kovů a jiných toxických látek.
- ↪ **Také vlastnosti přítomné mikrobiální populace, přítomnost příslušných katabolických genů.**

Přirozená atenuace

Omezení:

- ↪ Pokles koncentrace cílového polutantu během sledované doby může mít řadu důvodů, z nichž jenom jeden je kompletní mineralizace.
- ↪ Důvody jsou odpařování, adsorpce na částice půdy, biotransformace, chemická a fotochemická oxidace.
- ↪ Přirozenou atenuaci lze využít pouze pro biodegradovatelné organické látky.
- ↪ Sběr dat potřebných pro vstupní parametry modelu.
- ↪ Modelování je komplexní, vyžaduje expertízu.
- ↪ Produkty rozkladu mohou být více toxické, pohyblivé.
- ↪ Rozklad kontaminantů může měnit migrační rychlost.

Přirozená atenuace - využití

- ↪ Do dnešní doby byla **přirozená atenuace** využita převážně pro halogenovaná rozpouštědla a ropné uhlovodíky.
- ↪ Mezi další polutanty, které mají předpoklady pro přirozenou atenuaci patří chlorbenzeny, chlorfenoly, chlorbenzoáty a PCBs. PCBs jsou dehalogenovány kometabolicky za methanogenních podmínek.
- ↪ Mineralizace takto vzniklých nízkochlorovaných kongenerů je v zásadě možná.

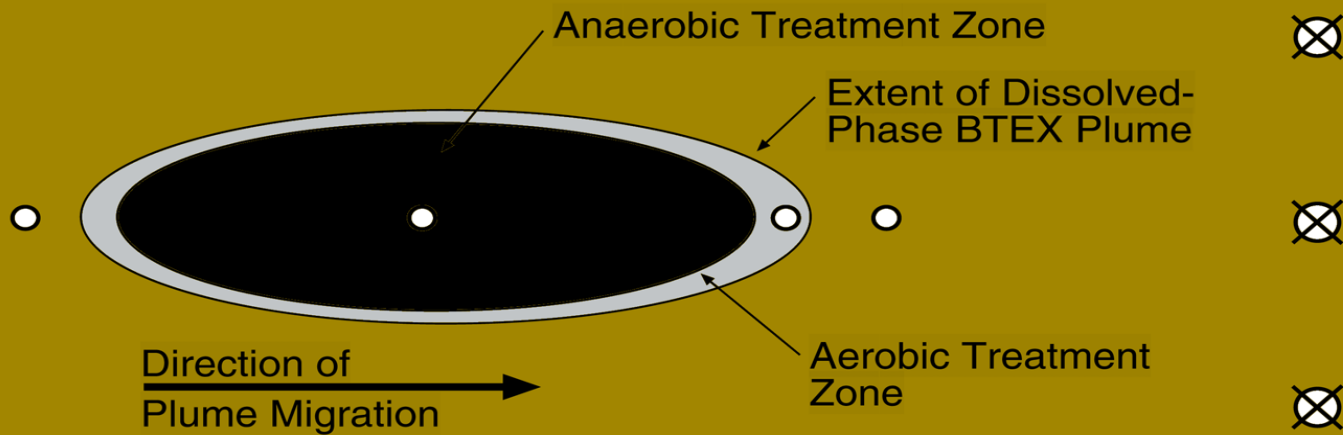
Přirozená atenuace

Náklady:

- ↪ Výhoda přirozené atenuace spočívá v minimálních nákladech, ale celý proces je dlouhodobý a může trvat i několik let a vyžaduje důsledný kontrolní systém.
- ↪ Cena zahrnuje cenu modelování, vzorkování a monitoringu.

Přirozená atenuace

Hypothetical Long-Term Monitoring Strategy



LEGEND

⊗ Point-of-Compliance Monitoring Well

○ Long-Term Monitoring Well

Not to Scale

Bioremediační technologie

- ↗ Bioprovzdušnění
- ↗ Bioslurping
- ↗ *In situ* remediacie podzemní vody
- ↗ Přirozená atenuace
- ↗ **Bioremediace v suspenzním systému**
- ↗ Bioremediace v tuhé fázi

Bioremediace v suspenzním systému

Cílové kontaminanty:

