

# **E2240 Účinky stresorů v ekosystémech**

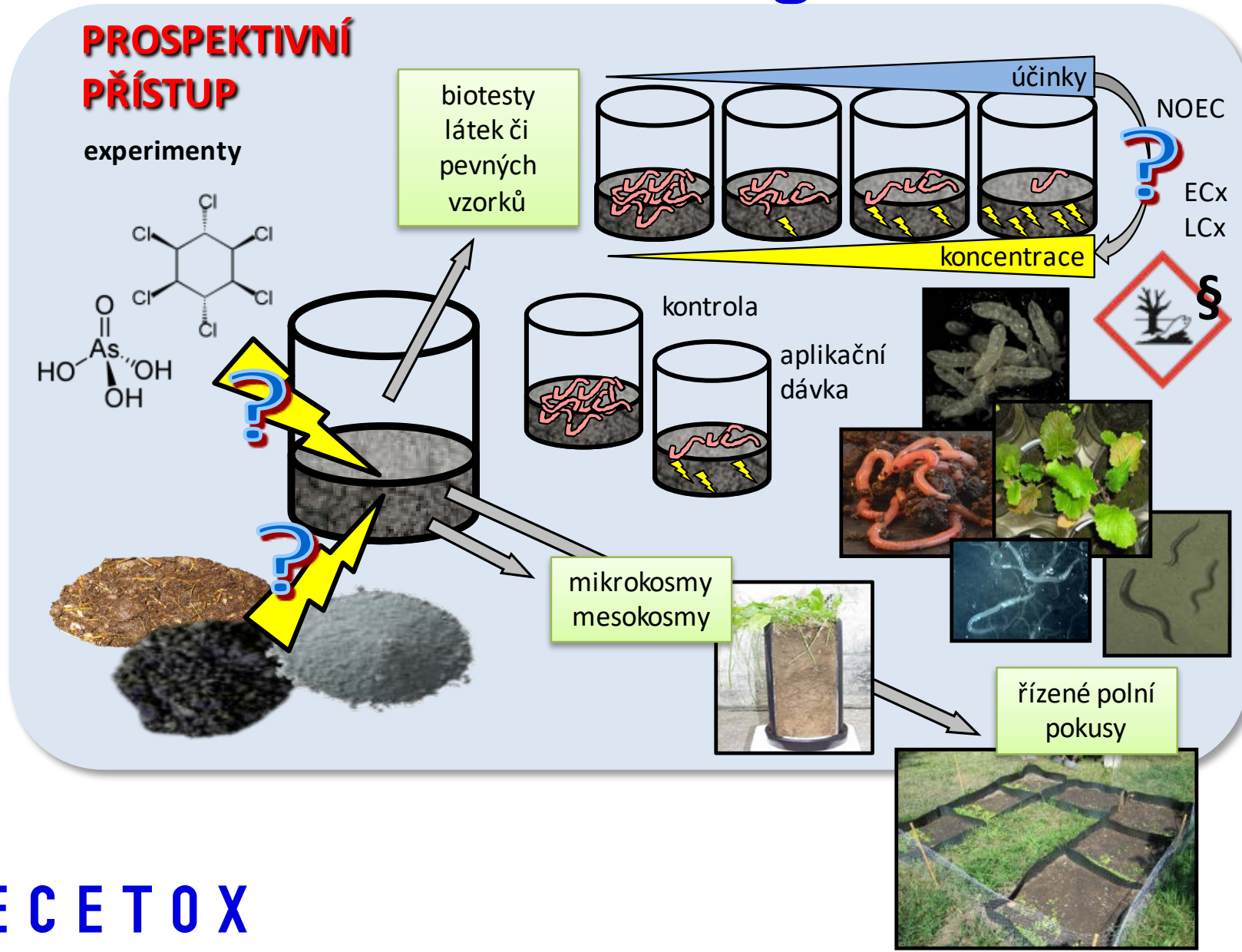
## **02 Konceptní přístupy k hodnocení účinků stresorů**

Jakub Hofman

**MUNI | RECETOX**

# **Základní koncepce**

# Prospektivní ekotoxikologie



# Prospektivní ekotoxikologie - cíle

- zhodnocení škodlivosti konkrétních kontaminantů (jednotlivých i směsí) a dalších stresorů pro organismy
- analýza vztahů mezi koncentrací a účinkem („dose-response relationship“)
- kvantifikace nebezpečnosti, hodnocení rizik (včetně legislativně nařízeného hodnocení) a predikce negativních účinků v reálném ekosystému
- nastavení limitních hodnot pro (legislativní) regulaci chemických látek, pesticidů, léčiv, odpadů a dalších materiálů, které mohou vstoupit do ekosystému (kaly, hnojiva, sedimenty ...)
- poznání dějů, procesů, zákonitostí a mechanismů týkajících se účinků kontaminantů (případně dalších stresorů) na biotu, osudu a biodostupnosti kontaminantů a expozice organismů
- pochopení příčin škodlivých účinků kontaminantů na organismy

# Prospektivní ekotoxikologie - příklad

## ■ Toxicita toxafenu půdní organismy

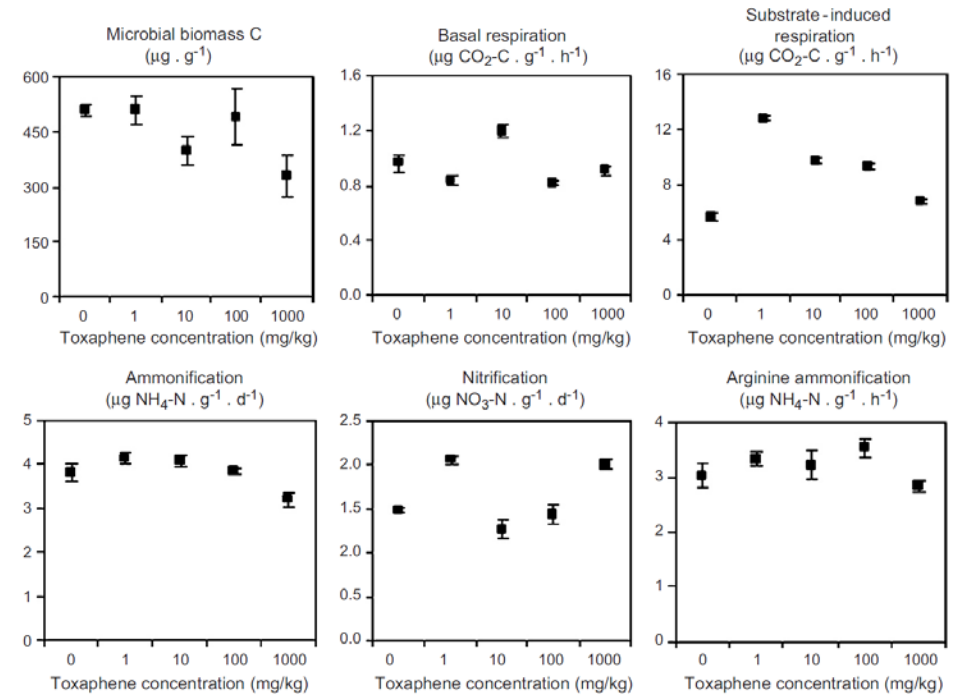
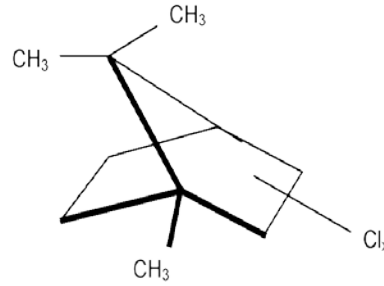
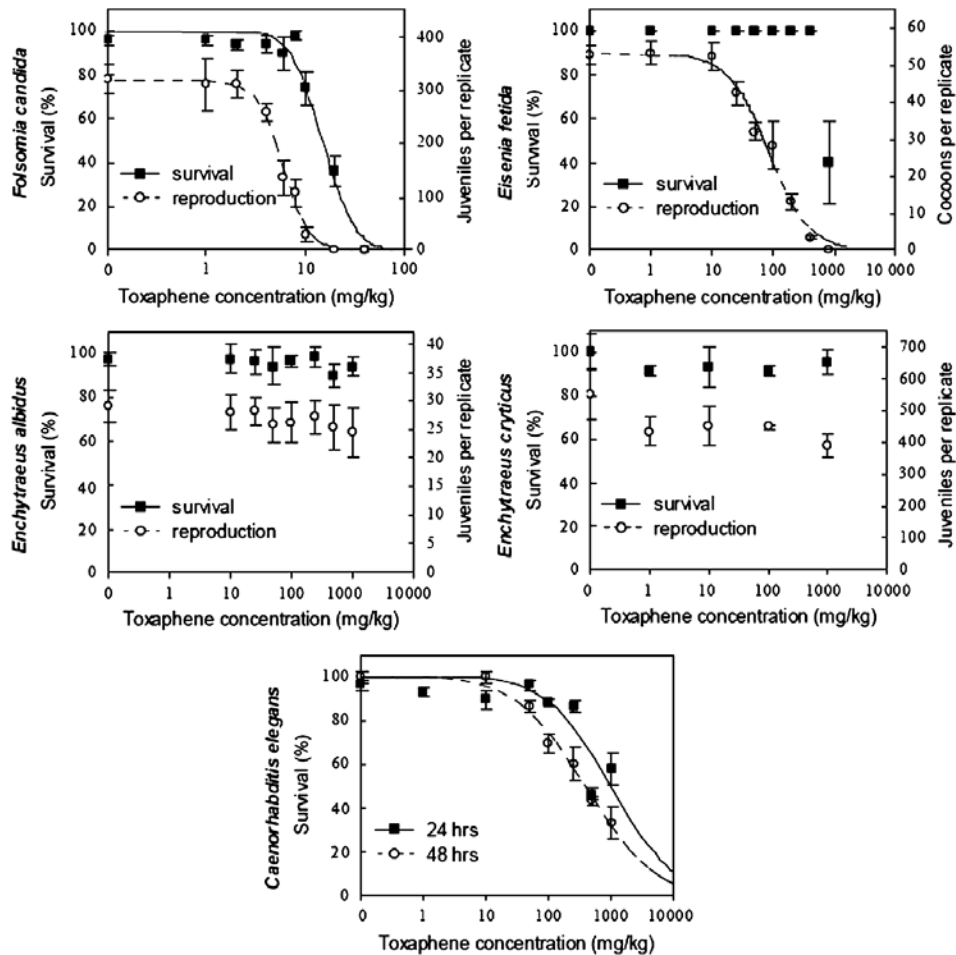


Fig. 2. Effects of toxaphene on biomass, respiration (basal and substrate-induced), ammonification, and nitrification of indigenous microorganisms. The boxes show mean  $\pm$  standard errors ( $n = 3$ ).

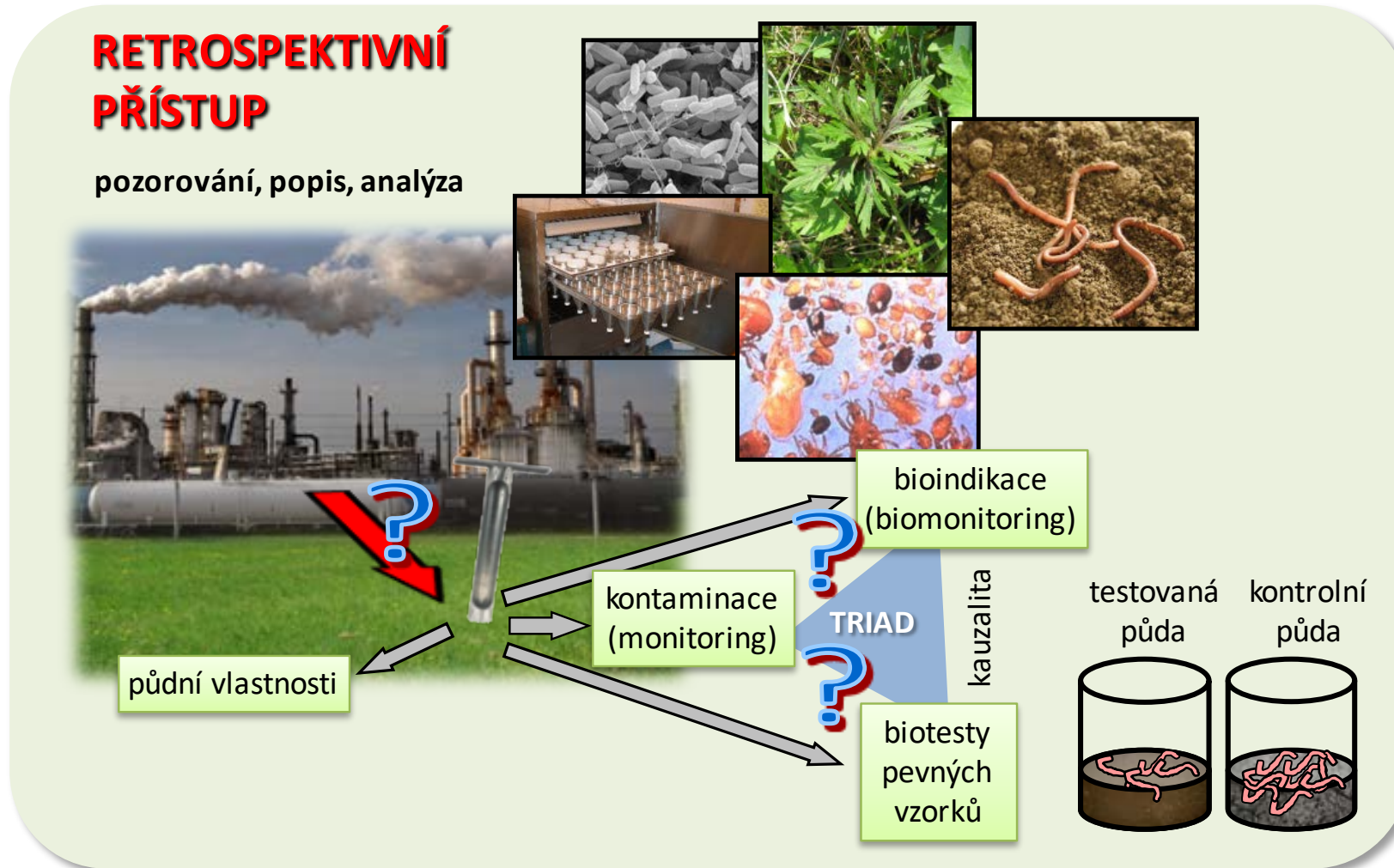
Bezchlebová et al. (2007)

