

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Ústav pro životní prostředí

Radek Adámek

diplovová práce



Sezónní vývoj a vertikální distribuce korýšů
v hluboké stratifikované nádrži
Josefův Důl v Jizerských horách

Seasonal dynamics and vertical distribution of Crustacea in the deep stratified reservoir Josefův Důl (the Jizera Mountains, Czech Republic)

Vedoucí práce: Dr. Zuzana Hořická

Praha 2015

Prohlášení

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s využitím citované literatury a informačních zdrojů, na které odkazuji. Vytisknutá verze předložené diplomové práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS Univerzity Karlovy.

v Praze, srpen 2015

Radek Adámek

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomohli, abych vypracoval tuto práci. Největší poděkování patří mé školitelce Dr. Zuzaně Hořické, která mi velmi pomohla svými radami a připomínkami, svou trpělivostí s vedením práce a celkově milým přátelským přístupem. Za její dokonale naplánované a zorganizované odběry v Jizerských horách. Dále děkuji své rodině a přítelkyni, která vždy stála při mně a dělala mi oporu. Děkuji všem kolegům, kteří se podíleli na terénních odběrech – jmenovitě: Dr. Michal Šorf, Anna Čermáková, Wade S. Jones, Aneta Doubalová a Lucie Vášková.

Díky patří i Grantové agentuře UK, která podpořila tuto práci v rámci projektu GAUK (1486214) „Příčiny masového výskytu sinic r. *Merismopedia* v horské vodárenské nádrži zotavující se z acidifikace (Josefův Důl, Jizerské hory) a jeho důsledky na upravitelnost vody“. Za finanční podporu děkuji i Nadaci pro obnovu a záchranu Jizerských hor. V neposlední řadě děkuji i státnímu podniku

Povodí Labe s. p. v Hradci Králové za navázání spolupráce a poskytnutí důležitých dat.

Abstrakt

Vodárenská nádrž Josefův Důl v Jizerských horách prochází složitým obdobím zotavování z antropogenní acidifikace, jehož důsledkem jsou mj. i nepředvídatelná sezónní maxima některých organismů. V posledních letech se jedná o masové namnožení pikosiníc rodu *Merismopedia* (*M. tenuissima*), které tvoří v některých obdobích převládající složku fytoplanktonu a značně komplikují proces úpravy vody na vodu pitnou. Zooplankton se vyvíjí v souvislosti s ústupem acidifikace a vysazením lososovitých ryb na konci 90. let 20. století. Korýši jsou zastoupeni pouze několika druhy v obvykle malých počtech, převládaly perloočky *Ceriodaphnia quadrangula* a *Holopedium gibberum*. O rozmístění jednotlivých druhů filtrátorů ve vodním sloupci této hluboké nádrže nebylo nic známo.

Cílem práce bylo popsat sezónní dynamiku a vertikální distribuci korýšů v nádrži Josefův Důl zejména v souvislosti s biotickými faktory prostředí (množství a kvalita potravy, kompetice, predace) a zjistit, zda v letním období dochází k jejich diurnálním vertikálním migracím.

Klíčová slova

zooplankton, zotavování z acidifikace, sezónní vývoj, diurnální vertikální migrace

Abstract

The zooplankton of Josefův Důl, a large and deep drinking water reservoir recovering from acidification, develop in relation to the improving water chemistry but also predation by salmonid fish re-stocked at the end of the 1990s. Crustacea are represented by small numbers of several species only, and nothing is known about their distribution in the water column. Recently, picocyanobacteria *Merismopedia* sp. became dominant in the phytoplankton, which hampers substantially the treatability of the raw water.

The aim of the thesis is to describe the seasonal dynamics and vertical distribution of Crustacea in the Josefův Důl reservoir, together with parameters of the environment, and to study their possible diurnal vertical migrations in the summer period.

Key words

zooplankton, recovery from acidification, seasonal dynamic, diel vertical migration

Obsah

Obsah	6
Úvod	7
Literární přehled	9
Jizerské hory	9
Přehrada Josefův Důl	12
Acidifikace	15
Filtrující zooplankton a sinice	19
Diurnální vertikální migrace	21
Metodika	26
Výsledky	29
Abiotické parametry	29
Fytoplankton	34
Zooplankton	37
Diurnální vertikální migrace zooplanktonu (DVM)	43
Dlouhodobý vývoj druhového složení a početnosti planktonních koryšů v nádrži Josefův Důl (1992-2014)	50
Bezobratlí predátoři	52
Diskuse	53
Chemismus	53
Sezónní vývoj zooplanktonu v horské hluboké nádrži	54
Diurnální vertikální migrace	56
Shrnutí	59
Literatura	61
Přílohy	70

Úvod

Josefův Důl je hluboká dimiktická nádrž, která leží ve vrcholové partii Jizerských hor. Tato oblast byla ve druhé polovině minulého století významně zasažena antropogenní acidifikací. Citlivost tohoto území vůči acidifikaci je způsobena několika faktory. Hlavní podíl nese nízká pufrací schopnost geologického podloží a půd, kde převažují žuly a mělké podzoly. Také se na ní ale podílel rozvoj průmyslu, kvůli kterému byly do konce 19. století na náhorní plošině vykáceny původní smíšené lesy a nahrazeny smrkovými monokulturami, mnohem méně odolnými vůči kyselé atmosférické depozici. Tato změna výrazně negativně pozměnila i retenční schopnost lesa a vodní režim toků na velké části území hor, což se projevovalo silným kolísáním hladin řek. Proto začala být začátkem 20. století v této oblasti, která odnepaměti trpěla ničivými povodněmi, budována soustava přehrad. K nim později (1982) jako nejmladší a největší přibyla Josefodolská nádrž, významný zdroj pitné vody pro Liberec a jeho okolí (Karpaš a kol., 2009).

Acidifikace půd a povrchových vod dosáhla ve střední Evropě svého maxima v 80. letech 20. století. Ve vodách způsobila velký pokles pH, vodivosti a alkality. Zároveň významně vzrostly koncentrace síranů a dusičnanů ve vodě a zvýšil se podíl toxické frakce některých kovů. V Jizerských horách kyselá zátěž vyvrcholila jak masivním odumíráním smrkových lesů, tak úhynem organismů v půdě a vodě. Potoky i nádrže byly už od poloviny 40. let minulého století zcela bez ryb (Křeček a Hořická, 2001). Výrazný pokles produkce emisí oxidů dusíku a síry do ovzduší na začátku 90. let a především velkoplošné smýcení smrkových lesů v povodích ve druhé polovině 80. let, tedy prudké snížení vylučování suché atmosférické depozice jehličnany, se však rychle odrazily na zlepšení chemického složení vod a následně také na jejich oživení. Během 90. let zvýšení pH vody umožnilo úspěšnou reintrodukcí sivena amerického (*Salvelinus fontinalis*), který dnes tvoří v Josefově Dole stabilní populaci. Přesto je proces zotavování z acidifikace v Jizerských horách složitý. Jak uvádějí Hořická a kol. (2013b), zotavení živé složky vodních ekosystémů je za změnami chemizmu výrazně opožděno a do značné míry ovlivněno vysazením lososovitých ryb.

Nádrž Josefův Důl byla už od svého napuštění silně kyselá. Její vývoj (z hlediska chemismu, fytoplanktonu a zooplanktonu) byl monitorován týmem Z. Hořické a pracovníky Povodí Labe od r. 1992. Vzhledem k dystrofnímu charakteru nádrže a její silné acidifikaci zde až do konce 90. let dominovaly acidotolerantní a rašelinné druhy. Procházková a kol. (2013) zjistily, že objemová biomasa fytoplanktonu se do roku 2012 neměnila. Původně velmi nízký počet druhů vzrostl, ale převládaly v něm stále organismy hojně v období silné acidifikace (obrněnky). Od roku 2005 však dochází k masovému šíření sinic druhu *Merismopedia tenuissima*, které způsobují velké technologické problémy na úpravně vody v Bedřichově.

Také druhové spektrum vířníků a korýšů a jejich zastoupení v planktonu, původně extrémně chudé, je nyní bohatší a stále se mění. Vývoj zooplanktonu v nádrži je v současné době pokročilého zotavení z acidifikace vedle fyzikálně-chemických parametrů prostředí především ovlivněn vzájemnými vztahy mezi organismy (Bímová 2013, Hořická a kol. 2013a, 2013b). Vedle dlouhodobého vývoje druhového složení a početnosti zooplanktonu v letním a podzimním období ale nebylo známo nic o jeho sezónní sukcesi a vertikální distribuci. Otázky výskytu planktonních filtrátorů v čase a prostoru vyvstaly zejména v souvislosti s prudkým nástupem sinic r. *Merismopedia* v nádrži a s jejich dominancí ve fytoplanktonu celého vodního sloupce v některých částech roku.

Cílem diplomové práce je studium kvalitativního a kvantitativního složení korýšů v profilu nádrže v průběhu roku 2014, včetně struktury populací dominantních druhů, a studium diurnálních vertikálních migrací korýšů v letním období v souvislosti s fyzikálně-chemickými parametry a vývojem fytoplanktonu. Dále bylo součástí práce ověření, zda se v nádrži vyskytují vedle ryb také bezobratlí predátoři, a doplnění dlouhodobé řady dat o vývoji korýšů v nádrži v období 1992-2012 (Bímová, 2013) o výsledky z let 2013 a 2014.

Literární přehled

Jizerské hory

Jizerské hory tvoří souvislé pásmo pohoří na severu Čech. Zaujímají rozlohu asi 620 km². Z celkové plochy rozlohy se rozprostírá 417 km² v České republice a zbylá část v sousedním Polsku. Nadmořská výška na českém území sahá od 325 m n. m. u Raspenavy až po nejvyšší horu Smrk (1124 m n. m.). Na polském území je nejvyšším bodem Wysoka Kopa (1126 m n. m.), jenž je jedním z celkem 28 tisícových vrcholů Jizerských hor. Střední výška tohoto pohoří činí 696 m n. m. (Balatka, 2009).

Jizerské hory patří do Krkonošsko-jesenické soustavy a jsou tvořeny částí Krkonošsko-jizerského krystalinika. To má půdorys připomínající osmičku dlouhou asi 70 km se zúžením na cca 8 km v oblasti Harrachova.

Hlavní horninou jsou žuly, které se dostaly na povrch po obnažení prvohorních plutonů. Většinou se jedná o porfyrickou středně zrnitou až hrubozrnnou biotickou žulu známou jako liberecká žula a o takzvanou fojtskou žulu – amfibolický granodiorit (Komínský a kol., 2003).

Ze dvou žulových těles je starší Lužický pluton, který do hor zasahuje svou rumburskou žulou. Nejvíce proměněné horniny jsou zde ortoruly, které tvoří Vysoký jizerský hřeben a horu Smrk. Druhý pluton, krkonošsko-jizerský, táhnoucí se od Chrastavy po Sněžku, utuhnul v karbonu a jeho žuly tvoří většinu jizerskohorských skalních útvarů. Horotvorné procesy zde probíhaly v několika etapách, od asyntského vrásnění na konci prekambria, přes kaledonské vrásnění až po vrásnění hercynské. K výraznému vyzdvižení došlo ve třetihorách při saxonských tektonických pohybech, kdy vznikly strmé severní svahy hor. Na těchto severních svazích a náhorní plošině jsou patrné vlivy mrazového zvětrávání, jež dalo vzniknout skaliskům a balvanovým mořím.

Žulový pluton na několika místech prostupují výlevné vyvěřeliny jako je třetihorní Bukovec (1005 m n. m.). Na okrajích plutonu jsou zastoupeny přeměněné horniny. Masiv Smrku je tvořen krystalickými břidlicemi a staršími žulami. Na Vápenném vrchu u Raspenavy se nacházejí krystalické vápence. Úbočí a údolní polohy jsou

místa překryta čtvrtohorními sedimenty, ve vyšších polohách vrstvami rašeliny (AOPK ČR; Chaloupský, 1989; Mackovčín a kol., 2002).

Krkonoško-jizerský masiv je vystaven intenzivnímu zvětvování a odnosu již 250 milionů let. Čtvrtohorní zalednění se Jizerských hor dotklo jen lehce, protože ledovec se zastavil na severním úpatí hor. Pro reliéf hor jsou charakteristické ploché kupy, plošiny, zaoblené hřbety a široká údolí, na okrajích jsou příkré svahy s mladými údolními vzniklými erozí. Typická jsou ve vyšších polohách jizerskohorská rašeliniště, která dnes pomalu z vrchovišť mizí v důsledku odlesnění a změny hydrologického režimu. Ve středu Jizerských hor převládají kambizemní podzoly, které jsou často zrašelinělé. Typické podzoly nalezneme až ve vrcholových partiích hor v nadmořské výšce nad 1000 m. Na vrchovištích se vyskytují organozemě a organozemní gleje. Severní skalnaté svahy jsou pokryty litozemí a rankery (oblast Bukovce je výjimkou). V nižších polohách z hlediska zrnitosti převažují zrnitofílové a jílovohlinité půdy, které ve vyšších polohách přecházejí v lehké půdy s vyšším podílem šterku. Vždy se jedná o půdy chudé, kyselé s hodnotami pH 3,5 – 5,5. (AOPK ČR; Balatka, 2009)

V roce 1968 v této zajímavé oblasti plně kontrastů, kde se na jedné straně nacházejí velké plochy imisních holin a poškozených lesů a na druhé straně zachovalé komplexy bučin a unikátní rašeliniště byla vyhlášena Chráněná krajinná oblast Jizerské hory s celkovou výměrou 368 km².

Jizerské hory jsou pramennou oblastí řeky Jizery, podle které nese celé pohoří název. Dále zde pramení řeka Lužická Nisa, Smědá a polské řeky Kwisa a Bobra. Prochází tudy evropské rozvodí mezi Baltickým a Severním mořem. Hory jsou protkány hustou říční sítí s velkými přírodními zdroji povrchové vody, o čemž svědčí i vysoký specifický odtok z území (20-35 l·s⁻¹·km⁻²). Jednotlivé průtoky ve vodních tocích jsou velmi rozkolísané a významně reagují na momentální srážkovou situaci. Území má značný význam pro zásobování liberecko-jablonecké aglomerace pitnou vodou. Proto byla v roce 1978 CHKO Jizerské hory prohlášena za Chráněnou oblast přirozené akumulace vod (AOPK ČR; Mackovčín a kol., 2002; Plán péče CHKO Jizerské hory).

Průměrné roční teploty ve vrcholových partiích jsou 3 až 4 °C, což souvisí se sněhovou pokrývkou, která se zde drží 140 – 165 dní v roce a průměru dosahuje

mocnosti 120 cm. Podnebí je velmi vlhké, úhrn ročních srážek dosahuje 1400 až 1600 mm (Březina a kol., 1997; Pelc, 1999; Křeček a Hořická, 2001).

Pro vodní režim oblasti mají zásadní význam rozlehlé lesní komplexy, které byly donedávna pro Jizerské hory typické, a spolu s nimi také rašeliniště. Původní bukojedlové hvozdy začaly být již v dávné minulosti osídlovány a hospodářsky využívány pro hojnost dřeva. Od pozdního středověku je tato oblast známá výrobou skla. Zdejší buky a břízy byly páleny pro získání potaše. Ze smrků a jedlí se vyrábělo dřevěné uhlí, kterým se vytápěly sklářské pece.

