

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH
BUDĚJOVICÍCH
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**



Bakalářská Práce

**VLIV GLOBÁLNÍ ZMĚNY KLIMATU NA SLADKOVODNÍ
FYTOPLANKTON NÁDRŽÍ STŘEDNÍ EVROPY**

Veronika Visocká

Vedoucí práce: RNDr. Petr Znachor, Ph.D.
České Budějovice, duben 2010

Visocká V. (2010): Vliv globální změny klimatu na sladkovodní fytoplankton nádrží střední Evropy.

[Impact of ongoing global climate change on fytoplankton in Central Europe. Bc. Thesis, in Czech] 24 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace:

Tato práce představuje návrh projektu zabývajícího se možným dopadem globální změny klimatu na složení, strukturu a dynamiku sladkovodního fytoplanktonu a následným ovlivněním kvality vody.

Annotation:

The thesis in the form of project proposal evaluates potential impacts of ongoing climate change on phytoplankton composition, structure and dynamics with special emphasis on water quality.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 30. dubna 2010

Veronika Visocká

Abstrakt:

Bakalářská práce je zpracována formou projektu. Cílem této práce je popsat možný vliv globální změny klimatu na chemické a fyzikální parametry nádrží střední Evropy, změny ve vývoji fytoplanktonu během roku a jeho druhovou rozmanitost. Globální změna klimatu se nejvýrazněji projevuje zvyšováním průměrných teplot na Zemi, může však také docházet i k nárůstu četnosti extrémních projevů počasí jako jsou přívalové srážky nebo vlny veder. Změny klimatu ovlivňují různě jednotlivé druhy organismů, předpokládají se změny ve fenologii, fyziologii, distribuci druhů i jejich adaptaci na nové podmínky. Z dosavadních pozorování vyplývá, že narůstající teploty zejména v letních měsících povedou k favorizaci sinic a tím ke zhoršení kvality vody. Abychom mohli studovat dlouhodobé změny fytoplanktonu, je třeba mít k dispozici dlouhodobé časové řady měření. Pro vlastní studium jsem se zaměřila na nádrž Římov v jižních Čechách, kde sledování probíhá nepřetržitě od jejího napuštění v roce 1979.

Abstract:

The bachelor thesis in the form of project is aimed at the impact of ongoing climate change on physical and chemical parameters in freshwater reservoirs in Europe and subsequent changes in phytoplankton assemblages. Besides an apparent increase in temperatures observed during last decades, climate change is supposed to intensify weather extremeness such as frequency of heavy rainfalls or occurrence of heat waves. As a result, changes in phenology, physiology and species distribution are expected. There is a potential threat to water quality that incidence and amount of cyanobacterial blooms will rise in near future. To assess the impact of climate change on the phytoplankton, long term data must be available. As an extensive long term data set is available from the Římov reservoir, it was chosen as a model reservoir.

Poděkování:

Ráda bych poděkovala mému školiteli RNDr. Petru Znachorovi, Ph.D. za trpělivost, pomoc a množství času, které věnoval této práci. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu a pomoc během tvorby mé práce.

Obsah:

1. Shrnutí současných vědomostí problematiky	1
1.1. Globální změna klimatu	1
1.1.1. Úvod	1
1.1.2. Vliv globální změny klimatu na organismy	1
1.2. Vliv globální změny klimatu na sladkovodní jezera a nádrže Střední Evropy	3
1.2.1. Míchání vodního sloupce	3
1.2.2. Vliv na fenologii hlavních fází rozvoje fytoplanktonu	5
1.2.2.1. PEG model	5
1.2.2.2. Vliv globální změny klimatu na načasování a trvání vybraných fází sezónního vývoje fytoplanktonu	6
1.2.3. Vliv na složení fytoplanktonu	7
1.2.4. Vliv na druhovou diverzitu fytoplanktonu	9
1.3. Jak studovat vliv klimatických změn na fytoplankton	12
2. Význam a uspořádání práce	13
2.1. Význam práce	13
2.2. Předběžné výsledky	14
3. Cíle práce:	16
4. Hypotézy	16
5. Způsob dosažení cílů	17
6. Časový harmonogram a finanční plán	17
7. Testování hypotéz	18
8. Závěr	18
9. Citace	20

Název projektu:

Vliv globální změny klimatu na sladkovodní fytoplankton nádrží střední Evropy.

1. Shrnutí současných vědomostí problematiky

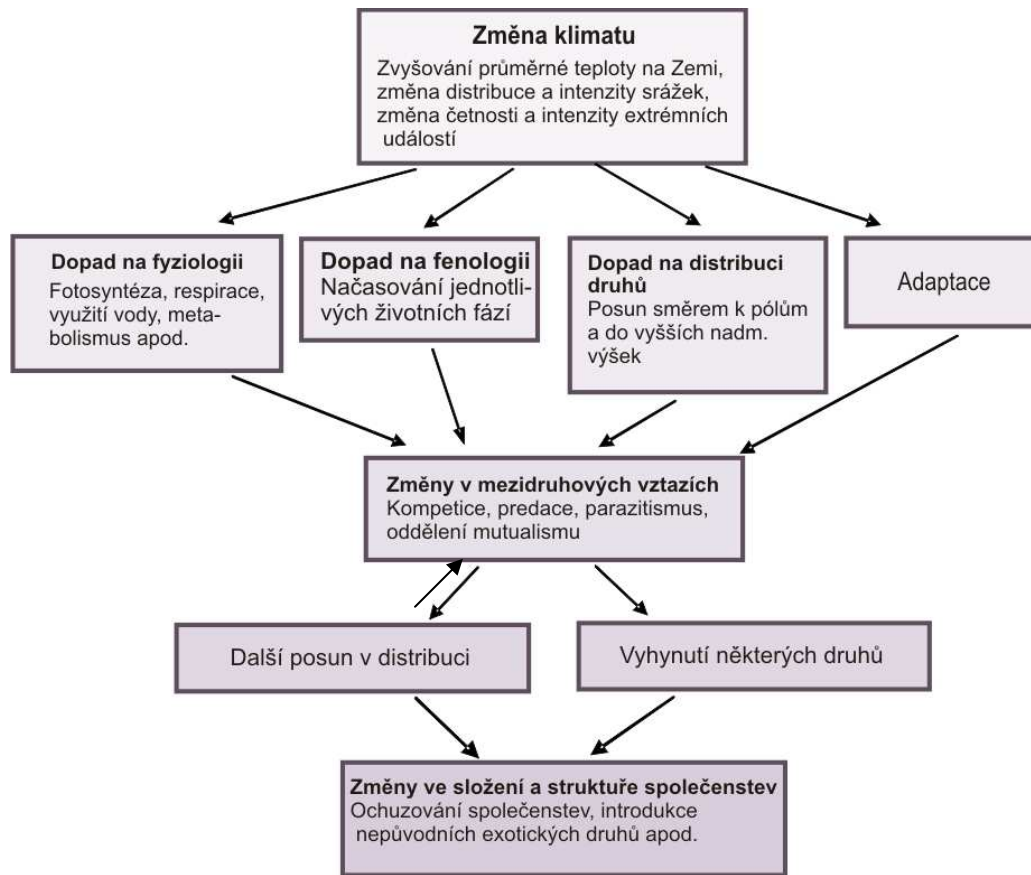
1.1. Globální změna klimatu

1.1.1. Úvod

V současné době jsme svědky globální změny klimatu, jejímž nejvýznamnějším projevem je růst průměrných teplot na Zemi (Mann et al. 1998, Walther et al. 2002, Moberg et al. 2005). Ačkoli příčin současné změny klimatu je pravděpodobně více, jednou z hlavních se zdá být antropogenní nárůst emisí oxidu uhličitého (IPCC 2007). Za posledních 100 let se klima na Zemi oteplilo přibližně o 0,6 °C a v současnosti je rychlost oteplování zřejmě nejvyšší za posledních 1000 let (Walther et al. 2002). I když se průměrná teplota zvyšuje, rychlost oteplování je značně heterogenní v různých částech Země (Diffenbaugh et al. 2005) a vlivem specifických místních podmínek může dojít i k lokálnímu ochlazení (Feddema et al. 2005, Diffenbaugh 2009). Kromě zvyšování průměrné teploty dochází i k významnému nárůstu její variability (Jentsch et al. 2007), což se může projevovat např. častějším výskytem vln horka, která zasáhla v létě 2003 velkou část Evropy (Schär et al. 2004). Dalším předpokládaným projevem globální změny klimatu ve Střední Evropě jsou změny v sezónním srážkovém režimu, nárůst intenzity a trvání období sucha, ale také větší pravděpodobnost přívalových dešťů a povodní (Booij 2002, Christensen & Christensen 2003, Kyselý & Beranová 2009). V souvislosti se změnou srážkového režimu dojde pravděpodobně na mnoha místech naší planety ke zhoršení dostupnosti zdrojů pitné vody (Vorosmarty et al. 2000), což bude pravděpodobně mít nedozírné socioekonomické následky (Sen 2009).