# Prospektivní ekotoxikologie - příklad

- **Toxicita toxafenu půdní organismy**
- USA National Soil Monitoring Program: 0,01 – 3,82 mg/kg
- Harner et al. (1999): 0,285 mg/kg půdy v Alabamě
- Kannan et al. (2003): 0,277 mg/kg South Carolina pole bavlny
- Pole bavlny v Nicaragui: 17 - 44 mg/kg
- pilotní screening toxafenu v ČR: 0,009 – 0,06 mg/kg ve vysokohorských lesních půdách
- **srovnáním s NOEC pro *F. candida* (nejcitlivější) se ukazuje, že na některých lokalitách ve světě soudobá residua toxafenu (desítky mg/kg) mohou představovat riziko pro půdní organismy**

Bezchlebová et al. (2007)

# Retrospektivní ekotoxikologie





# Retrospektivní ekotoxikologie - cíle

- poznání vazeb (kauzality) mezi výskytem a osudem kontaminantů (stresorů) a stavem bioty
- poznání proběhlých dějů a jejich zákonitostí umožňuje odhadovat vývoj pro budoucnost v podobných situacích (predikce)
- hodnocení zásahů v reálných ekosystémech (hodnocení hnojení, remediací, posuzování kontaminovaných míst...)
- poznání dějů, procesů, zákonitostí a mechanismů týkajících se účinků kontaminantů (případně dalších stresorů) na biotu, osudu a biodostupnosti kontaminantů a expozice organismů
- pochopení následků škodlivých účinků kontaminantů zejména na vyšších úrovních biologické organizace



# Retrospektivní ekotoxikologie - příklad

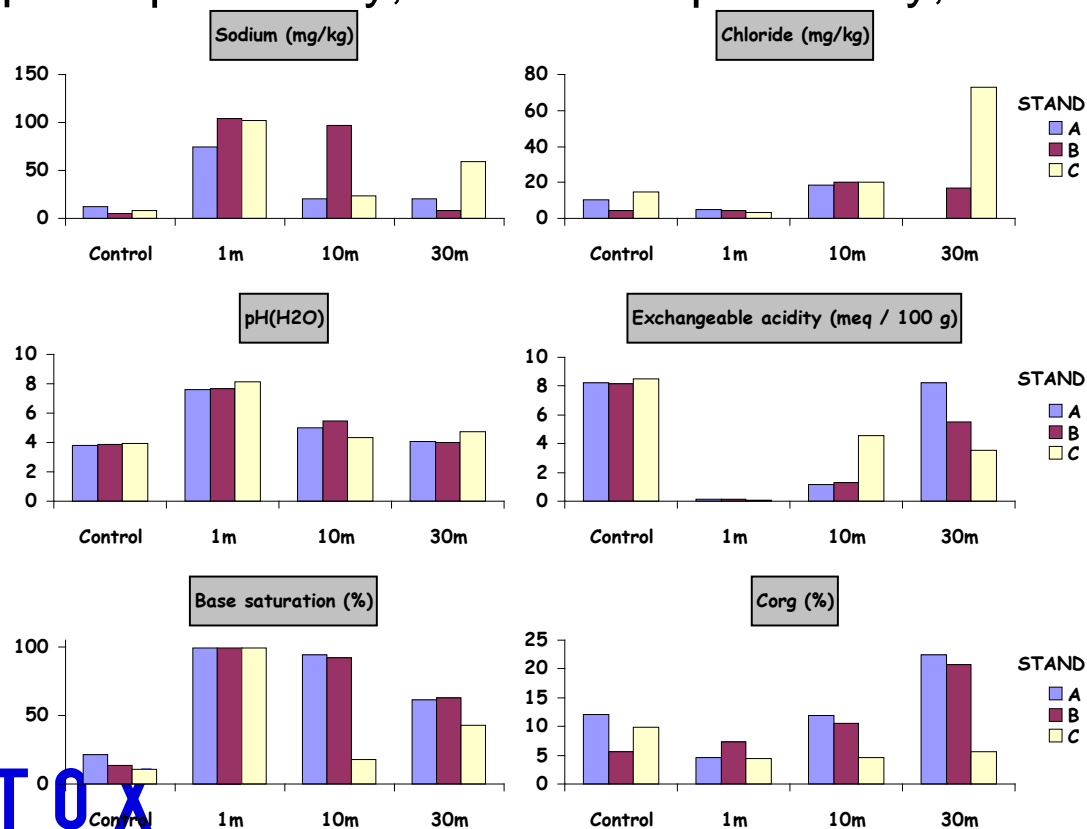
## Vliv solení na půdní mikroorganismy

- používání solí na pozemních komunikacích - hlavní prostředek zvýšení bezpečnosti v zimě, ALE může mít výrazný vliv na okolní ekosystémy
- hlavní efekty: silně zvýšené hladiny chloridů a sodíku a u některých posypových materiálů také těžké kovy, ferokyanidy apod.
- řada studií sledujících efekty na vegetaci: negativní efekty při koncentracích  $> 68 \text{ mg/kg Na}^+$  a  $> 215 \text{ mg/kg Cl}^-$
- $\text{Cl}^-$  v půdě mobilní  $\rightarrow$  do vodních ekosystémů  $\rightarrow$  chronické efekty na vodní organismy od 200–300 mg/L
- o vlivech na mikroorganismy je dosud jen málo poznatků

# Retrospektivní ekotoxikologie - příklad

## Vliv solení na půdní mikroorganismy

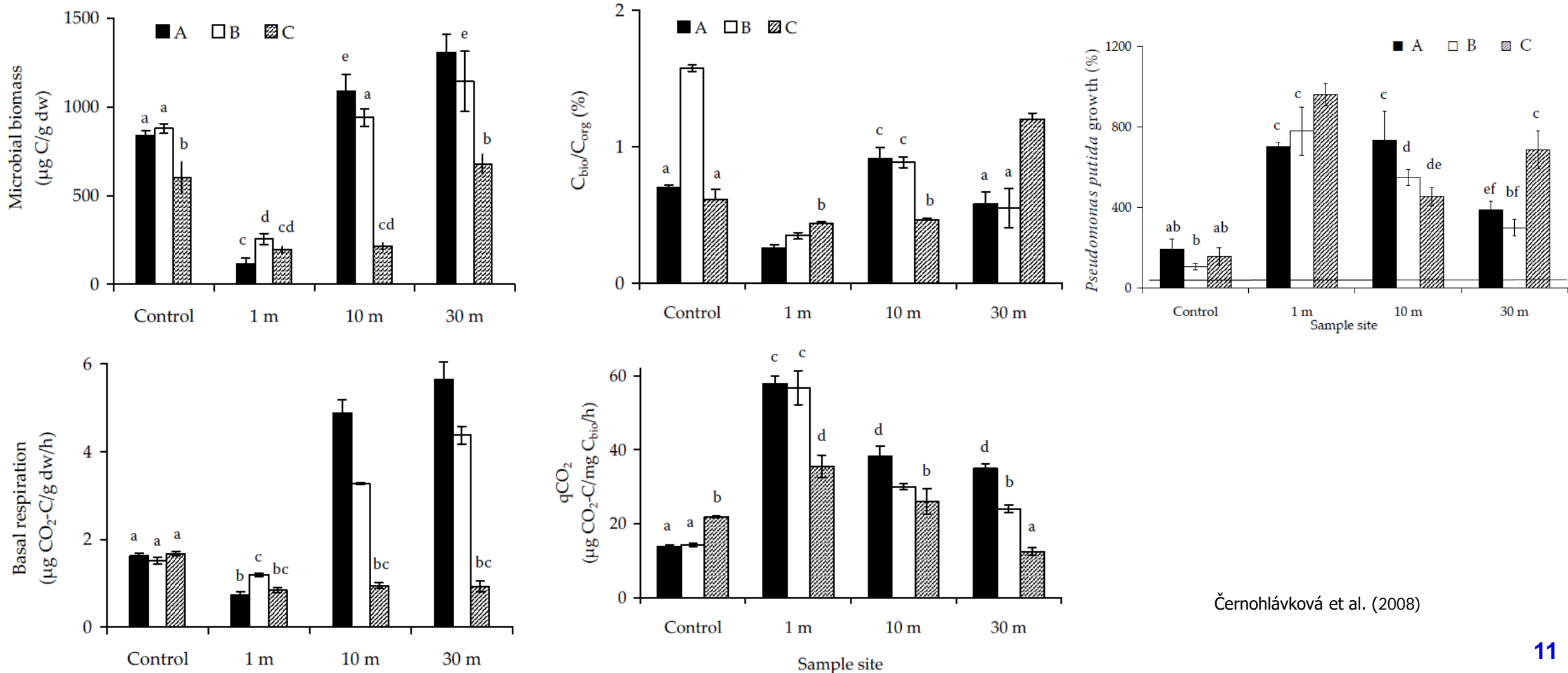
- Cíl studie:
  - Sledovány tři transekty v okolí silnice v KRNAP – lokality v různé vzdálenosti od silnice
  - Sledovány půdní parametry, mikrobiální parametry, bakteriální testy toxicity



Černošlávková et al. (2008)

# Retrospektivní ekotoxikologie - příklad

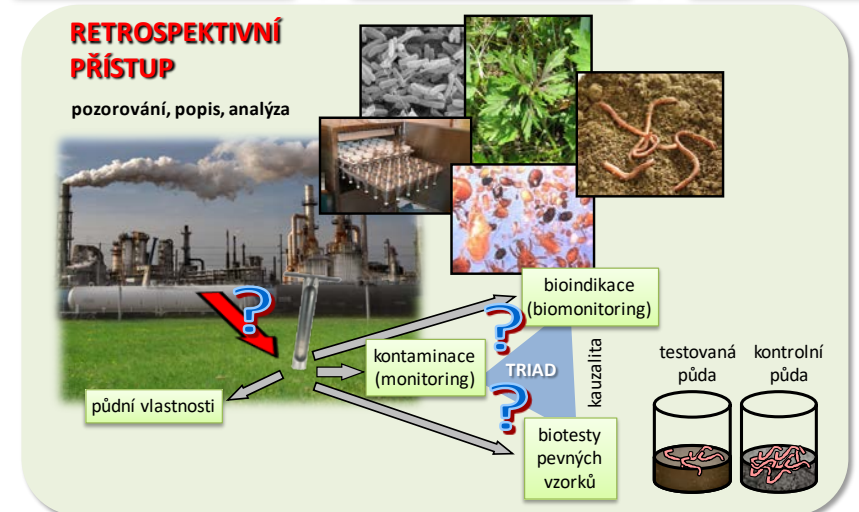
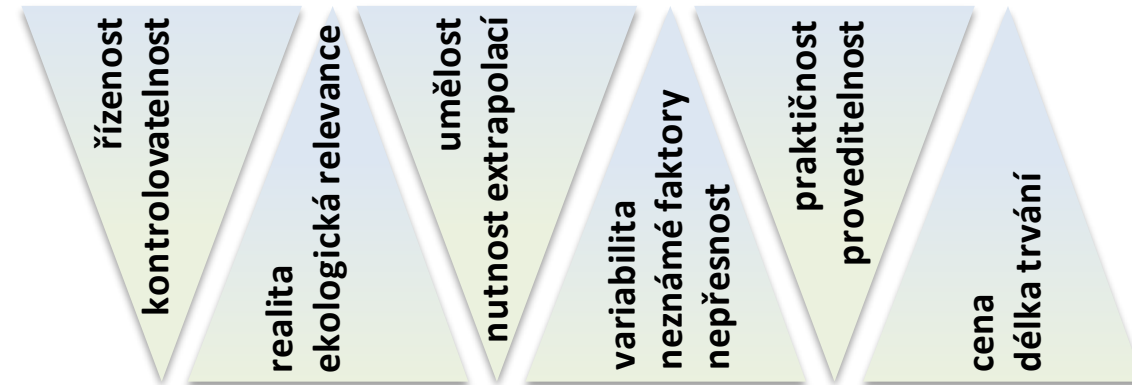
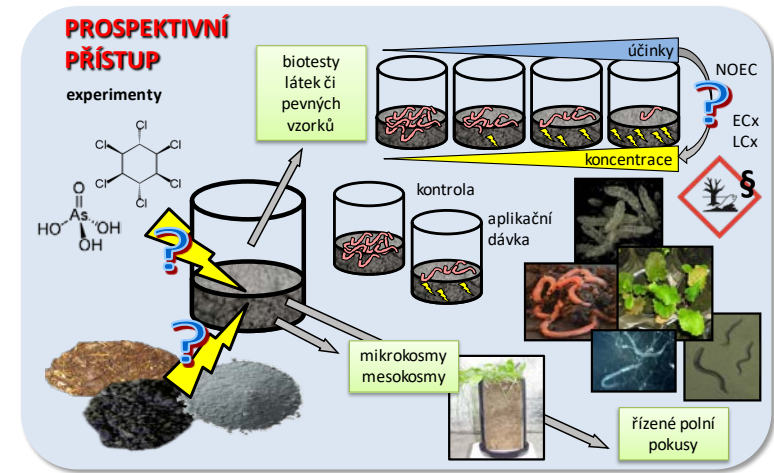
## ■ Vliv solení na půdní mikroorganismy