Od 19. století se smýcené plochy zalesňovaly rychle rostoucími nepůvodními smrký. Původní lesní porosty se zachovaly pouze na strmých severních svazích hor. Toto vykácení původních lesů mělo dalekosáhlé následky ve změně vodního režimu (Pelc, 1999; Křeček a Hořická, 2001). Došlo k významnému poklesu retenční schopnosti půdy, tudíž hladiny vodních toků v této deštivé oblasti začaly silně kolísat. To bylo důvodem, proč se v oblasti Jizerských hor někdy projevoval nedostatek vody a jindy se vyskytovaly povodně. Vše vyvrcholilo katastrofickou záplavou v roce 1897, po které bylo ustanoveno „Vodní družstvo k regulování říčních toků a ke stavbě přehrad v povodí Zhořelecké Nisy“. Ke konzultacím byl jako odborník přizván profesor Otto Intze z Cách, který rozhodl o postavení šesti přehrad. V letech 1903 – 1911 byly vybudovány přehrady s tzv. hrází intenzivního typu (hrází zděnou kamennými bloky do oblouku proti tlaku vody). Harcov a Bedřichov na Černé Nise, Mlýnice, Fojtka a Mšeno. Od stavby šesté přehrady na Jeřici se upustilo. Vybudované přehrady slouží jako retenční vodohospodářský systém pro kontrolu povodí (Nevrlý, 1961). Dále byly v letech 1911 – 1915 vybudovány další dvě přehrady sypaného typu: Souš na Černé Desné a s ní štolou propojená přehrada na Bílé Desné. 10 měsíců po kolaudaci přehrady na Bílé Desné, dne 18. 9. 1916, došlo k tragickému protržení hráze. Voda způsobila velké ztráty na majetku a lidských životech. Nádrž Souš dodnes slouží jako zdroj surové vody pro vodárenské účely, zásobuje pitnou vodou Tanvald a Jablonec. Za stejným účelem byla později vybudována také největší jizerskohorská vodní nádrž Josefův Důl na řece Kamenici, která byla dokončena v roce 1982.

Přehrada Josefův Důl

Řeka Kamenice je největším pravostranným přítokem Jizery (plocha povodí 20 km², průměrný dlouhodobý roční průtok 0,76 m³·s⁻¹), který odvádí vodu ze zalesněné centrální oblasti hor. Na této říčce roku 1906 navrhl Ing. Wilhelm Plenkner výstavbu dvou navzájem spolupracujících nádrží. Ty měly sloužit k zadržování velkých vod v údolní nádrži na Blatném potoce, do které by se část povodňových průtoků z Kamenice převáděla štolou od Kristiánova. Tento stavební záměr se ale tehdejšímu Vodnímu družstvu z Dolního Polubného nepodařilo uskutečnit (www.pla.cz).

V šedesátých letech 20. století se začal projevovat nedostatek pitné vody v aglomeraci Liberecka a Jablonecka, a vyplynula tedy potřeba získání nových perspektivních zdrojů surové vody. Proto byla vypracována nová koncepce zásobování Liberecka vodou, která se opírala o výstavbu nádrže na Kamenici.

Na vybudování nového vodního díla byla vybrána lokalita nad Josefovým Dolem pod soutokem Kamenice a Hlubokého potoka, kde pro zadržení potřebného množství vody bylo potřeba vystavět dvě přehradní tělesa: hlavní hráz přes údolí řeky Kamenice a boční hráz přes levostranné úžlabí. Projekt tohoto vodního díla zpracoval Hydroprojekt Praha a stavební práce proběhly v letech 1976 – 1982 (Broža a kol., 2005).

Přímé zemní těleso hlavní hráze je nasypáno z místních materiálů vytěžených z prostoru nádrže, což jsou zejména zahliněné hrubozrnné písky zvětralé místní žuly. Podloží bylo v údolní nivě u návodní paty utěsněno železobetonovou podzemní stěnou sahající do hloubky 20 m a dále injekční clonou do hloubky až 35 m. Na vrch stěny je v návodní patě nasazena 419 metrů dlouhá injekční štola, ze které je možné provádět kontrolu těsnících prvků. Návodní těsnění hráze je unikátní, tvoří ho asfaltobetonový dvouvrstvý plášť o tloušťce 10 a 8 cm. Hráz je silná 7,5 m v koruně a 200 metrů v patě. Na výšku měří 44 metrů a její celková délka je 360 metrů. Kvóta koruny hráze je 735 m n. m.

Boční hráz je sypaná stejně jako hráz hlavní a je vystavěna v levostranném terénním sedle. Podloží má u návodní paty utěsněno betonovou klínovou ostruhou sahající do hloubky až 5 m a injekční clonou do hloubky až 25 m. Na ostruhu přímo

navazuje návodní těsnění hráze, tvořené asfaltobetonovým dvouvrstvým pláštěm stejně jako na hlavní hrázi. Na výšku měří pouze 15 m, ale délkou a šířkou v koruně je srovnatelná s hlavní hrází (www.pla.cz).

Přehrada Josefův Důl leží na říčním kilometru 30,2 řeky Kamenice a asi 2 km od obce Josefův Důl. Celkový objem nádrže je 22,3 mil. m³, což odpovídá při maximální výšce hladiny zaplavené ploše 140 ha. Doba zdržení vody v nádrži je 464 dní. Přehrada byla napuštěna v roce 1982. Dnes slouží jako zdroj akumulace vody pro vodárenské účely (v množství 502 l·s⁻¹). Surová voda je odtud vedena štolou do Bedřichovské úpravny vody, která zásobuje Liberec (Rous a kol., 2009). Dále plní funkci retenční ochranné nádrže před povodněmi a naopak nadlepšuje stav vody při nízkých průtocích, nebo při havarijním znečištění vody v toku pod hrází. K energetickým účelům se využívá potenciálu vody vypouštěné z nádrže. Na odbočce z levé spodní výpusti byla v roce 1990 instalována malá vodní elektrárna se dvěma turbínami Bánkiho typu o výkonu 2 × 55 kWh.

Nejmladší z jizerskohorských přehrad, Josefodolská, je se svými třemi zátokami zároveň největší (objemem i plochou), nejhlubší ($z_{\max} = 35$ m) a nejkyselější. Jedná se o dimiktickou nádrž s letní a zimní teplotní stratifikací. Během letní stratifikace se epilimnion ostře vyděluje od chladného hypolimnia. Důvodem je značná hloubka nádrže a silné proudění větru v odlesněné části hor. Termoklina nádrže je obvykle v hloubce kolem 8 m. Vertikální distribuce rozpuštěného kyslíku v přehradě je klinográdního typu. Nádrž je již od svého napuštění přirozeně silně kyselá. Typický dystrofní charakter nádrže je způsoben přísunem huminových kyselin z povodí (Stuchlík a kol., 1997). To vedlo k tomu, že se v nádrži vždy vyskytovaly pouze acidofilní druhy planktonu. Průhlednost nádrže měřená Secchiho deskou se z původních 3 – 5 m na začátku 90. let v posledních letech snížila v létě v průměru na 1,5 – 3 m (Z. Hořická, nepublikované údaje).

V současné době v nádrži probíhá složitá chemická a biologická zotavování z antropogenní acidifikace. S pokročilým zotavením, zhruba od roku 2000, se začíná zvyšovat jak počet druhů zooplanktonu, tak jejich početnosti (Bímová, 2013), i když je oživení nádrže stále chudé. Vliv na zooplankton nemá

pouze příznivá změna chemismu, ale také vysazení lososovitých ryb – sivena amerického (1998), v současné době jistě také posun klimatu.

Ústup acidifikace souvisí s občasným přemnožením některých organismů. Z hlediska úpravy surové vody na pitnou se dříve jednalo o obrněnky a později rozsivky, v posledních letech jsou to sinice rodu *Merismopedia* (Hořická a kol, 2013a).

Tab. 1. Základní morfometrické parametry nádrže Josefův Důl.

Převzato z www.pla.cz

řeka	Kamenice
rok napuštění	1982
plocha	140 ha
plocha povodí	20,02 km ²
objem	22,6 mil. m ³
max. hloubka	35 m
doba zdržení	464 dní
odběr vody pro úpravnu	502 l·s ⁻¹
délka hlavní hráze	360 m
délka boční hráze	360 m
výška koruny hlavní hráze	44 m
výška koruny boční hráze	15 m
maximální výška hladiny	733,2 m n. m.
průměrný dlouhodobý roční průtok	0,762 m ³ ·s ⁻¹

Acidifikace

Acidifikace je proces, který vede k okyselování ekosystémů. Přírozená acidifikace probíhá v přírodě řadou procesů, jako jsou například mikrobiální pochody, lesní požáry nebo sopečná činnost. Oxidy síry se dostávají do ekosystémů oxidací sulfanu, který se tvoří rozkladem odumřelé biomasy v půdách a sedimentech. V povrchových vodách jsou přirozeným zdrojem fulvokyselin a huminových kyselin rašeliniště (Hořická, 2005). Oxidy dusíku se přirozeně tvoří jako produkty mikrobiálních pochodů v půdách, vznikají také při lesních požárech a elektrických výbojích v atmosféře. Tato přirozená acidifikace je však proces velmi pozvolný, se kterým se většina organismů vypořádá.

Ve 20. století s rostoucím průmyslem tuto přirozenou acidifikaci překryla acidifikace antropogenní. Antropogenní acidifikace je spojena především s průmyslovými emisemi SO_2 a NO_x . Oxidy dusíku a síry reagují fotochemicky v atmosféře s vodou za vzniku silných kyselin. Tyto kyseliny snižují pH srážkové vody a šíří se na velké vzdálenosti od míst, kde byly oxidy do ovzduší vypuštěny (Hruška a Majer, 1996).

O antropogenní acidifikaci se lidé začali zajímat až po uveřejnění článku švédského vědce S. Odéna ve stockholmském deníku Dagens Nyheter v roce 1967, který oznámil, že déšť je kyselý v důsledku lidské činnosti. Také ukázal na fakt, že z mnohých severských jezer vymizely ryby právě kvůli kyselým dešťům. Ve Švédsku se ale prakticky nespalovalo uhlí a emise z domácností byly také minimální. Šokujícím zjištěním bylo, že se jedná o kyselou dešť přenesenou až z Velké Británie, Polska a Německa (Menz a Seip, 2004; Hruška a Kopáček, 2005).

SO_2

Jako Černý trojúhelník byla od šedesátých let 20. století nazývána oblast na pomezí Polska, bývalého Československa a NDR. Zde se v průmyslu v obrovských kvantech spalovala fosilní paliva, především sirnaté hnědé uhlí. Kvůli nejvyšším emisním hodnotám oxidu siřičitého na celém světě bylo označení černý trojúhelník velmi výstižné. Maximálních hodnot celosvětových emisí SO_2 bylo dosaženo v 80. letech 20. století, kdy bylo do ovzduší vypuštěno 80 mil. $\text{t}\cdot\text{rok}^{-1}$ (v Evropě 60 mil. $\text{t}\cdot\text{rok}^{-1}$). Z toho pouze Československo produkovalo 1,5 milionu tuny ročně (Hruška a Kopáček, 2005). Doba setrvání SO_2 v atmosféře je i několik dní,

přičemž průměrná transportní vzdálenost se pohybuje ve stovkách kilometrů za den. Z tohoto důvodu mohou průmyslová centra ovlivňovat kvalitu srážek i ve vzdálených oblastech.

NO_x

Největšími antropogenními zdroji oxidů dusíku jsou stejně jako u síry spalovací procesy, přičemž se nejedná o dusík obsažený v palivu, ale o atmosférický dusík, který je oxidován při vysokých teplotách. Významnou složku znečištění činí mobilní zdroje: automobilová doprava, která má rostoucí tendenci, se dnes podílí na emisích NO_x 60 % (Hruška a Kopáček, 2005).

Vertikální mokrá depozice vypadává z atmosféry v podobě kyselých dešťů, krup či sněhu. Horizontální mokrou depozici tvoří rosa, mlha, námraza, a jinovatka. Na zemský povrch nepadá pouze kyselina sírová a dusičná, ale především jejich soli. Nejvýznamnější jsou sírany a dusitany amonné. Atmosférický amoniak na sebe váže ion H⁺ a mění se na NH₄⁺. Přítomnost amonného iontu v atmosféře významně snižuje pH srážek. Jako kyselé srážky označujeme dešťovou či sněhovou vodu, jejíž pH je nižší než 5,6 – tedy nižší než pH destilované vody, ve které je oxid uhličitý v rovnováze s atmosférickým CO₂ (Hořická, 2005). Na ekosystémy má velký vliv množství a rychlost tání sněhu, tedy čas, během kterého se uvolní velké množství depozice nashromážděné za celou zimu.

Suchá depozice v podobě plynu a aerosolu se zachytává na vegetaci téměř nepřetržitě. Následně je deštěm spláchnuta do půdy jako podkorunová depozice (Mauer a kol., 2010). V České republice tvoří z celkové suché depozice 50-70 % depozice síry a 10-50 % depozice dusíku. Suchá depozice se významně podílí na okyselování prostředí zalesněných oblastí, obzvláště ve smrkových lesích, které vychytávají trojnásobné množství (65 kg·ha⁻¹·rok⁻¹) depozice síry než lesy bukové (Krušné hory, 90. léta 20. století – Hruška a Kopáček, 2005).

Depozice síry a dusíku, které dopadnou na zemský povrch, působí na půdu. Půda je schopna eliminovat přísun kyselých částic pomocí pufru tak, že zprvu po nějakou dobu nedochází k výrazným změnám a proces acidifikace není viditelný. Pufry tvoří bazické kationty Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺. Právě množství těchto kationtů udává schopnost půdy odolávat kyselým depozicím. Ve smrkových lesích je tato

antropogenní acidifikace umocněna rozkladem kyselého jehličnatého opadu. Právě horské oblasti jsou typické svými smrkovými lesy a v kombinaci s mělkými půdami a vysokým úhrnem srážek tvoří velmi citlivý systém. Odolnost je dána mocností a také typem (původem) půdy. Bazické kationty se tvoří a doplňují zvětráváním podložní horniny. Pomalu zvětrávané horniny, jako je například žula, rula a svor, tvoří geologické podloží citlivé vůči acidifikaci, na kterém vznikají mělké, přirozeně kyselé, nedostatečně pufované půdy. Po vyčerpání jejich bazických kationtů klesá pH půdního roztoku a z půdy se vyluhuje toxický hliník (hydratovaný ion $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$) spolu s dalšími kovy. Tato toxická forma se nejvíce uplatňuje při poklesu hodnot pH pod 4,5. Toxicita vede k vyhubení půdního edafonu, který napomáhá zvětrávání hornin (Rosseland a kol., 1990; Hruška a Cienciala, 2002; Borůvka a kol., 2004; Hořická, 2005) ..

Voda

Povodí a děje v nich probíhající jsou úzce spjaty s vodními toky a nádržemi. Kyselé deště vedou k okyselení půd i povrchových vod. Dokud půdy mohou neutralizovat kyselé vstupy snižováním bazických kationtů v půdním iontově výměnném komplexu, neklesá pH podzemní ani povrchové vody. Protože ve střední Evropě jsou půdy mocné se značnou pufrací kapacitou, nedošlo u nás k rychlému okyselení povrchových vod jako ve Skandinávii (Hořická, 2005; Hruška a Kopáček, 2005).

Odolnost povrchových vod vůči poklesu pH určuje alkalita (kyselé neutralizační kapacita – KNK). Tu díky protolytickému uhličitanovému systému zastupuje především koncentrace hydrogenuhličitanů. Hodnota alkality nás u přírodních vod informuje o množství rozpuštěného vápníku a hořčíku. Pufr netvoří pouze uhličitanový systém, ale je doplněn ionty rozpuštěnými ve vodě – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . Podílejí se na iontové výměně s volnými H^+ ionty. Tyto bazické kationty se do vody dostávají z vegetace a z podloží procesem jeho zvětrávání. Po vyčerpání uhličitanového pufracího systému vody rychle klesá pH až na hodnoty kolem 4,5. Při této hodnotě pH je voda proti další acidifikaci poměrně stabilizována pufracími systémy hliníku a humínových látek. Na okyselení má také velký vliv, zda se jedná o stojatou či tekoucí vodu a jaký je její průtočný objem. Nejvíce citlivá vůči

acidifikací jsou malá mělká jezera nacházející se na málo pufrovaném podloží žul, rul, či svorů (Laws, 1993; Kopáček, 1997; Hořická, 2005).

