

# Eutrofizace



# Eutrofizace

- proces zvyšování produkce organické hmoty ve vodě zejména vlivem zvýšeného přísunu živin
  - obohacování vod o živiny - **DUSÍK** a **FOSFOR**
  - od 50. let 20. století

## Zdroje živin

- Autochtonní
  - rozklad organické hmoty, mrtvých organismů
  - vyluhování sedimentů a hornin, výplach z půdy
  - biogenní fixace dusíku - bakterie a cyanobakterie
- Allochtonní
  - eroze půdy - povrchový odtok
  - znečištění atmosféry NO<sub>x</sub>
  - odpadní vody - odtoky z ČOV bez terciálního čištění, prací a čisticí prostředky, průmyslové odpadní vody, zvýšená produkce komunálních odpadních vod
  - splachy hnojiv ze zemědělství

# Trofie (úživnost) vody

= úživnost = schopnost vodního prostředí dodávat organismům živiny, aby mohly růst, rozmnožovat se a produkovat další organickou hmotu.

Procesy ve vodách související s biodostupností forem dusíku a fosforu - trofizace (eu-, hyper-)

Projevy:

- Vegetační zákal - drobné planktonní řasy (zdroj potravy!)
- Vodní květ - větší koloniální nebo vláknité sinice (nebo i řasy), toxiny
- Bentické sinice a rozsivky - na povrchu sedimentů (ovlivňují výměnu plynů)
- Zelené vláknité řasy (ne toxiny, ale alelopatické látky)
- Vyšší vodní vegetace

Omezování:

- Zabránit přísunu živin
- Zpomalit koloběh živin
- Odstranění živin, odstranění biomasy

Indikace

- Přímé stanovení živin - podle koncentrace N a P ve vodě
- Podle růstové odezvy *in vitro* - metoda trofického potenciálu - laboratorní metoda, růstové testy na řase *Desmodesmus quadricauda*
- Stanovení koncentrace řas a sinic jako chlorofyl a - *in situ*
- Podle *in situ* realizované zvýšené koncentrace biomasy fototrofů
- Bioindikační metody - analýza společenstva řas a sinic
- Hodnocení podle změn v druhovém složení - fytoplankton, fytobentos, makrofyta

# Fosfor jako limitující prvek

Element	Symbol	Supply in water (%)	Demand by plants (%)
Oxygen	O	89.0	80.5
Hydrogen	H	11.0	9.7
Carbon	C	0.0012	6.5
Silicon	Si	0.00065	1.3
Nitrogen	N	0.000023	0.7
Calcium	Ca	0.0015	0.4
Potassium	K	0.00023	0.3
<b><u>Phosphorus</u></b>	<b><u>P</u></b>	<b><u>0.000001</u></b>	<b><u>0.08</u></b>
Magnesium	Mg	0.0004	0.07
Sulfur	S	0.06	0.06
Sodium	Na	0.0006	0.04
Iron	Fe	0.00007	0.02

**Zákon minima: limitujícím prvkem pro růst rostlin je ten prvek, který je v prostředí v minimu**

# Stupně trofie

Trofický stav	Koncentrace celkového fosforu ve vodě ( $\mu\text{g/L}$ )
Oligotrophic	$< 10 \mu\text{g/L}$
Mesotrophic	$10-30 \mu\text{g/L}$
Eutrophic	$30-100 \mu\text{g/L}$
Hypertrophic	$> 100 \mu\text{g/L}$

Pro masový rozvoj sinic postačuje koncentrace fosforu cca  $20-25 \mu\text{g/L}$

Brněnská přehrada (před zásahy):  $200-300 \mu\text{g/L}$

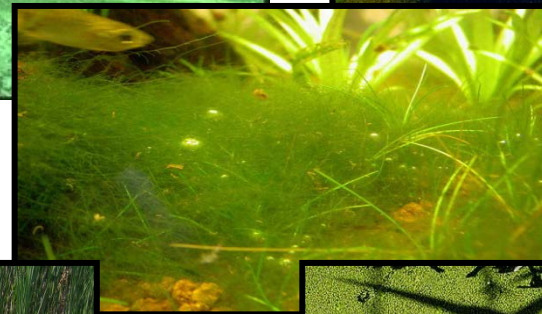
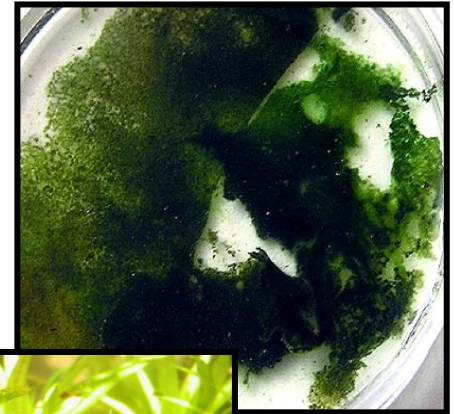
Plumlov:  $40-50 \mu\text{g/L}$

Máchovo jezero -  $20-30 \mu\text{g/L}$



# Dominanty trofizovaných vod

1. drobné planktonní řasy  
(vegetační zbarvení)
2. koloniální a vláknité sinice  
(tzv. vodní květ)
3. bentické sinice a rozsivky
4. litorální vláknité řasy
5. vyšší vodní vegetace  
- rostliny