1.1.2. Vliv globální změny klimatu na organismy

Veškeré změny klimatu mají určitý dopad na organismy. V různých regionech se tyto dopady liší a organismy jsou ovlivněny různě silně. Nicméně obecně lze předpokládané vlivy shrnout do 4 kategorií (Walther et al. 2002; Obr. 1):



Obrázek.1: Možné dopady globální změny klimatu na organismy lze shrnout do čtyř kategorií. Reakce organismů na změny spojené se změnou klimatu mohou vést ke změnám vztahů mezi organismy a následně k vymírání druhů a další rozdílné distribuci druhů. Následkem těchto změn by bylo jiné složení a struktura společenstev (převzato z Hughes 2000).

- a) **Vliv na fyziologii** – změny koncentrace CO_2 v atmosféře, srážek a teploty mají přímý vliv na metabolické procesy jako respirace, fotosyntéza, růst a u rostlin ovlivňují i složení pletiv.
- b) **Vliv na distribuci jednotlivých druhů** – změna roční průměrné teploty o 3°C odpovídá změně izotermy o 300 – 400 km zeměpisné šířky a 500 m nadmořské výšky. Z těchto důvodů se předpokládá šíření druhů směrem k pólům a do vyšších nadmořských výšek.

- c) **Vliv na fenologii** (načasování sezónních aktivit živočichů a rostlin) – životní cykly řídící se podněty z prostředí, např. teplotou okolí, mohou být pozměněny a tím může dojít k oddělení fylogenetických vazeb mezi druhy (Hughes 2000). V jarních měsících například dochází k dřívějším návratům migrujících ptáků, k dřívějšímu výskytu motýlů, rostliny vytvářejí dříve květy apod. (Walther et al. 2002).
- d) **Adaptace** – u organismů s krátkou generační dobou a rychlým populačním růstem, jako je fytoplankton, může v relativně krátkém čase dojít k vytvoření nejrůznějších adaptací tak, aby se přizpůsobily novým podmínkám.

Veškeré proběhnuvší změny ve fyziologii, fenologii nebo distribuci jednotlivých druhů nevyhnutelně ovlivní i kompetiční, predační a jiné mezidruhové interakce (Obr. 1), jejichž přímým nebo nepřímým důsledkem bude změna druhového složení a následné ovlivnění biodiverzity daného společenstva (Hughes 2000). V předkládaném projektu se budu zabývat dopadem globální změny klimatu na fenologii, složení a strukturu společenstva fytoplanktonu, jehož výskyt má klíčový vliv pro kvalitu vody v jezerech a nádržích.

1.2. Vliv globální změny klimatu na sladkovodní jezera a nádrže Střední

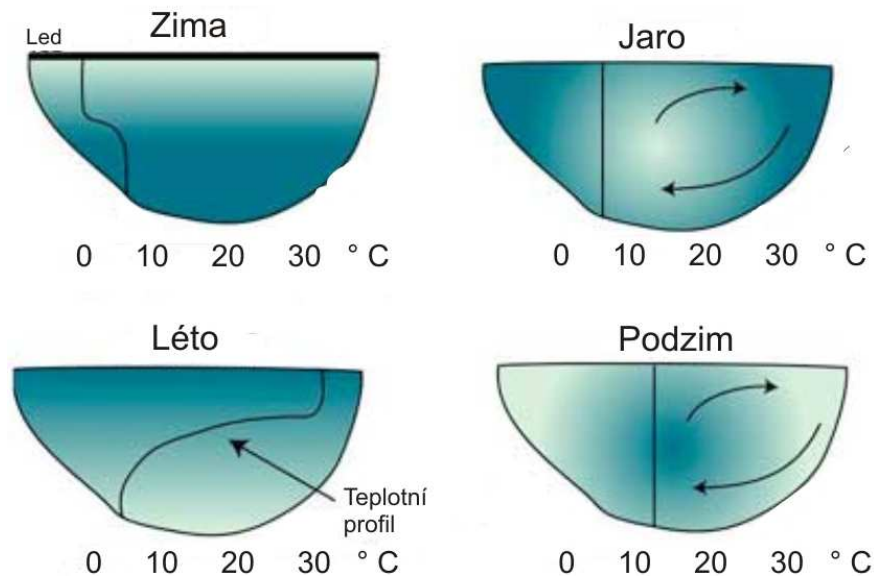
Evropy

1.2.1. Míchání vodního sloupce

Změna klimatu projevující se nárůstem průměrných teplot významně ovlivňuje režim míchání jezer a nádrží. Dynamiku sezónního míchání sladkovodních těles lze obecně shrnout do čtyř typů: polymiktická, dimiktická, a teplá a studená monomiktická tělesa. Pro dimiktická jezera a nádrže bylo prokázáno, že zvýšení teploty vzduchu vede k podobnému zvýšení teploty vody v epilimniu (Hondzo & Stefan 1993) jehož následkem je nárůst intenzity a trvání stratifikace (Huttula et al. 1992, Elo et al. 1998, Peeters et al. 2007). To může být ilustrováno na příkladu Curyšského jezera, kde došlo v druhé polovině 20. století k nárůstu teploty epilimnia rychlostí 0,24 °C za dekádu a prodloužení letní stratifikace o 2-3 týdny (Livingstone 2003). Tento trend rostoucích teplot vody v epilimniu byl pozorován i na kanadských jezerech (Schindler et al. 1990).

Pokud dojde vlivem globální změny klimatu ke zvýšení minimální teploty vody v zimě nad 4°C, může u mnoha jezer dojít až k přechodu z dimiktického (Obr. 2) do teplého monomiktického režimu, kdy se jezero bude míchat pouze v zimě. V hlubokých

monomiktických jezerech mírného pásu dochází k míchání zpravidla v období, kdy teploty vzduchu dosáhnou svých ročních minim, a proto s předpokládaným nárůstem minimálních teplot vzduchu (Jentsch et al. 2007) dojde k většímu oteplení spodních vrstev hypolimnia a slabšímu nárůstu stratifikace ve srovnání s dlouho zamrzlými arktickými studenými monomiktickými jezery (Peeters et al. 2002).



Obrázek 2: Roční cyklus míchání a stratifikace dimiktických jezer. Na jaře a na podzim dochází k promíchání celého profilu jezera, v zimě a v létě dochází k teplotní stratifikaci.

V závislosti na rychlosti růstu teploty vzduchu se některá hluboká jezera mohou stát přechodně meromiktická, což znamená, že nebude docházet k míchání celého vodního sloupce až ke dnu, ale jen jeho části (Matzinger et al. 2007). V některých evropských jezerech byl tento jev již pozorován a bylo popsáno jeho působení na fytoplankton. Přechodná meromixie vede ke snížení přísunu živin do epilimnia, což se v jezeře Constance (Švýcarsko) projevilo snížením množství fytoplanktonu s následným zlepšením kvality vody v epilimniu (Straile et al. 2003). Na druhou stranu neúplné míchání má ve spodních vrstvách hypolimnia za následek snížení množství kyslíku, jelikož je zamezeno přísunu vody z horních na kyslík bohatých vrstev vodního sloupce (Livingstone 1997)

Mělká jezera včetně člověkem vytvořených rybníků zpravidla nemají po většinu roku stabilní teplotní stratifikaci a jsou polymiktická. U těchto vodních těles mohou rostoucí teploty v kombinaci s klesající rychlostí větru nastartovat přechod z polymiktického do

monomiktického režimu. V těchto případech hraje významnou roli průhlednost vody, jejíž pokles urychluje celý proces směrem k vytvoření dimiktického režimu míchání, a proto dlouhodobé predikce režimu míchání v polymiktických jezerech jsou nejisté stejně jako předpovědi vývoje kvality vody (MacKay et al. 2009). Mělká jezera mohou být charakterizována dvěma protikladnými rovnovážnými stavy, čistá jezera se submerzními makrofyty nebo turbidní s velkým množstvím fytoplanktonu (Scheffer et al. 1993). Současné prognózy bohužel předpovídají, že v blízké budoucnosti dojde k nárůstu četnosti mělkých jezer v turbidním stavu s masově rozvinutým sinicovým fytoplanktonem, a tudíž ke zhoršení kvality vody a redukci biodiverzity (MacKay et al. 2009), což bylo konstatováno i v nedávno publikované souhrnné studii o vlivu změny klimatu na mělká jezera v Nizozemí (Mooij et al. 2005).