Jizerské hory tato „kyselá katastrofa“ neminula. Svou polohou mezi českými a polskými uhelnými pánvemi se nacházely v samém středu silného znečištění. Mělké půdy a nepůvodní skladba lesa, která byla nahrazena smrkovou monokulturou, byla acidifikace této oblasti umožněna již začátkem 20. století. Už v roce 1909 masově vyhnuli pstruzi v Bedřichovské nádrži na Černé Nise (napuštěna 1905) (Hořická a kol., 2013b). S rozvíjejícím se průmyslem se po druhé světové válce začal projevovat vliv emisí silněji. V Černé Nise postupně klesalo pH vody až na hodnoty 5,5 – 5,0. V nádržích Bedřichov a Souš během 50. let vyhnuli i acidotolerantní siveni američtí, kteří nahradili původní pstruhy. Až do 90. let 20. století zůstaly nádrže a potoky bez ryb (Hruška a Kopáček, 2005; Hořická a kol., 2013a).

Acidifikace je proces dlouhodobý a kumulativní, který se dynamicky vyvíjí. Teprve po určité době se projeví příznaky procesů, které již dlouho skrytě probíhají. Z tohoto důvodu je nutné zabývat se i minulostí acidifikovaných ekosystémů (Hruška a kol., 2006). V roce 1992 byla provedena analýza historických dat o chemismu a oživení nádrží, z které vyplynulo, že v přirozeně kyselých humínových vodách v 50. letech převládl podíl antropogenní acidifikace (Stuchlík a kol., 1997). Koncentrace síry a dusíku v depozicích rostla natolik, že v 80. letech ve vrcholových částech hor došlo k masivnímu úhynu smrkového lesa. Po odtěžení zbylých porostů přestala být suchá depozice vychytávána jehlicemi stromů. Snížení přísunu síry do půdy v povodí mělo zásadní význam ke zlepšení situace. Ve vodách klesaly koncentrace síranů a dusičnanů a docházelo k postupnému zvyšování pH. Toto chemické zotavování se projevovalo od počátku 90. let, kdy velmi pomalu začalo docházet i k oživování. Ačkoliv jsou Jizerské hory chráněnou krajinnou oblastí a významnou pramennou oblastí, management pro jejich ochranu před acidifikací nebyl podniknut do roku 1990. I přesto, že se rostoucím pH v nádržích roste koncentrace limitujícího fosforu (Kopáček a kol. 2015), zotavování již nikdy nedosáhne stavu před acidifikací a prostředí bude tedy vždy kyselejší. To je způsobeno nenávratně vymytými důležitými neutralizačními prvky z půdy (Křeček a Hořická, 2001; Hruška a kol., 2006; Hruška a kol., 2009).

Filtrující zooplankton a sinice

Jednou z lokalit na různých místech světa, kde dnes po ústupu acidifikace ve fytoplanktonu dominují sinice r. *Merismopedia*, je švédské jezero Njupfatet. Hlavní složku jeho zooplanktonu tvoří vznášivky *Eudiatomus gracilis* (Blomqvist 2001). Příběh tohoto jezera se odvíjí od neúspěšného rozmnožování ryb v důsledku kyselosti a toxicity vody a namnožení bezobratlých predátorů (Stensson et al., 1993). Změna dominantního predátora vedla ke změnám ve struktuře zooplanktonu: nejvíce ovlivnila velké druhy zooplanktonu, které už nebyly ohrožovány vizuálně se orientujícími rybami. Jejich namnožení způsobilo větší tlak na fytoplankton, který tak také musel projít změnou své struktury. Více se v něm uplatnily malé jednobuněčné druhy nebo druhy tvořící kolonie. Některé druhy jsou pro zooplankton hůře stravitelné a i mezi nimi se vyskytují druhy, které jsou pozřeny, ale svou silnou buněčnou stěnou nebo želatinovou schránkou jsou chráněny proti natrávení ve střevě filtrátorů. Představují tedy nutričně méně výhodnou potravu. Velké kolonie, jaké tvoří sinice rodu *Aphanizomenon*, *Anabaena* a *Microcystis*, zooplankton nefiltruje, ale při samotné filtraci mu nevadí. Větší problémy dělají malé kolonie, které mechanicky zpomalují filtraci a tím i celý proces přijímání potravy, což následně snižuje růst a rozmnožování (Lampert, 1987). Snížení počtu druhů vede ke změně stechiometrie látek v prostředí a k vyšším nárokům na stejné živiny. Po jarním míchání vody v jezeře se dusík uvolní ve formě amoniaku, který je rychle spotřebován. To otevírá prostor pro uplatnění sinic nefixujících dusík, jako je *Merismopedia* (Blomqvist et al., 1989).

Lampert(1987) uvádí asimilační efektivitu některých perlooček pro vybrané druhy sinic:

<i>Anabaena flos-aquae</i>	<i>Daphnia pulex</i>	100 %
<i>Merismopedia</i> sp.	<i>Daphnia pulex</i>	85,3 %
<i>Microcystis</i> sp.	<i>Daphnia longispina</i>	17,9 %

Perloočky filtrují potravu pěti páry hrudních končetin, z nichž každý má jinou stavbu. První dva páry slouží jako čistící brvy, které zatlačují potravu do břišní rýhy. Třetí a čtvrtý pár nohou je osazen filtračními hřebínky, pátý pár uzavírá hrudní prostor. Při příjmu potravy jsou perloočky velmi omezeny jejichmi rozměry. Velikost těla perloočky koreluje s velikostí přijaté potravy. Pozřené částice se velikostně pohybují mezi 0,2 a 20 μm (Sterner a Hessen, 1994).

Na druhou stranu je morfologie filtračních hřebínků perlooček nesmírně adaptabilní. Na změnu filtračního aparátu nemá tolik vliv růst těla jako množství a kvalita potravy v prostředí (Koza, Kořínek 1985). Pokud je potravy ve vodě málo, filtrační hřebínek se zvětší a zhoustne, zvýší se tak i rychlost filtrace. Jestliže je tomu naopak a ve vodě se nachází dostatek potravy, filtrační aparát prořídne, aby nedocházelo k jeho zbytečnému zanášení (Brendelberger, 1991; Lampert a Brendelberger, 1996).

Perloočky *Ceriodaphnia quadrangula* a *Chydorus sphaericus* mají velmi hustý a účinný filtrační hřebínek (oka velikosti 0,2-0,6 μm), se kterým mohou filtrovat i bakterie. Na rozdíl od nich má druh *Bosmina coregoni* hřebínek řidší a bakterie filtruje velmi špatně. Druh *Holopedium gibberum* má velmi hrubé hřebínky na všech pěti párech končetin (Geller a Müller, 1981). Díky větším okům ve filtračním sítu jsou kopepoditová stádia vznášivek a perloočky rodů *Bosmina* a *Holopedium* méně ovlivněna mechanickou disturbancí než ostatní filtrující zooplankton (Lampert, 1987). Vznášivky si obstarávají potravu pomocí dvou vírů, které vytvářejí kolem těla končetinami. Antény současně používají k pohybu a zpomalení padání ve vodním sloupci.

Nutriční hodnota stejně jako množství potravy se ve vodním prostředí mění a zooplankton se s tím vyrovnává různými způsoby. Při nedostatku určitých látek v potravě se zooplankton zbavuje živin, kterých je v prostředí dostatek, a limitující živiny zadržuje v těle. Zároveň omezuje příjem potravy, čímž se zvýší doba zdržení ve střevě. To umožní vstřebání limitující prvků. Velké množství nekvalitní potravy v prostředí má za následek zvýšení rychlosti žíru a příjem většího množství fytoplanktonu do střeva. Takto není omezen růst těla a předejde se nedostatku limitujících prvků. Při příjmu potravy s velkým poměrem C:P si perloočky ukládají

uhlík v těle v podobě tukových kapének. Ty využijí později k metabolickým procesům ve stresových situacích, při rozmnožování nebo je vloží do svých vajíček ve snůšce (Sterner a Hessen, 1994).

Struktura korýšů Josefova Dolu

Skladba planktonu této nádrže je jednoduchá, žije v ní jen omezené množství druhů. V létě 1992 se v nádrži podle Stuchlíka a kol. (1997) nejvíce ze zooplanktonních korýšů vyskytoval druh *Ceriodaphnia quadrangula*. To potvrdila i Bímová (2013), která pro období 1992 - 2012 uvedla jako dominantní druhy zooplanktonu perloočky *Ceriodaphnia quadrangula*, *Bosmina longirostris*, *Holopedium gibberum*, *Chydorus sphaericus*, buchanku *Cyclops strenuus* a vznášivku *Eudiaptomus gracilis*.

Fytoplankton je tvořen především obrněnkami (*Dinophyceae*)(63-99 %), běžné jsou rody *Peridinium* a *Gymnodinium*, dále zlativky (*Chrysophyceae*) (2-16%) a skrytěnky (*Cryptophyceae*) (2-16 %) (Stuchlík a kol., 1997). Na podzim se situace mění. Ve fytoplanktonu převládají zlativky s menším zastoupením tříd *Cryptophyceae* a *Dinophyceae*. Od roku 1997 byl v nádrži pozorován nástup sinice *Merismopedia tenuissima*. Tato pikosinice tvoří v posledních letech významný podíl ve složení fytoplanktonu, a to po celou sezónu (Procházková a kol., 2013).

Diurnální vertikální migrace

Diurnální vertikální migrace (DVM) představují biomasou největší migrace živočichů na světě (Hays, 2003). Limnologové už přes sto let pozorují fenomén, kdy se zooplankton za rozbřesku noří do hloubky, kde přečkává den, aby za soumraku opět mohl stoupat k hladině. I velmi malé planktonní organismy urazí kvůli potravě denně desítky až stovky metrů (Hays, 2003).

V podvečer nastává v mořích a jezerech fáze, kdy zooplankton začne pomalu stoupat vzhůru. Pohyb se zrychlí se západem slunce a do dvou hodin po západu slunce ustane. V tuto chvíli už bývá většina zooplanktonu v epilimniu plném fytoplanktonu, kde se herbivorní zooplankton živí filtrací. Ještě před východem slunce se začnou planktonní organismy opět zanořovat do hloubky, nejdříve zvolna a

pak rychleji. Migrace končí s východem slunce opět dole ve studeném hypolimniu (Ringelberg, 1999).

Diurnální vertikální migrace je strategie organismů, které plavou vertikálně ve vodním sloupci v denních cyklech.

Tento fenomén motivoval vědce ve snaze porozumět mechanismu tohoto jevu. Vystavalo hned několik otázek. Proč tyto organismy přes den hladoví v tmavých studených vrstvách vody? Jak to, že najednou začnou populace migrovat? Jaká vnější síla je k tomu nutí? Co spouští migrační pochody? Jaké jsou proximální a ultimální faktory, které tyto migrace podmiňují? Proximální faktory odpovídají na otázku, jak zvířata migrují, jaké fyziologické a behaviorální mechanismy mají k dispozici a co je spouštěčem mechanismů běžné DVM. Ultimální aspekty mají odpovědět na to, proč migrace nastane, jaké jsou podněty z vnějšího prostředí, jaký adaptivní význam lze tomuto jevu přičíst a jaké jsou jeho výhody a ztráty.

Dnes se ekologové přiklánějí k tvrzení, že na otázku, proč dochází k DVM, nelze najít jednoznačnou odpověď. Sestupuje zooplankton přes den do hloubky kvůli škodlivému UV záření, jak se domnívali Leech a Williamson (2001)? To by nevysvětlovalo řadu dalších věcí. Třeba to, že UV-B záření proniká do hloubky několika metrů pod hladinou, ale plankton se zanořuje několikanásobně hlouběji. Uvádí se, že amplituda migrace je přímo úměrná průhlednosti vody. Tedy čím hlouběji pronikne světlo, tím níže se musí zooplankton zanořit. Rozsah migrace je ale podstatně větší. Samotná amplituda se liší u jednotlivých druhů. V jezerech migrují jedinci v řádech několika desítek metrů, u mořských druhů dosahuje amplituda několika set metrů (Ringelberg, 1999; Hays, 2003).

Ultimální faktory

Pohyby skrz vodu jsou energeticky náročné, migrace tedy musí přinášet nějaký benefit. Proto byly z hlediska ultimálních faktorů DVM dlouze diskutovány teorie týkající se kompetice. Někteří autoři se domnívali, že se jedná o určitou metabolickou výhodu, kdy organismus přijatou potravu stráví v hlubokých chladných vrstvách vody (McLaren, 1963; Enright, 1977; Geller, 1986). Ukládání tukových zásob a pomalé přírůstky na váze a velikosti ve studeném prostředí dovolí dorůst do větších velikostí. To kromě kompetiční výhody umožní samicím snášet

větší snůšky a lépe odolávat stresu hladovění. Fytoplankton ukládá produkty fotosyntézy k večeru, z čehož vyplývá, že v tuto dobu má vyšší nutriční hodnotu a proto se herbivorní zooplankton pase až večer.

Další teorie ultimátních faktorů se týkaly samotného přežití. Myšlenka o vyhnutí se vizuálně se orientujícím predátorům (rybám) byla velmi dlouho diskutována, ale jako první ji sepsal Zaret a Suffern (1976).

Diskuse o dvou protichůdných teoriích vyřešili svými experimenty až Stich a Lampert (1984), kteří nepochybně vyvrátili teorii metabolické výhody. Předvedli, že DVM je spojená se značnými ztrátami energie v chladných a na potravu chudých vrstvách vody. Čas trávený ve studené vodě je energeticky ztrátový a vyloženě nevýhodný (Lampert a kol., 1988). Ringelberg a van Gool (2003) zjistili, že ve 20 m pod hladinou se délka vývoje vajíček prodlužuje na pětinasobek běžné doby. Tato nevyváženost musí ale přinášet nějaké výhody, na které poukázal až Dodson (1988) svým pokusem s rybími kairomony. Ty byly označeny jako spouštěč DMV (Lampert, 1993).

Kairomony jsou chemické látky vypouštěné organismy do vody. Tyto infochemikálie vypouštějí téměř všechny organismy (savci, ptáci, obojživelníci, ryby i bezobratlí) a mají různou funkci. Rutherford a kol. (2002) je rozdělili do několika kategorií podle toho, k čemu slouží. Kategorie „foraging“ kairomony obsahuje látky, kteří využívají především dravci k lokalizaci potravy. „Enemy-avoidance“ kairomony naopak informují organismy o přítomnosti dravce v nebezpečné vzdálenosti. Výzkum ukázal, že takovéto látky zachytávají jak bezobratlí živočichové, tak i obratlovci. U zooplanktonu tyto látky vyvolávají několik typů reakcí, jednak změnu v chování, kdy se snaží uprchnout před predátorem, ale také fyziologické změny v morfologii těla.

Jedinci s nově narostlými ostny, týlními zuby, ostrými helmami takto snižují risk predace. Mnohé druhy perlooček dokonce mění velikost těla. V prostředí s rybí predací se jedinci dalších generací zmenšují, aby byli méně nápadní a zůstali bez povšimnutí ryb, které je loví pomocí zraku. Ty si vybírají velké jedince – mají vyšší nutriční hodnotu, ale jsou i lépe spatřitelní. Naopak ve vodě s bezobratlými predátory, kteří jsou limitováni ústním otvorem, najdeme populace zooplanktonu,

kteře mají tendenci dorůstat ve většíc jedince (Zaret a Suffern, 1976; Lampert a kol., 1994; Macháček, 2001; Ruther a kol. 2002; Meester, 2009).

Dodson (1988) a Ringelberg (1991) připravili pokus podporující teorii vyhnutí se predátorovi. Do nádrže s konstantní intenzitou osvětlení byly přidány kairomony predátora. Zooplankton reagoval tak, že zaujal nejvzdálenější pozici od těchto látek. Autoři tedy vyvodili, že samotné kairomony DVM nevyvolají.