# Důsledky zvýšené trofie

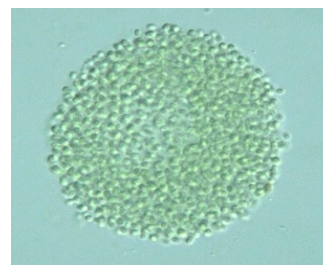
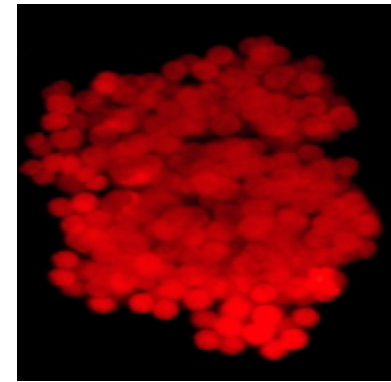
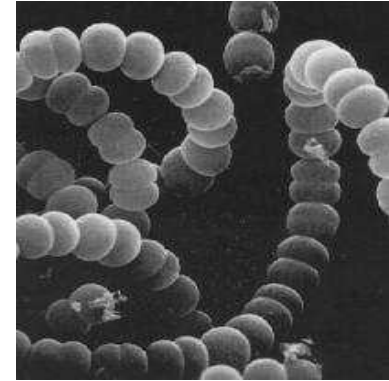
- Vodní květ - rychlejší vývoj řas a sinic
  - Posmrtně uvolňují toxiny
- Snížená samočisticí schopnost vod
- Problémy s úpravou vody
- Zmenšená možnost využívání vody k zásobování a rekreaci





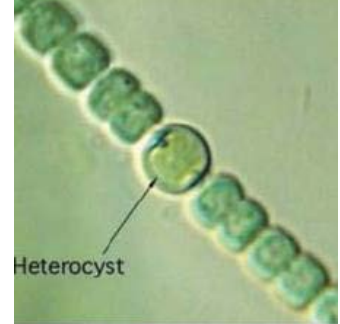
# SINICE (=CYANOBAKTERIE)

- fotosyntetizující prokaryota - bakterie
- jednobuněčné či vláknité organismy
- modrozeleně zbarvené (blue-green algae)
- velikost 1-10  $\mu\text{m}$
- přes 2000 druhů
- osidlují **rozmanité biotopy** (sladké i slané vody, vlhká půda, ledovce, kůra dřevin, fykobionti v lišejnících...)
- většina druhů se vyskytuje ve **vodních ekosystémech** - v sladkých i slaných vodách
- produkce **biologicky aktivních látek**
  - cca 3.5 mld let staré
  - vytvoření kyslíkové atmosféry Země



Přemnožení  
→ **vodní květ**

# STAVBA TĚLA



## jednobuněčná X

- propojení slizovými pouzdry  
⇒ kolonie

## mnohobuněčná (vláknitá)

- nevětvená nebo větvená
- propojené buňky
- specializované buňky

### ➤ Vegetativní buňky

### ➤ Akinety - schopné přežít nepříznivé podmínky

### ➤ klidové rezistentní stadium

### ➤ větší buňky s tlustou stěnou, často v řetízcích

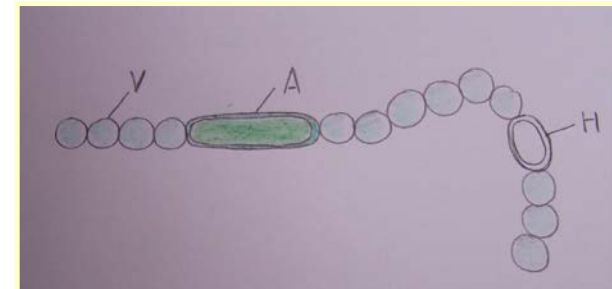
### ➤ rezistence vůči vysychání a fyzikálnímu porušení

### ➤ vegetativní buňky se přeměňují v akinety na konci exponenciální fáze

### ➤ akinety klíčí a vyrůstají z nich vegetativní buňky, v řetízcích

### ➤ Heterocyty - bezbarvé, váží vzdušný dusík

### ➤ za nedostatku využitelného dusíku se v řetízku tvoří heterocyty - zhruba každá sedmá buňka







# Masový rozvoj sinic – globální problém



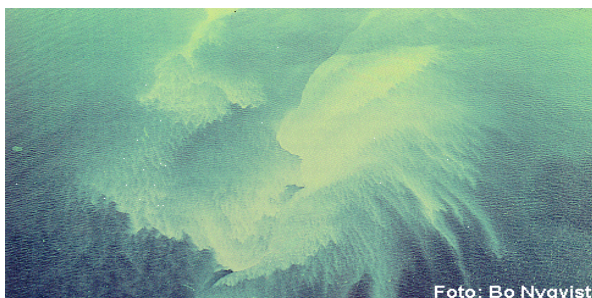
Upper Saranac River, USA



Bedetti Lake, Argentina



Neuse River, USA



Baltické moře, Evropa



Nové Mlýny, Česko



Žluté moře, Čína



Lake Mokoan, Austrálie



Jihoafrická republika

Eutrofizovány téměř všechny evropské řeky – Seina, Dunaj, Labe  
Jezera – Balaton, africká jezera - Viktoriino jezero – úhyny ryb a ptáků  
Moře a oceány – Finský záliv v Baltském moři, kanál La Manche

# Podmínky masového rozvoje

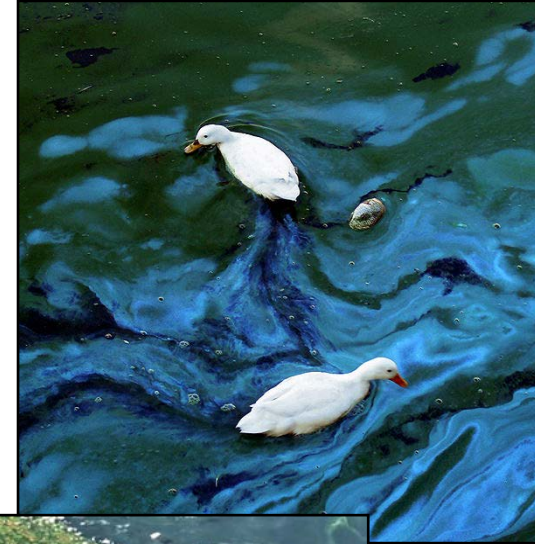
- Sluneční záření
- Teplá voda (teplé letní dny)
- Stojatá nebo pomalu tekoucí voda
- Živiny (fosfor)