1.2.2. Vliv na fenologii hlavních fází rozvoje fytoplanktonu

Existuje mnoho důkazů, že globální změna klimatu významně ovlivňuje fenologii organismů, tzn. načasování jednotlivých fází jejich sezónního cyklu (Hughes 2000, Walter et al. 2002). Tento vliv se nevyhnul ani sladkovodnímu fytoplanktonu, jehož sezónní cyklus byl popsán na základě dlouhodobého sledování mnoha jezer a nádrží již v osmdesátých letech minulého století a souhrnně publikován v tzv. PEG modelu (Sommer et al. 1986).

1.2.2.1. PEG model

Během zimních měsíců je biomasa fytoplanktonu na svém sezónním minimu vlivem limitace světlem a nízké teploty. Na konci zimního období zlepšující se podmínky pro růst fytoplanktonu umožní jeho následný rozvoj, který vede k vytvoření jarního maxima biomasy fytoplanktonu. Biomasu tvoří zpravidla malé, rychle rostoucí řasy jako jsou kryptomonády, chlamydomonády nebo drobné centrické rozsivky. Následně dochází k rozvoji herbivorního zooplanktonu, který vytváří silný predanční tlak na fytoplankton. Kombinací filtračního tlaku zooplanktonu s možnou limitací živinami, které mohou být v období růstu fytoplanktonu vyčerpány, dochází k rychlému poklesu biomasy řas, což se často projevuje zvýšením průhlednosti. Tato fáze sezónního cyklu na přelomu jara a léta se nazývá období „clear water“, během níž dochází k recyklaci živin a utváření teplotní

stratifikace. Herbivorní zooplankton je limitován nedostatkem potravy, a proto zpravidla následuje pokles jeho četnosti a biomasy.

V letním období je nádrž zpravidla již teplotně stratifikována a za těchto podmínek dochází k rozvoji letního fytoplanktonu, jehož růst je charakterizován střídáním nejrůznějších limitujících faktorů. Hlavním limitujícím faktorem bývá zpravidla množství dostupného rozpuštěného fosforu, ale uplatňují se i další, např. dostupnost Si, N, dostupnost světla, predanční tlak zooplanktonu atd. PEG model předpokládá nejprve dominanci zelených řas, kompetice o fosfor vede k postupnému převládnutí koloniálních rozsivek. Ty jsou následně kvůli vyčerpání křemíku nahrazeny dinoflageláty nebo sinicemi. Předpokládaný pokles koncentrace dusíku ve vodě vede k rozvoji vláknitých sinic, schopných dusík fixovat. Tato modelová sekvence sukcesního vývoje složení fytoplanktonního společenstva může mít však v konkrétních případech značně odlišný průběh. S koncem léta dochází k postupnému ochlazování vody v epilimniu až do doby, kdy se teploty u hladiny a dna vyrovnají a nastává podzimní míchání celého vodního sloupce. Biomasa fytoplanktonu postupně klesá a mění se také jeho složení. Dominují druhy adaptované na míchání vodního sloupce, jako jsou např. rozsivky nebo kryptomonády. Se zkracujícím se dnem klesá množství světla, které limituje růst fytoplanktonu. Teplota u hladiny se snižuje a s příchodem zimy se celý cyklus uzavírá.

1.2.2.2. Vliv globální změny klimatu na načasování a trvání vybraných fází sezónního vývoje fytoplanktonu

Jedním z důsledků probíhající změny klimatu je posun v načasování a trvání jednotlivých fází sezónního cyklu fytoplanktonu v dimiktické nádrži mírného pásu. Mnohé z těchto fenologických změn jsou přímo spojeny s fyzikálními parametry, jako je např. teplota, která řídí míchání vodního sloupce. Protože počátek jarního rozvoje fytoplanktonu je těsně spojen s předcházejícím zimním obdobím, jarní maximum fytoplanktonu a následná fáze „clear water“ je jedním z období, kde změna klimatu bude mít největší dopad. Z dlouhodobého sledování mnoha švédských jezer bylo zjištěno, že teplejší zimy spojené s brzkým táním ledu v devadesátých letech 20. století zapříčinily dřívější rozvoj a pokles jarního fytoplanktonu a dokonce i uspíšily nástup letního fytoplanktonu (Weyhenmeyer 2001). Byly publikovány četné studie, které poukazují na pozitivní korelace mezi nástupem jarního fytoplanktonu, případně období „clear water“ a NAO

indexem (North Atlantic Oscillation index = změny rozdílů tlaku vzduchu nad Arktickým mořem a subtropickým Atlantským oceánem, Hurrell, 2003), který charakterizuje předchozí zimní období (Weyhenmeyer et al. 2002, Scheffer et al. 2001, Dröscher et al. 2009). Na dlouhodobé řadě dat z jezera Washington bylo za posledních 40 let pozorováno urychlení nástupu jarní stratifikace o 16 dní, což bylo doprovázeno zrychlením rozvoje fytoplanktonu o 19 dní (Winder & Schindler 2004). Autoři dále uvádějí, že načasování a trvání období „clear water“ bylo během let značně variabilní a záviselo především na biologických faktorech. Zároveň s posunem jarní stratifikace se prodloužilo období letní stratifikace o 9 dní, což v konečném důsledku znamená, že vegetační sezóna byla v roce 2002 o 25 dní než v roce 1960 (Winder & Schindler 2004).

1.2.3. Vliv na složení fytoplanktonu

Z dosavadních pozorování vyplývá, že rostoucí teploty zejména v letním období zapříčiní podstatné změny ve složení a struktuře vodních ekosystémů s vážnými důsledky pro kvalitu vody (MacKay et al. 2009). Přímé i nepřímé vlivy spojené s nárůstem teploty vytváří v jezerech vhodné podmínky pro růst a dominanci sinic. Předpokládá se, že úspěšnost sinic závisí na více faktorech prostředí, nejen na teplotě, nicméně mnoho těchto faktorů je ovlivněno právě teplotou. Nárůst teploty vody znamená příznivé podmínky pro tvorbu vodních květů sinic, které zdá se mají vyšší růstová teplotní optima (Robarts & Zohary 1987). Společenstvu sinic bude zřejmě stále častěji dominovat rod *Microcystis* spp., který má vysoké Q_{10} pro růstovou rychlost (Q_{10} = nárůst rychlosti růstu při zvýšení teploty o 10 °C, MacKay et al. 2009). Vyšší teplota také zvyšuje stabilitu vodního sloupce a tím omezuje vertikální promíchávání nádrže, což posunuje kompetiční rovnováhu ve prospěch volně plovoucích sinic (Jöhnk et al. 2008, Wagner & Adrian, 2009a). Dřívější nástup jarní stratifikace a oddálené období podzimního míchání prodlouží periodu vhodnou pro optimální růst sinic (Paerl & Huisman 2008). Růst sinic silně závisí i na množství živin. Teplejší voda v hypolimniu urychluje mineralizaci organického materiálu a přispívá tím k akumulaci živin v hypolimniu. Přístup k těmto živinám je omezen na druhy schopné ve vodě migrovat, jako jsou volně plovoucí sinice, pro něž se uvádí nejčastější koncentrace TP v rozmezí 70 – 215 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (MacKay et al. 2009). Navíc pokud poklesne množství dusíku ve vodě, mohou některé sinice na rozdíl od ostatního fytoplanktonu fixovat vzdušný dusík.