Dalším důvodem spouštění DVM může být UV-B záření. Siebeck a kol. (1994) tvrdí, že UV-B záření je hlavní a jedinou příčinou migrací. Ve vyšších nadmořských výškách jsou mezotrofní jezera, kde byly pozorovány negativní fototaktické migrace. Vyšší nadmořská výška, tenčí ozonová vrstva a malé množství rozpuštěných látek ve vodě dovolily, aby škodlivé UV-B záření proniklo do vody (až do hloubky 2 metrů) (Ringelberg, 1999) a zatlačilo tak organismy do větších hloubek (Williamson a kol., 2001). Leech a Williamson (2001) takto pozorovali migrace i bez přítomnosti predátora.

Myšlenka ultrafialového záření jako jediné hnací síly je v rozporu s reverzní diurnální migrací RDVM (Brierley, 2014). RDVM se zdá být přesným opakem klasické diurnální migrace, kdy se zooplankton nesnaží schovat v tmavé hloubce, ale naopak vyplave k hladině. K tomuto jevu dojde tehdy, když do klasického vzorce DVM predátor – zooplankton – fytoplankton přidáme další člen: predátor 1. řádu (ryby) – predátor 2. řádu (bezobratlí – hmyz) – zooplankton – fytoplankton. Ryby v tomto případě jako vrcholoví predátoři vytlačí bezobratlé predátory do hloubky a ti zde začnou ve větší míře lovit zooplankton. Zooplankton bude tedy vytlačen do horních vrstev s nižším predáčním tlakem (Ohman a kol., 1983; Neill, 1990; Jensen a kol. 2011).

Proximální analýza

DVM byla vždy úzce spojeny s denními světelnými cykly. Světlo jako proximální faktor nebylo nikdy zpochybněno. Ringelberg (1999) jednoznačně prokázal, že DVM není řízena přímo intenzitou světla, ale relativní změnou osvětlení. Svítání a soumrak jsou tedy obecně brány jako spouštěč každodenní migrace za potravou (Brierley, 2014).

Kde se potrava nachází, rozezná zooplankton spolehlivě. O tom se svými pokusy přesvědčili Larson (1997), Lampert a kol. (2003), a Rinke a Petzold (2008). V nádržích s planktonem, kde byl uměle vytvořený gradient potravy, jedinci zaujímali pro sebe nejvhodnější fitness. Oblast s nejvyšší koncentrací byla rychle zabrána velkými jedinci a ostatním kompetičně vytlačeným nezbývalo, než zaujmout jiné vhodné místo. Takto dojde k ideální volné distribuci, kde organismy nejsou ničím omezeny a mohou se volně pohybovat prostředím (ideal free distribution – IFD). Princip IFD ukazuje na to, že si jedinci volí mezi množstvím potravy a vlivem kompetice.

V přírodě se ale setkáme s teplotně stratifikovanými systémy, kde nízká teplota představuje „ztrátové“ prostředí. Organismy musejí umět nakládat i s tímto faktorem a zaujmout „IFD with costs“ – tedy takové rozložení, které je pro ně nejlepší, neboť jsou omezováni teplotním gradientem. Lampert vytvořil model, ve kterém simuloval hloubkové maximum chlorofylu. Pod termoklinu do studené části nádrže umístil potravu. Jedinci si na přežívání vybrali teplou část nádrže a dolů migrovali pouze za potravou (Lampert a kol., 2003). Autoři tak potvrdili význam teplotního gradientu popsany ze staršího pokusu Loose a Dawidowiczem (1994).

Lampert (1993) uvedl, že DVM není fixní chování zvířat, že se naopak jedná o adaptivní flexibilní strategii přežití. Příkladem může být omezený výstup k hladině, který může být potlačen toxickými sinicemi v epilimniu, nebo naopak zabránění sestupu do hloubky, kde není dostatek kyslíku (Forsyth a kol., 1990).

Ringeberg a van Gool (2003) stanovili 4 nejdůležitější faktory k vyvolání migrace. Jsou to změna relativního osvětlení, predace, koncentrace potravy a teplota. Zdá se, že benefit snížení predace převýšil potenciál denní pastvy – strategie „better hungry than dead“ (Kremer a Kremer, 1988).

Metodika

Dr. Zuzana Hořická se svojí pracovní skupinou od roku 1992 monitoruje a vzorkuje nádrže Bedřichov, Souš a Josefův Důl včetně jejich přítoků. V dubnu roku 2014 jsme pro účely mapování sezónního výskytu zooplanktonu začali vzorkovat vodárenskou nádrž Josefův Důl.

Vzorky byly odebírány z lodi nad nejhlubším místem nádrže ($z_{\max}= 35\text{m}$), které je označeno bójí ve vzdálenosti asi 230 m od hráze a 10m od odběrové věže, GPS: 50.7953739N, 15.1917583E.

Nejdříve byla pomocí Secchiho desky o průměru 30 cm ve stínu boku lodi změřena průhlednost vody. Poté se pevným odběrákem typu Van Dorn o délce 103 cm a průměru 10 cm jsem na jeden tah odebral 6,36 l vody. Nabraný vzorek byl okamžitě z odběráku přelit do připravených kádinek, kde se ihned měřily základní fyzikálně-chemické parametry. Teplota se měřila rtuťovým teploměrem. Za použití sondy typu DataSonde 4, Hydrolab bylo v letních měsících (červenec, srpen) měřeno množství rozpuštěného kyslíku ve vodě. Do plastových lahví o objemu 0,3 l předem řádně vymytých a připravených se odebraly vzorky vody na rozbor chemického složení. Vzorek vody byl předem přefiltrován přes uhelové sítko o velikosti ok 40 μm . Vzorky byly odebrány z hloubek 0, 2, 4, 6, 8, 10, 20 a 30 metrů. Včetně odebraného profilu byly také vzorkováno pět přítoků nádrže. Lahve s odebranými vzorky byly vloženy do chladicích boxů a převezeny do Prahy. Před zasláním do laboratoře na chemickou analýzu byly skladovány v lednici při teplotě 5°C. Analýza byla prováděna servisně v hydrobiologické laboratoři PŘF UK v Blatné. Jedná se o stanovení pH, vodivosti, alkality, chlorofylu-*a* a koncentrace hlavních iontů – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- a F^- .

Vzorky zooplanktonu byly pro větší získaný objem odebírány nadvakrát. Tím způsobem, že dva z hloubky vyzdvižené objemy (12,72 l) vody byly z odběráku vylity do planktonní sítě o velikosti ok 40 μm , přefiltrovány a kvantitativně spláchnuty výpustním kohoutem do připravené vzorkovací plastové lahve. Pro popsání prostorové distribuce byl zooplankton odebírán z hloubek 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 a D (D = metr nad změřeným dnem nádrže, v praxi 32 až 33) metru. Vzorky z hladiny – 0 m byly nabírány 10 cm pod hladinou vody. 103 cm dlouhý

odběrák ve skutečnosti nabíral vzorek z hloubky 0-1, 2-3, 4-5, atd. metrů pod hladinou. Dále byly vertikálními tahy planktonními sítěmi (40 μm a 200 μm) s Apsteinovým nástavcem odebrány kvalitativní a kvantitativní vzorky. Vstupní průměr nástavce byl vždy 19,5 cm. Po ukončení odběru byly odebrané vzorky na břehu nádrže ihned zafixovány cukerným formalínem v poměru 1:10. Po převozu vzorků na Ústav pro životní prostředí v Praze byly lahve se vzorky zooplanktonu uskladněny na suchém temném místě v místnosti s pokojovou teplotou.

Mapování sezónního vývoje si vyžadovalo vzorkování od jara do zimy roku 2014. V Jizerských horách, 730 m n. m., kvůli sněhové pokrývce nastává jaro později. Za jarní měsíce je zde považováno období od konce dubna do června. První odběr byl tedy uskutečněn na konci dubna, poslední v prosinci s periodou opakování jednoho měsíce vyjma listopadu. Období zimní cirkulace nádrže běžně probíhá na přelomu října a listopadu, proto k popsání této situace byl k odběru zvolen konec října.

Sinice rodu *Merismopedia* se nachází v celém vodním sloupci, a proto nás zajímalo, zda i přes to bude filtrující zooplankton migrovat do horních vrstev vody za potravou. Ringelberg (1999) uvádí, že migrace začíná se západem/východem slunce a ustane 1,5 až 2 hodiny po západu/ před východem. Proto byly zvoleny takové časy (pravé poledne = 13, 17, 21 = západ slunce, 1 = půlnoc, 5 = východ slunce a 9 hodin), aby se popsaly tyto jevy. 23. července 2014 ve 13 hodin bylo zahájeno z odběrového místa vzorkování diurnálních vertikálních migrací s opakováním každé 4 hodiny až do 9. hodiny následujícího dne. Noc byla tmavá, nesvítil měsíc; ve dne bylo 23. 7. slunečno s ojedinělou oblačností a středně silným větrem, 24. 7. zataženo.

Vzorky, byly odebrány vždy po 3 tazích odběráku (objem 19,08 l) ze všech hloubek kromě dna. Takto bylo během 24 hodin odebráno celkem 6 profilů.

Pro vyloučení predace zooplanktonu bezobratlými predátory, kteří by mohli způsobovat atypické chování, byly sestrojeny a instalovány světelné pasti. Světelná past byla vyrobena z průhledné plastové krychlové krabice s uzavíratelným víkem o velikosti 30x30x30 cm. Boční a spodní strany jsou opatřené kulatou dírou o průměru 10 mm. Nahoře ve víku měla upevněnu v nepropustné schránce diodovou svítílnu. Takto tři zkonstruované světelné pasti byly zavěšeny na šňůře vedle sebe a

exponovány přes celou noc. První noc byly pasti nataženy na hladině mezi vyčnívající kameny asi 200 m od boční hráze. Při druhé instalaci pastí byla zvolena volná hladina mezi odběrovou věží a boční hrází. V obou případech se nepodařilo prokázat přítomnost bezobratlých predátorů.

Před prohlížením jednotlivých vzorků pod mikroskopem v Mikroskopické laboratoři na Ústavu životního prostředí PřF UK v Praze, byl obsah lahvičky zbaven zdraví nebezpečného formalinu přefiltrováním přes uhelové sítko o velikosti děr 40 μm . Vzorek zachycený na sítku byl pomocí stříčky s vodou kvantitativně spláchnut do kádinky. Z kádinky jsem kapátkem nabíral podíly vzorku a vkládal je do Sedgwick-Rafterovy počítací komůrky. Zde byly pod mikroskopem Carl Zeiss s křížovým posunem při zvětšení 40x – 200x determinovány a počítány jednotlivé druhy zooplanktonu (Crustacea) a jejich vývojová stádia. Nedospělí jedinci a jejich vývojová stádia, dospělci – samci a samice, samice se snůškou, u perlooček ephippiální samice. Po dopočítání celého objemu kádinky byl vzorek znovu spláchnut do lahve, zafixován a uschován.

Pro determinaci byl použit klíč autora Šrámek-Hušek a kol. (1962). S obtížně deteminovatelnými jedinci jsem požádal o pomoc Mgr. D. Vondráka a Dr. Z. Hořickou.

Příprava cukerného formalínu

Cukerný formalín se používá pro zafixování vzorků v poměru 3:50. Na rozdíl od běžného formalínu má vyšší hustotu a viskozitu. Tato vlastnost u perlooček způsobuje, že samice se snůškou se ve stresové situaci nezbavuje svých vajíček.

Cukerný formalín byl připraven v laboratoři. Do 250 ml vroucí vody se přidalo 700g cukru (potravinářský cukr krystal). Roztok se za stálého míchání vařil, dokud se všechn cukr nerozpustil. Poté se nechal zchladnout asi na 30°C. Do vychlazeného roztoku se přidalo 750 ml 40% formaldehydu (Michal Šorf, osobní sdělení).

Výsledky

Kapitola shrnuje mé výsledky studia sezónního vývoje, vertikální distribuce a diurnálních vertikálních migrací planktonních korýšů v nádrži Josefův Důl v r. 2014. Uvádím také data o chemismu vody a fytoplanktonu, zčásti přejatá nebo poskytnutá Povodím Labe.

Abiotické parametry

Bímová ve své diplomové práci (2013) uvádí přehled nepublikovaných dat týmu Z. Hořícké o chemismu vody pro hladinové vzorky, které jsem, doplnil o hodnoty ze sezóny 2014 (Tab. 2, Tab. 3).

Tab. 2. Vývoj základních fyzikálně-chemických parametrů vody v nádrži Josefův Důl od jejího napuštění. Podle Bímové (2013), doplněno. pH, alkalita, vodivost: vážené průměry nebo rozsah hodnot ve vzorcích vody odebraných od hladiny.

	80. léta	90. léta	po roce 2000	2010- 2012	2014
pH	4,4	5,0	6,1	5,6	6,0
Alkalita [$\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$]	-18	2	27	12	29
K₂₅ [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]	20-30		40-50	35	35

Tab. 3. Vývoj obsahu základních iontů ve vodě ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) v nádrži Josefův Důl od r. 1998. Podle Bímové (2013), doplněno. Minimální a maximální hodnoty vybraných parametrů za jednotlivá období ve vzorcích vody odebíraných od hladiny. Analýzy:

1998-2006 Centrální laboratoř ÚÚG Praha, 2007-2014 Hydrobiologická stanice UK u Blatné.

	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1998-	0,11-	0,8-	2,2-	12,3-	1,8-	<0,02-	0,5-	0,8-	3,8-
1999	0,13	1,3	3,5	14,5	2,1	0,25	0,6	0,9	4,5
2000-	0,05-	0,79-	1,1-	10,3-	1,5-	0,02-	0,24-	0,52-	2,4-
2009	0,08	1,1	1,52	13,1	3,0	0,41	0,6	0,9	3,0
2010-	0,031-	0,64-	0,4-	7,8-	1,0-	0,02-	0,24-	0,45-	2,0-
2012	0,058	1,1	2,9	8,8	1,4	0,2	0,34	0,66	2,9
2014		0,72-	0,4-	7,4-	1,4-	<0,02-	<0,02	1,4-	2,6-
		1,02	1,1	9,9	2,1	0,2	-1,3	2,1	3,3

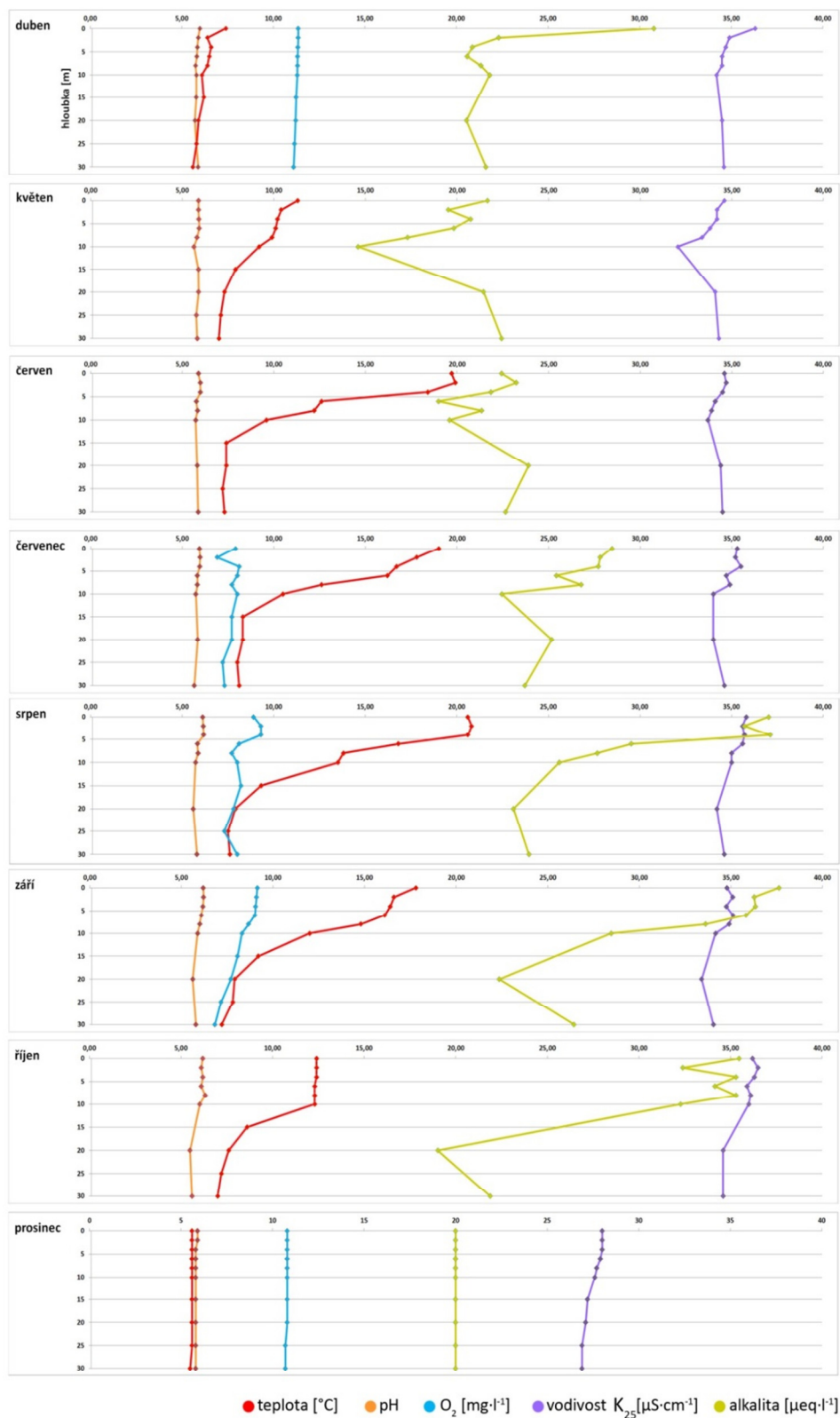
Z Tab. 2 a 3 je zjevné, že pH, alkalita i vodivost do začátku tisíciletí velmi výrazně vzrostly, od té doby se ale s poklesem v období 2010-2012 stále drží na podobných hodnotách. Také v iontovém složení je možné pozorovat oproti období 2010-2012 stagnaci (sírany, NH₄⁺) nebo opačný trend – opětovný nárůst koncentrace Ca a Mg, snížení koncentrace NO₃⁻.