# Důsledky masového rozvoje sinic

- snížení biodiverzity
- narušení kyslíkového režimu (ranní anoxické zóny) - bakteriální rozklad biomasy sinic - náhlé vyčerpání kyslíku z vody
- změna chemismu vody v průběhu jejich růstu (zejm. změny pH)
- snížení kvality vod (produkce pachů a pachutí)
- hospodářský dopad (rekreace, rybářství)
- vliv na akvatické bakterie, zooplankton, ryby a obojživelníky; vlivy na chování zvířat
- ovlivnění vodních rostlin - redukce prostupnosti světla pro fotosyntézu

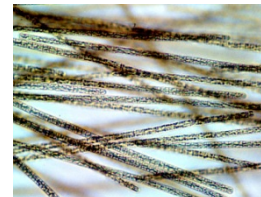
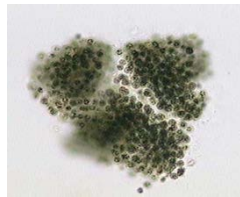
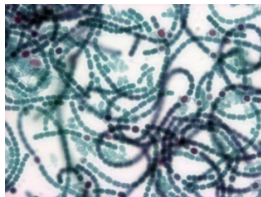


# Metabolismus sinic

- Primární metabolismus
  - Fotosyntéza - produkce O<sub>2</sub>
- Sekundární metabolismus
  - vitamíny, peptidy, hormony, enzymy, polysacharidy, antibiotika, **CYANOTOXINY**

## Produkce cyanotoxinů

- Producenti: Kokální i vláknité sinice

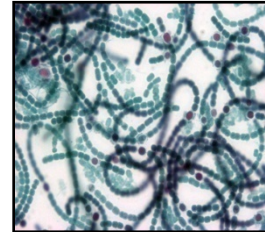


# SINICE

---

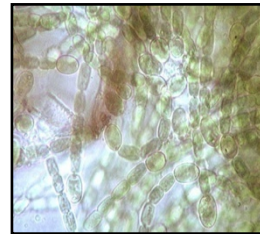
produkují stovky sekundárních metabolitů

- rozmanité struktury:
  - peptidy a depsipeptidy (lineární, cyklické)
  - heterocyklické sloučeniny
  - lipidické látky



**BIOTOXINY** - vysoká akutní toxicita pro savce  
- dle specifických účinků:

**neurotoxiny, hepatotoxiny, dermatotoxiny, genotoxiny, imunotoxiny a embryotoxiny**



**CYTOTOXINY** - biologická aktivita, nízká akutní toxicita  
(př. protirakovinné metabolity-cryptophyciny)





# CYANOTOXINY

---

Nejvýznamnější rody produkující cyanotoxiny  
(dosud identifikováno cca 50 druhů  
produkujících tyto látky):

***Anabaena*** (microcystiny, anatoxiny, anatoxin-a(S),  
saxitoxiny, cylindrospermopsin)

***Aphanizomenon*** (anatoxiny, saxitoxiny,  
cylindrospermopsin)

***Microcystis*, *Nodularia*** (microcystiny a nodulariny)

***Planktothrix*/*Oscillatoria*** (microcystiny, anatoxiny,  
saxitoxiny)

***Cylindrospermopsis*** (cylindrospermopsin, saxitoxiny)





# Specifické účinky cyanotoxinů

- **Neurotoxiny** - narušení nervového systému
  - Anatoxin-a
  - Anatoxin-a(s)
  - Saxitoxin
  - Neosaxitoxin
- **Hepatotoxiny** - poškození jater
  - Microcystiny
  - Nodulariny
  - Cylindrospermopsin
- **Dermatotoxiny** - poškození kůže
  - Lyngbyatoxin
  - Aplysiatoxin
- **Promotory nádorů** - podporují nádorové bujení
  - Microcystiny, lyngbyatoxin, aplysiatoxin