Společně s teplotou se předpokládá nárůst oblačnosti a rychlosti větru v některých oblastech Střední Evropy, který může oslabovat vertikální teplotní gradient ve vodě, a tím eliminovat výhodu sinic regulovat svou pozici ve vodním sloupci. O tom, jak komplexní jsou předpovědi složení fytoplanktonu v budoucnosti, svědčí i práce Shatwell et al. (2008), kteří na základě 25-ti letého sledování jezera Müggelsee zjistili, že paradoxně v obecně teplých letech byly nižší teploty začátkem sezóny a došlo k rozvoji chladnomilných sinic z řádu *Oscillatoriales* a centrických rozsivek v pozdně jarním období. Nicméně zvýšená tvorba sinicových vodních květů v letním období může být považována jako dobrý indikátor klimatických změn.

Další významnou skupinou, jejíž výskyt může být ovlivněn změnou klimatu, jsou rozsivky. I když by se z výše uvedeného mohlo zdát, že vývoj fytoplanktonu v letním období jednoznačně směřuje k dominanci sinic, není tomu tak. Projevem globální změny klimatu totiž není jen zvyšování teploty, ale také nárůst variability počasí a srážkových extrémů (IPPC 2007). Člověkem vytvořené přehradní nádrže zbudované přehrazením říčního toku jsou významně ovlivněny množstvím přitékající vody. Předpokládané zvýšení četnosti extrémních průtoků v blízké budoucnosti zapříčiněných přívalovými srážkami (Christensen & Christensen 2003) vyvolá změny ve složení, dynamice a sezónním vývoji fytoplanktonu. Z ekologického hlediska patří extrémní srážky mezi klasické příklady disturbance, které vychylují systém z rovnováhy a nasměrují jeho vývoj jiným směrem (Jentsch et al. 2007). Z literatury jsou známy případy, kdy vývoj fytoplanktonu byl povodňovými událostmi uspíšen, pozdržen nebo dokonce navrácen do předchozího sukcesního stádia (Reynolds 1993). Dalším markantním dopadem povodňových událostí na fytoplankton jsou změny v jeho druhovém složení, mění se biodiverzita a narůstá podíl dříve nedetekovaných (“vzácných”) druhů na celkové biomase (Barbiero et al. 1999). Obecně lze říct, že povodňové události spojené s přísunem živin a narušením teplotní stratifikace v letním období vedou zpravidla k rozvoji rozsivek (Godlewska 2003, Leitão 2003, Znachor et al. 2008).

Přívalové srážky a následné povodně ovšem nejsou jediným projevem zvýšené variability klimatu. Lze očekávat, že kromě srážkových extrémů bude narůstat četnost a intenzita tzv. vln horka (Schär et al. 2004). Bylo prokázáno, že tyto vlny horka výrazně zvyšují pravděpodobnost a intenzitu sinicových vodních květů v eutrofních jezerech a nádržích (Jöhnk et al. 2008). Složení fytoplanktonu v budoucích letech bude tedy záviset

především na tom, který z projevů klimatické změny bude právě aktuální a vytvoří příhodné podmínky šité na míru konkrétnímu organismu (Obr. 3).



Obrázek 3: Dva možné scénáře vlivu globální změny klimatu na rozvoj letního fytoplanktonu.

1.2.4. Vliv na druhovou diverzitu fytoplanktonu

Biodiverzita sladkovodních ekosystému je velmi citlivá na změnu klimatu a s ní související vymírání sladkovodních druhů. Toto vymírání je srovnatelné nebo dokonce přesahuje ztráty předpokládané pro suchozemské organismy, které se odhadují na 15-37 % celkového počtu druhů v příštích 50-ti letech (Heino et al. 2009). Význam biodiverzity spočívá v tom, že zajišťuje správné fungování ekosystému a udržuje jeho stabilitu a to následujícími způsoby (Chapin et al. 1997):

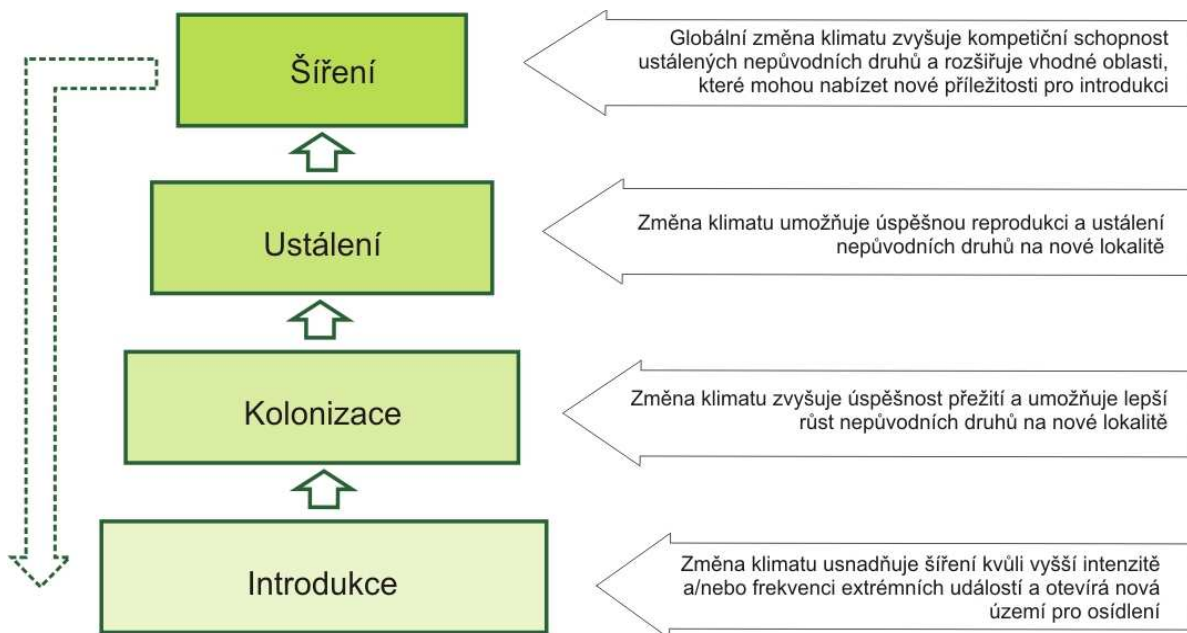
1) Vysoká diverzita je spojena s množstvím trofických interakcí, které alternativně mohou zajišťovat stabilní toky energie mezi jednotlivými trofickými úrovněmi. Jinými

slovy, pokud jeden článek systému vypadne, jeho funkci převezme jiný a celkové fungování se nezmění.

2) Vysoká druhová rozmanitost značně snižuje náchylnost ekosystému vůči šíření invazních druhů.

3) Vysoká diverzita může redukovat šíření patogenních druhů, protože zvětšuje průměrné vzdálenosti mezi jedinci stejného druhu (platí zejména pro vyšší rostliny).

Ačkoli sladkovodní ekosystémy představují 0,01 % světového vodstva a zaujímají pouze 0,8 % plochy Země, jsou obývány 100 tisíci druhů, což představuje asi 0,6 % z odhadovaného celkového počtu 1,8 milionu popsanych druhů (Heino et al. 2009). Změna klimatu umožňuje nepůvodním druhům rozšířit se do oblastí, kde by dříve nemohly přežít a rozmnožovat se (Walter et al. 2009, Obr. 4). Vliv změny klimatu na organismy je druhově specifický, nicméně obecně platí, že dopady pro akvatické chladnomilné druhy budou spíše negativní, zatímco pro teplomilné druhy budou pozitivní. V této souvislosti se předpokládá posun druhů do vyšších nadmořských výšek a vyšších zeměpisných šířek. S tím souvisí šíření teplomilných invazních druhů i do oblastí mírného pásu (Heino et al. 2009).



Obrázek 4: Vliv globální změny klimatu na všechny stupně úspěšného invazního procesu. Změna klimatu pomáhá druhům nejen šířit se do nových oblastí, ale také přežít, úspěšně se rozmnožovat a následně se šířit dál (převzato z Walther et al. 2009).