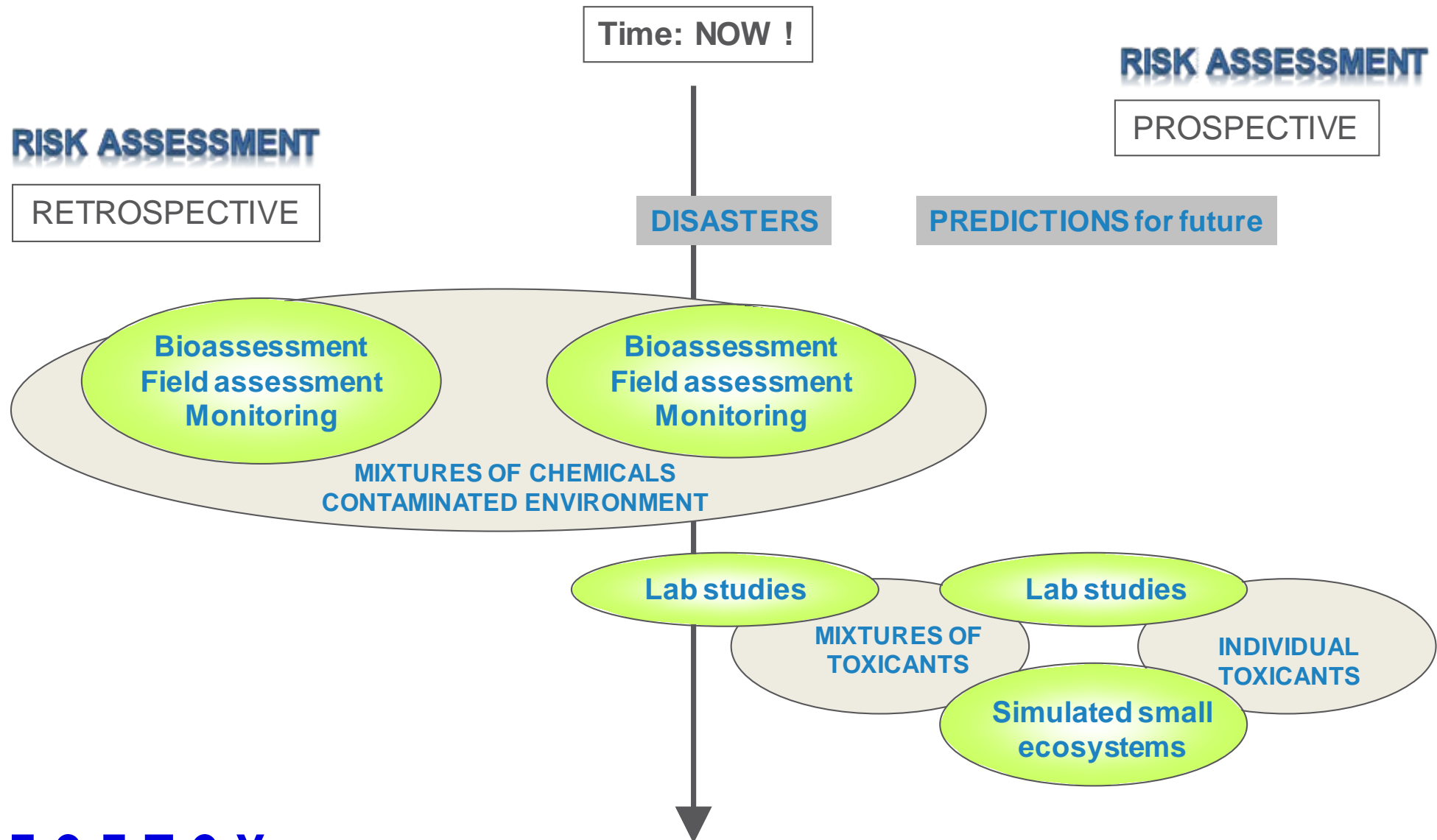
Černošlávková et al. (2008)

# Kombinace přístupů

- každý metodický přístup má svá omezení a může být interpretován pouze s ohledem na svůj informační obsah a zaměření
- optimální je kombinace či prolínání obou přístupů !!!**



# Časový aspekt koncepce



# **Terénní studie, retrospektivní ekotoxikologie**

# Obecný postup

- charakterizace lokality, průzkum přímo v terénu
- definice hodnocených parametrů příslušného ekosystému ve vztahu k působení stresu
  - abiotické složky
  - biotické složky
    - strukturní parametry (např. druhové složení, počty, abundance ...)
    - funkční parametry (např. toky energií a látek, procesy, bilance, resilience/resistence ...)
- definice odběrů (vzorkování, četnost, počty)
  - abiotických složek (voda, sedimenty, půda, vzduch)
  - biotických složek (producenti – konzumenti – destruenti)
- realizace odběrů / analýzy / hodnocení
- srovnání expozice vs. kontrola (!), závěry



# Charakterizace lokality

- rozdílná charakterizace v závislosti na typu
  - terestrický ekosystém: terénní vlivy - svažitosť, vegetace ...
  - akvatický ekosystém: tekoucí – stojatý, hloubka - plocha, rychlost toku, členitost (makrofyta ...)
- další charakteristiky, které je třeba zaznamenat:
  - převládající počasí, směry větru, intenzita světla ...
  - specifické parametry (přítomnost antropogenních aktivit, zdroje znečištění ...)
  - mapový záznam
  - ...

# Sledované parametry

## abiotické složky

- ve kterých složkách (voda, sediment, půda, vzduch) působí/il stresor ?
- kde lze předpokládat rezidua toxických látek ?

## biotické složky

- definice organismů, které budou sledovány pro posouzení působení stresu:
  - vztah k působení stresu (př. planktonní organismy – látky s tendencí zůstat ve vodním sloupci, tj. hydrofilní vs. sedimenty-hydrofobní)
  - hodnocené skupiny (př. producenti – řasy; konzumenti – zooplankton, ryby; destruenti – planktonní bakterie)
  - klíčové druhy, bioindikátory ...
  - parametry hodnocení
    - strukturní (taxonomické parametry, biomasa, abundance ...)
    - funkční (produkce/respirace, potravní řetězce ...)

# Odběry a analýzy

## odběry a analýzy abiotické složky

- návrh a rozložení vzorkovacích míst
  - plošné, vertikální – hloubka, odběry vzduchu
- spojování a vytváření směsných vzorků ("průměrný" vzorek z lokality)
- hodnocení základních chemických parametrů (obsah uhlíku, pH ...)
- charakterizace a stanovení kontaminace
  - techniky analytické chemie a chemie životního prostředí
- ekotoxikologické testy reálných matric

**viz specializované předměty**

# Odběry a analýzy

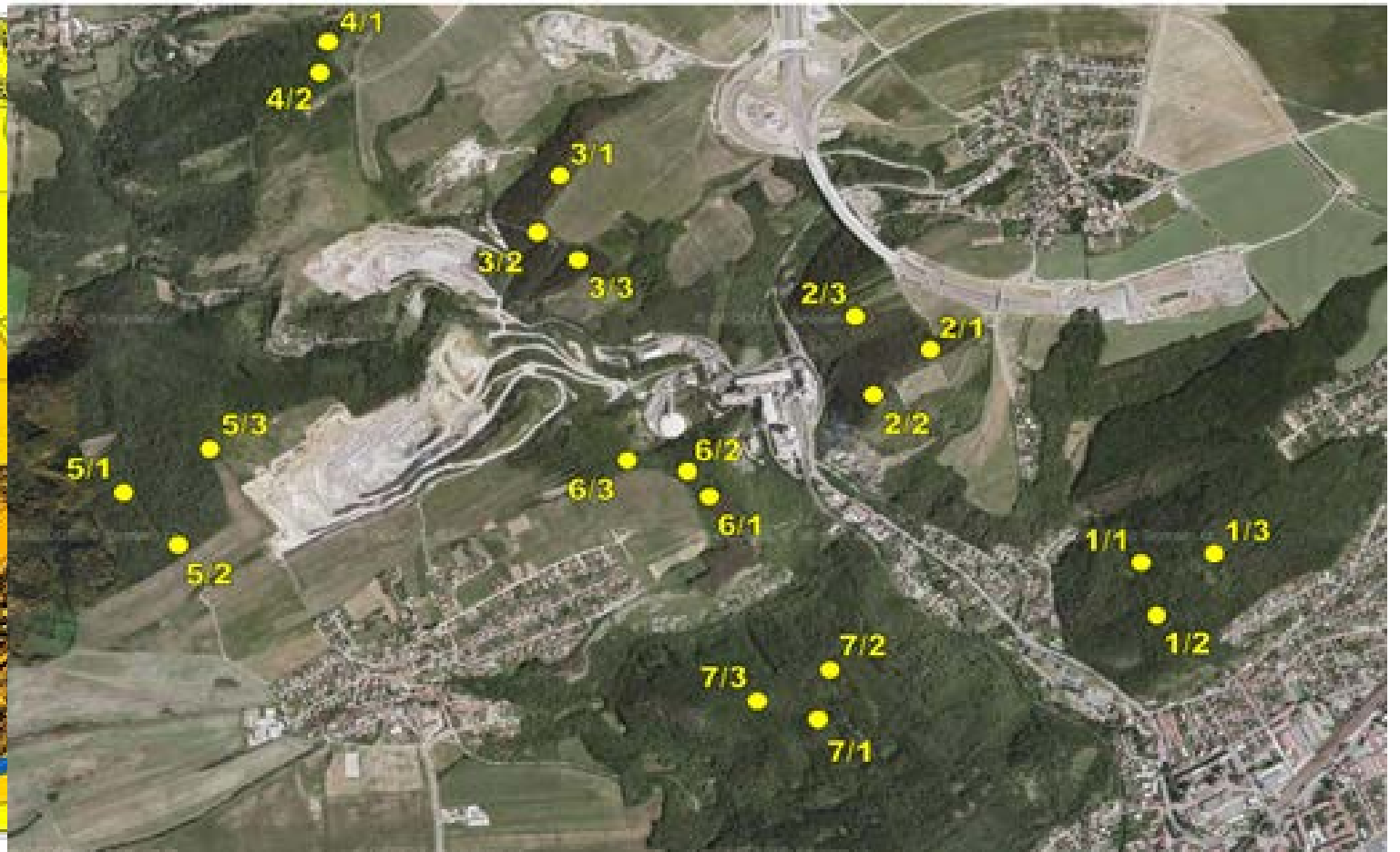
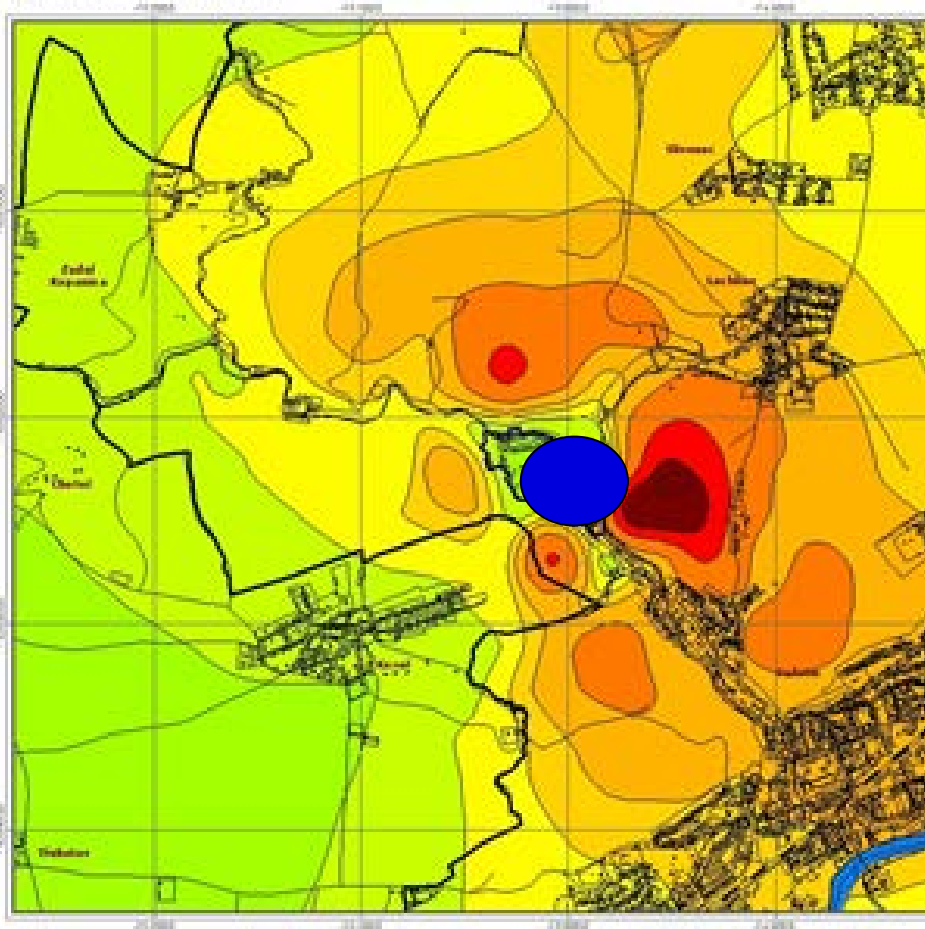
## odběry a analýzy bioty

- návrh a rozložení vzorkovacích míst
- vzorkování – podle typů organismů ....
- charakterizace a stanovení definovaných biotických parametrů
  - techniky botanických, zoologických, mikrobiologických a ekologických disciplin
- charakterizace a stanovení kontaminace bioty
  - techniky analytické chemie a chemie životního prostředí

# Odběry a analýzy - příklad

- Radotín

OXID DUSIČITÝ  
průměrná roční koncentrace



# Techniky vzorkování

Voda



Sediment



*Eckmanov  
drapák*



# Techniky vzorkování



Půda



*Půdní sonda  
- půdní jádro*

Vzduch





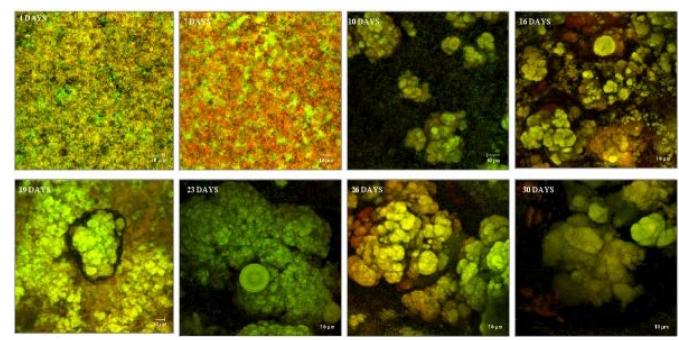
# Techniky vzorkování - biota

- voda

Planktonní síťky



Periphyton – nárosty, biofilmy



# Techniky vzorkování - biota

- voda

Bentičtí bezobratlí



Ryby





# Techniky vzorkování - biota

- suchozemský ekosystém

rostliny



Bezobratlí



# Techniky vzorkování - biota

- suchozemský ekosystém

malí obratlovci



# Techniky vzorkování - biota

- půda

žížaly



brouci



mikročlenovci



# Vyhodnocení

- **srovnání exponovaného a kontrolního ekosystému**
- základní parametry srovnávaných systémů by měly být blízké (např. hodnoty pH, tvrdost vody, shodné geochemické parametry – podloží ...)
- chemická kontaminace prostředí / bioty v obou systémech
  - existují rozdíly v koncentracích toxických látek?
  - existuje vztah mezi koncentrací v prostředí a v biotě?
- srovnání biotických parametrů v obou ekosystémech
  - existují rozdíly v taxonomickém složení společenstev?
  - existují rozdíly v pokryvnosti-abundanci-biomase?
  - liší se potravní vztahy?
  - posouzení rezistence a resilince (jak dlouho stres působil a jak dlouho již nepůsobí)
- **korelace nerovná se kauzalita !**



# Problémy v terénních studiích

- **přirozené fluktuaace, velký vliv faktorů prostředí**
- Údaje o kontaminaci se ve většině případů zaměřují na celkové obsahy
  - s biotou ovšem reaguje jen biodostupná frakce, která je závislá na mnoha faktorech (nelze ji zcela dobře namodelovat)
  - v důsledku toho často nevidíme kauzalitu mezi znečištěním a stavem bioty, nebo až ve velmi vysokých koncentracích
- Pozorované jevy mají stochastický charakter
  - Existuje přirozený rozptyl v prostoru a čase!
  - Máme dostatečně reprezentativní vzorek? Co vlastně vzorkujeme a měříme?
- Kontaminace často působí jako selekční tlak
  - dlouhodobé zatížení může vést k vytvoření adaptací a tolerancí, či dokonce stimulací (zejména u mikroorganismů)
  - známe dobře historii kontaminace lokality?