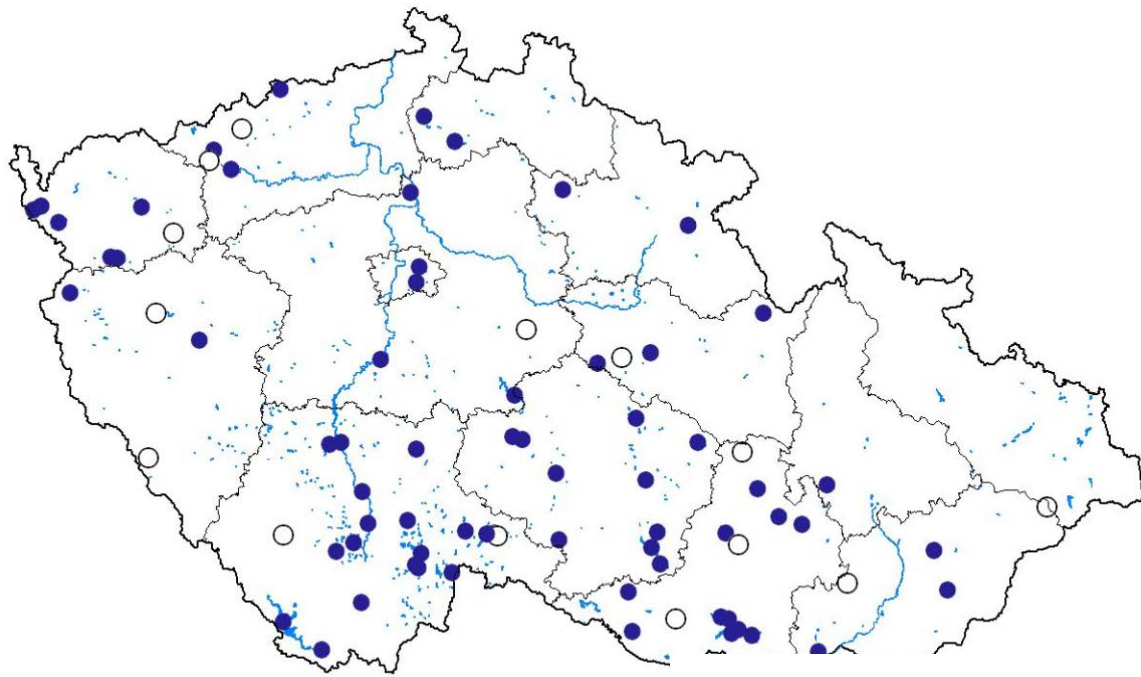


**Lipopolysacharidy** - narušení gastrointestinálního traktu,  
kožní iritant

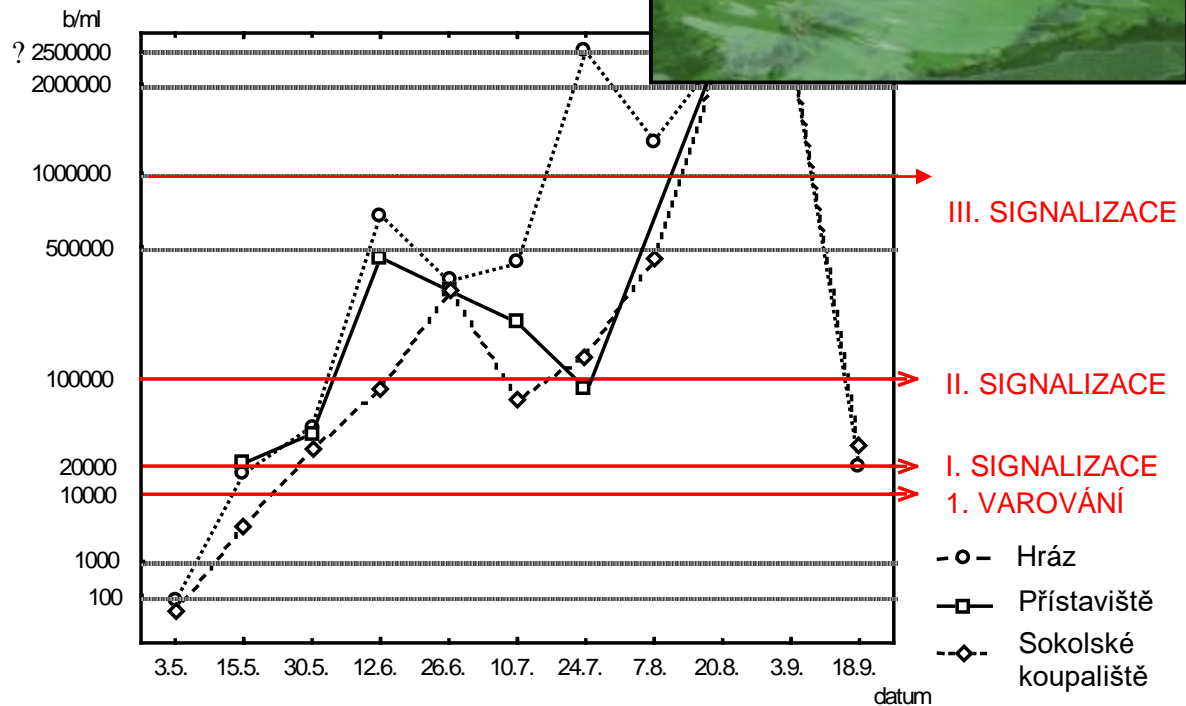


TOXIN	STRUCTURE	STRUCTURE VARIATION	LD50* (µg.kg <sup>-1</sup> )	TOXICITY
Microcystin	cyclic heptapeptide	>60	50-1200	hepatotoxicity, tumor promotion induction of oxidative stress
Nodularin	cyclic pentapeptide	7	50-2000	hepatotoxicity, tumor promotion
Anatoxin	alkaloide	2	200-250	neurotoxicity
Anatoxin-a(S)	methylphospho- ester N-hydroxy- guanine	1	20	neurotoxicity
Saxitoxin	carbamat alkaloid	19	10	neurotoxicity
Cylindrospermopsin	guanidin alkaloid	2	200**	cytotoxicity, target organs: liver and kidney
Aplysiatoxin		2		dermatotoxicity, tumor promotion
Lyngbyatoxin	modified cyclic dipeptide	1		dermatotoxicity, tumor promotion
Lipopolysaccharide				irritate effect

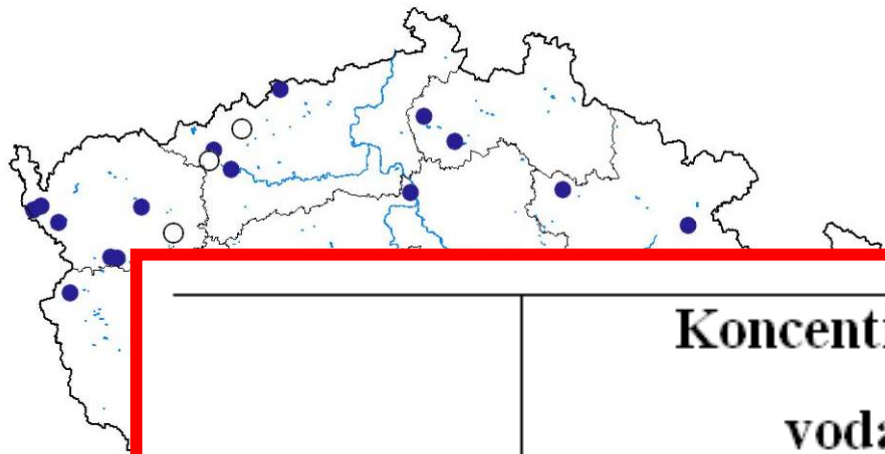
WHO (ČR) **1  $\mu\text{g/l}$**   
**MC-LR** v pitné vodě  
 při 100 000 buněk/ml  
 - **zákaz koupání**