Příkladem invazního planktonního organismu může být sinice *Cylindrospermopsis raciborskii*, která byla původně popsána jako tropický a subtropický druh, ale v posledních letech značně rozšířila svůj geografický areál do mírného pásu včetně Střední Evropy (Briand et al. 2004, Paerl & Huisman 2008). Šíření tohoto druhu schopného vytvářet masivní vodní květy představuje vážné nebezpečí pro kvalitu vody, neboť produkuje toxický cylindrospermopsin, který může způsobovat otravy lidí odkázané na užívání kontaminované vody (Carmichael 2001). Příčinou invazního šíření této sinice je její široká teplotní tolerance, vyšší teplotní optimum (20–35 °C) a schopnost růstu za různých světelných podmínek (Briand et al. 2004).

Dalším neobvyklým druhem, který se vyskytl na našem území, je tropická zelená řasa *Pleodorina indica* (Obr. 5). Tento druh v srpnu 2003, kdy v Evropě panovalo mimořádně horké počasí (Schär et al. 2004), vytvořil na řece Malši v Českých Budějovicích masivní vodní květ (Znachor & Jezberová 2005). Jednalo se o vůbec první případ hromadného výskytu této exotické zelené řasy v Evropě. Příčinami jejího nenadálého výskytu byly zřejmě tropické teploty a extrémně nízké srážky. Celý případ trval pouze několik dní a po mírném zvýšení průtoku vody říčním korytem došlo k odplavení převážné části biomasy dolů po proudu. V následujících letech byla řasa objevena i na dalších lokalitách, nicméně již nikdy nevytvořila masový vodní květ. Zdá se, že řasa je schopna přežít nepříznivé podmínky v zimě a opakovaně se namnožit do té míry, že se stává na lokalitě dominantním druhem a silně konkuruje původním druhům (Znachor & Jezberová 2005). Otázkou zůstává, nakolik byl tento výskyt ojedinělý nebo se v brzké budoucnosti dočkáme jeho opakování.



Obrázek 5: *Pleodorina indica* a vodní květ na řece Malši v Českých Budějovicích v roce 2003 (převzato z Znachor & Jezberová 2005).

V České republice byl publikován ještě jeden případ masového výskytu řas, tentokrát se jednalo o dinoflageláty. V červenci 2007 byl v přítokové části Vranovské nádrži zaznamenán hnědo-červeně zbarvený silný vegetační zákal tvořený převážně druhem *Peridinopsis kevei*, který u nás doposud nebyl zaznamenán. Hodnoty chlorofylu přesáhly $300 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ a počet buněk dosáhl v maximu téměř 90 tisíc na ml (Geriš 2008). Zřejmě i za tímto přemnožením, které trvalo cca. 2 týdny, stojí pravděpodobně vysoké teploty, nízký průtok a také vysoké množství živin přitékajících do nádrže. Z uvedených příkladů je zřejmé, že za určitých specifických podmínek (vysoké teploty, nízké srážky, vysoké množství živin), jejichž předpokládaná frekvence v budoucnosti poroste, může docházet i na našem území k přemnožování nepůvodních teplomilných druhů, které mohou způsobovat značné problémy s kvalitou vody.

Změna klimatu neovlivňuje pouze druhovou diverzitu a složení fytoplanktonu, ale v některých případech také jeho velikost a s tím související toky uhlíku potravními řetězci vodních ekosystémů. V jezeře Tahoe zvýšená teplotní stratifikace v poslední době a změna v dostupnosti živin vedla ke zmenšování velikosti rozsivek, zejména z rodu *Cyclotella*. Menší buňky mají výrazně nižší rychlost klesání ke dnu. Snižování buněčných rozměrů ve stabilním vodním sloupci je projevem adaptace vedoucí k minimalizaci sedimentačních ztrát (Winder et al. 2009).

1.3. Jak studovat vliv klimatických změn na fytoplankton

Pro studium vlivu klimatických změn na fytoplankton je nezbytné mít k dispozici dlouhodobé časové řady sezónního vývoje fytoplanktonu a také naměřeny biotické a abiotické faktory určující jeho složení, strukturu a dynamiku (Smetacek & Cloern 2008). I když se z předchozího textu může zdát, že takovýchto dlouhodobých řad je k dispozici velké množství, není tomu tak. Asi nejdelší souvislá časová řada existuje z jezera Bajkal, kde měření probíhá od roku 1945. Vzorky z tohoto jezera byly odebírány každých 7 – 10 dní ve vertikálním profilu až do hloubky 250 m, celková hloubka v odběrovém místě je 800 m. Zjistilo se, že průměrná teplota vody se od roku 1946 zvýšila o $1,21 \text{ }^\circ\text{C}$, chlorofyl *a* narostl o 300 % od roku 1979 a zvýšilo se i množství zooplanktonu o 335 %. Hlavní příčinou zaznamenaných změn je pravděpodobně globální změna klimatu, nicméně důležitou roli hrají i socio-ekonomické změny využívání celé oblasti a následná zvýšený

přísun živin do jezera (Hampton et al. 2008). V tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny příklady existujících dlouhodobých časových řad z jezer a nádrží.

V ČR jsou k dispozici dlouhodobá data z nádrží Římov a Slapy. V této práci se zaměřím pouze na nádrž Římov, kde monitoring probíhá již od jejího napuštění v roce 1979, měřené parametry jsou uvedeny v Tabulce 1. Tato přehrada leží v jižních Čechách na řece Malší v nadmořské výšce 470 m. Byla vybudována jako zdroj pitné vody. Celá přehrada je dlouhá 13,5 km a její povrch zaujímá 12,06 km². Průměrná hloubka přehrady je 16,5 m a u hráze dosahuje hloubka až 43 m. Doba zdržení se pohybuje mezi 80 – 180 dny.

Tabulka 1: Příklady existujících dlouhodobých řad ze světových jezer a nádrží.

Lokalita	Počátek/ délka	Odběrový interval	Měřený parametr	Citace
jezero Veluwe	1959	denní	teplota	Scheffer et al. 2001
jezero Washington	1964-1998	týdenní	chlorofyl, fytoplankton, zooplankton	Arhonditsis et al. 2004
jezero Windermere	45let	týdenní	fytoplankton	Maberly et al. 1994
jezero Baikal	1945	7-10-ti denní	fytoplankton, zooplankton, chemie	Hampton et al. 2008
jezero Constance	1960 (1974)	měsíční	profil Si, O ₂ , TP	Straile et al. 2003
Curyšské jezero	1936	měsíční	teplota, profil	Livingston 2003
jezero Washington	1962-2002	7-14ti denní	fytoplankton, zooplankton, chlorofyl	Winder & Schindler 2009
jezero Müggelsee	1982-2007	týdenní	fytoplankton, zooplankton, chemie	Wagner & Adrian 2009b
nádrž Římov	1979	3 týdenní	fyzikální a chemické (teplota, kyslík, pH, průhlednost aj.), biologické (fytoplankton, zooplankton, chlorofyl)	Komárková et al. 2003

2. Význam a uspořádání práce

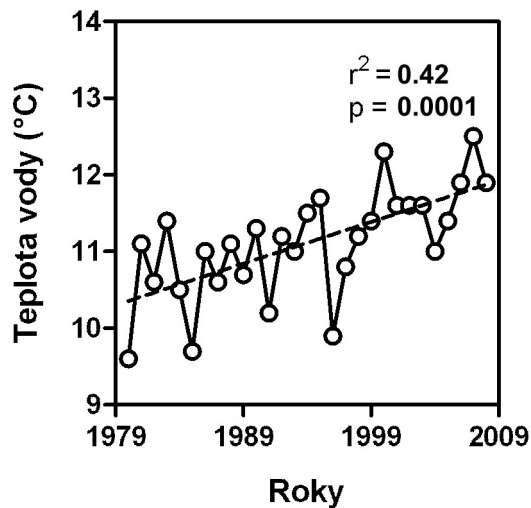
2.1. Význam práce

Globální změna klimatu představuje aktuální problém s pravděpodobným negativním dopadem na dostupnost a kvalitu vody (Sen 2009). Klíčovým faktorem, ovlivňujícím kvalitu vody je množství a složení fytoplanktonu. Předkládaný projekt se zabývá možnými

scénáři vývoje budoucího složení fytoplanktonu. Navrhovaná analýza dlouhodobých dat z nádrže Římov umožní predikci vývoje a změn ve struktuře a druhovém složení fytoplanktonu a odhad budoucího vývoje kvality vody v nádrži.