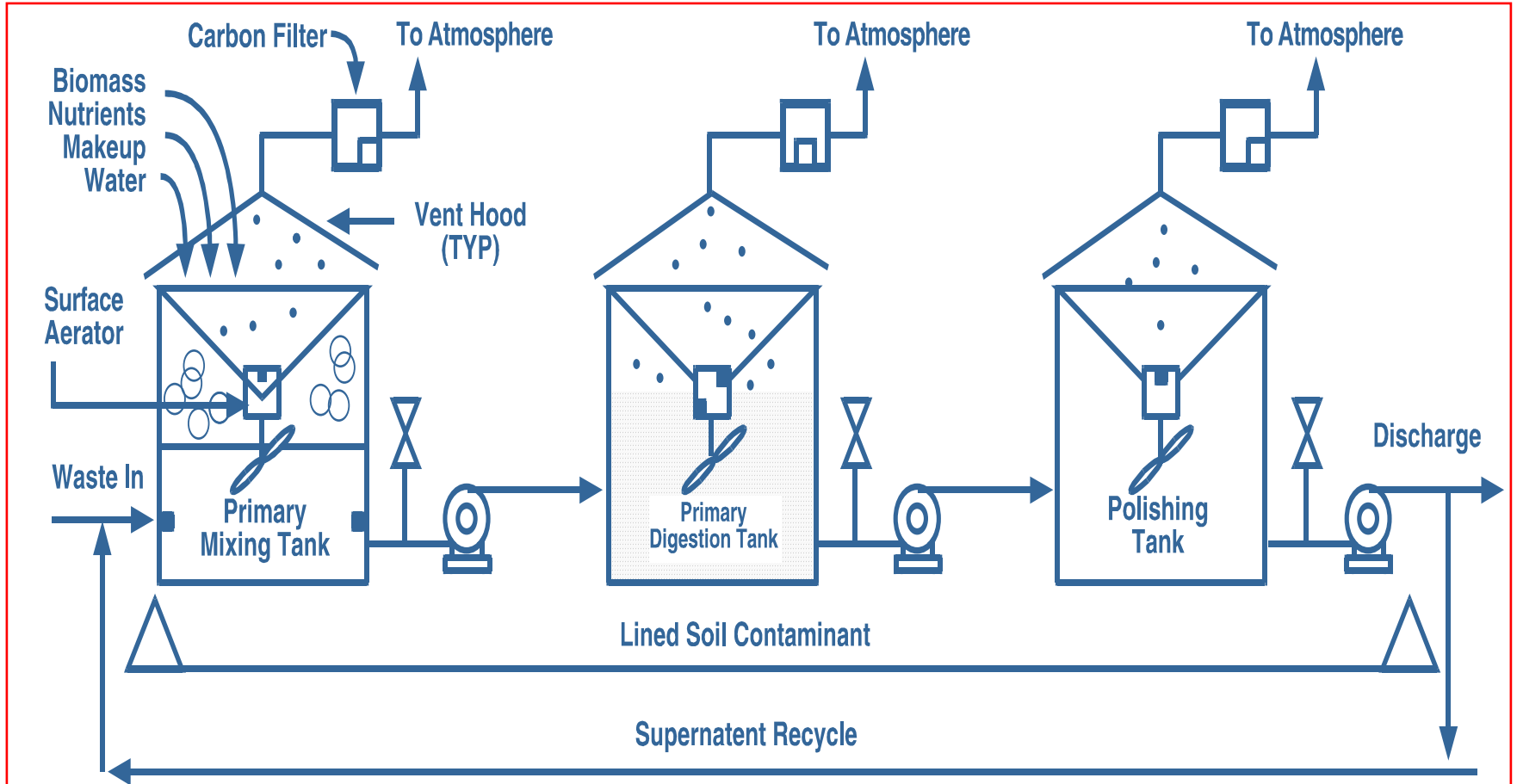
- ↪ VOCs
- ↪ SVOCs
- ↪ X- VOCs
- ↪ X- SVOCs
- ↪ PAHs
- ↪ PCDDs/Fs
- ↪ Pesticidy

Bioremediace v suspenzním systému

- ↪ Prvním krokem při čištění je odtěžení půdy, odstranění velkých kamenů a příprava vodní suspenze (60-95 váhových %).
- ↪ Obvykle je technologie v suspenzním systému prováděna jako vsádkový proces v reaktoru, kterým může být laguna, otevřené nádoby nebo uzavřený systém.
- ↪ Po ukončení bioremediace se oddělí vodní a pevná fáze.
- ↪ Různé typy suspenzních reaktorů se od sebe liší ve způsobu okysličování a způsobem míchání suspenze.