Vývoj fyzikálně-chemických poměrů (teploty, koncentrace rozpuštěného kyslíku, pH, alkality, vodivosti) v průběhu roku a jejich stratifikaci ve vodním sloupci zachycuje Obr. 1. (Pro poruchu sondy chybí údaje o rozpuštěném kyslíku ze dvou odběrů.) Zatímco v září i říjnu byla nádrž v důsledku velmi teplého léta a podzimu stále výrazně stratifikovaná, prosincová data představují zimní poměry a úplné promíchání nádrže. Také hodnoty naměřené v dubnu odpovídají situaci krátce po úplném jarním míchání. Během letní teplotní stratifikace se termoklína (metalimnion) nacházely v hloubce mezi 5 a 10 metry.

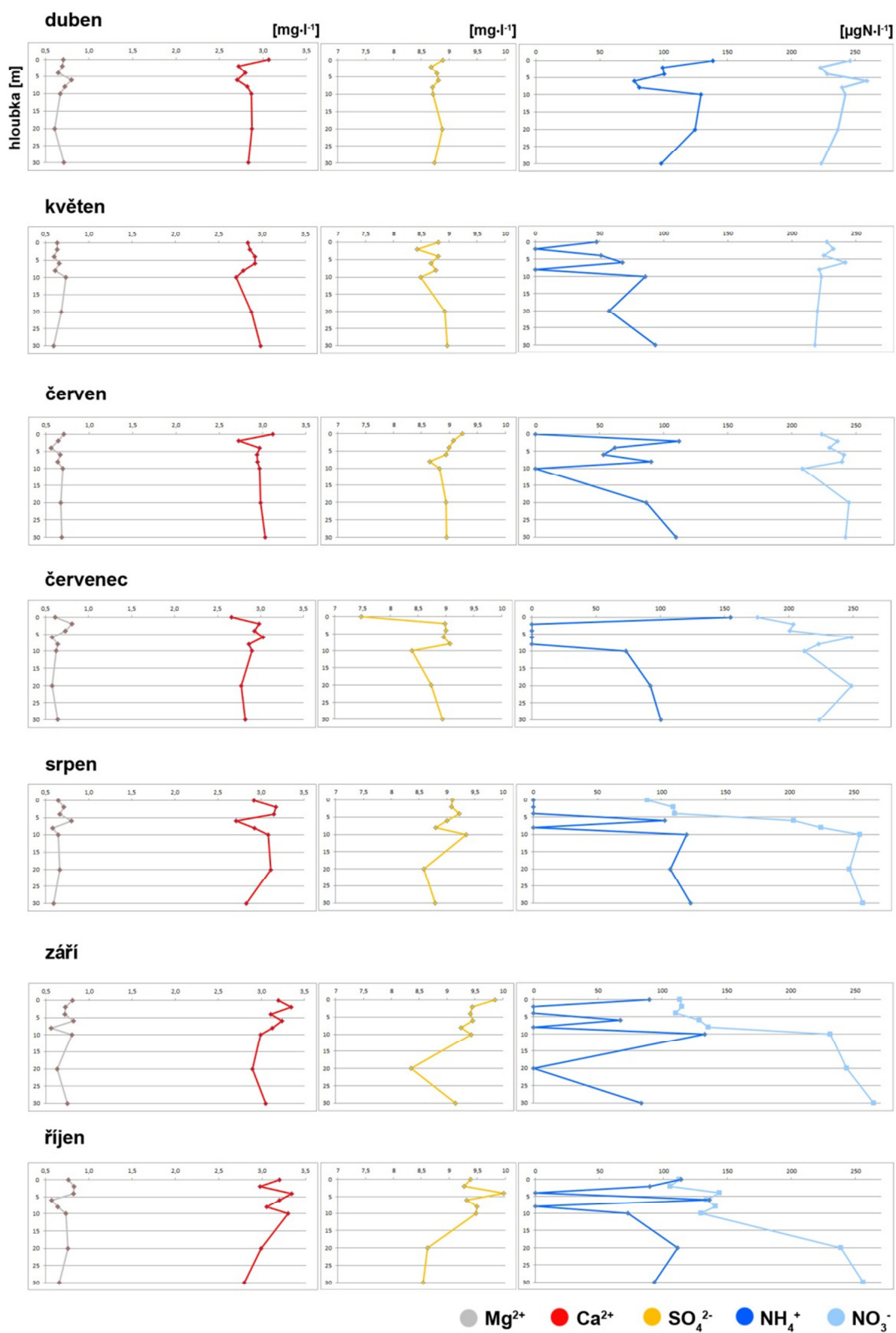
Detailně je vertikální profil teploty a pH v nádrži znázorněn na Obrázku 6 a 7 v Příloze.

Hodnoty pH se během celého roku pohybovaly v rozmezí 5,6-6,3. pH vody nevychýlilo ani tání sněhu v povodí nádrže na začátku sezony.

Obr. 2 ukazuje sezónní vývoj a vertikální stratifikaci vybraných iontů (Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻) ve vodě.

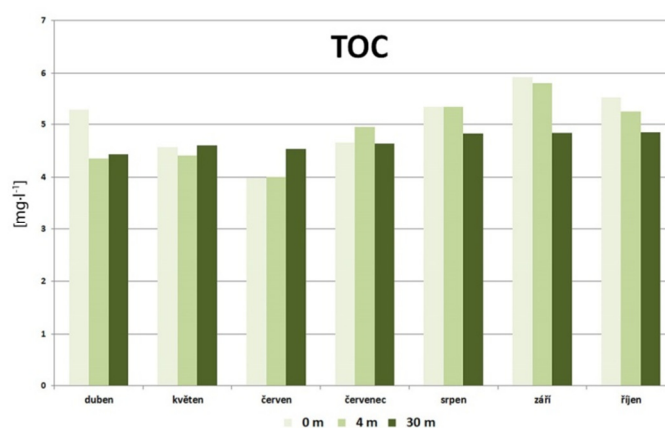


Obr. 1. Vertikální distribuce a sezónní vývoj základních fyzikálně-chemických parametrů vody v nádrži Josefův Důl v roce 2014. Hodnoty rozpuštěného kyslíku pro měsíc duben, září a prosinec byly poskytnuty Povodím Labe.

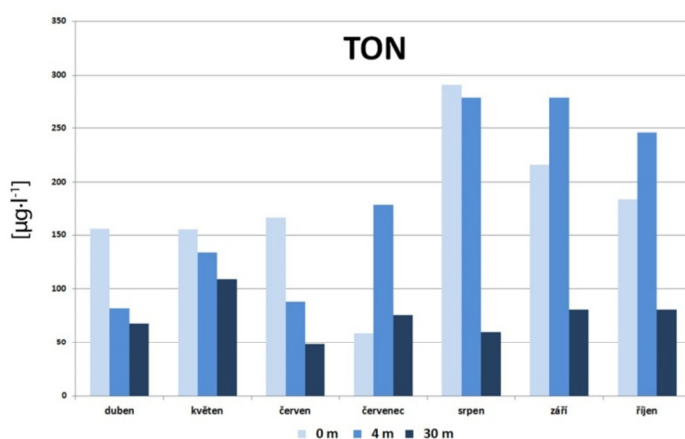


Obr. 2. Vertikální distribuce a sezónní vývoj vybraných iontů v nádrži Josefův Důl v roce 2014.

Jako ukazatel množství organických látek a živin ve vodě byl vybrán celkový organický uhlík (TOC) a celkový organický dusík (TON). Jejich hodnoty pro eufotickou (0 m, 4 m) a afotickou (30 m) vrstvu jsou znázorněny na Obr. 3. a Obr. 4. Zatímco množství TOC je v epilimniu i u dna podobné, s nárůstem v létě, množství TON je u dna výrazně nižší.



Obr. 3. Množství celkového organického uhlíku (TOC) u hladiny, v hloubce maximálního rozvoje fytoplanktonu (4 m) a nade dnem – Josefův Důl, 2014.



Obr. 4. Množství celkového organického dusíku (TON) u hladiny, v hloubce maximálního rozvoje fytoplanktonu (4 m) a nade dnem – Josefův Důl, 2014.

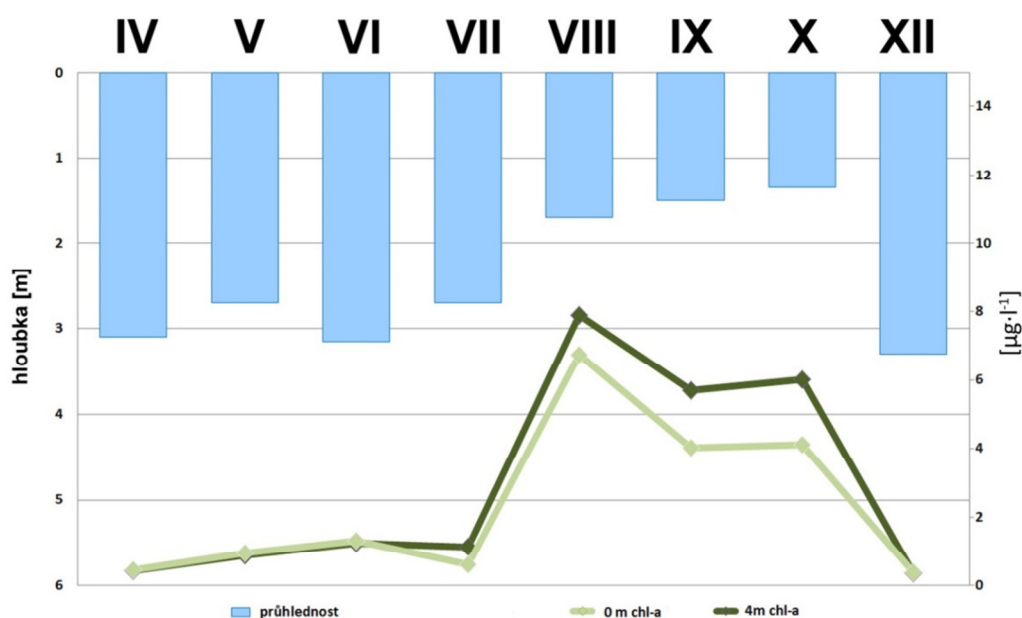
Fytoplankton



Obr. 5. Vertikální distribuce a sezónní vývoj koncentrace chlorofylu-a v nádrži Josefův Důl v roce 2014.

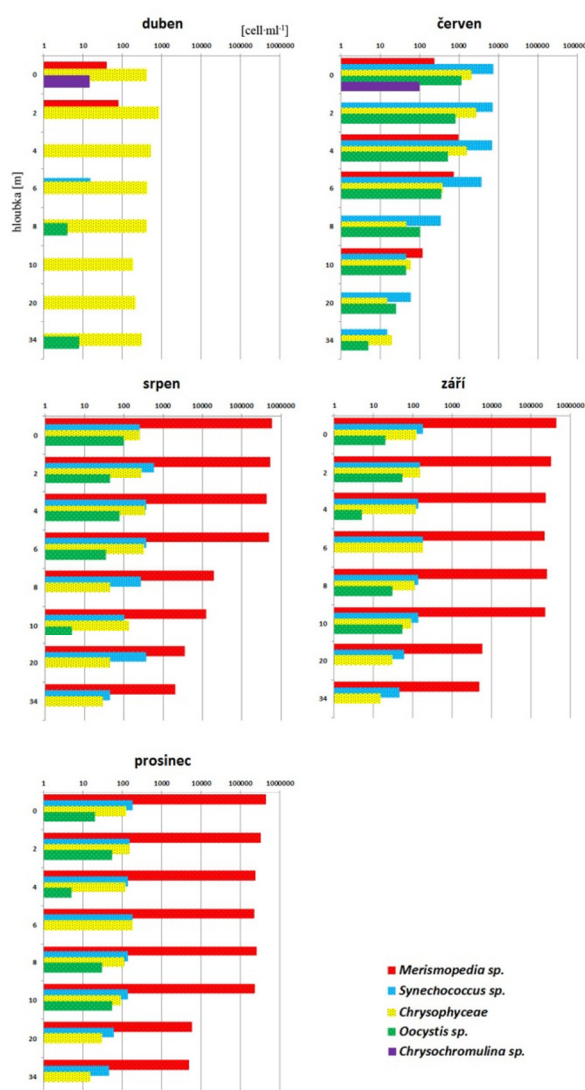
O ročním průběhu koncentrace chlorofylu-*a* (míry biomasy fytoplanktonu) v nádrži a její distribuci ve vodním sloupci vypovídá Obr. 5. K prudkému nárůstu hodnot došlo v nádrži až ve vrcholném létě (srpnu) a takto vysoké hodnoty se udržely až do října, ale pouze v epilimniu.

Do Obr. 6 jsem vynesl vývoj průhlednosti vody měřené Secchiho deskou v průběhu roku, spolu s koncentrací chlorofylu-*a* u hladiny a v hloubce 4 m (která odpovídala maximálním naměřeným hodnotám chlorofylu-*a*). S nárůstem koncentrace chlorofylu-*a* během vrcholného léta byl zaznamenán silný pokles průhlednosti.



Obr. 6. Roční průběh průhlednosti vody a koncentrace chlorofylu-*a* v hladinových vzorcích a vzorcích z hloubky 4 m (Josefův Důl, 2014).

Druhové složení fytoplanktonu bylo velmi chudé (Obr. 7). Začátkem roku rychle nastoupily zlativky (Chrysophyceae) – zejména rody *Chromulina*, *Uroglena*, jejichž množství během sezóny lehce klesalo. V červnu byl pozorován velký nárůst zelených řas r. *Oocystis* a ještě větší nárůst sinic – prvně rodu *Synechococcus* a poté rodu *Merismopedia*, který ve fytoplanktonu naprosto dominoval až do konce roku. Jak je patrné z Obr. 7, tyto sinice (jedná se o druh *Merismopedia tenuissima*) byly v nádrži po celý rok, i když na jaře pouze u hladiny, ale rychle se šířily i do hlubokých tmavých a chladných vrstev nádrže a od vrcholného léta v celém vodním sloupci suverénně převládly – dosahovaly populačních hustot až o tři řády vyšších než ostatní zástupci fytoplanktonu.