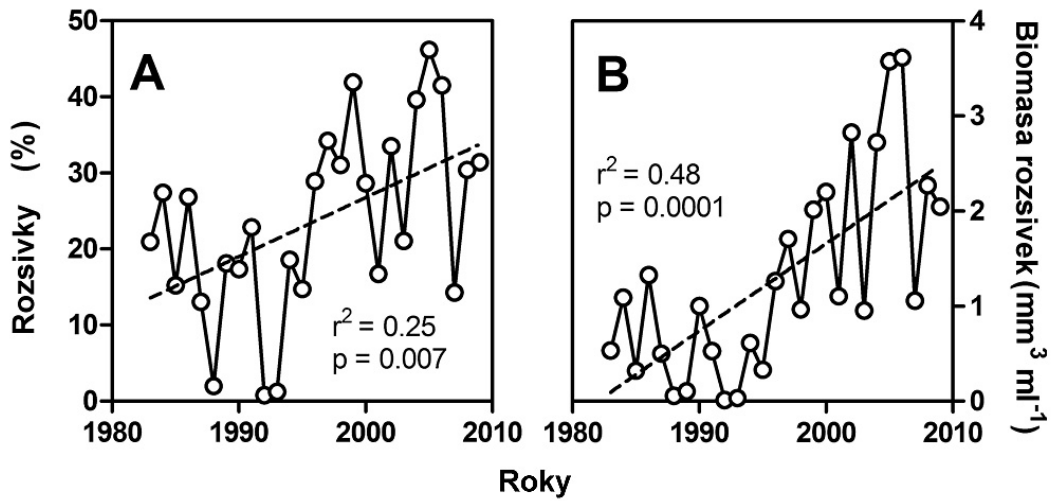
2.2. Předběžné výsledky

Z předběžných analýz se zdá, že časová řada téměř 30-ti let je dostatečná k tomu, aby bylo možné některé časové trendy učít a vyhodnotit. Během posledních třiceti let došlo k nárůstu průměrné roční teploty v epilimniu nádrže o $\sim 1,5$ °C (Obr. 6).

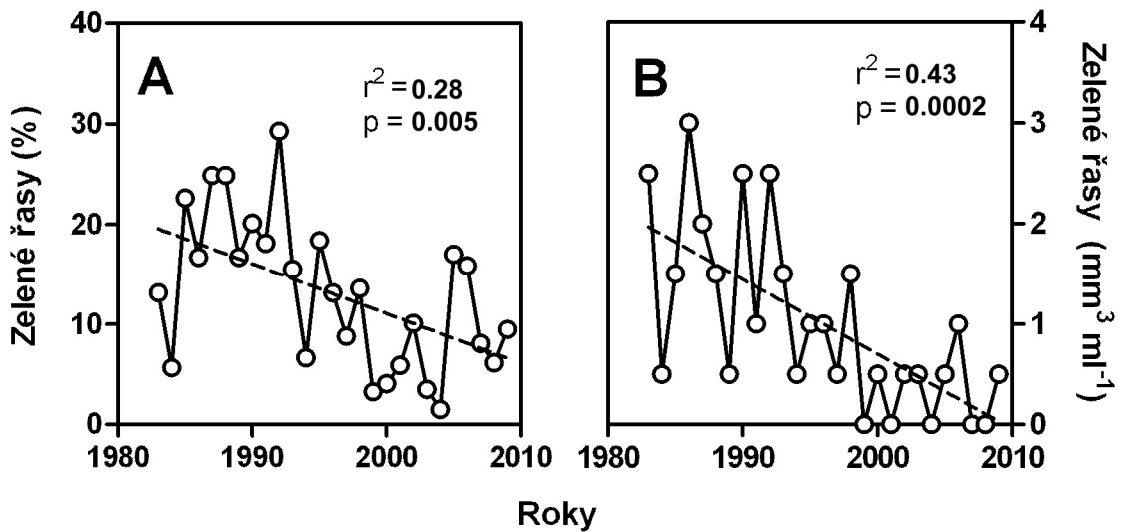


Obrázek 6: Průměrné roční teploty měřené v epilimniu nádrže Římov od roku 1979. Z obrázku je patrné, že časový trend lze proložit lineární regresí se statisticky významným nárůstem teploty o $0,54$ °C za dekádu.

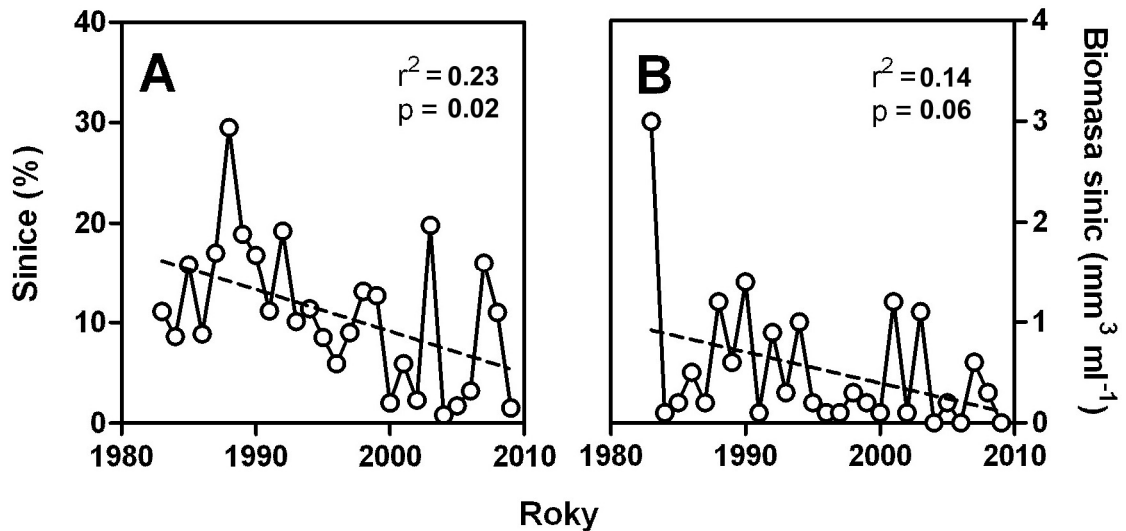
Zdá se, že společně s růstem teploty došlo i ke změně dominantních složek fytoplanktonu. Dochází k nárůstu procentuálního zastoupení a biomasy rozsivek (Obr. 7A, B), zatímco množství a procento zelených řas (Obr. 8A, B) se dlouhodobě snižuje. Celkové množství sinic se také snižuje (Obr. 9B), tento trend však není statisticky významný. Signifikantně se ovšem snižuje podíl sinic ve společenstvu fytoplanktonu (Obr. 9A). Otázkou zůstává, zda-li k podobným změnám dochází také na druhové úrovni a jak tyto změny souvisí se změnami chemických a fyzikálních parametrů a vzájemnými biotickými interakcemi.



Obrázek 7: Průměrné roční procentuální zastoupení (A) a biomasa (B) rozsivek v nádrži Římov.



Obrázek 8: Průměrné roční procentuální zastoupení (A) a biomasa (B) zelených řas v nádrži Římov.



Obrázek 9: Průměrné roční procentuální zastoupení (A) a biomasa (B) sinic v nádrži Římov.

3. Cíle práce:

Cílem této práce je utřídit a zpracovat dlouhodobá data z nádrže Římov a zjistit, zda existují časové trendy v měřených fyzikálních, chemických a biologických parametrech. Zjištěné dlouhodobé trendy budou zasazeny do kontextu probíhající změny klimatu a také socioekonomických změn souvisejících s vývojem hospodaření v povodí nádrže.

4. Hypotézy

Hypotéza 1: Globální změna klimatu má vliv na teplotu nádrže. Průměrná roční teplota zejména v epilimniu se zvyšuje.