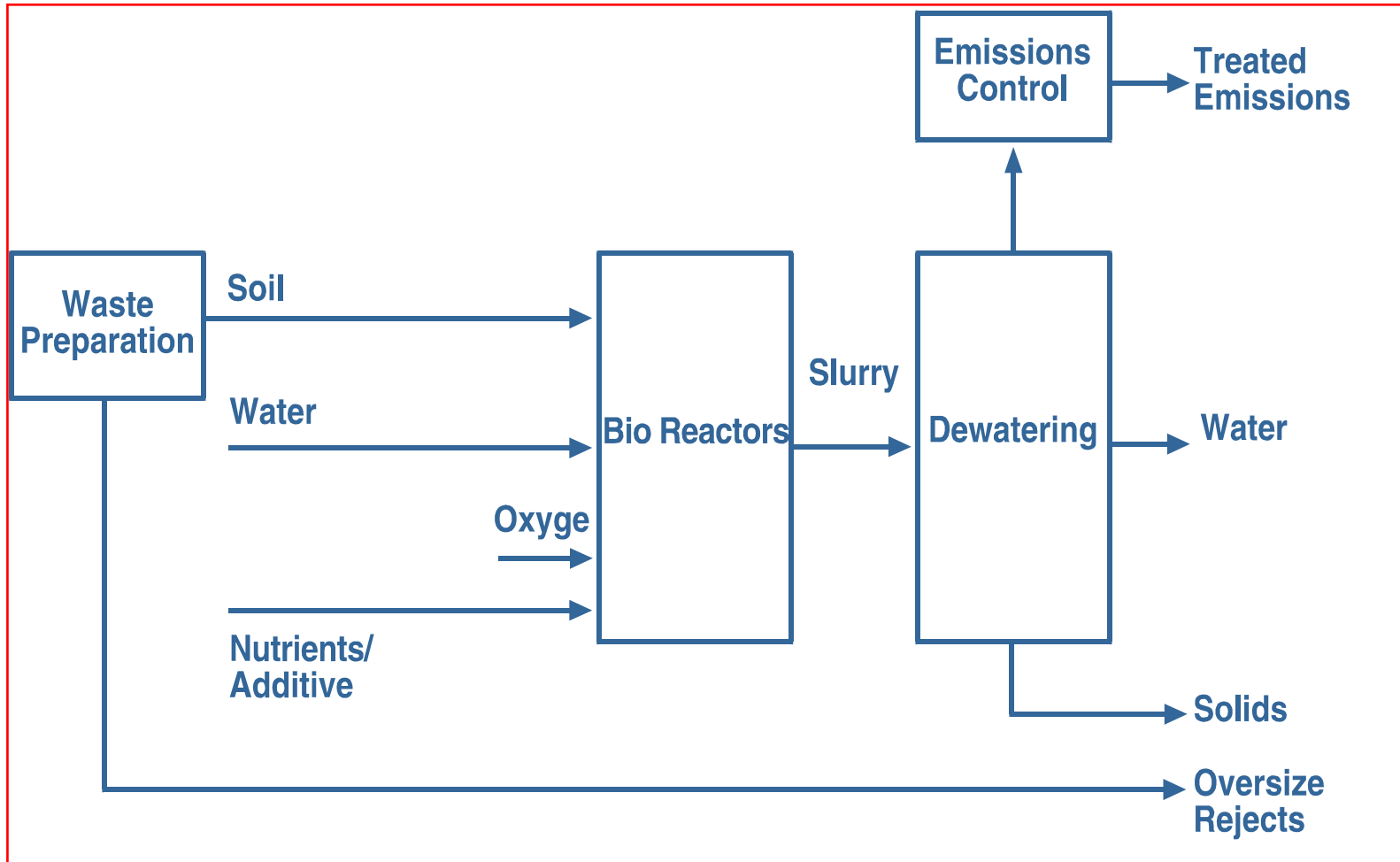
Bioremediace v suspenzním systému

Konceptní model čistící technologie



Bioremediace v suspenzním systému

Typický proces