Toxické VKS  
**80%** nádrží a  
 rybníků v **ČR**



WHO (ČR) **1  $\mu\text{g/l}$**   
**MC-LR** v pitné vodě  
 při 100 000 buněk/ml



LIZACE

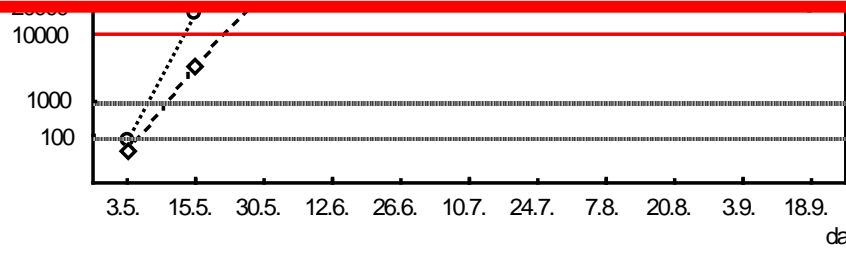
ZACE

1. VAROVÁNÍ

- Hráz
- Přístaviště
- ◇- Sokolské koupaliště

**Koncentrace microcystinu ( $\mu\text{g/L}$ ) na vodárenských nádržích ČR**

	2004	2005	2006	2007	2008	Celkem 2004-8
<b>N</b>	52	46	68	111	89	<b>366</b>
<b>Průměr</b>	0.46	0.93	0.60	0.64	0.27	<b>0.55</b>
<b>Minimum</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
<b>Maximum</b>	9.18	17.27	6.76	10.59	5.05	<b>17.27</b>

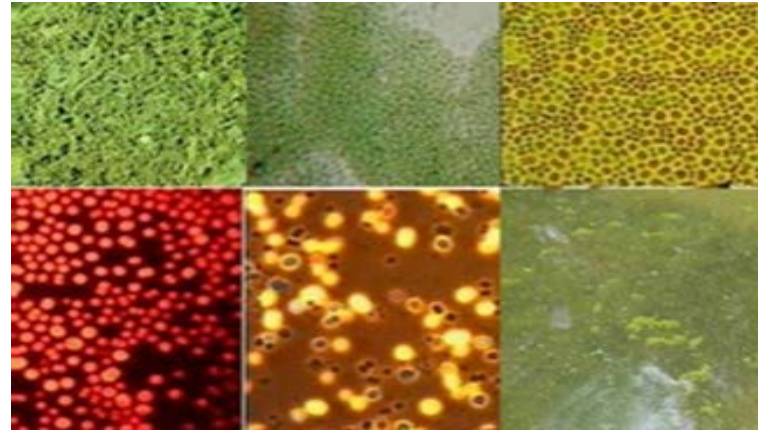


# „Nové“ cyanotoxiny

- Ohromné množství sloučenin (anagnostec.com: 5000 látek)

- Minimum informací:

- toxikologie ?
- výskyt a osud v prostředí ?
- vliv na volně žijící organismy ?
- účinky složitých směsí ?
- přirozená funkce těchto látek ?



- Podle mnoha indicií existuje **mnoho dalších dosud neobjevených toxických metabolitů sinic** (sinice jsou často toxické i když neobsahují žádný z dosud identifikovaných cyanotoxinů!!!).

- **Farmakologicky slibné látky**

- **Tříděné látek, nomenklatura..... nejednotné**

- detailní studium - nutnost LC/MS instrumentace



# Cyanotoxiny - zdravotní a ekologická rizika ?

**Cyanotoxiny**

The diagram illustrates the health and ecological risks of cyanotoxins. It features a central blue oval with the word "Cyanotoxiny" and several chemical structures of cyanotoxins. Red arrows point from the central area to illustrations of a swimmer in a pool, a child drinking water from a tap, and a child eating a sandwich. Green arrows point from the central area to illustrations of a duck, a goose, a fish, and a frog. The bottom half of the image is filled with various biological organisms, including insects (beetles, flies, crickets), crustaceans (cyclops, amphipods, crayfish), mollusks (clams, snails), and plants (algae, ferns). The overall layout suggests the pathways of cyanotoxin exposure and its effects on different organisms.

# Toxins

## Animal Health Effects



<u>Country</u>	<u>Species Killed</u>
• Argentina	• cattle
• Australia	• cattle, sheep
• Canada	• cattle, waterfowl
• England	• dogs, fish
• USA	• dogs, cattle, human?

In July 2002, a Wisconsin teenager died two days after swimming in a golf-course pond that had a bloom of *Anabaena flos-aquae*. A year later, an autopsy reported the death was due to cyanotoxins in the pond water (Anatoxin-a).

# Vliv na člověka

- z pitné vody, z rekreační expozice
  - Alergie - vyrážky
  - Zánět spojivek
  - Bronchitida
  - Střevní a žaludeční potíže
  - Bolesti hlavy
  - Jaterní problémy

**Otravy dobytka a domácích zvířat (psi) pijících znečištěnou vodu**

**Zvířata - více dokumentovaných otrav - nádrže nebo řeky kontaminované sinicemi pro zvířata často jediným dostupným zdrojem vody a jsou pak nucena konzumovat jí nesrovnatelně větší množství, než je náhodné požití lidmi při rekreaci**