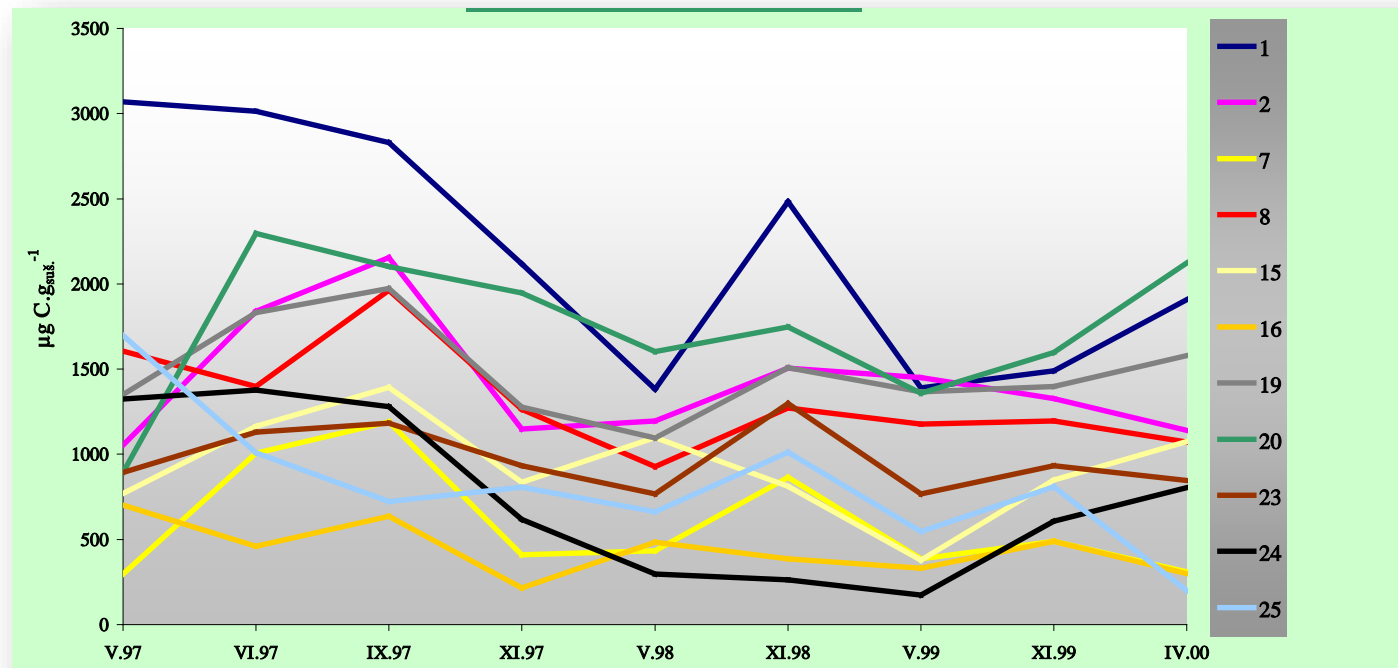
# Problémy v terénních studiích

- Celkové propojení potravními a ekologickými vazbami, návaznost procesů
  - Změny v aktivitě jednoho společenstva nebo populace ve vztahu k společenstvům a funkcím, které s ním souvisí
  - Inhibice jedné složky ekosystému, může stimulovat jinou složku
- Samotné organismy mohou ovlivňovat chemické formy polutantů
  - Může tak docházet například k opětovné mobilizaci sorbovaných forem látky či k degradacím působením mikroorganismů
- Problém optimálního designu terénní studie (biomonitoringu)
  - potřeba referenčního stavu - neznečištěná lokalita (srovnání s kontrolou)
  - nebo velký soubor (korelace, kauzalita)
  - nebo časové trendy (BACI)

# Potřeba referenčního stavu

## srovnání "před a po" působení stresu

- kontrola = stav ekosystému před působením
- předpokládá monitoring před působením stresu (sledování stavu abiotické a biotické složky ekosystému)
- známe pozad'ové hodnoty a "přirozený" stav



# Potřeba referenčního stavu

**srovnání exponovaného ekosystému s jiným nezasaženým ("kontrolním") ekosystémem**

- klíčový je výběr kontrolního ekosystému:
  - oba ekosystémy mají srovnatelné vlastnosti abiotické (terén, geologie, nadmořská výška ...)
  - za normálního stavu se předpokládají podobné biologické vlastnosti (tj. shodná společenstva, potravní vztahy ...)
- odvození závěrů je v tomto případě vždy složité (neexistují dva stejné / stejně se vyvíjející ekosystémy)



# „Normální“ stav v ekosystémech

## **stacionární stav**

- klidový stav, dlouhodobě ustálené hodnoty,
- není běžný: ekosystémy jsou přirozeně „variabilní“ (hodnoty se dynamicky mění)

## **stabilní stav**

- stav, kdy okolní podmínky nemění podstatu věci (uvnitř může docházet ke změnám/kolísání hodnot)

## **dynamická stabilita / rovnováha: homeostáza**

- stav, kdy se prostřednictvím akce/reakce udržuje dlouhodobě stabilní stav

## **sukcese**

- ekosystémy nejsou nikdy „stacionární“ – prochází v čase vývojem: cílem by měla být ochrana „plynutí“ – udržování homeorhézy

# „Normální“ stav v ekosystémech

- regulatorní postoj – **příklad rámcová směrnice o vodách EU (WFD)**
- cíl EU WFD: “dobrý” (good) stav všech povrchových vod v EU do roku 2020
- 2 komponenty hodnocení kvality (“dobrého stavu”) „ekologická“ a „chemická“

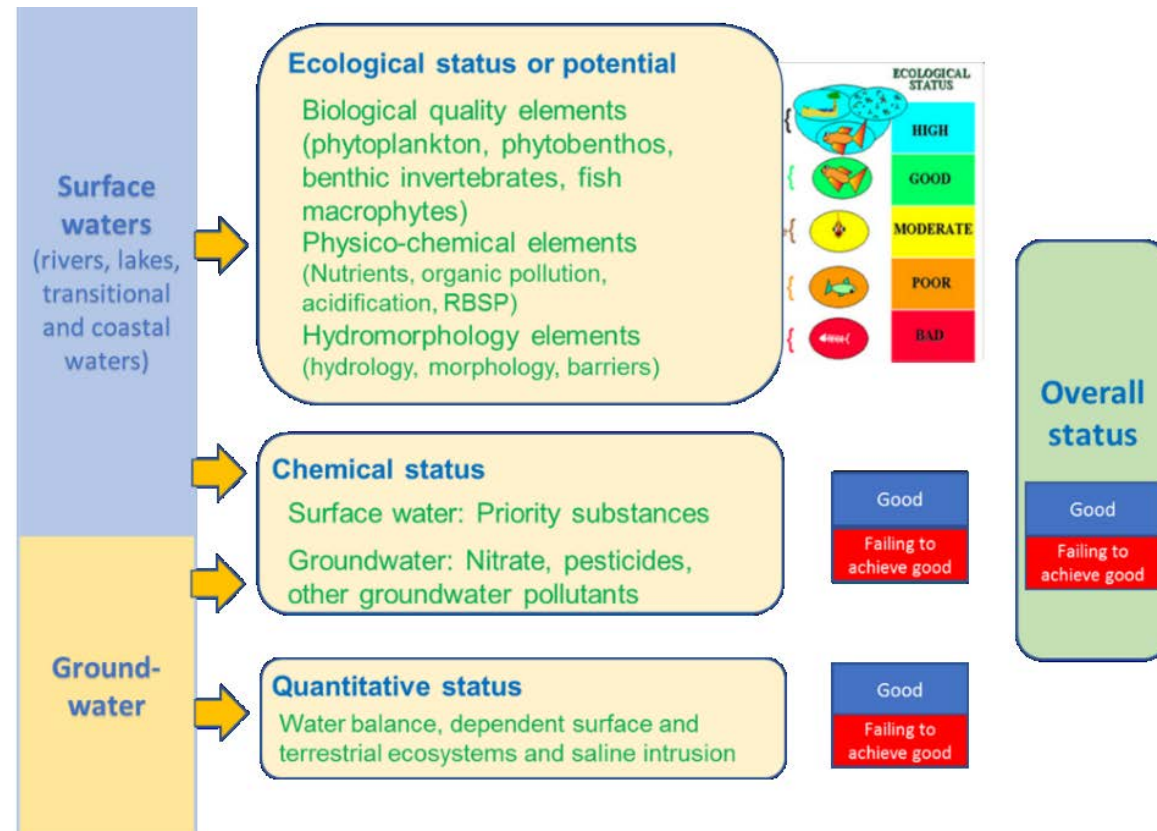
## Chemická komponenta

- 3 seznamy definovaných látek
  - Seznam prioritních látek
    - Dobrá kvalita = koncentrace každé konkrétní látky < NEK (Normy environmentální kvality, anglicky EQS), RP-NEK – roční průměrná koncentrace, NPK –NEK – nejvyšší přípustná koncentrace
  - Seznam sledovaných látek („watch list“) ... je třeba je sledovat (analyzovat) - posouzení v budoucnu a případné zařazení mezi “PRIORITNÍ látky”
  - Seznam specifických polutantů - dle plánů povodí „river basin specific pollutants“

# „Normální“ stav v ekosystémech

- regulatorní postoj – příklad rámcová směrnice o vodách EU (WFD)
- cíl EU WFD: “dobrý” (good) stav všech povrchových vod v EU do roku 2020
- 2 komponenty hodnocení kvality (“dobrého stavu”) „ekologická“ a „chemická“

## Ekologická komponenta



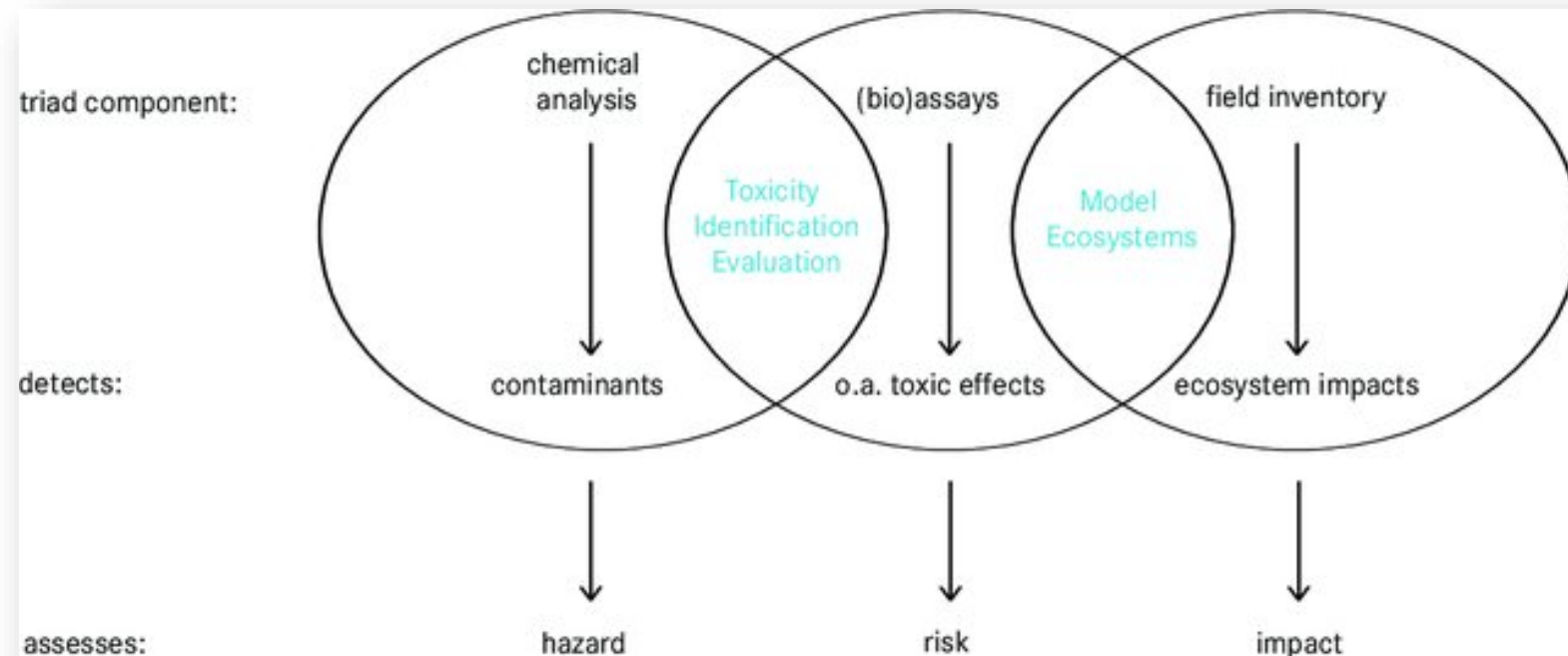
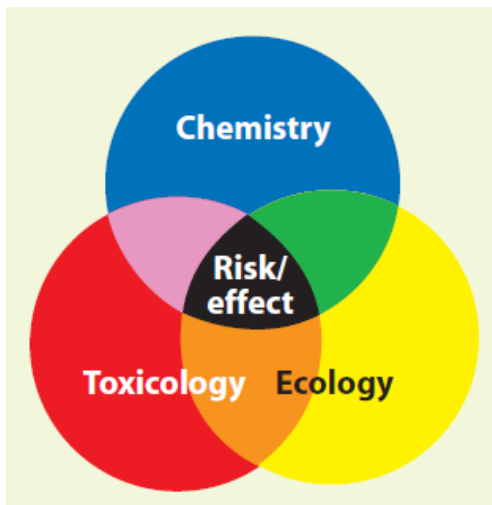
**MUNI | RECETOX**

**TRIAD přístup**



# TRIAD

- má dlouhou tradici
- ISO 19204 (2017): Soil quality - Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)
- site-specific risk assessment s třemi liniemi evidence (LoE)
- jejich vyhodnocení („weight of evidence“ - WoE)



# TRIAD

- součást je škálování
- finále je integrace výsledků

## Text Box 1. Examples on how to scale the results from two types of toxicity tests.

### Scaling. Example 1. Results in percentages.

This method can be used as default when the results from the test are expressed as percentages (%), e.g. mortality (negative effect) or survival (positive effect). Note: the results have to lie between 0 and 100%.