Bioremediace v suspenzním systému

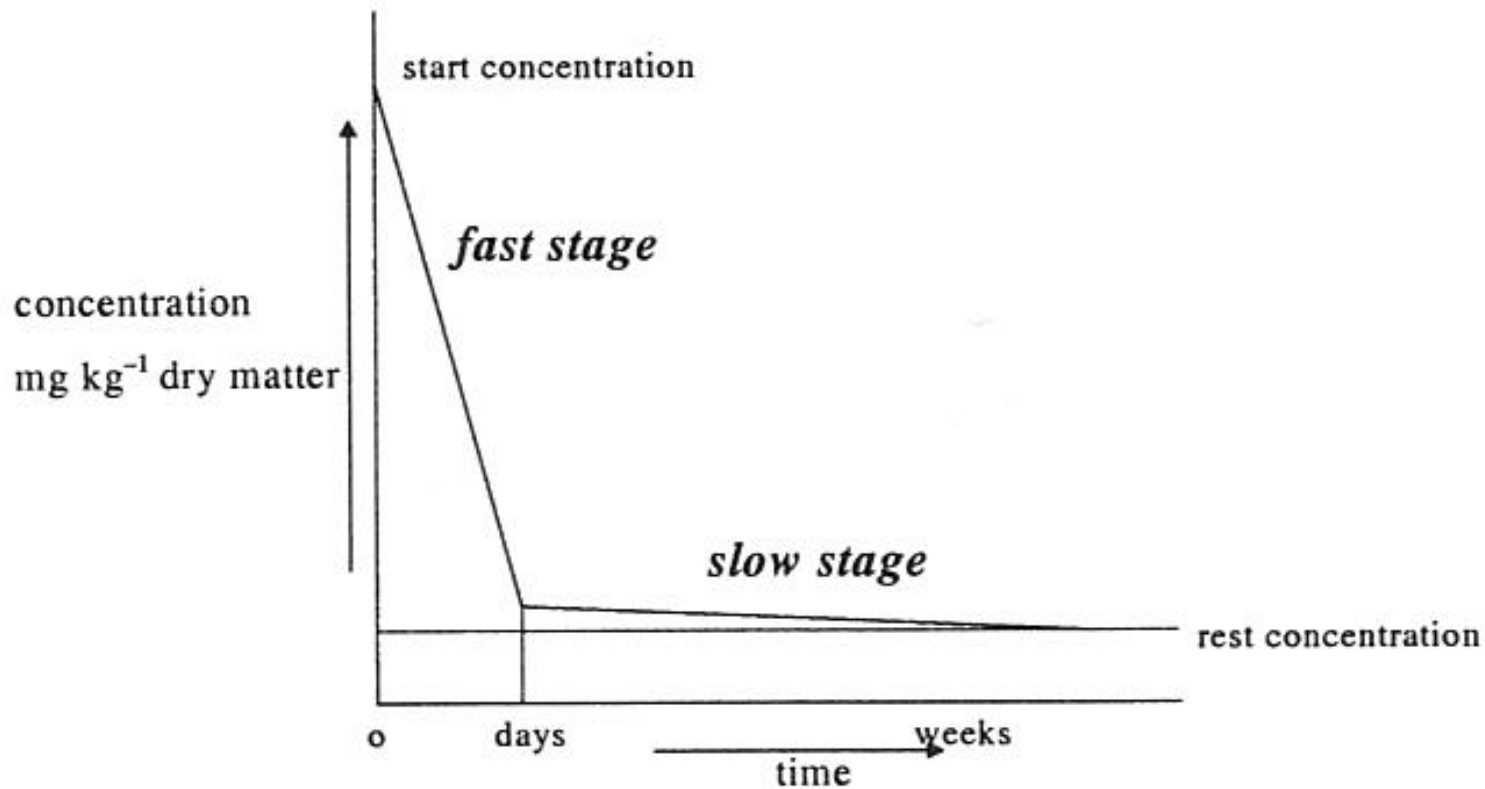


Fig. 11.8 Generalized curve for decontamination during batch operation.