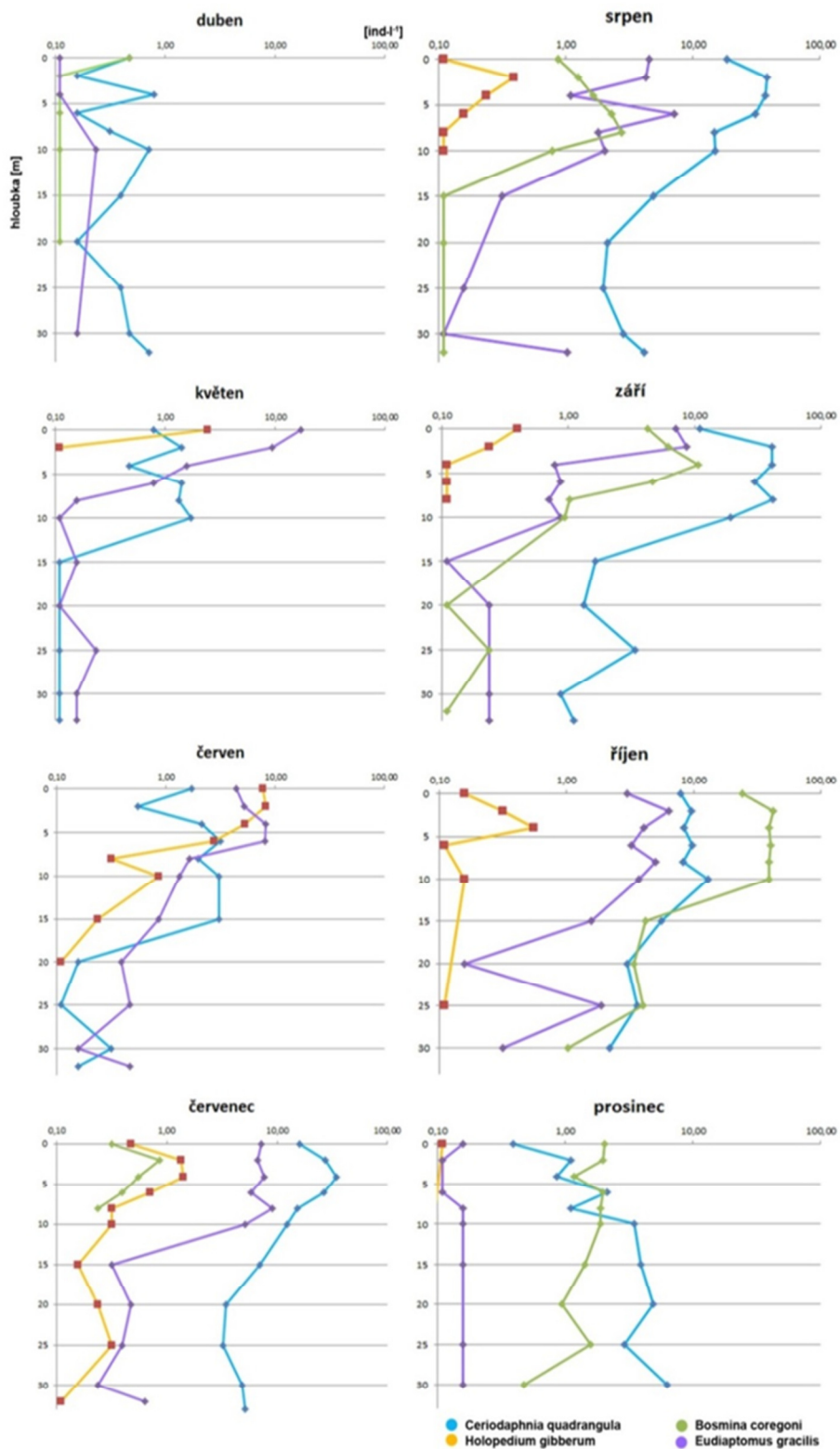
Obr. 7. Složení fytoplanktonu nádrže Josefův Důl, jeho vertikální distribuce a vývoj v průběhu roku 2014. Veškeré údaje o druhovém a početním (cell.ml⁻¹) zastoupení fytoplanktonu nádrže v r. 2014 byly poskytnuty Povodím Labe.

Zooplankton

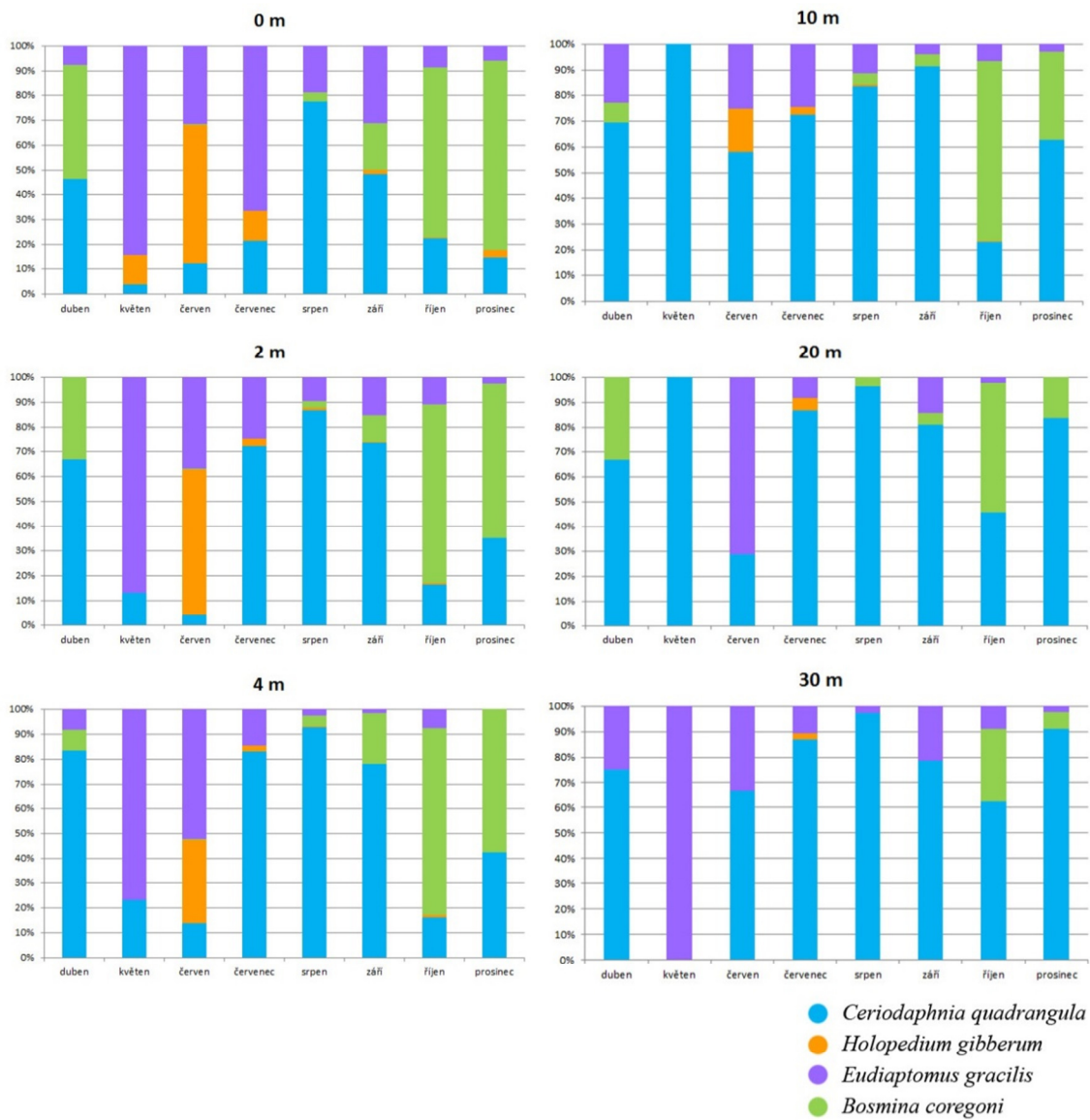
Početní zastoupení jednotlivých druhů planktonních korýšů ve vodním sloupci a v průběhu roku je znázorněno na Obr. 8. Pro názornost je do Příloh (Obrázek 9) zařazeno také vynesení počtů všech filtrujících korýšů spolu se záznamem o teplotě vody a koncentraci chlorofylu-*a*. Počet druhů korýšů byl v Josefově Dole v roce 2014 nízký a dominovala mezi nimi perloočka *Ceriodaphnia quadrangula*, dalšími hojnými druhy byly vznášivky *Eudiaptomus gracilis* (s výjimkou zimního období) a v létě a na podzim také drobné perloočky *Bosmina coregoni*. Nápadné je, že perloočky *Holopedium gibberum* (zčásti také *Bosmina coregoni*) se v některých obdobích roku zdržovaly pouze v horních vrstvách nádrže s nejvyšší nabídkou fytoplanktonu a nejvyšší teplotou. Mezi minoritními druhy byly perloočky z čeledi Chydoridae *Alona affinis*, *A. quadrangularis*, *Alonella nana*, překvapivě perloočka *Daphnia longispina* (nedospělí jedinci) a buchanka *Cyclops strenuus* (kopepoditové stádium).

Obr. 9 zobrazuje relativní zastoupení hlavních druhů korýšů v jednotlivých datech a hloubkách. Nejběžnější perloočka *Ceriodaphnia quadrangula* se vyskytovala v celém vodním sloupci a ve větších hloubkách a v letním období dominovala. Na jaře se uplatnily vznášivky *Eudiaptomus gracilis* (dospělé vznášivky se zdržovaly v prvních 10 metrech hloubky, níže se nacházela hlavně jejich vývojová stádia) a perloočka *Holopedium gibberum*. Perloočky *Bosmina coregoni* měly zpožděný nástup, vyskytovaly se od poloviny sezóny a v říjnu a v prosinci početně dominovaly ve vrchních vrstvách vody (do 10 m).

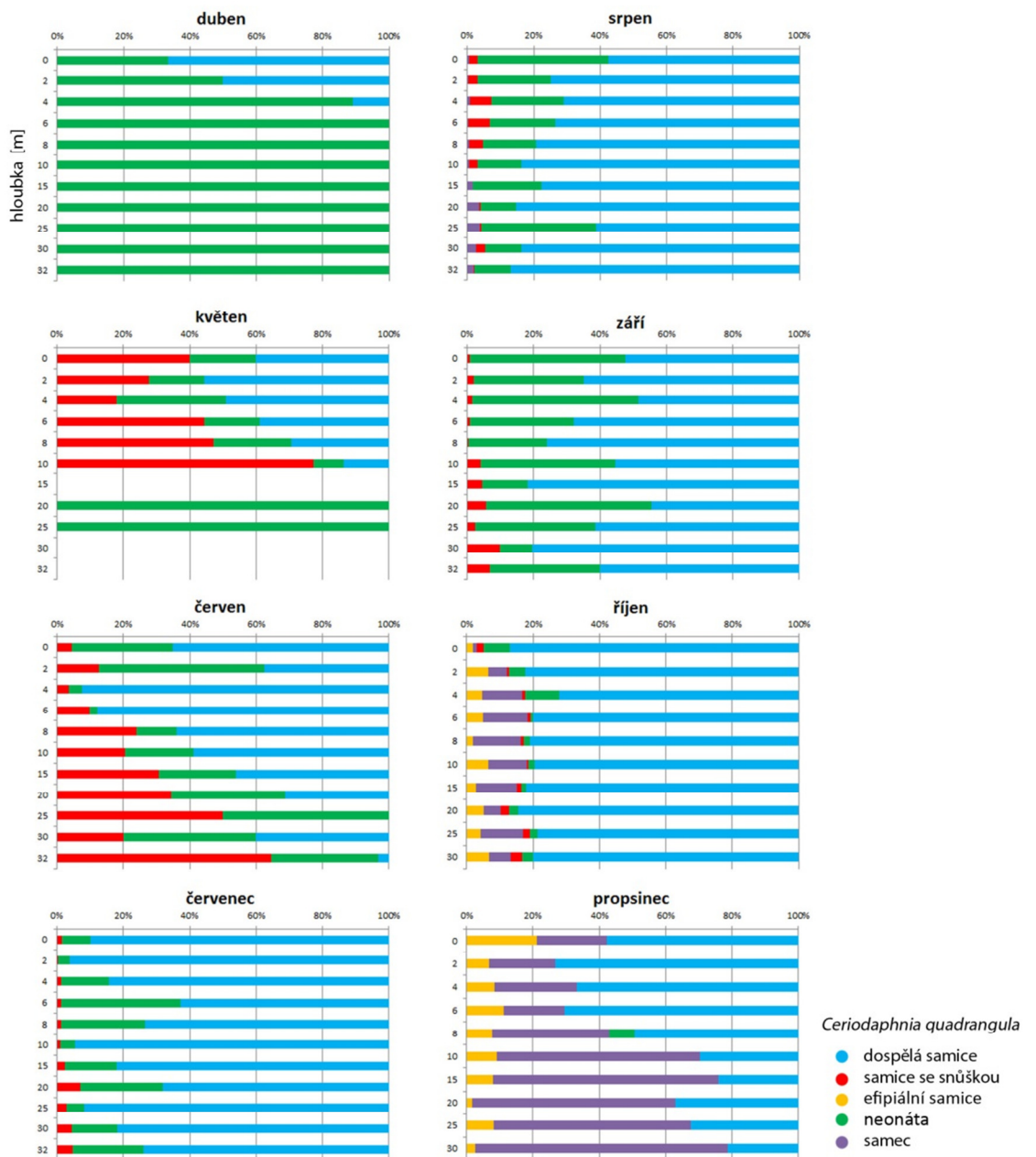
U hlavních filtrátorů v ekosystému nádrže Josefův Důl, perlooček *Ceriodaphnia quadrangula*, jsem se zabýval také strukturou jejich populace (Obr. 10). S postupem sezóny byly nedospělé perloočky v populaci vystřídány dospělými partenogenetickými samicemi (největší podíl samic se snůškou jsem však zaznamenal na jaře, jinak zcela převládaly dospělé samice bez vajíček), na podzim se v populaci objevili samci a efipiální samice. Nápadné bylo, že se neonáty, dospělé samičky se snůškou a v zimě také samci hromadili v hlubších vrstvách nádrže.



Obr. 8. Početní zastoupení jednotlivých druhů planktonních koryšů na vertikálním profilu nádrže a v průběhu roku (Josefův Důl, 2014). Minoritní druhy (< 1 %) nejsou zahrnuty.