Hypotéza 2: Z analýzy dlouhodobé řady lze identifikovat časové trendy dalších fyzikálních a chemických parametrů.

Hypotéza 3: Globální změna klimatu má vliv na načasování jednotlivých fází vývoje fytoplanktonu během roku. Nárůst teploty společně se změnou fyzikálně chemických parametrů vede ke změně složení fytoplanktonu.

5. Způsob dosažení cílů

Práce na tomto projektu je plánovaná na 3 roky. Hlavním činností bude zpracování fyzikálních, chemických a biologických dat získaných během dlouhodobého sledování Římovské nádrže. Roční monitoring nádrže se skládá ze 17 odběrů v třítydenních intervalech. V odběrovém místě u hráze jsou měřeny základní fyzikální a chemické parametry (teplota, průhlednost, pH, množství živin, kyslíku, základní vertikální profily atd.) a také biologické parametry (chlorofyl, biomasa a složení fytoplanktonu a zooplanktonu). Velká většina těchto dat není doposud vytříděna a detailně zpracována. Bude vytvořena časová matice, po jejímž vytvoření bude možné provádět podrobné statistické hodnocení časových trendů. Zároveň bude probíhat další odběr vzorků a jejich analýzy a doplňování časových řad o nové údaje.

6. Časový harmonogram a finanční plán

Tabulka 2: Časový plán.

Činnost	2011	2012	2013
Odběr vzorků	*	*	*
Shromáždování dat	*	*	*
Třídění a normalizace dat	*	*	*
Statistické vyhodnocení	*	*	*
Zpracování výsledků		*	*
Publikace výsledků		*	*

Tabulka 3: Finanční plán v tisících Kč.

	2011	2012	2013
Věcné náklady	125	85	75
Mzdové náklady	60	60	60
Cestovní náklady	45	75	85
Služby	30	40	50
Celkem	260	260	270

Finanční náročnost celého projektu je plánovaná na tisíc Kč.

Rozpis věcných nákladů pro první rok projektu:

Přenosný počítač.....	25 tisíc Kč
Statistický program PRISM 5.....	10 tisíc Kč
Kancelářské potřeby	20 tisíc Kč
Terénní vybavení.....	10 tisíc Kč
Zálohování dat.....	10 tisíc Kč
Náklady na analýzu vzorků.....	50 tisíc Kč

Mzdové náklady předpokládaného 20 % pracovního úvazku na Hydrobiologickém ústavu BC AV ČR a představují 60 tisíc Kč.

Cestovní náklady zahrnují cestovné na konference a konzultace nutné pro vypracování tohoto projektu a náklady na cesty nutné pro odběr vzorků.

Výběr a použití vhodných statistickým postupů a analýz bude průběžně konzultováno s příslušnými odborníky. Tyto konzultace budou hrazeny z kategorie **služeb**, které činí 30 tisíc Kč.

7. Testování hypotéz

Časové trendy jednotlivých parametrů budou identifikovány pomocí lineární regrese. Data budou utříděna do časové matice zahrnující všechny naměřené parametry. Bude otestováno, zda mají data normální rozložení. V případě nesplnění podmínek normality rozdělení, bude provedena transformace dat, případně k dalším analýzám budou použity neparametrické testy. K otestování vztahu mezi druhovým složením fytoplanktonu a vysvětlujícími proměnnými budou použity metody mnohorozměrné analýzy dat, např. mnohorozměrná regrese s postupným výběrem. Abych zajistila použití korektních statistických metod a postupů, budou veškeré kroky průběžně konzultovány s příslušnými odborníky.

8. Závěr

Navrhovaný projekt se zabývá aktuální tematikou globální změny klimatu a možným vlivem na vodní nádrže a fytoplankton. Z dosavadních pozorování vyplývá, že globální změna klimatu se již na Zemi projevuje, např. vyšší průměrnou teplotou a nárůstem variability počasí. Všechny tyto dopady nějakým způsobem ovlivňují organismy. I když

každý druh reaguje na změny jinak, dopady se dají rozdělit do 4 kategorií: vliv na fyziologii, fenologii, distribuci druhů a adaptace druhů.

Změna klimatu zásadně ovlivňuje a bude ovlivňovat i jezera a nádrže. S narůstající teplotou ovzduší bude stoupat i teplota vody v nádržích a jezerech. Teplejší voda stabilizuje vodní sloupec a brání vertikálnímu promíchávání, navíc zvyšuje obsah živin v hypolimniu díky rychlejší mineralizaci. To vše by mohlo mít za následek zvýšení dominance sinic a hromadný rozvoj vodních květů sinic, které mají růstová optima ve vyšších teplotách a jsou schopné ve stabilním vodním sloupci aktivně měnit svoji polohu ve vodním sloupci. Rozvojem sinicových květů by následně došlo ke zhoršení kvality vody a jejího vodohospodářského využití. Na druhou stranu se vlivem změny klimatu předpokládá i nárůst četnosti extrémních událostí jako přívalových dešťů a extrémních průtoků. Tyto disturbance vedou naopak k dominanci rozsivek. Změna klimatu se projeví také na šíření exotických druhů. V současné době je již pozorován výskyt několika tropických sinic a řas ve střední Evropě, např. *Pleodorina indica* nebo *Cylindrospermopsis raciborskii*.

Pro studium vlivu změn klimatu na vodní nádrže, na načasování jednotlivých fází vývoje fytoplanktonu a na jeho druhové složení potřebujeme mít k dispozici dlouhodobé časové řady sezónního vývoje fytoplanktonu. Dále musíme mít naměřeny biotické i abiotické faktory, které určují strukturu a složení fytoplanktonu. Takové dlouhodobé řady jsou poměrně vzácné, k dispozici jsou pouze z několika světových jezer a nádrží. V ČR probíhá dlouhodobý monitoring na přehradě Římov. Tato přehrada se sleduje již od jejího napuštění v roce 1979. Cílem projektu je utřídit tato data a vyhodnotit, zda má změna klimatu opravdu vliv na vodní nádrže a fytoplankton. Z předběžných analýz vyplývá, že 30-ti letá časová řada je dostatečná ke zjištění některých trendů. Vyhodnocená data by měla ukázat dopad probíhající změny klimatu, ale také přispět k vytvoření scénářů budoucího vývoje fytoplanktonu. Tyto výsledky pak mohou v budoucnu pomoci k predikci vývoje a změn ve struktuře fytoplanktonu a také k odhadu budoucího vývoje kvality vody.

9. Citace

- Arhonditsis G.B., Brett M.T., DeGasperi C.L., Schindler D.E. (1994) Effects of climatic variability on the thermal properties of Lake Washington. *Limnology and Oceanography* 49, 256 - 270
- Barbiero R.P., James W.F., Barko J.W. (1999) The effects of disturbance events on phytoplankton community structure in a small temperate reservoir. *Freshwater Biology* 42, 503 – 512
- Booij M.J. (2002) Extreme daily precipitation in Western Europe with climate change at appropriate spatial scales. *International Journal Of Climatology* 22, 69-85
- Briand J.F., Lebourlangier C., Humbert J.F., Bernard C., Dufour P. (2004) *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: Selection, wide physiological tolerance, or global warming? *Journal of Phycology* 40, 231 – 238
- Carmichael W.W. (2001) Health effects of toxin-producing cyanobacteria: "The CyanoHABs". *Human and Ecological Risk Assessment* 7, 1393-1407
- Diffenbaugh N.S. (2009) Influence of modern land cover on the climate of the United States. *Climate Dynamics* 33, 945 – 958
- Diffenbaugh N.S., Pal J.S., Trapp R.J., Giorgi F. (2005) Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of Amerika* 102, 15774-15778
- Dröscher I., Patoine A., Finlay K., Leavitt P. R. (2009) Climate kontrol of spring clear-water phase through the transfer of energy and mass to lakes. *Limnology and Oceanography* 54, 2469 – 2480
- Elo A-R., Huttula T., Peltonen A., Virta J. (1998) The effects of climate change on the temperature conditions of lakes. *Boreal Environment Research*. 3, 137 – 150
- Feddema J.J., Oleson K.W., Bonan G.B., Mearns L.O., Buja L.E., Meehl G.A., Washington W.M. (2005) The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science* 310, 1674-1678
- Geriš R. (2008) Masový výskyt obrněnek v nádrži Vranov. 24. ročník konference Vodárenská biologie 2008
- Godlewska M., Mazurkiewicz-Boron G., Pocięcha A., Wilk-Wozniakand E., Jelonek M. (2003) Effects of flood on the functioning of the Dobczyce reservoir ecosystem. *Hydrobiologia* 504, 305 – 313