Bioremediace v suspenzním systému

Specifické aplikace:

- ↪ Je účinná pro různé koncentrace kontaminantů
- ↪ Využitelná pro řadu organických kontaminantů (dříve uvedené, kreosot, uhelný dehet a odpady z rafinérií)
- ↪ Problémovou může být aplikace na místech s vysokými koncentracemi kovů, anorganických látek, pesticidů nebo organických látek nerozpustných ve vodě

Bioremediace v suspenzním systému

Specifické výhody:

- ↪ Nejsou požadovány speciální zařízení
- ↪ Vsádkové operace dovolují přesnější stanovení hmotnostní bilance
- ↪ Využitelné pro široký rozsah kontaminantů
- ↪ Podmínky uvnitř suspenzního reaktoru mohou být kontrolovány

Bioremediace v suspenzním systému

Specifická omezení:

- ↪ Vyšší nároky na energii
- ↪ Nutnost přemístování zeminy a její úprava
- ↪ Separace vodního a pevného podílu suspenze v závěru procesu

Bioremediační technologie

- ↪ Bioprovzdušnění
- ↪ Fytoremediace
- ↪ Bioslurping
- ↪ *In situ* remediace podzemní vody
- ↪ Bioremediace v suspenzním systému
- ↪ Bioremediace v tuhé fázi

Bioremediace v tuhé fázi

Cílové kontaminanty:

- ↪ VOCs
- ↪ SVOCs
- ↪ X- VOCs
- ↪ X- SVOCs
- ↪ PAHs
- ↪ Pesticidy
- ↪ Chlorované fenoly
- ↪ Výbušniny (TNT, RDX, HMX)

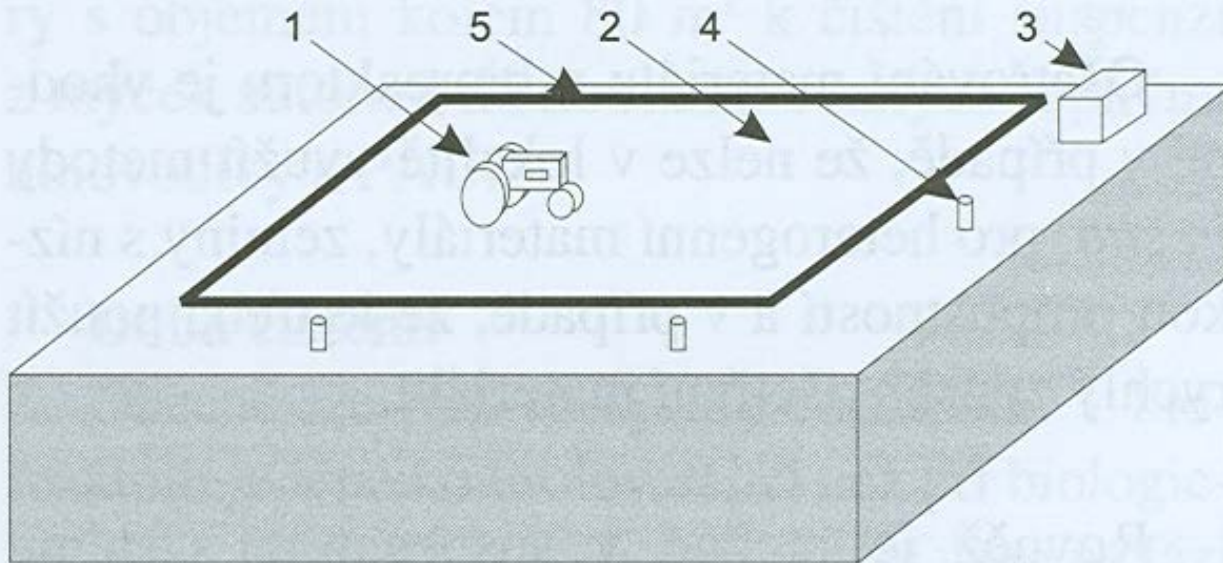
Bioremediace v tuhé fázi

- ↪ **Land farming technologie** se obvykle provádí přímo v povrchových vrstvách půdy anebo na separovaných dekontaminačních plochách.
- ↪ Kontaminovaná půda je dostatečně pohnojena N-P-K hnojivem, provlhčena a rozprostřena na nepropustnou podložku tak, aby se vrstva zeminy pohybovala v rozmezí 40 - 60 cm.

Bioremediace v tuhé fázi

- ↪ Při dostatečné katabolické aktivitě mikroorganismů přirozeně osidlujících kontaminovanou zeminu se neprovádí žádná další inokulace mikroorganismy.
- ↪ Půda je v průběhu dekontaminace provzdušňována přehazováním.
- ↪ Průběžně se kontroluje vlhkost půdy, koncentrace živin a koncentrace polutantu.