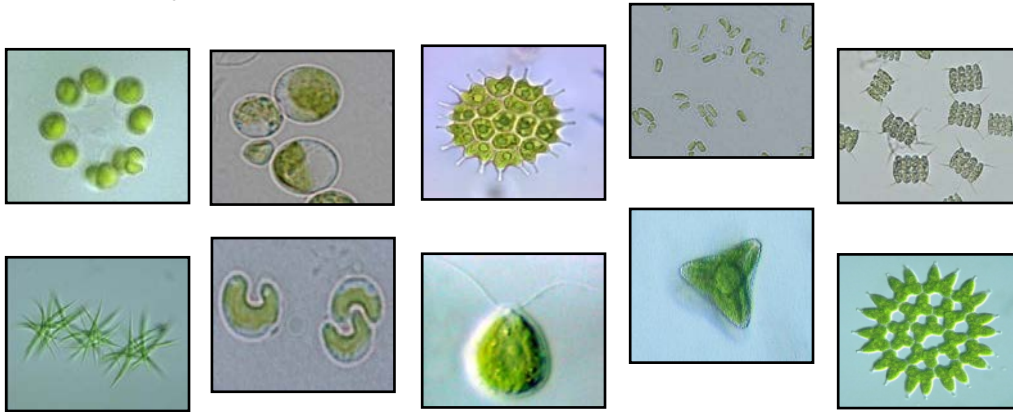


<b>Případy otrav spojené s cyanotoxiny v pitné vodě</b>	
1931	USA: masivní vodní květy <i>Microcystis</i> v řekách Ohio a Potomac způsobily onemocnění 5000 – 8000 lidí (převážně gastroenteritidami) v řadě měst zásobovaných vodou z těchto řek
1960 - 1965	Zimbabwe, Harare: v části města zásobované vodou z nádrže s vodním květem <i>Microcystis</i> každoročně v době kolapsu vodního květu docházelo k rozvoji gastroenteritid u dětí. Děti ze čtvrtí s jiným zdrojem vody nebyly ovlivněny a nebyly identifikovány žádné infekční faktory.
1975	Pensylvánie, USA: akutní gastroenteritidy u 62% z 8000 lidí, konzumace vody z nádrže se sinicí <i>Schizotrix</i>
1975	USA: endotoxický šok 23 dialyzačních pacientů ve Washingtonu související s rozvojem sinic ve vodárenské nádrži
1979	Austrálie: po algicidním zásahu proti vodnímu květu <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> ve vodárenské nádrži na Palm Island onemocnělo přes 140 obyvatel (převážně děti) těžkými hepatoenteritidami, které si vyžádaly hospitalizaci. Symptomy byly malátnost, nechutenství, zvracení, bolesti hlavy, zvětšení jater, zácpy následované krvavými průjmy, dehydratace. Rozbory moče prokázaly poškození ledvin a rozbory krve zvýšené hladiny jaterních enzymů indikující poškození jater.
1994	Švédsko, 3 vesnice poblíž Malmö: po dobu několika hodin došlo k náhodnému míchání vodárensky neupravené říční vody s pitnou vodou. V řece v té době rostla hustě sinice <i>Planktothrix agardhii</i> produkující microcystiny. 121 obyvatel (z celkových 304) onemocnělo (nevolnosti, bolesti břicha, svalů, hlavy, zvracení, průjmy, horečky). Ovlivněna byla také domácí zvířata (psi a kočky).
<b>Případy spojené s rekreační expozicí</b>	
1959	Kanada, Saskatchewan: navzdory úhynům dobytka a varováním před rekreačním využitím plavali lidé v jezeře zamořeném sinicemi. 13 osob onemocnělo (bolesti hlavy, nevolnost, bolesti svalů, bolestivé průjmy). V exkrementech jednoho z pacientů, který náhodně požil asi 300ml vody, byly identifikovány sinice <i>Microcystis</i> a <i>Anabaena circinalis</i> .
1980 - 1981	Pensylvánie a Nevada, USA: u více než 100 osob podráždění očí, kůže, bolest uší, symptomy „senné rýmy“, akutní gastroenteritidy aj. po plavání a vodním lyžování v jezeře s <i>Aphanizomenon</i> a <i>Anabaena</i>
1989	Anglie: po plavání a jízdě na kanoích ve vodě se silným vodním květem sinic rodu <i>Microcystis</i> trpělo 10 z 20 branců zvracením, průjmy, bolestmi břicha, otoky rtů, bolestmi v krku. U dvou z nich se rozvinul silný zápal plic (zřejmě způsobený aspirací

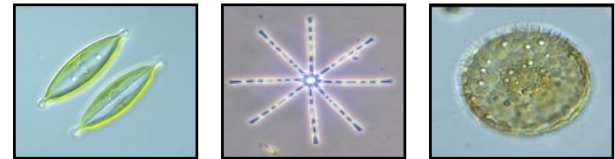
# Účinky na fotoautotrofní organismy

- studium alelopatických interakcí
- objasnění možné funkce některých cyanotoxinů

Zelené řasy (*Chlorophyta*)



Rozsivky (*Chromophyta*)



Skrytěnky (*Cryptophyta*)



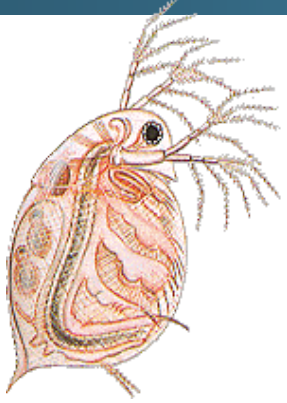
Sinice (*Cyanophyta*)



- vliv na vodní rostliny, které jsou schopny přijímat microcystiny; některé studie ukázaly účinky microcystinů na aktivitu rostlinných detoxikačních enzymů (Pflugmacher et al. 1998; Pflugmacher et al. 1999)



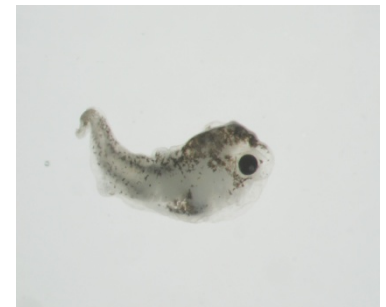
# Účinky na živočichy



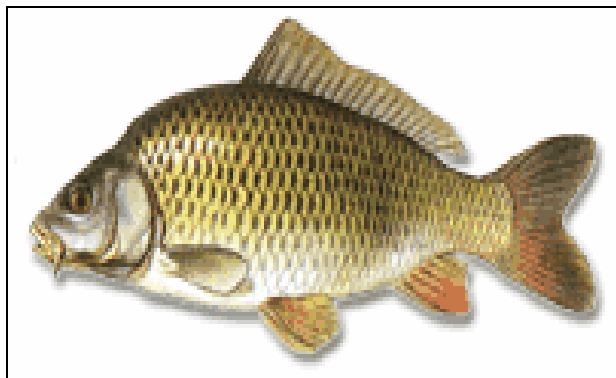
- planktonní korýši (*Daphnia magna*)
- akutní toxicita, chronická a reprodukční toxicita