#### Scaling method 1A. Negative response in reference/control sample

Test Example: *Algae light inhibition*

Data:	Reference	Site A	Site B
Test results (%):	4.0	46	71

Step 1. Divide data by 100.  $R1 = X / 100$

Result (R1)	Reference	Site A	Site B
	0.04	0.46	0.71

Step 2: Scale difference between X and reference.  $R2 = (X - Ref) / (1 - Ref)$

Result (R2)	Reference	Site A	Site B
	0.0	0.44	0.70

#### Scaling method 1B. Positive response in reference/control sample

Test Example: *Survival of earthworms*

Data:	Reference	Site A	Site B
Test results (%):	98	40	10

Step 1. Subtract from 100 and then divide by 100.  $R1 = (100 - X) / 100$

Result (R1)	Reference	Site A	Site B
	0.02		

Step 2. Scale difference between X and reference.  $R2 = (X - Ref) / (1 - Ref)$

Result (R2)	Reference	Site A	Site B
	0.0		

### Integrated risk.

	Reference	Site A	Site B
LoE - Chemistry:	0.00	0.77	0.84
LoE - Toxicology:	0.00	0.23	0.34
LoE - Ecology:	0.00	0.21	0.29

Step 1. Calculate log to (1-scaled result).  $R1 = \log(1-X)$

	Reference	Site A	Site B
LoE - Chemistry:	0.00	-0.64	-0.80
LoE - Toxicology:	0.00	-0.11	-0.18
LoE - Ecology:	0.00	-0.10	-0.15

Step 2. Average all log-values to one integrated log value.  $R2 = \text{Average}(X_1, \dots, X_n)$

Result (R2)	Reference	Site A	Site B
	0.00	-0.29	-0.38

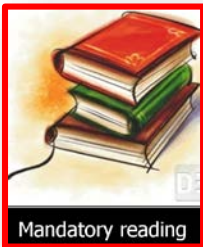
Step 3. Transform log-values into integrated risk (IR) values.  $R3 = 1 - (10^{R2})$

Result (R3 = Integrated Risk)	Reference	Site A	Site B
	0.00	0.48	0.58

Step 4. Calculate standard deviation (Std) of the integrated results for each site, i.e. three LoE

Result (R4 = Std)	Reference	Site A	Site B
	0.00	0.55	0.53

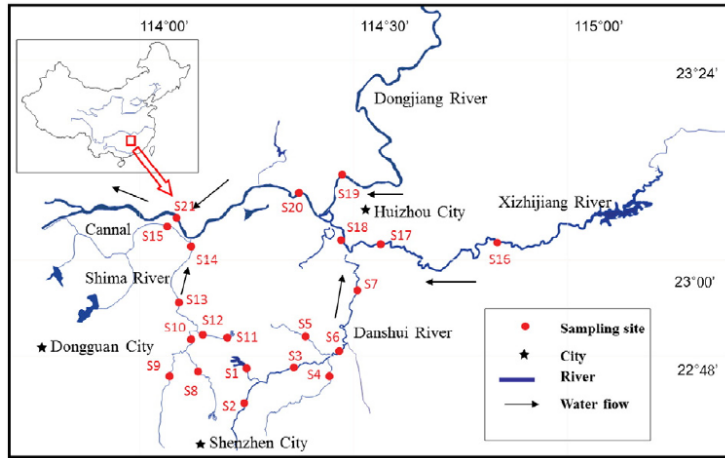
Jensen & Mesman (2006)



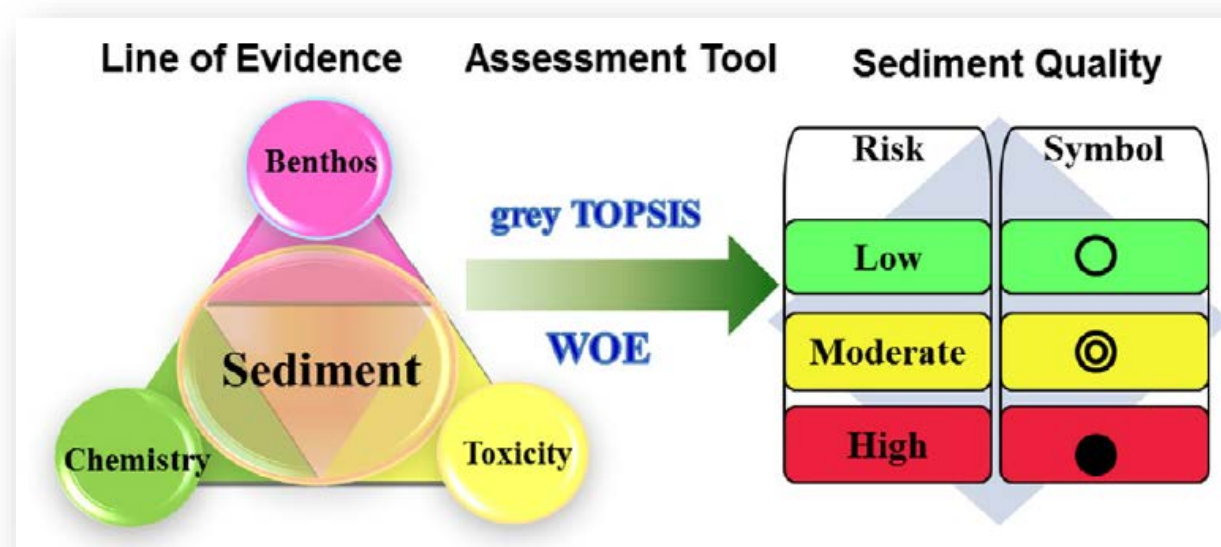
Mandatory reading

4 kapitola z Jensen J. & Mesman M. (2006).  
Ecological risk assessment of contaminated land.  
Decision support for site specific investigations.  
Report 711701047. RIVM, Netherlands

# TRIAD - příklad



Jiang et al. (2015)



**Table 1**  
Selection method of metric values of the better site and worse site used in the case study.

	Chemical metric	Toxicological metric	Ecological metric
The better site	CB-TECs <sup>a</sup>	$0.2 \times (100\% \text{ inhibition rate or the maximum FTI index } ^c)$	$0.2 \times \text{the 95th percentile of cost metric values or } 0.8 \times \text{the 95th percentile of benefit metric values } ^d$
The worse site	CB-PECs <sup>b</sup>	$0.5 \times (100\% \text{ inhibition rate or the maximum FTI index})$	$0.5 \times \text{the 95th percentile of cost metric values or } 0.5 \times \text{the 95th percentile of benefit metric values}$

<sup>a</sup> CB-TECs = threshold effect concentration of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines (MacDonald et al., 2000).

<sup>b</sup> CB-PECs = probable effect concentration of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines (MacDonald et al., 2000).

<sup>c</sup> FTI index is the fish teratogenic index of zebrafish embryo, whose range is 0–3.

<sup>d</sup> Cost metric is the metric that smaller is better, while benefit metric is the metric that bigger is better.

**Table 2**  
Ecological risk ranking and final management decision.

Ecological risk	Corresponding symbol	Sequence	Definitive final decision of overall evaluation
Low	○	In front of the better site	No further actions needed
Moderate	⊙	Between the better site and worse site	Additional assessment required
High	●	Behind the worse site	Management actions required

# TRIAD - příklad

Sites	Chemical LOE			Toxicological LOE			Ecological LOE		
	C + <sup>a</sup>	Sequence <sup>b</sup>	Symbol <sup>c</sup>	C +	Sequence	Symbol	C +	Sequence	Symbol
Better site	0.743	3	○	0.704	3	○	0.766	1	○
Worse site	0.378	22	⊙	0.522	11	⊙	0.682	5	⊙
S1	0.721	5	⊙	0.553	8	⊙	0.666	6	●
S2	0.627	17	⊙	0.405	20	●	0.405	16	●
S3	0.446	20	⊙	0.488	14	●	0.314	18	●
S4	0.443	21	⊙	0.777	1	○	0.494	11	●
S5	0.700	10	⊙	0.468	18	●	0.720	7	⊙
S6	0.690	12	⊙	0.472	16	●	0.604	16	●
S7	0.690	11	⊙	0.580	6	⊙	0.499	16	●
S8	0.558	18	⊙	0.471	17	●	0.167	17	●
S9	0.748	2	○	0.269	22	●	0.491	16	●
S10	0.711	8	⊙	0.542	9	⊙	0.322	16	●
S12	0.667	15	⊙	0.384	21	●	0.238	16	●
S13	0.718	6	⊙	0.425	19	●	0.167	16	●
S14	0.650	16	⊙	0.681	4	⊙	0.414	16	●
S15	0.722	4	⊙	0.506	13	●	0.302	16	●
S16	0.753	1	○	0.754	2	○	0.596	16	●
S17	0.713	7	⊙	0.478	15	●	0.689	16	●
S18	0.503	19	⊙	0.666	5	⊙	0.443	16	●
S19	0.707	9	⊙	0.520	12	●	0.607	16	●
S20	0.678	13	⊙	0.570	7	⊙	0.710	16	●
S21	0.675	14	⊙	0.540	10	⊙	0.454	16	●

Sites	Relax effect			Strict effect		
	C + <sup>a</sup>	Sequence <sup>b</sup>	Symbol <sup>c</sup>	C +	Sequence	Symbol
Better site	0.711	1	○	0.765	1	○
Worse site	0.499	14	⊙	0.537	9	⊙
S1	0.623	4	⊙	0.613	5	⊙
S2	0.451	18	●	0.445	18	●
S3	0.412	19	●	0.399	19	●
S4	0.538	10	⊙	0.523	11	●
S5	0.615	5	⊙	0.615	4	⊙
S6	0.563	8	⊙	0.561	8	⊙
S7	0.543	9	⊙	0.537	10	●
S8	0.390	22	●	0.377	22	●
S9	0.473	16	●	0.464	16	●
S10	0.482	15	●	0.473	15	●
S12	0.391	21	●	0.388	21	●
S13	0.399	20	●	0.393	20	●
S14	0.526	11	⊙	0.520	12	●
S15	0.464	17	●	0.455	17	●
S16	0.637	3	⊙	0.626	3	⊙
S17	0.609	6	⊙	0.600	6	⊙
S18	0.508	13	⊙	0.500	14	●
S19	0.589	7	⊙	0.593	7	⊙
S20	0.639	2	⊙	0.629	2	⊙
S21	0.518	12	⊙	0.506	13	●

Jiang et al. (2015)

# **1) Chemické analýzy ŽP**

viz specializované přednášky



## 2) Testy ekotoxicity

viz E1240

# Testy ekotoxicity

**experimentální metody** (postupy, nástroje), kde jsou organismy exponovány **řízenému** vlivu kontaminantů (případně jiných stresorů) za více či méně **kontrolovaných** podmínek a následně jsou vyhodnocovány účinky na tyto organismy, přičemž účinkem může být (eko)toxicita, ale např. bioakumulace

## **Přínos proti chemickým analýzám:**

- ukazují přímo efekt
- nezanedbávají biodostupnost
- posuzují účinky komplexní směsi + vlivy matrice

## **Nevýhody:**

- variabilita, živý systém

# Ekologická relevance ekotox. testu

= blízkost testu (a tím i jeho výsledků) reálnému ekosystému

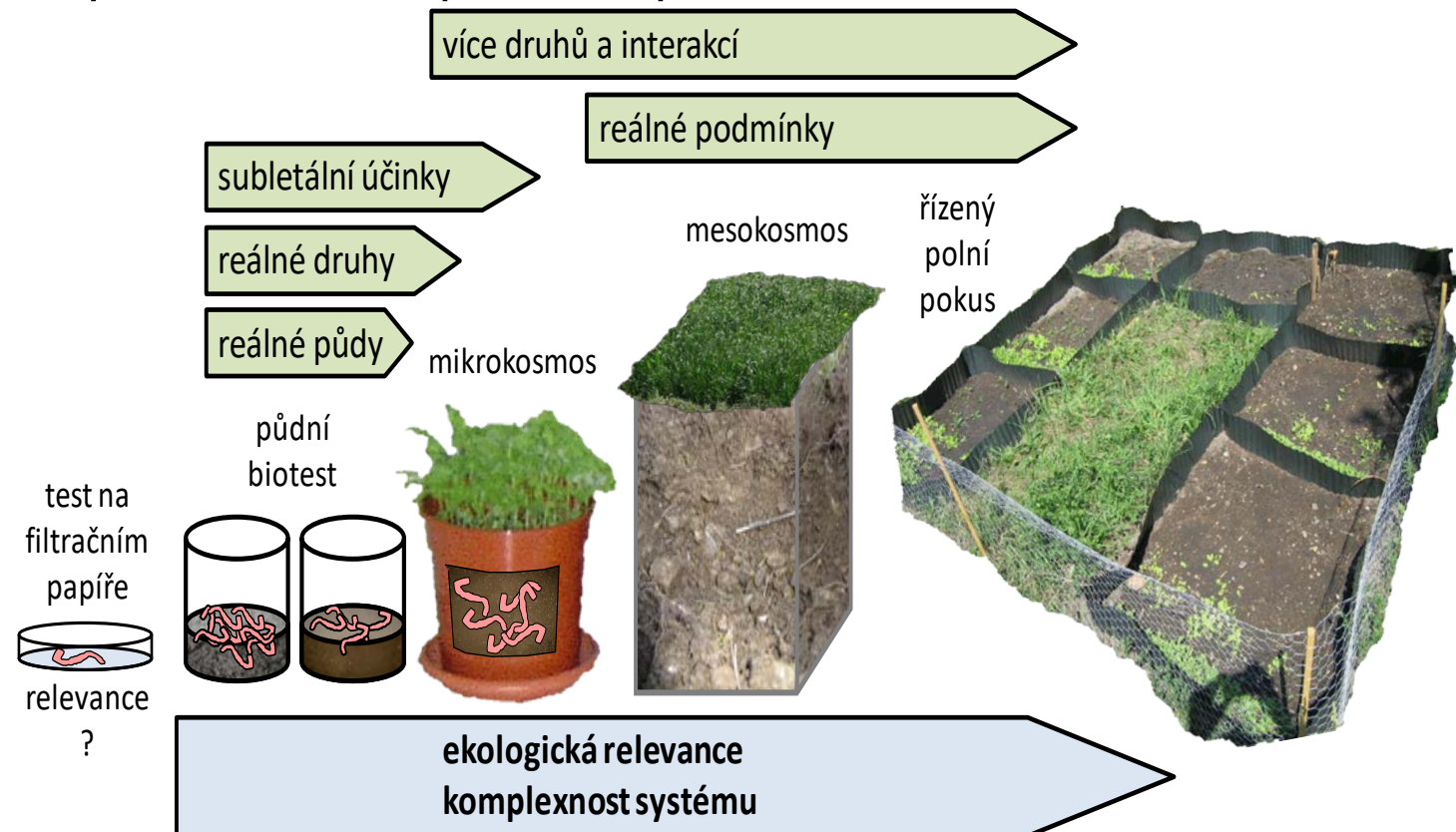


# Ekologická relevance ekotox. testu

- testované organismy by měly být relevantní – abundantní v reálných ekosystémech, funkčně významné, dostatečně citlivé, pravděpodobně exponované apod.
- sledované odpovědi by měly být ekologicky relevantní a indikovat stav a funkci organismu (přežití, růst, reprodukce, přijímání potravy a mobilita)
- podmínky (abiotické a biotické faktory) a průběh testu by měly respektovat ekologii organismu a situaci v reálném ekosystému
- expoziční cesty a délka expozice by měly napodobovat reálné expozice a korespondovat se sledovanými parametry (při sledování reprodukce by měla expozice pokrývat většinu životního cyklu apod.)
- biodostupnost kontaminantu by měly být podobná jako v reálu a koncentrace by měly být environmentálně reálné

# Ekologická relevance ekotox. testu

- od základní varianty laboratorního testu s modelovým druhem, modelovým médiem a standardními endpointy se ekologická relevance testu zvyšuje použitím reálného média, reálných druhů, reálných podmínek, zapojením subletálních endpointů, prolongací testů apod.
- čím vyšší je tato relevance, tím nižší je potřeba výsledky testu před použitím pro odhady rizika pro reálné ekosystémy nějak upravovat, extrapolovat apod.