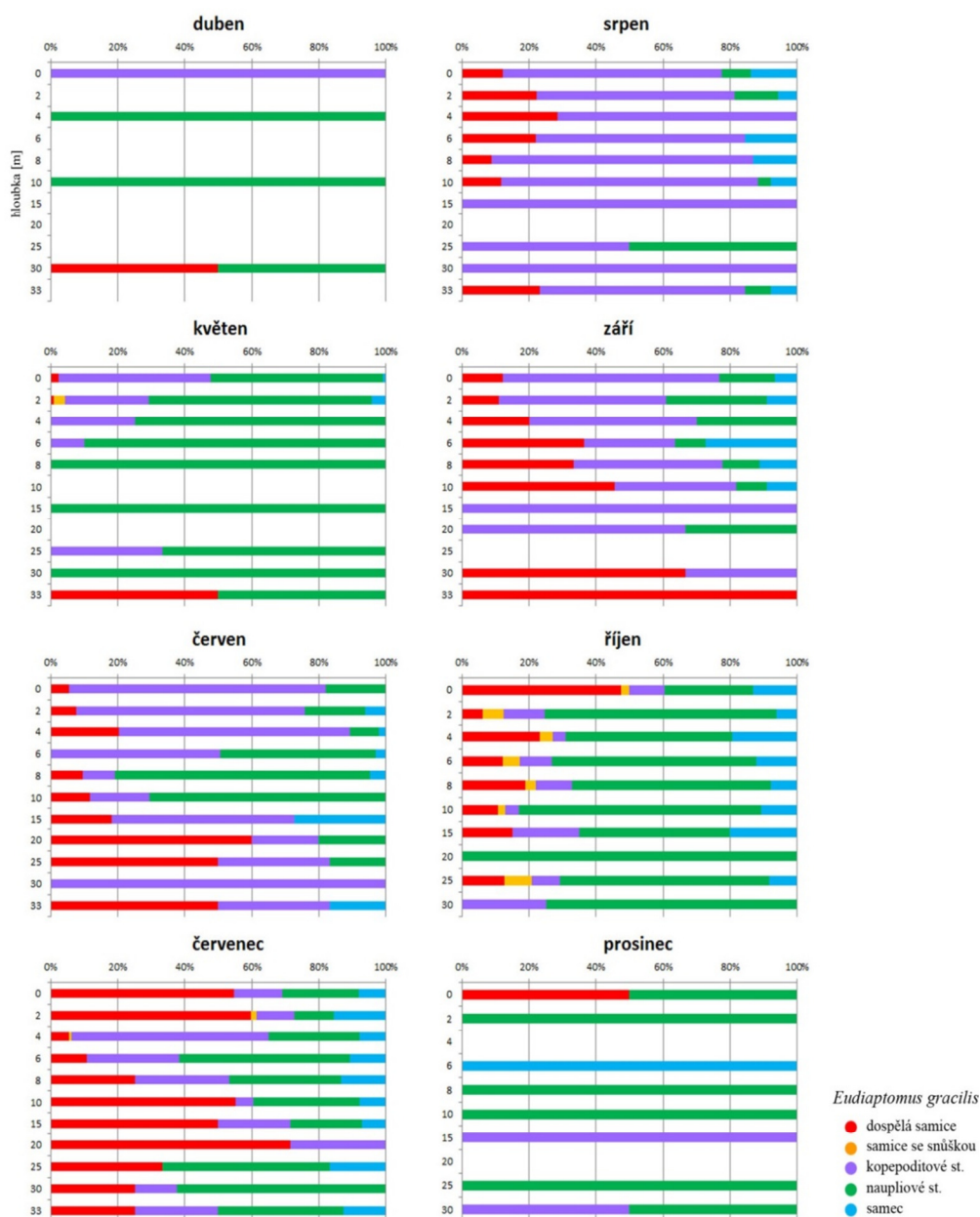


Obr. 9. Relativní zastoupení korýšů na vertikálním profilu nádrže Josefův Důl v průběhu roku 2014. Minoritní druhy (s četnostmi pod 1 %) nebyly zařazeny (*Alona affinis*, *A. quadrangularis*, *Alonella nana*, *Daphnia longispina*, *Cyclops strenuus*).



Obr. 10. Populační struktura perlooček *Ceriodaphnia quadrangula* v Josefově Dole v roce 2014. Rozlišeny jsou nedospělé samice (neonáty), dospělé samice „prázdné“ (bez snůšky), dospělé samice se snůškou, efiipiální samice a samci.

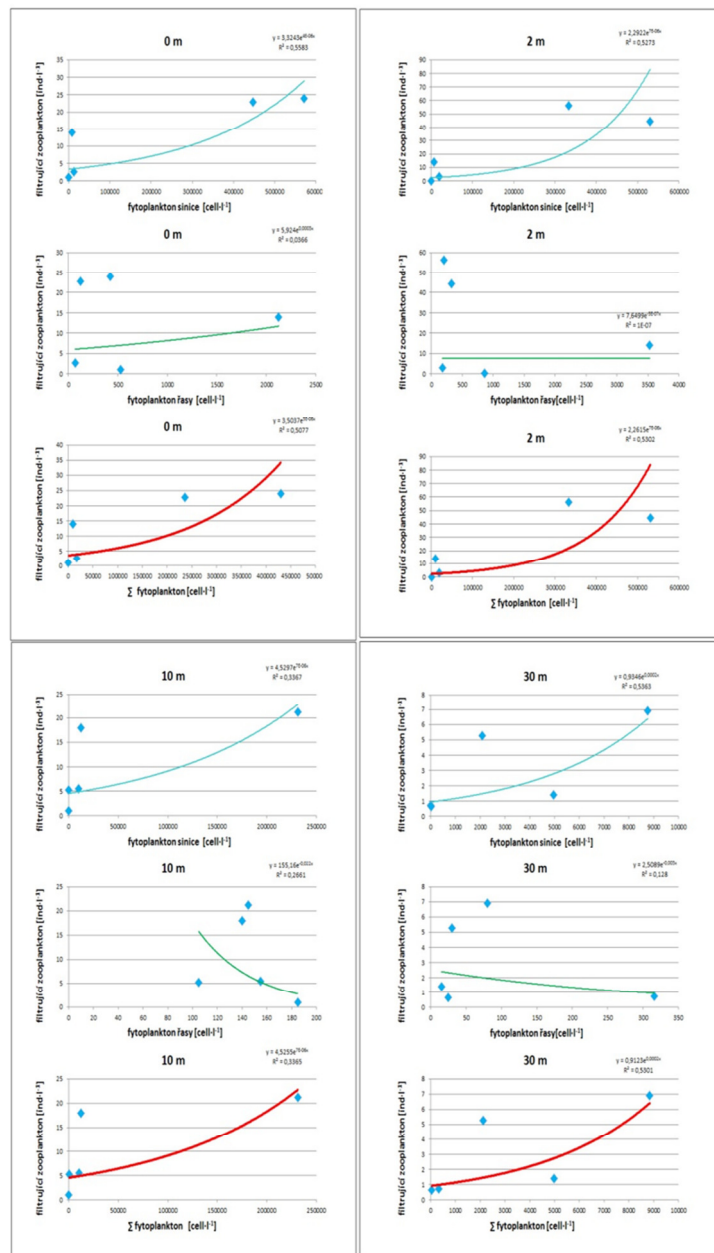
U vznášivek (*Eudiaptomus gracilis*) se populační struktura v průběhu roku vyvíjela jinak (Obr. 11). Začátkem sezóny zcela převládala naupliová a kopepoditová stádia, přičemž na dně nádrže se zdržovaly také dospělé samice. V létě vystoupily dospělé samice do horních vrstev nádrže a část populace již tvořili dospělí samci, na sklonku sezóny jsem zaznamenal největší podíl samic s ovisaky. V té době a také ještě v prosinci se dospělé samice a samci ještě drželi i u povrchu nádrže.



Obr. 11. Populační struktura vznášivek *Eudiaptomus gracilis* v Josefově Dole v roce 2014.

Rozlišeny jsou naupliové larvy a kopepoditová stádia, dospělé samice s ovisaky, dospělé samice „prázdné“ (bez snůšky) a samci.

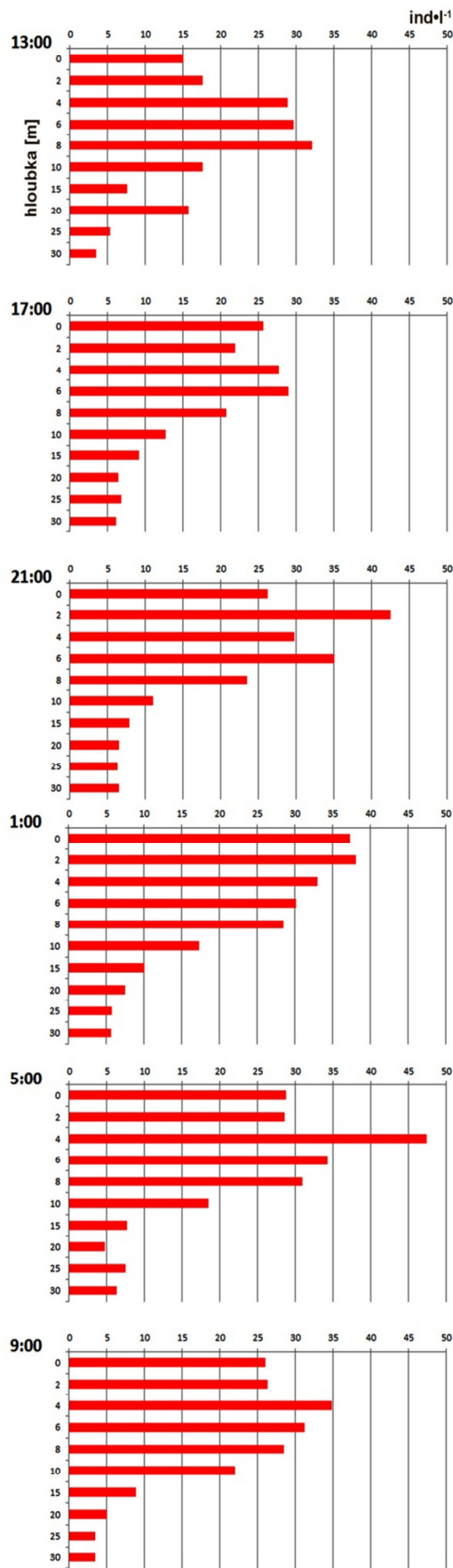
Ověřoval jsem závislost mezi početností filtrujících korýšů a množstvím potravy (počtech buněk fytoplanktonu ve stejném datu), a to v hladinových vzorcích, vzorcích z hloubek 2 a 10 m (epilimnion) a ode dna (30 m) – Obr. 12. Zabýval jsem se touto možnou závislostí zvláště pro sinice, řasy a celkový fytoplankton. Z Obr. 12 je pro celkový fytoplankton a pro sinice ve všech hloubkách patrná zvyšující se početnost korýšů se stoupajícím množstvím potravy, ale závislost byla ve všech případech jen velmi slabě průkazná. Pro řasy byl tento trend zcela neprůkazný nebo opačný.



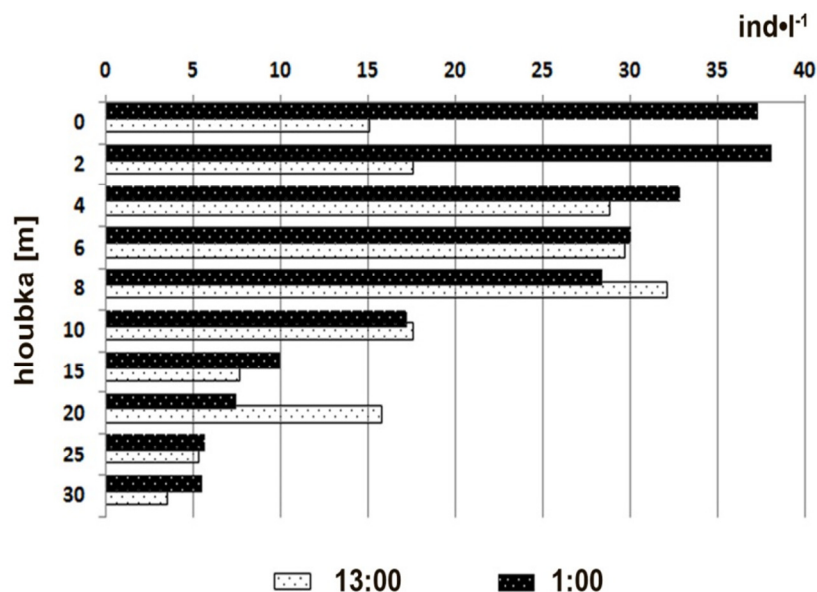
Obr. 12. Závislost zooplanktonu a fytoplanktonu.

Diurnální vertikální migrace zooplanktonu (DVM)

Vertikální migrace zooplanktonu během dne a noci (DVM) jsme sledovali v nejhlubší části nádrže z 23. na 24. července 2015. Prostorové změny pro všechny planktonní korýše jsou znázorněny na Obr. 13. V právě poledne (13 hodin letního času) došlo k zanoření části jedinců do hlubších vrstev vody. Naopak o půlnoci (v 1 hodinu ráno letního času) se nacházelo nejvíce jedinců těsně pod hladinou a v hloubce 2 metry. S nízkou hladinou osvětlení byla spojena ve 21 hodin a v 5 hodin maxima korýšů v hloubkách 2-4 m, kde se nacházelo nejvíce fytoplanktonu (maximální hodnoty chlorofylu-*a*). Rozdíl v uspořádání organismů mezi nejsvětlejší a nejtmaší částí 24-hodinového cyklu je lépe patrný z Obr. 14.

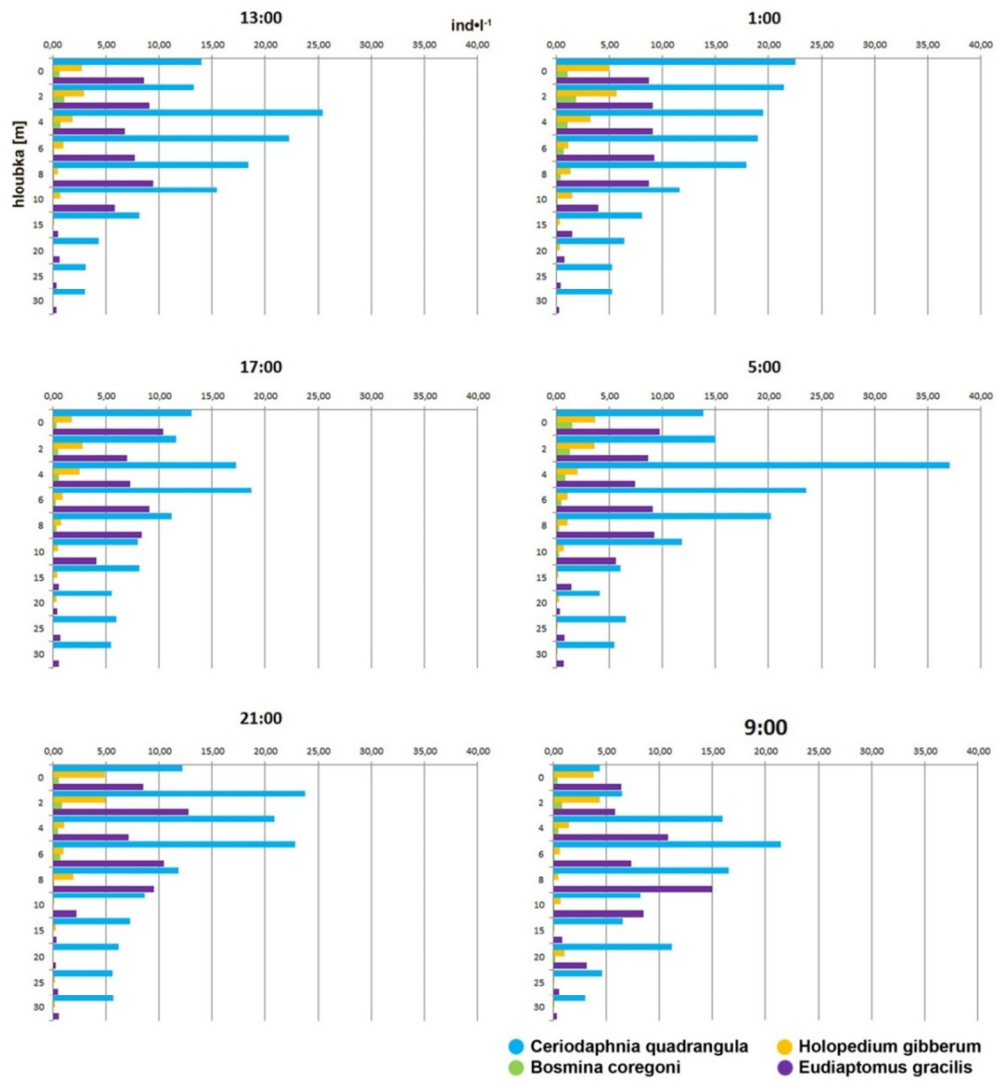


Obr. 13. Diurnální vertikální migrace korýšů na Josefově Dole 23.-24.7.2014.