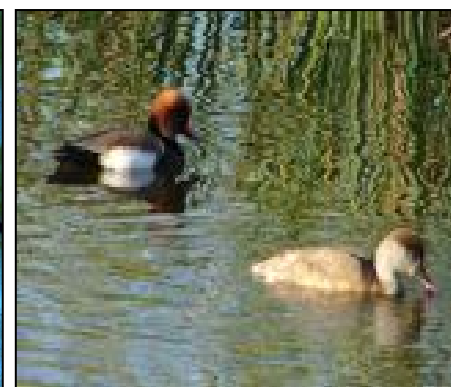
- embrya drápatek (*Xenopus laevis*)
- embryotoxicita, teratogenita



# Účinky na obratlovce



- Úhyny ryb spojené především se **snížením obsahu kyslíku**



- **Hromadné úhyny ptáků** v různých částech světa spojovány s masovými rozvoji sinic - nejednoznačné důkazy

- Většinou **souhrn více faktorů** - paraziti, UV, sinice, patogeny - oslabení populací

# Potlačování eutrofizace

## Metody omezení masového rozvoje sinic

---

- Snížení koncentrace živin v povodí nad nádrží -  
Odstranění zdrojů z povodí
  - Bodové zdroje - ČOV, odpadní vody
  - Plošné zdroje - eroze půdy, znečištění ovzduší
  - Zákaz fosfátových detergentů (prací prášky ČR 2006, EU 2013)
  - Omezení užití umělých hnojiv
- Snížení koncentrace živin v nádrži
- Odstraňování inokula sinic ze sedimentů, odtěžení sedimentů z nádrží
- Regulace rybí obsádky, Biomanipulace
- Rozšiřování makrofyt (vyšší vodní rostliny)
- Algicidní zásahy

# Zdroje fosforu v povodí nad nádrží

---

Bodové zdroje - lidská sídla (města, vesnice)

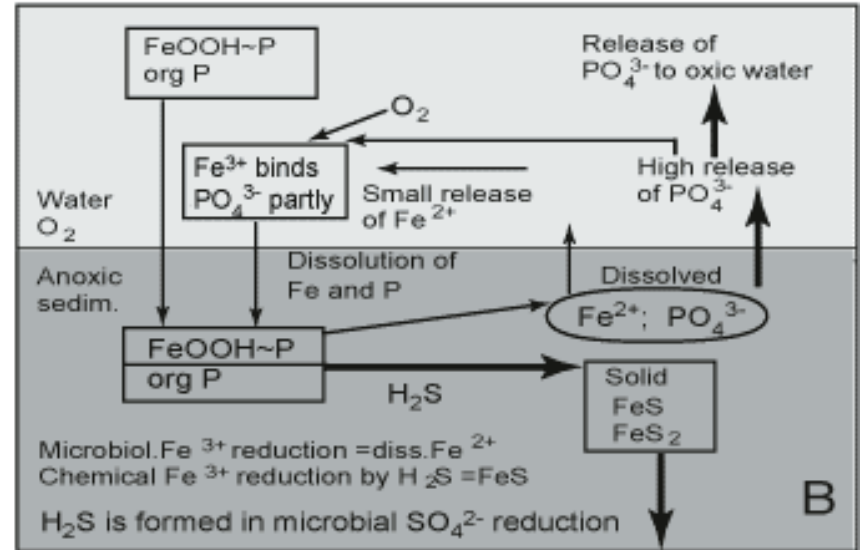
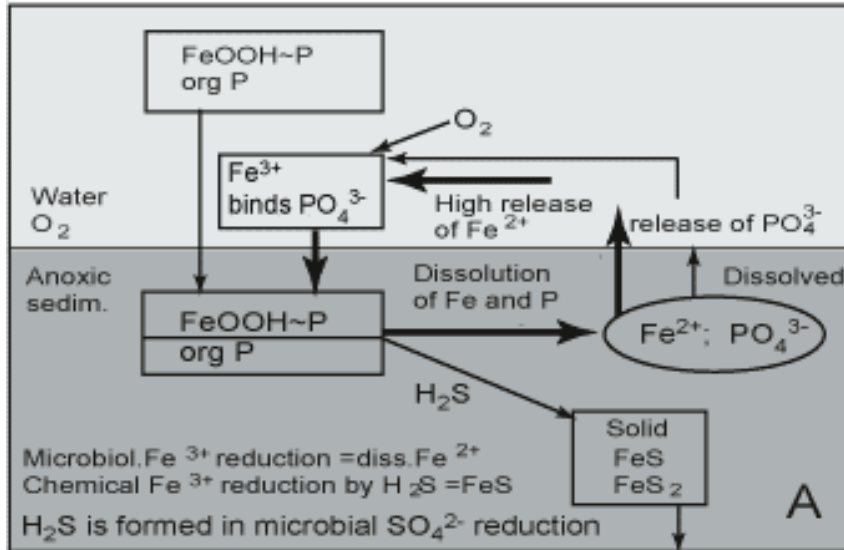
- průmyslové závody
- zemědělské objekty
- čistírny odpadních vod!
- rybníky... atd.