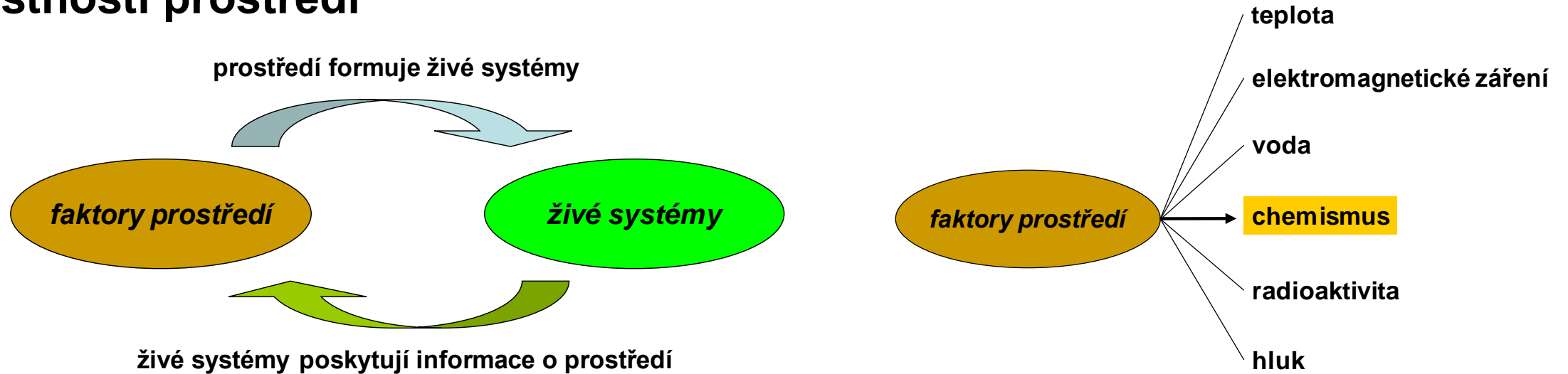


## **3) Bioindikace, biomonitoring**



# Bioindikace

metoda, kdy se na základě vlastností biologických systémů odhadují vlastnosti prostředí



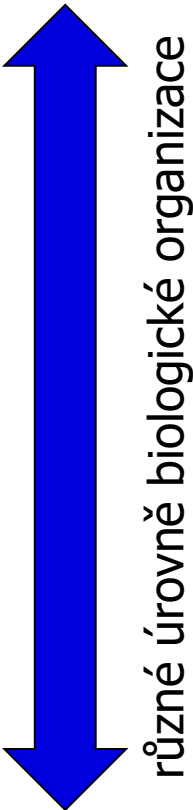
v širším slova smyslu tím označujeme všechny postupy, kde sledujeme reakce organismů (od jedinců po společenstva) přítomných v prostředí na stres

# Bioindikace versus biomonitoring

- bio + monitoring
- bioindikace je postup
- biomonitoring je jeho použití v terénních studiích zejména na více lokalitách nebo opakovaně v čase

# Bioindikace

- sledování chemických látek v odebraných vzorcích bioty
  - v čemkoliv, preferenčně tzv. bioakumulátory či bioindikační druhy/vzorky (jehličí)
- sledování bioty a její odezvy na faktory prostředí
  - biochemické markery
    - účinku (stresové proteiny – HSP – heat shock proteiny, chromozomové aberace ...)
    - expozice (methalothioneiny, EROD - ethoxyresorufin-O-deethylase ...)
  - indikátorové druhy - přítomnost/nepřítomnost indikuje určitou vlastnost ekosystému
    - citlivé druhy (např. pošvatky, horské ploštěnky, lišejníky)
    - oportunní druhy (např. pakomáři, pijavky ...)
  - stav a funkce organismů
  - populace - počty organismů, distribuce, věkové složení ...
  - společenstvo – druhové složení a zastoupení, biodiverzita
  - stav ekosystému, krajiny – struktura, dynamika, funkce



# Bioindikace

**Postupy užívané ke sledování biologických endpointů v reálných ekosystémech by měly ideálně být:**

1. prakticky aplikovatelné
2. lehce interpretovatelné výkonným orgánem
3. ekologicky relevantní pro více ekosystémů
4. výsledný parametr by měl být oddělitelný od přirozených fluktuací
5. měly by dávat kauzální vztah mezi látkou a účinkem
6. rychlé a levné
7. standardizovatelné

# Bioindikace

- kritéria pro výběr bioindikátorů

Kelly J. & Harwell M. (1990).

Signal-to-noise ratio

Sensitivity to stress

Intrinsic stochasticity

Rapid response

Early exposure

Quick dynamics

Stress-specific sensitivity

Reliability of response

Specificity to stress

Ease/economy of monitoring

Field sampling

Laboratory expertise

Preexisting data base and history

Easy test for process

Relevance to endpoint

Intrinsic

String of ecological connections

Feedback to regulation or management

Adaptive management potential

Hierarchical suites of indicators

Relevance to recovery processes

Short-term and long-term processes

Refugia, colonizing capacity

Adaptation to new physical constraints

# Bioindikace

- různé důvody pro výběr bioindikátorů

Intrinsic importance

Key: indicator is the endpoint

Economic species

Endangered species

Other aspects of direct importance to humans

Early warning indicator

Key: rapid indication of effect

Use when endpoint is slow or delayed in response or too variable in time or space

Minimal time lag in response to stress (rapid response rate)

Signal-to-noise ratio low; discrimination low

Screening tool; accept false positives

Sensitive indicator

Key: reliability in predicting

Use when endpoint is relatively insensitive

Stress specificity

Signal-to-noise ratio high

Minimize false positives

Process indicator

Key: endpoint is process

Monitoring other than biota, e.g., decomposition rates

Complement structural indicators

Indicator of ecosystem sensitivity/vulnerability

Key: system attributes

Abiotic indicators such as flushing rates; neutralization capacity; nearby seed sources

Kelly J. & Harwell M. (1990).



# **Indikátorové druhy – příklad hodnocení saprobity**

# Saprobita

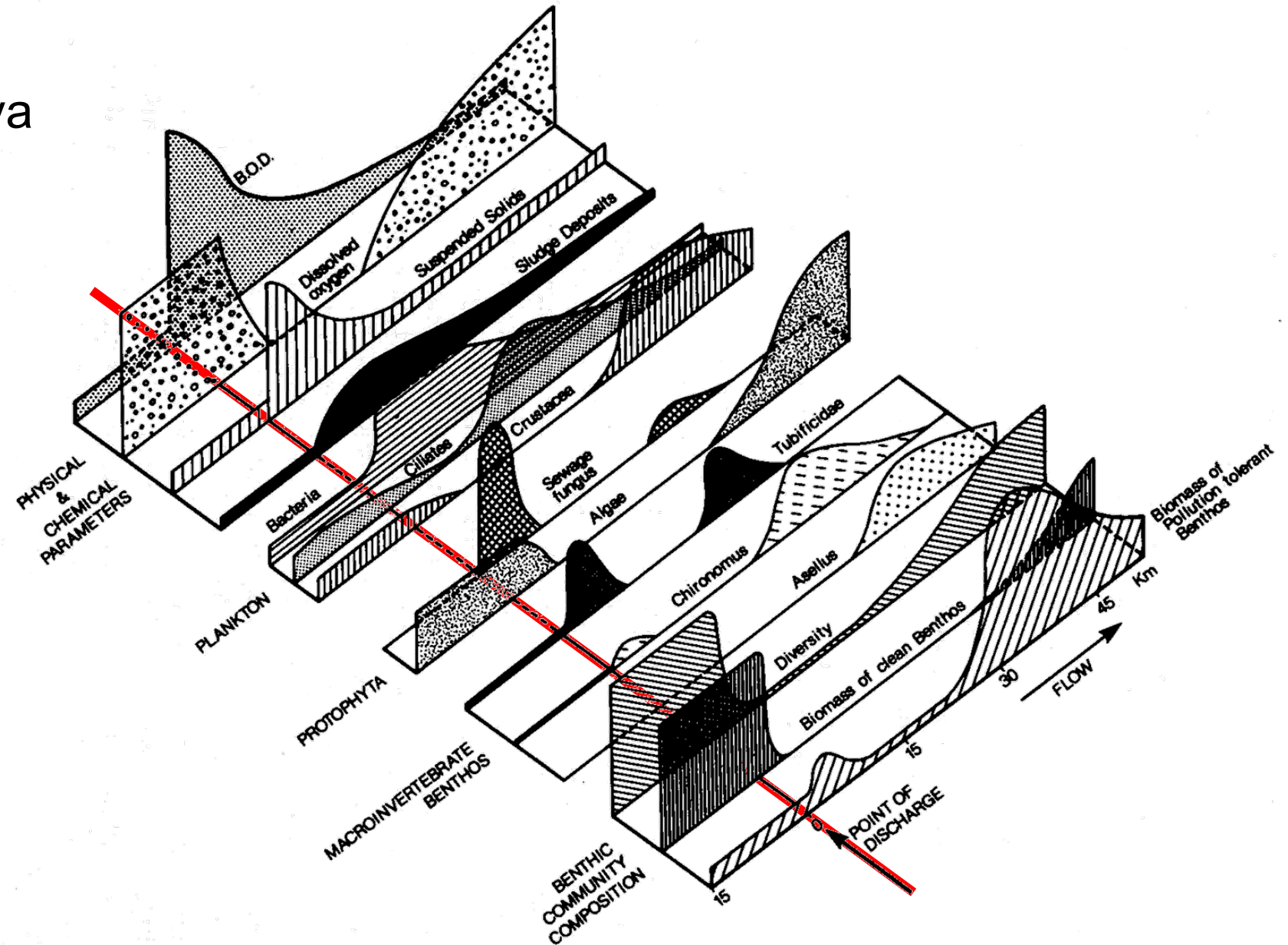
- sapos = hniloba
- organické "netoxické" látky (fekální znečištění, „živiny“ pro mikroorganismy)
- hodně organických látek → živiny pro bakterie → spotřeba organických látek a současně vyčerpání kyslíku → dopady na vodní biotu organismy

## Zvýšená saprobita

- stále jeden z hlavních problémů (a ukazatelů ne/čistoty vody) v Evropě
- nezohledňuje přímou toxicitu, spíše obsah kyslíku (!)
- hodnocení = kategorizace
- polysaprobita / mezosaprobita (alfa-, beta-) / oligosaprobita
- (nebo nověji katarobita / limnosaprobita / eusaprobita / transsaprobita)

# Saprobity

- proměna společenstva



# Hodnocení saprobity

## Hodnocení obsahu org. látek pomocí spotřeby kyslíku

- BSK5 („Biologická spotřeba kyslíku“, 5 dní, anglicky BOD – Biological Oxygen Demand)
  - vzorek vody se inkubuje za definovaných podmínek a měří se spotřeba kyslíku v čase (často/vysoký obsah OC - je třeba vodu ředit):
  - více organických látek → více živin pro bakterie ve vzorku → vyšší spotřeba O<sub>2</sub> → vyšší BSK5
- CHSK („Chemická spotřeba kyslíku“)
  - množství kyslíku, které je třeba k úplné oxidaci všech odbouratelných látek obsažených ve vodě, tedy i těch, které nejsou degradovány mikroorganismy, tj. biologicky
  - stanovení – celková spotřeba kyslíku při oxidaci manganistanem draselným

# Hodnocení saprobity

## Hodnocení pomocí BIOINDIKACE - Saprobní index

- ČSN 83 05 32, část 6
- významné druhy organismů mají přiřazenu „indikátorovou“ hodnotu
- analýza společenstva na lokalitě → výpočet Saprobního indexu

### Výpočet saprobního indexu

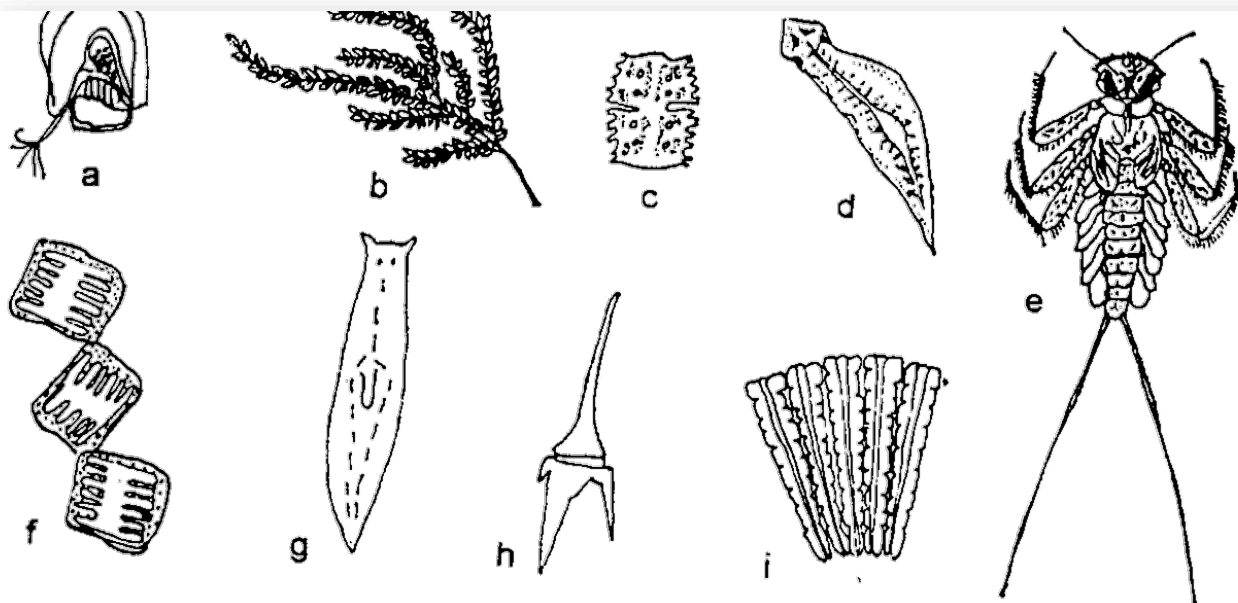
$$S = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot s_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot g_i}$$

$A_i$  – abundance zjištěného organismu,  
 $s_i$  - individuální saprobní index organismu  
 $g_i$  - indikační hodnota organismu.