Landfarming

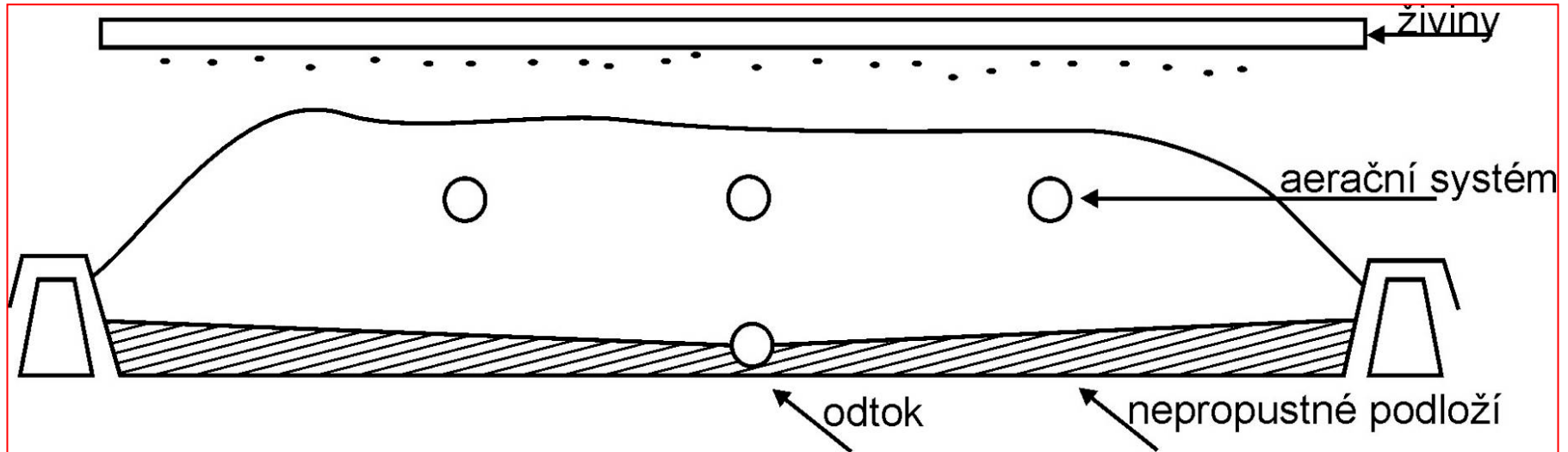


Obr. č. 2.2.1-4 Základní uspořádání landfarmingu s nejdůležitějším technickým vybavením (Anonym, 2004)

1 – kypření ošetřovaného materiálu pro zapravení kyslíku, 2 – kontaminovaná zemina, 3 – jímka na průsakové vody a jejich čištění, 4 – monitorovací vrty pro kontrolu kvality podzemních vod, 5 – ohrazení

Bioremediace v tuhé fázi

Vanový reaktor (bed reactor).



Bioremediace v tuhé fázi

- ↪ Při **kompostování** je kontaminovaný materiál míchán s organickým materiálem (sláma, piliny, kůra aj.) a obohacen zdrojem N a P, případně dalšími anorganickými živinami.
- ↪ Materiál může být uložen rotačních bubnech, cirkulačních tancích, otevřených nádobách, silech nebo na otevřené hromadách (**biopiles**) nebo záhonech (**windrow composting**).
- ↪ V průběhu kompostování je materiál pravidelně vlhčen a vzdušněn přehazováním, otáčením nebo vzdušnicím systémem.
- ↪ Teplota během procesu je obvykle okolo 50-60 °C.
- ↪ Proces může probíhat za aerobních nebo anaerobních podmínek.

Bioremediace v tuhé fázi

Aplikace:

- ↪ Primárně využitelná pro řadu organických látek a některé kovy, organické látky převádí na neškodné
- ↪ Vhodná metoda pro čištění půd, kalů a sedimentů (studie proveditelnosti je nutná)
- ↪ Vysoké koncentrace kontaminantů mohou být toxické pro mikroorganismy
- ↪ Teplota, obsah vlhkosti, pH, obsah živin a kyslíku (pro aerobní systémy) musí být vhodné pro použití mikroorganismy
- ↪ Během posledních 25 let se kompostování stalo jednou ze základních technologií pro čištění městských odpadů