Difuzní zdroje - atmosferický spad

- geologické podloží
- roztroušená sídla
- pole ... atd

# Zdroje fosforu v nádrži

- Biomasa - řasy, rostliny, sinice, zooplankton, ryby ...
- Sediment - zásobárna fosforu nádrží
  - zpětné uvolňování do vodního sloupce za anoxických podmínek (role dusičnanů)





# Zdroje sinic

---

- Sinice jsou přirozenou součástí nádrží, avšak bez „pomoci“ člověka by se nikdy **znovu** nestaly dominantní skupinou autotrofů
- Povodí nad nádrží - rybníky, přehradý s masovým rozvojem sinic
- Sedimenty v nádržích s masovým rozvojem sinic

# Snižování koncentrace fosforu v povodí

---

- Výstavba ČOV s terciálním stupněm čištění
- Zákaz používání fosfátových prášků a mycích prostředků
- Technická protierozní opatření
- Vrstevnicové hospodaření
- Ochranné travní pásy
- Zajištění úniků živin z farem
- Terasy a meze
- Decentralizované čištění odpadních vod
- Nevegetační stabilizace půdy
- Protipovodňová opatření v citlivých oblastech

# Snižování koncentrace fosforu v nádrži

- Aplikace železa/hliníku
- Aplikace vápna
- Využití jílu



Látky vážící fosfor aplikovány přímo do vodní nádrže. Fosfor deaktivují a snižují tak jeho dostupnost pro primární producenty.

- řada komerčně využívaných látek ke srážení fosforu z vodního sloupce.
- založeny na reakcích fosforu s hliníkem, železem, kalcitem (uhličitan vápenatý), hašeným vápnem (hydroxid vápenatý) nebo jílovými částicemi (bentonity, zeolity, modifikované jíly, kaolíny apod.)
- Hypolimnické odpouštění
  - snížení obsahu živin v nádrži odpouštěním na živiny bohaté hypolimnické vody, i zlepšení kyslíkových poměrů u dna

# Ošetření sedimentů

---

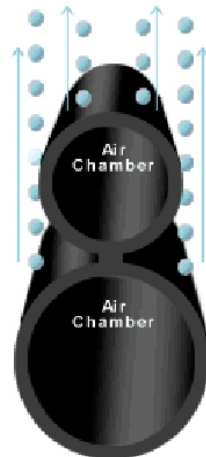
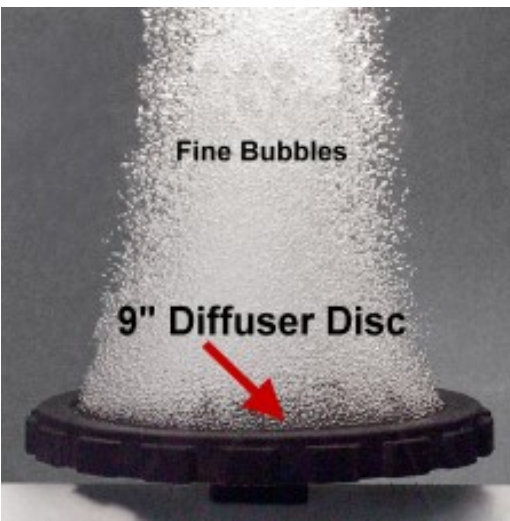
- Překrývání sedimentů
  - aktivní bariéry - materiály které mohou aktivně adsorbovat fosfor (jíly, vápence)
  - pasivní bariéry - inertní materiály, geotextílie, izolační fólie, surový popel, rozdrčené cihly...
- Odstraňování sedimentů - sací bagry
- Oxidace sedimentů - provzdušňování
- Aplikace bakterií

# Ošetření sedimentů

## Provzdušňovací a okysličovací techniky

teplotní stratifikace - kvůli rozkladu organické hmoty a minimální cirkulaci vody nade dnem mohou vznikat anoxické (bezkyslíkaté) podmínky - uvolnění živin ze sedimentů

- Provzdušňovací jednotky, aerátory, aerační věže





# Ošetření sedimentů

- odstranění svrchní vrstvy sedimentů - nejvíc fosforu
- redukce vnitřní zásoby živin v nádrži
- odkryta vrstva s větší kapacitou pro další vázání fosforu.
- odstraněna značná část inokula (dočasně inaktivního stádia) sinic, které je v sedimentu trvale přítomno.



# Regulace struktury biotických vztahů

---

- Využití rybí obsádky
- Přímá predace planktofágních ryb - ichtyoeutrofizace (Tilapie?)
- Redukce bentofágních ryb (kapr, candát, cejn)
- Podpora dravých ryb (okoun, štika...) = podpora růstu vyšších rostlin



# Regulace struktury biotický vztahů

- Využití makrovegetace
- Podpora rozvoje litorální vegetace → redukce živin (N, P), stabilizace ekosystému
- Odstranění nežádoucích látek (kumulace těžkých kovů, pesticidů aj.)
- Produkce alelopatických látek inhibujících růst sinic (*Myriophyllum* sp.)



# Aplikace algicidních přípravků

---

Zásahy (pomocí algicidních přípravků) proti autotrofním organismům v eutrofních vodách je finančně náročný a nevede k dlouhodobým efektům pokud nejsou odstraněny živiny v povodí nad nádrží! Ale...



# Algicidní zásahy

---

## • Výhody

- Rychlý účinek
- Relativně levné
- Snadná manipulace
- Dostupnost

## • Nevýhody (Rizika)

- Toxicita pro necílové organismy
- Akumulace v životním prostředí
- Vznik rezistence
- Kyslíkový deficit na dně nádrže
- Uvolňování toxinů

# Algicidní látky

---

- Přírodní látky - ječná sláma, Myriophyllum, výluhy rostlin (listový opad)
- Algicidy první generace - skalice modrá, dusičnan stříbrný, manganistan draselný
- Algicidy druhé generace - většinou komerční přípravky biologicky rozložitelné, selektivní vůči řasám/sinícím, nezanechávají rezidua v ekosystému
- Koagulanty - síran hlinitý, polyaluminium chlorid, síran železitý (snižují obsah živin ve sloupci, schopny i odstraňovat buňky sinic)

# **Jak na toxické sinice ?**

**Neexistuje univerzální návod**

**- kombinace metod**

**- „specifický problém“ podle nádrže**