# Hodnocení saprobity

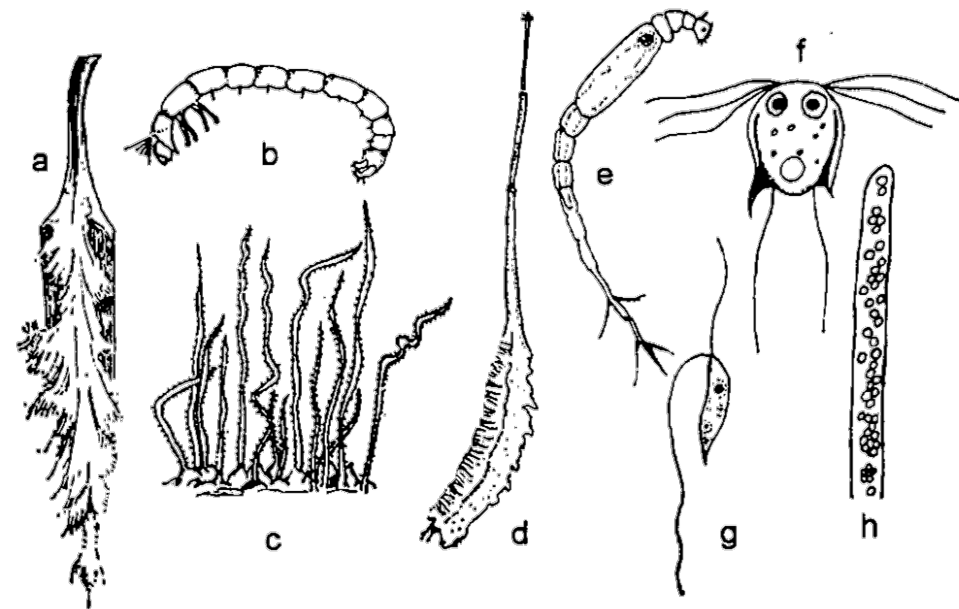
## Indikátorové druhy saprobity - příklady

### Xeno & oligosaprobity



Obr. 132. Příklad xenosaprobních a oligosaprobních organismů  
a - perloočka *Holopedium gibberum*, b - vodní mech *Fontinalis*, c - dvojčatkovitá řasa *Micrasterias truncata*, d - ploštěnka *Dugesia gonocephala*, e - jepice *Epeorus asimilis*, f - rozsivka *Tabellaria flocculosa*, g - ploštěnka *Crenobia alpina*, h - obrněnka *Ceratium hirundinella*, i - rozsivka *Meridion circulare*

### Polysaprobity



Obr. 135. Příklad polysaprobních organismů  
a - bakterie *Sphaerotilus natans*, b - pakomár *Chironomus thummi*, c - nitěnky *Tubifex tubifex*, d - pestřenka r. *Eristalis*, e - viňník *Rotaria neptunia*, f - bičíkovec *Hexamitus inflatus*, g - bičíkovec *Bodo putrinum*, h - bakterie *Beggiatoa alba*



# Hodnocení saprobity

- Třídy saprobního indexu podle normy ČSN 75 7221 (1998)

	Třída I	Třída II	Třída III	Třída IV	Třída V
<b>Saprobní index</b>	... - 1,49	1,50 - 2,19	2,20 - 2,99	3,00 - 3,49	3,50 - ...

S	Saprobity	Rybí pásma	O <sub>2</sub>	BSK <sub>5</sub>	Zoobentos	Ekologická pásma
0,0	xenosaprobity	bez ryb	9	0	Ameletus	eukrenon hypokrenon
0,5	lepší oligosaprobity	pstruh	8	1	Rhithrogena	epirhithron
1,0	horší oligosaprobity	lipan	7	1,7	Ecdyonurus	metarhithron
1,5	lepší beta-mezo-saprobity	parma	6	2,5	Oligoneuriella	hyporhithron
2,0	horší beta-mezo-saprobity	vodárenské toky ostatní toky cejn	5	3,7	Palingenia (Ephemera) (Ephoron)	epipotamon metapotamon
2,2				4,0		2,2
2,5	lepší alfa-mezo-saprobity	cejn	4	5	Herpobdella	—
3,0						
3,2	horší alfa-mezo-saprobity	přípustné znečištění nepřípustné znečištění kaprovité	3	7,5	Herpobdella	—
3,5	lepší polysaprobity	přežívá kapr karas lín	2	10	Tubifex Limnodrilus	—
4,0	horší polysaprobity	přežívá kapr karas lín	1	30	Tubifex Limnodrilus	—
4,5	mikroaerobie anaerobie odp. vody		0,1 0,0	50		

# **Úroveň populace, společenstva a ekosystému**

# Bioindikace

LANDSCAPE/REGION: Spatial heterogeneity; patch size, shape and distribution; fragmentation; connectivity

ECOSYSTEM/COMMUNITY: Substrate and soil conditions, slope, aspect, living and dead biomass, canopy openness, gap characteristics, abundance and distribution of physical features, water and resource (e.g., mast) presence and distribution, snow cover

POPULATION/SPECIES: Dispersion, range, population structure, morphological variability

STRUCTURE

COMPOSITION

FUNCTION

Identity, distribution, richness of patch types  
Identity, abundance, frequency, richness, evenness, and diversity of focal species; biomass, productivity, extrapation, nutrient cycling  
Identity, abundance, frequency, richness, evenness, and diversity of focal species; biomass, productivity, extrapation, nutrient cycling

Presence, abundance, cover, biomass, density  
Identity, abundance, frequency, richness, evenness, and diversity of focal species; biomass, productivity, extrapation, nutrient cycling

Demography, population changes, physiology, growth rates, life history, phenology, acclimation, adaptation  
Identity, abundance, frequency, richness, evenness, and diversity of focal species; biomass, productivity, extrapation, nutrient cycling

Biomass, productivity, decomposition, herbivory, parasitism, predation, colonization, extrapation, nutrient cycling, succession, small-scale disturbances  
Patch persistence, rates of nutrient cycling and energy flow, erosion, geomorphic and hydrologic processes, disturbance

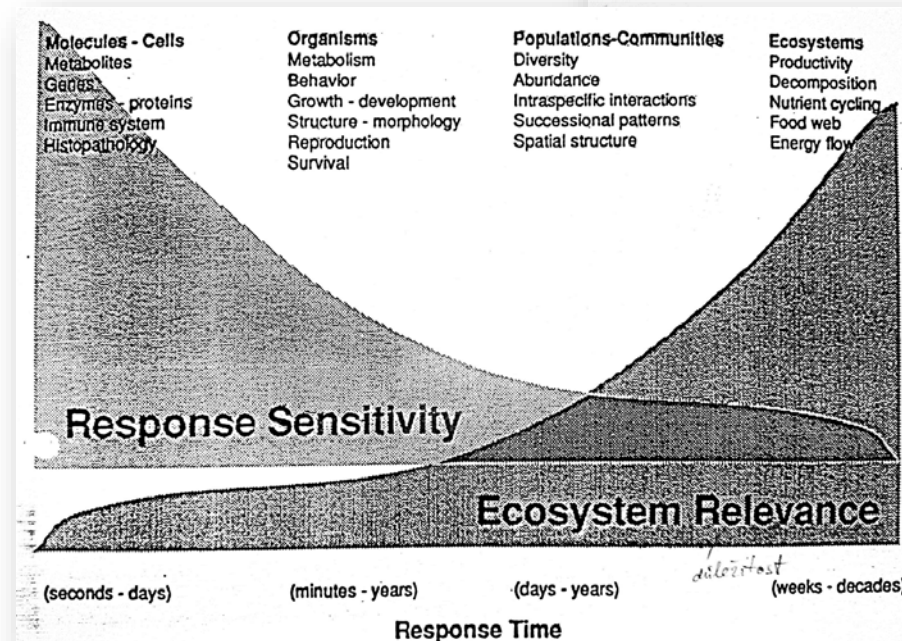
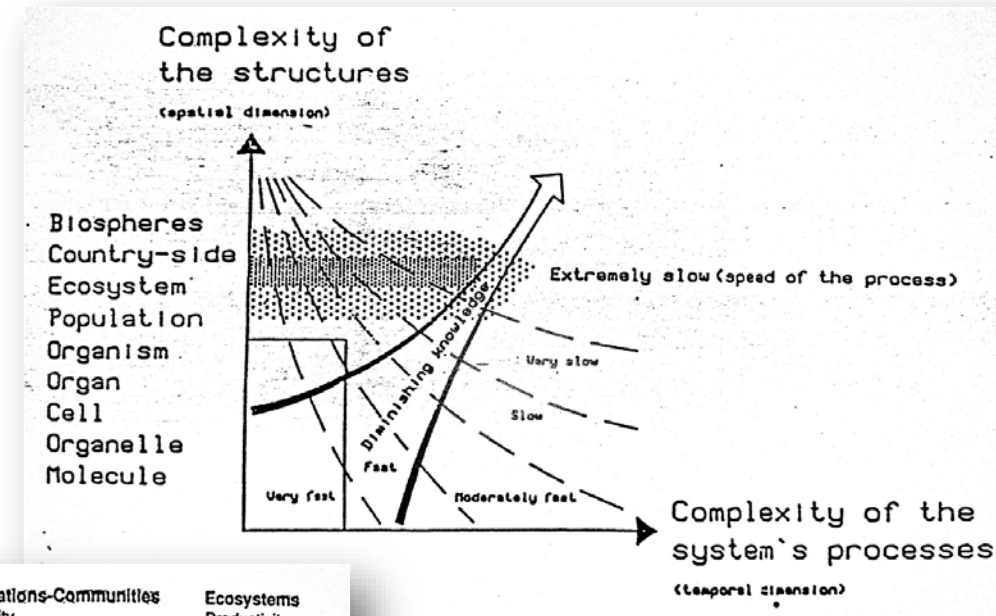
- nejen indikátorové druhy, ale i vyšší úrovně ekologické hierarchie
- jak struktura, tak složení, tak funkce

Dale & Beyeler (2001)



# Vyšší úrovně v ekotoxikologii

- obtížně studovatelné a kvantifikovatelné
  - komplexnost a variabilita
  - dobře prokazatelné až velké změny
  - pomalé projevy
  - organismální efekty nejsou vždy interpretovatelné
  - obtížně prokazatelná kauzalita "toxikant <-> efekt"
  - obtížně predikovatelné



# Vliv na populace

<u>Response variable</u> <i>Impacts on Pop</i>	Measurement	Comments
Reduced abundance	Numbers of individual or biomass of population versus chemical exposure	Compare to abundance of reference population in uncontaminated area or control population in enclosure study
Altered distribution	Presence/absence or commonness/rareness of a population versus chemical exposure	Analysis must account for life history and other ecological and environmental factors structuring population distribution
Changed age structure	Frequency distribution of age or size class versus chemical exposure	Can be used to assess recruitment success or recovery
Altered gene pool	Electrophoretic analysis of genotypic frequencies versus chemical exposure	Opportunistic species more likely than specialized species to develop resistant populations

# Vliv na společenstvo a ekosystém

- struktura a dynamika

Response variable	Measurement	Comments
Population extinction	Absence of a population known to have existed prior to chemical exposure	Loss of 'key' commercial or ecological populations is most easy to interpret
Changed community composition	Species list, indicator species or indicator assemblages versus chemical exposure	Best to know what taxa are absent as well as what taxa present; trophic organization may provide insights into effect on feeding relationships
Dominance switches	Relation of abundance versus chemical exposure	Abundance under chemical stress often depends on the opportunistic life histories of species
Changed diversity	Margalet, Simpson or Shannon diversity indices versus chemical exposure	Applicable only to gross levels of chemical pollution due to conflicting data from richness and evenness components and insensitivity to moderate levels of pollution; species richness may be a more consistent index of chemical stress
Changed similarity	Coefficient of similarity, quotient of similarity, or percentage similarity versus chemical exposure	More consistent and sensitive than diversity indices in assessing chemical effects on community composition
Reduced abundance/biomass	Total number or biomass of individuals in community versus chemical exposure	Do not provide much information on the ecological character of the system but least expensive variables to measure
Altered spatial structure	Vertical and horizontal patterns versus chemical exposure	Only of value in assessing pollution effects on non-mobile communities such as forests which exhibit a distinct spatial structure



# Vliv na společenstvo a ekosystém

- struktura a dynamika

Response variable	Measurement	Comments
Stability fluctuations — <u>inertia</u> <i>resistence</i>	50% change in species composition or richness versus chemical exposure	Is a measure of the system's resistance to pollution
— <u>elasticity</u> <i>resilience</i>	Recovery time to reach 85% similarity to the	Is a measure of the system's ability to recover from chemical stress
— <u>amplitude</u>		Is a measure of the maximum amount of damage from which a system can recover in a specific time
— <u>hysteresis</u>	Sperman's rank correlation coefficient comparing disappearance and reappearance of species	A measure of the degree to which an ecosystem's pattern of recovery is not the reversal of the pattern of species loss