- Hampton S.E., Izmet'eva L.R., Moore M.V., Katz S.L., Dennis B., Silow E.A. (2008) Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* 14, 1947 – 1958
- Heino J., Virkkala R., Toivonen H. (2009) Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological reviews* 84, 39 – 54
- Hondzo M., Stefan H. (1993) Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change. *Climatic Change* 24, 187 – 211
- Hughes L. (2000) Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *TREE* 15, 56 - 61
- Hurrell J.W. (2003) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676 – 679
- Huttula T., Peltonen A., Bilaletin A., Saura M. (1992) The effect of climatic change on lake ice and water temperature. *Aqua Fennica* 22, 129 – 142
- Chapin F.S., Walker B.H., Hobbs R.J., Hooper D.U., Lawton J.H., Sala O.E., Tilman D. (1997) Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science* 277, 500 – 504
- Christensen O.B., Christensen J.H. (2004) Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global and Planetary Change* 44, 107 – 117
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E.). Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Jentsch A., Kreyling J., Beierkuhnlein C. (2007) A new generation of climate-change experiments: events, not trends. *Frontiers In Ecology and The Environment* 5, 365 – 374
- Jöhnk K.D., Huisman J., Sharples J., Sommeijer B., Visser P.M., Stroom J.M. (2008) Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global change biology* 14, 495 – 512
- Komárková J., Komárek O., Hejzlar R. (2003) Evaluation of the long term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods. *Hydrobiologia* 504, 143 - 157
- Kyselý J., Beranová R. (2009) Climate-change effects on extreme precipitation in central Europe: uncertainties of scenarios based on regional climate models. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 361 – 374

- Leitão M., Morata S.M., Rodriguez S., Vergon J.P. (2003) The effect of perturbations on phytoplankton assemblages in a deep reservoir Vouglans, France. *Hydrobiologia* 502, 73 – 83
- Livingstone D.M. (1997) An example of the simultaneous occurrence of climate-driven "sawtooth" deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 26, 822 – 828
- Livingstone D.M. (2003) Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. *Climatic Change* 57, 205 – 225
- Maberly S.C., Hurley M.A., Butterwick C., Corry J.E., Heaney S.I., Irish A.E., Jaworski G.H.M., Lund J.W.G., Reynolds C.S., Roscoe J.V. (1994) The rise and fall of *Asterionella formosa* in the South Basin of Windermere: analysis of a 45-year series of data. *Freshwater Biology* 31, 19 - 34
- MacKay M.D., Neale P.J., Arp C.D., Domis, L.N.D., Fang X., Gal G., Joehnk K.D., Kirillin G., Lenters J.D., Litchman E., MacIntyre S., Marsh P., Melack J., Mooij W.M., Peeters F., Quesada A., Schladow S.G., Schmid M., Spence C., Stokes S.L. (2009) Modeling lakes and reservoirs in the climate system. *Limnology and Oceanography* 54, 2315-2329
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. (1998) Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392, 779 – 787
- Matzinger A., Schmid M., Veljanoska-Sarafiloska E., Patceva S., Guseska D., Wagner B., Muller B., Sturm M., Wuest A. (2007) Eutrophication of ancient Lake Ohrid: Global warming amplifies detrimental effects of increased nutrient inputs. *Limnology and Oceanography* 52, 338 – 353
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlen W. (2005) Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature* 433, 613 – 617
- Mooij W.M., Hülsmann S., De Senerpont Domis L.N., Nolet B.A., Bodelier P.L.E., Boers P.C.M., Pires L.M.D., Gons H.J., Ibelings B.W., Noordhuis R., Portielje R., Wolfstein K., Lammens E.H.R.R. (2005) The impact of climate change on lakes in the Netherlands. *Aquatic Ecology* 39, 381 – 400
- Paerl H.W., Huisman J. (2008) Blooms like it hot. *Science* 320, 57 – 58

- Peeters F., Livingstone D.M., Goudsmit G-H., Kipfer R., Forster R. (2002) Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography* 47, 186 – 197
- Peeters F., Straile D., Lorke A., Livingstone D.M. (2007) Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate. *Global Change Biology* 13, 1898 – 1909
- Reynolds C.S. (1993) Scales of disturbance and their role in plankton ecology. *Hydrobiologia* 249, 157 – 171
- Robarts R.D., Zohary T. (1987) Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 21, 391 – 399
- Sen Z. (2009) Global warming threat on water resources and environment. *Environmental Geology* 57, 321 – 329
- Shatwell T., Kohler J., Nicklisch A (2008) Warming promotes cold-adapted phytoplankton in temperate lakes and opens a loophole for Oscillatoriales in spring. *Global Change Biology* 14, 2194 – 2200
- Schär Ch., Vidale P.L., Lüthi D., Frei Ch., Häberli Ch., Liniger M.A., Appenzeller Ch. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332 – 336
- Scheffer M., Hosper S.H., Meijer M.L., Moss B., Jeppesen E. (1993) Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution* 8, 275 – 279
- Scheffer M., Straile D., Van Nes E.H., Hosper H. (2001) Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnology and Oceanography* 46, 1780 – 1783
- Schindler D.W., Beaty K.G., Fee E.J., Cruikshank D.R., Debruyne E.R., Findlay D.L., Linsey G.A., Shearer J.A., Stainton M.P., Turner M.A. (1990) Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest. *Science* 250, 967 – 970
- Smetacek V., Cloern J.E. (2008) On phytoplankton trends. *Science* 319, 1346 – 1348
- Sommer U., Gliwicz Z. M., Lampert W., Duncan A. (1986) The Peg-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.* 106, 433 - 471
- Straile D., Johnk K., Rossknecht H. (2003) Complex effects of winter warming on the physiochemical characteristics of a deep lake. *Limnology and Oceanography* 48, 1432 – 1438

- Vorosmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B. (2000) Global water resources: Vulnerability from climate change acid population growth. *Science* 289, 284 – 288
- Walther G-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389 – 395
- Walther G-R., Roques A., Hulme P.E., Sykes M.T., Pyšek P., Kühn I., Zobel M., Bacher S., Botta-Dukát Z., Bugmann H., Czúcz B., Dauber J., Hickler T., Jarošík V., Kenis M., Klotz S., Minchin D., Moora M., Nentwig W., Ott J., Panov V.E., Reineking B., Robinet Ch., Semchenko V., Solarz W., Thuiller W., Vilà M., Vohland K., Settele J. (2009) Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution* 24, 686 – 693
- Wagner C., Adrian R. (2009a) Cyanobacteria dominance: Quantifying the effects of climate change. *Limnology and Oceanography* 54, 2460 – 2468
- Wagner C., Adrian R. (2009b) Exploring lake ecosystems: hierarchy responses to long-term change? *Global Change Biology* 15, 1104 - 1115
- Weyhenmeyer G.A. (2001) Warmer winters: Are planktonic algal populations in Sweden's largest lakes affected? *Ambio* 30, 565 – 572
- Weyhenmeyer G.A., Adrian R., Gaedke U., Livingstone D.M., Maberly S.C. (2002) Response of phytoplankton in European lakes to a change in the North Atlantic Oscillation. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 28, 1436 – 1439
- Winder M., Schindler D.E. (2004) Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global change biology* 10, 1844 – 1856
- Znachor P., Jezberová J. (2005) The occurrence of bloom-forming green alga *Pleodorina indica* (Volvocales) in the downstream reach of the River Malse (Czech Republic). *Hydrobiologia* 541, 221 – 228
- Znachor P., Zapomělová E., Řeháková K., Nedoma J., Šimek K. (2008): The effect of extreme rainfall on summer succession & vertical distribution of phytoplankton in a lacustrine part of a eutrophic reservoir. *Aquatic Sciences* 70, 77 – 86