# Vliv na společenstvo a ekosystém

- funkce

Response variable	Measurement	Comments
<i>Impacts on ecosystem functions</i>		
• Reduced organic decomposition	Decomposition rate of plant litter or reference organic substrates versus chemical exposure	Effects may not be obvious until some time after exposure
• Reduced nutrient conservation	Net loss of essential elements in mass balance studies versus chemical exposure; nutrient spiralling length in stream studies	Of most obvious importance in terrestrial ecosystems
• Reduced primary productivity	<sup>14</sup> C assimilation rate or other methods of measuring plant growth versus chemical exposure	Long-term reductions in primary productivity are the most obvious index of a functionally stressed ecosystem
• Reduced ecosystem production	Net gain in ecosystem production versus chemical exposure, e.g. net oxygen evolution in an aquatic system; Odum's index of power may be appropriate	Integrates chemical effects on primary productivity and energetic costs
• Altered food web and functional regulation	Changes in predator-prey or consumer-consumed interactions versus chemical exposure	The loss of a predator indirectly through the elimination of prey and the dramatic increase in a population after the removal of a predator or competitor are examples of chemical alteration of functional regulation

# Ekosystémová dynamika - příklad

Westman (1978)

Characteristic	Definition	Example 1: A metal coil	Example 2: Ecosystem subjected to oil spill
Inertia <i>resistance</i>	resistance to change	force needed to stretch coil a given distance	amount of oil that must accumulate over a given area in a given time period to cause a given level of ecosystem damage (such as local extinction of species X & Y)
Elasticity <i>resilience</i>	rapidity of restoration of a stable state following disturbance	time required to spring back to initial size after stretching a given distance	time required to recover initial structure or function following ecosystem damage (e.g., restoration of populations X & Y)
Amplitude	zone from which the system will return to a stable state	distance beyond which coil cannot be stretched without being permanently deformed	maximum amount of oil that can accumulate in an area such that damage sustained can be fully repaired (e.g., restoration of populations of X & Y)
Hysteresis	degree to which path of restoration is an exact reversal of path of degradation	degree to which region temporarily occupied by coil in springing back differs from region through which coil moved during stretching	degree to which pattern of secondary succession is not an exact reversal of the pattern of retrogression experienced following impact (e.g., were the last species to die the first ones to return?)
Malleability	degree to which stable state established after disturbance differs from the original steady state	degree to which stretched coil remains stretched after deforming force is removed	degree to which new climax ecosystem resembles the initial climax state (e.g., how closely do the species composition and equitability of new climax state resemble the old?)

# **Hodnocení biodiverzity**

# Biodiverzita

- **biodiverzita = diverzita bioty**
- **diverzita** = rovnoměrnost rozložení položek do skupin a jejich relativní frekvence
- **diverzita = informace:** větší diverzita = větší "pool" informací = menší energie nutná na udržení celku = vyšší stability
- **biodiverzita organismů je ideální mírou biologické kvality systému, ideální bioindikátor**
- komplexní a integrující endpoint

# Biodiverzita

- je funkcí ekosystému (ekosystém má mnoho/málo nik → biodiverzita je velká/malá )
- tíhne být nízká ve specializovaných ekosystémech, kde je jeden faktor určující (variant)
- přirozený stav pro společenstva - vysoká diverzita - snižována stresem, negativními zásahy
- často má inverzní vztah s produktivitou

## Nerovnováha

- ekosystém má mnoho nik a ty nejsou zaplněny (zničené či stresované ekosystémy)

## Stabilita

- stabilní vztahy mezi populacemi, uvnitř populací a mezi organismy a prostředím
- většinou dosaženo na konci sukcese (nebo pravdivěji v jejím subfinálním stádiu)
- pokud je zásah, je tolerance vyšší u diverzifikovaného společenstva
- **vysoká diverzita zajišťuje stabilitu ekosystému**



# Biodiverzita

- u biodiverzity jde většinou o druhy (skupiny) a jedince (položky), ale může jít o jiné skupiny (např. genomy, ekologické skupiny, typy funkcí, životní strategie) a položky (např. geny v genomu, zastoupení skupin, funkcí, strategií) – *vše, co je dále uváděno jako „počet druhů“ a „počet jedinců“ lze takto použít i na jiné kategorie*
- **Taxonomická diverzita** – výskyt a četnost jedinců druhů nebo jiných taxonomických jednotek
- **Genetická** – výskyt různých kombinací alel v populacích organismů
- **Ekologická/funkční** – funkce, kterou organismy vykonávají v rámci společenstva (predátor, parazit, dekompozitor ...)
- **Fyziologická/biochemická diverzita** – způsoby a biochemické dráhy používané organismy k zpracování substrátu
- **Rozhodování co hodnotit:** specifika organismů - např. u mikroorganismů různé druhy a rody mohou zastávat podobné funkce - větší smysl má tedy funkční než taxonomická diverzita

# Biodiverzita

*... referes to the **variety within and among living organisms, assemblages of living organisms, biotic communities, and biotic processes**, whether naturally occurring or modified by humans ...*

*... can be measured in terms of genetic diversity and the identity and number of different types of species, assemblages of species, biotic communities and biotic processes, and the amount (e.g., abundance, biomass, cover, rate) and structure of each ...*

*... can be observed and measured at any spatial scale ranging from microsites and habitat patches to the entire biosphere ...*

DeLong (1996)

# Hodnocení biodiverzity

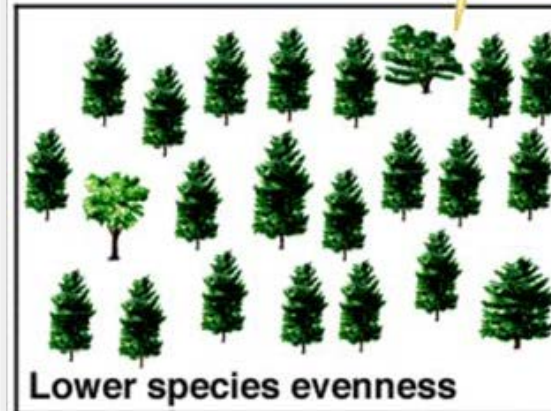
- 2 složky
  - **druhová bohatost (richness), různorodost** – počet různých organismů/druhů (kvalita), bez ohledu na jejich početnost
  - **druhová vyrovnanost (evenness), relativní abundance** – poměr výskytu organismů (kvantita)
- druhová diverzita pak zahrnuje jak počet druhů, tak jejich relativní početnost

## Species evenness and species diversity.

Communities *a* and *b* both contain five tree species. However, because community *b* has greater species evenness, it has higher species diversity.

Community *a* is dominated by one of its five species and so has lower species diversity than...

...community *b*, which has the same five species but in equal proportions.



# Shannonův index diverzity

- $H' = -\sum p_i \ln(p_i)$ ,  $p_i$  je relativní abundance druhu  $i$ , tedy  $n_i/N$ , kde  $n_i$  je abundance druhu  $i$  a  $N$  celkový počet jedinců
- také jako Shannon-Wiener index (nesprávně jako Shannon-Wiever)
- odvozen z informační teorie (entropie systému) - vyjadřuje nejistotu, se kterou jsem schopen předpovědět jakého druhu bude náhodně vybraný jedinec ze vzorku; nejistota klesá s klesajícím počtem druhů a s klesající vyrovnaností (společenstvo s málo dominantními druhy)
- většinou v rozmezí 1,5 - 3,5
- maximální velikost indexu pro počet druhů  $S$  nastane, pokud mají všechny druhy stejnou relativní abundance:  $H'_{\max} = \ln(S)$
- vyrovnanost odvozená ze Shannonova indexu (Shannon's evenness):  
 $J = H' / H'_{\max} = H' / \ln(S)$

# Shannon's index diversity



Species	Abundance	Shannon index of diversity		
		$p_i$	$\ln(p_i)$	$p_i \cdot \ln(p_i)$
Baetis alpinus	736	0.9472	-0.0542	-0.0513
Rhithrogena semicolorata	28	0.0360	-3.3232	-0.1198
Epeorus sylvicola	8	0.0103	-4.5760	-0.0471
Baetis rhodani	4	0.0051	-5.2691	-0.0271
Ephemerella mucronata	1	0.0013	-6.6554	-0.0086
Total number of individuals		777		
Shannon index of diversity (using natural logarithm)				<b>0.2539</b>

# Simpsonův index diverzity

$$D = \sum \left( \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \right)$$

- zjišťuje, zda jsou ve společenstvu přítomny silně dominantní druhy nebo je společenstvo spíše vyrovnané
- vyjadřuje pravděpodobnost, že dva náhodně vybraní jedinci budou patřit ke stejnému druhu
- hodnoty jdou opačným směrem než u indexů počítajících s vyrovnaností a počtem druhů (Shannon) - často se používá odpočet od jedné nebo převrácená hodnota – **Gini-Simpson index:  $GS = 1 - D$**
- vyrovnanost odvozená ze Simpsonova indexu (Simpson's evenness):  
 **$E = (1/D) / S$**

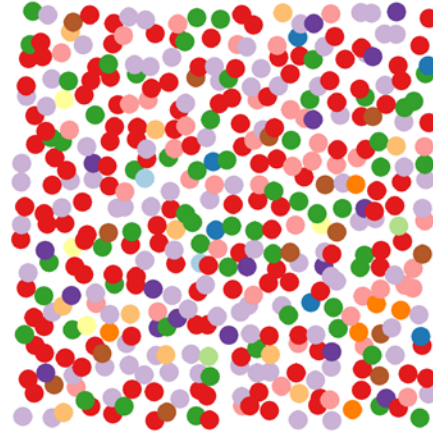


# Hodnocení biodiverzity

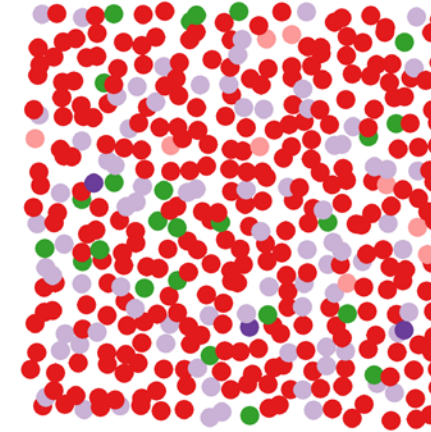
Community A  
(perfectly even)



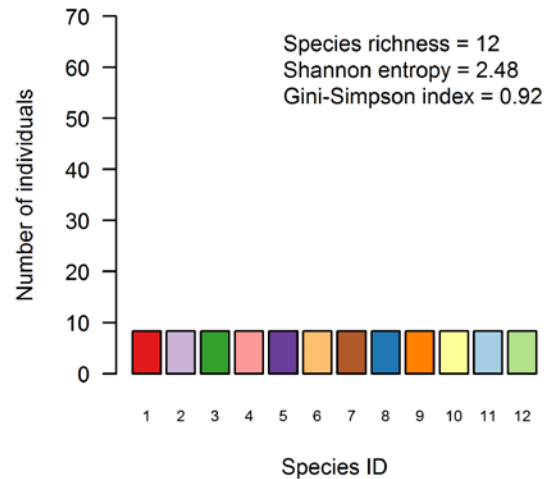
Community B  
(moderately uneven)



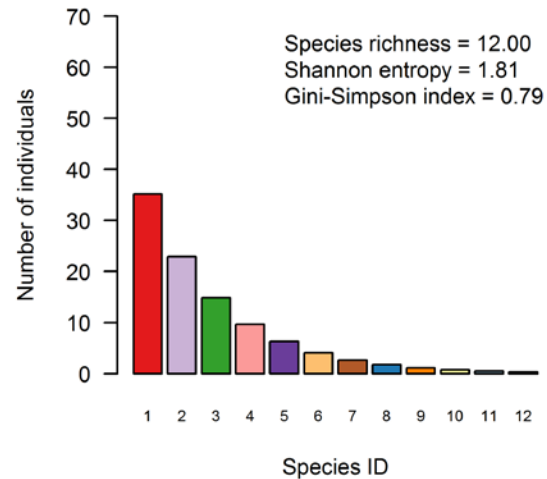
Community C  
(highly uneven)



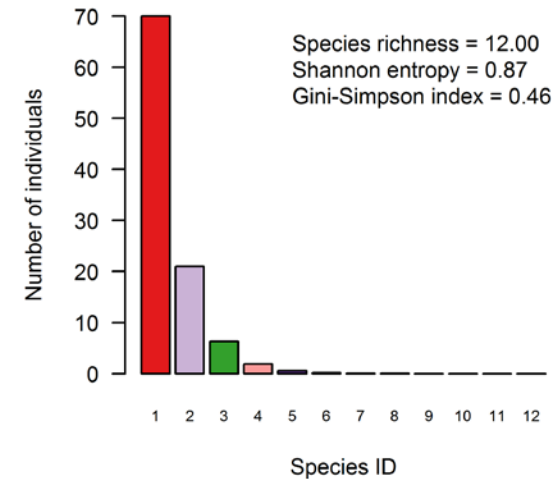
Species abundance distribution



Species abundance distribution



Species abundance distribution



# Literatura

Anděl P. (2011): Ekotoxikologie, bioindikace a biomonitoring. Evernia. ISBN 9788090378797.

Bezchlebová J., Černošková J., Lána J., Sochová I., Kobetičová K., Hofman, J. (2007): Effects of toxaphene on soil organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 68: 326-334.

Černošková J., Bartoš T., Hofman J., Anděl P. (2008): Effects of road deicing salts on soil microorganisms. *Plant, Soil and Environment* 54: 479-485.

Jensen J. & Mesman M. (2006). Ecological risk assessment of contaminated land. Decision support for site specific investigations. Report 711701047. RIVM, Netherlands.

Jiang Y.X., Liu Y.S., Ying G.G., Wang H.W., Liang J.Q., Chen X.W. (2015): A new tool for assessing sediment quality based on the Weight of Evidence approach and grey TOPSIS. *Science of The Total Environment* 537: 369-376.

ISO 19204 (2017): Soil quality - Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)

Kelly J. & Harwell M. (1990). Indicators of ecosystem recovery. *Environmental Management* 14: 527-545.

Dale V.H. & Beyeler S.C. (2001): Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators* 1: 3-10

Doelman P. & Eijsackers H.J.P. (2004): *Vital Soil - Function, Value and Properties*. Elsevier. 358 p. ISBN: 0-444-51772-3

Westman W. (1978). Measuring the Inertia and Resilience of Ecosystems. *BioScience* 28: 705-710.

DeLong D.C. (1996): Defining biodiversity. *Wildlife Society Bulletin* 24: 738-749. <http://www.jstor.org/stable/3783168>