Obr. 14. Distribuce planktonních koryšů ve vodním sloupci ve 13:00 a v 1:00 letního času (tj. v pravé poledne a o půlnoci). Josefův Důl, 23.-24.7.2014.

Srovnání diurnálních vertikálních migrací jednotlivých druhů koryšů podává Obr. 15. U perloočky *Ceriodaphnia quadrangula* jsou patrné posuny části její populace v čase. Populace perloočky *Bosmina coregoni* také vykazuje v nočních hodinách posun do hloubky s maximem chlorofylu-*a*, i přes malé počty jedinců ve vzorcích. Na druhé straně perloočky druhu *Holopedium gibberum* vykazovaly podobné rozmístění během dne a noci, s vyššími počty jedinců u hladiny. Podobně tomu bylo i u vznášivek *Eudiaptomus gracilis*, které byly po celou dobu rozmístěny ve vrchních 10 metrech, sestup níže vykazaly pouze v 9 hodin dopoledne. Relativní zastoupení druhů ve vybraných hloubkách během dne a noci uvádí Obrázek 10 v Příloze.

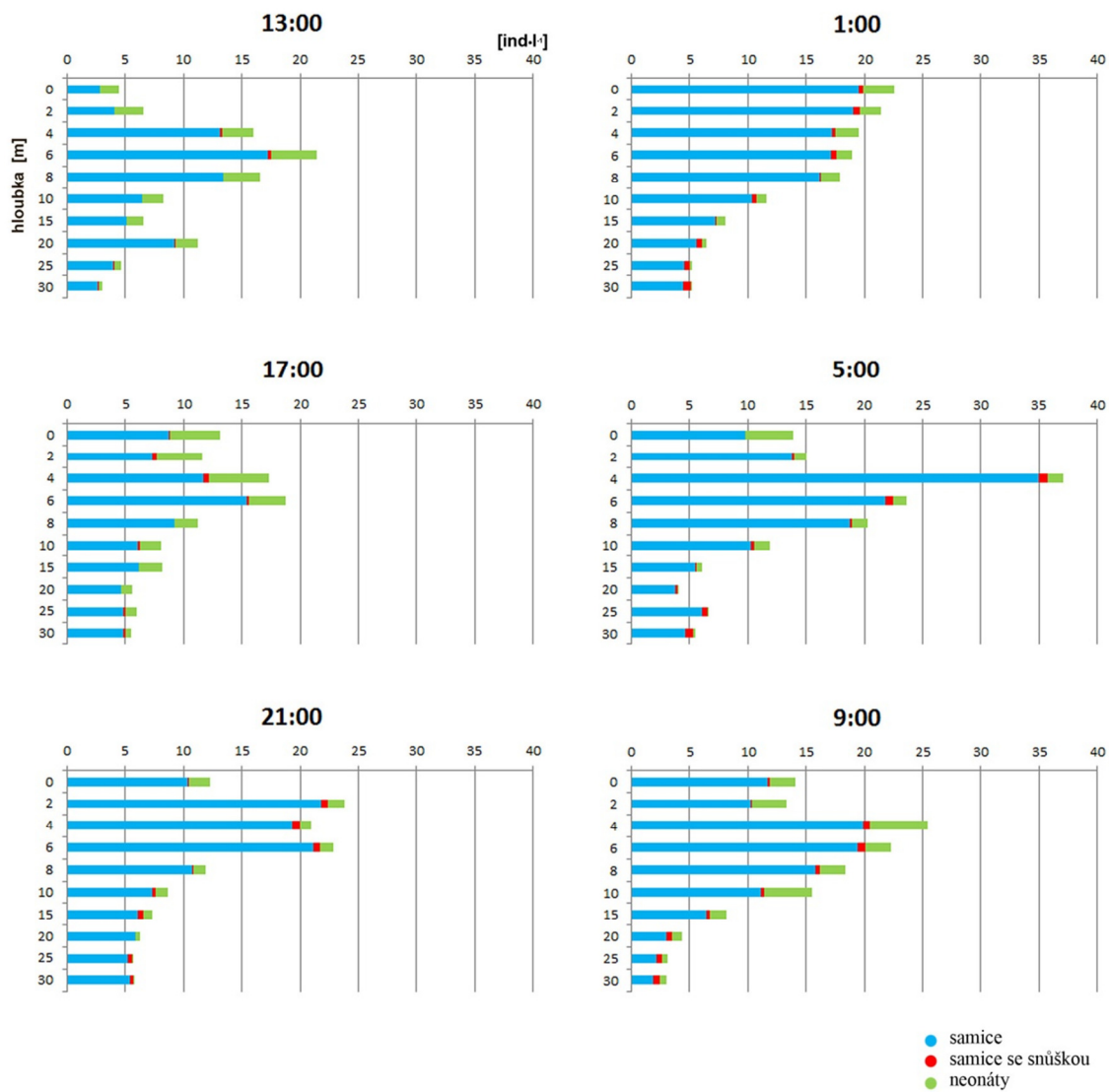


Obr. 15. Diurnální vertikální migrace jednotlivých druhů koryšů. Josefův Důl, 23.-24.7.2014.

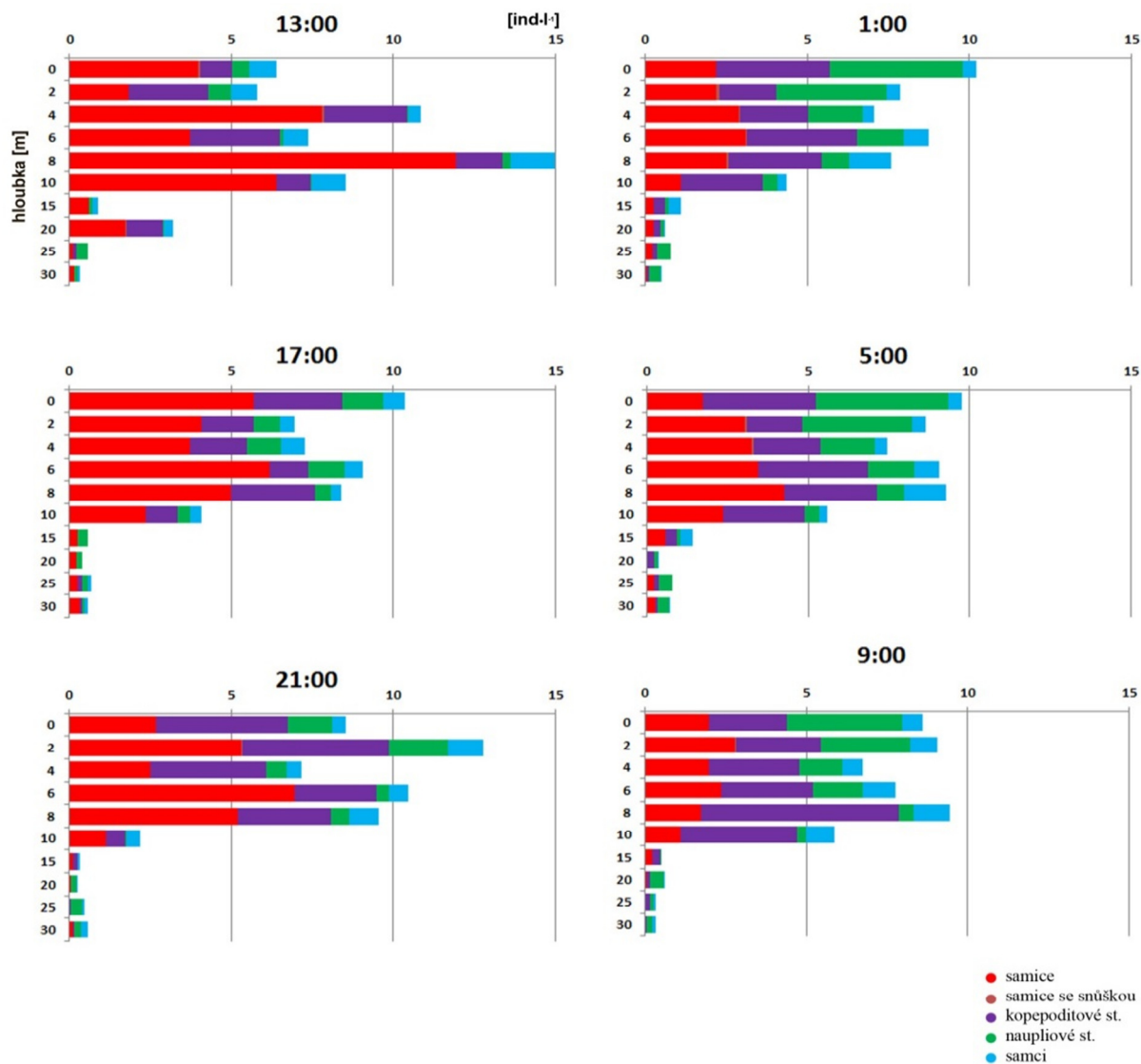
Za velmi zajímavé jsem pokládal vertikální migrace během dne a noci u různých populačních kategorií hlavních druhů.

Obr. 16 shrnuje DVM perloočky *Ceriodaphnia quadrangula*, a to zvláště pro neonáty, dospělé samice bez snůšky a samice se snůškou. Dospělé samice (v populaci v té roční době naprosto převažovaly „prázdné“, tj. bez snůšky) se s výjimkou nejtmaší části noci držely v hloubce maximálního množství potravy. Nedospělé perloočky (neonáty) stoupaly nejvíce k hladině také o půlnoci, jinak byly stále rozmístěné v celém vodním sloupci, s vyššími počty v horních 10-15 m. Na rozdíl od větších dospělých samic se však vyskytovaly ve vysokých počtech u hladiny také ve zbytku dne s výjimkou nejsvětější části (ráno a v poledne) – viz též Obr. 5 v Příloze.

DVM jednotlivých populačních kategorií vznášivky *Eudiaptomus gracilis* (Obr. 17) byly odlišné. Naprostá většina populace se po celý den zdržovala ve svrchních 10 metrech hloubky. Naupliová a kopepoditová stádia, která tvořila zhruba polovinu populace, se objevila u hladiny ve druhé části noci a ráno. Samci byli stále rozmístěni v „osídleném“ epilimniu, avšak zdá se, že větší podíl samců se v noci a ráno držel na jeho spodní hranici.



Obr. 16. Diurnální vertikální migrace neonát a dospělých partenogenetických samic druhu *Ceriodaphnia quadrangula*. Josefův Důl, 23.-24.7.2015.

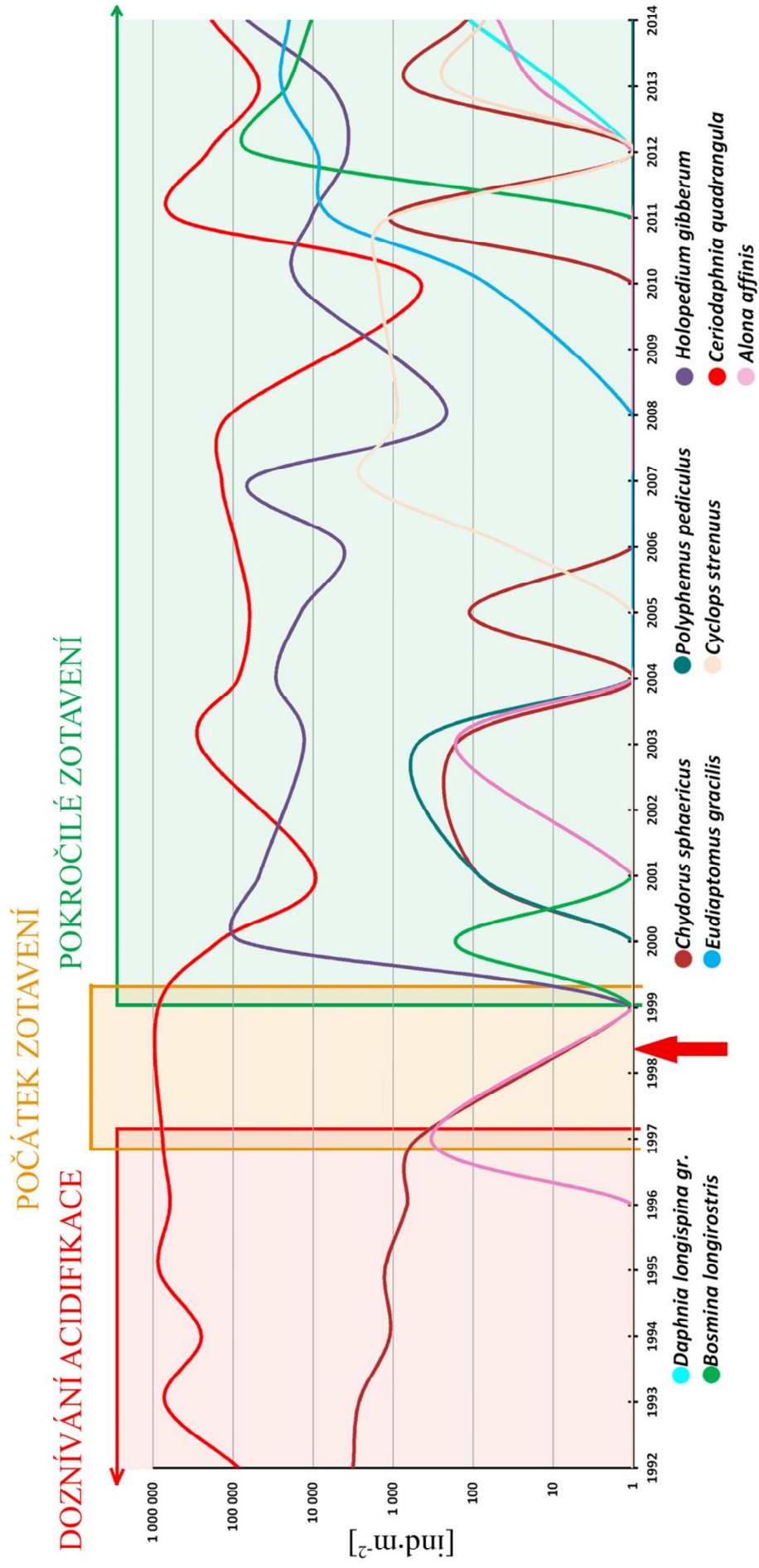


Obr. 17. Diurnální vertikální migrace druhu *Eudiaptomus gracilis* (naupliových a kopepoditových stádií, dospělých samic bez snůšky a se snůškou, dospělých samců). Josefův Důl, 23.-24.7.2015.

Dlouhodobý vývoj druhového složení a početnosti planktonních korýšů v nádrži Josefův Důl (1992-2014)

Strukturou a početnostmi korýšů v jizerskohorských nádržích se ve své diplomové práci zabývala Bímová (2013), která zpracovala vzorky zooplanktonu z Josefodolské nádrže za období 1992 až 2012. K jejím výsledkům z vertikálních tahů planktonními sítěmi ode dna v podzimním období jsem vyhodnotil a přidal údaje z podzimních odběrů v letech 2013 a 2014, na kterých jsem se podílel.

Pro názorné představení dynamického vývoje zooplanktonu v nádrži v různých fázích jejího zotavování z acidifikace jsem vynesl data pro všechny druhy společně na Obr. 18. Přes značné střídání druhů a změny jejich kvantitativního zastoupení v nádrži po celou dobu dominovala perloočka *Ceriodaphnia quadrangula*. Tu dvakrát krátkodobě vystřídal druh *Holopedium gibberum*, který se od r. 1999 vyskytuje v nádrži také ve vysokých počtech. V posledních pěti letech prudce vzrostla početnost vznášivek *Eudiaptomus gracilis* a perlooček *Bosmina coregoni*, překvapením bylo objevení se perloočky *Daphnia longispina* gr.



Obr. 18. Dlouhodobý vývoj početnosti (ind. m⁻³) planktonních koryšů v nádrži Josefův Důl po ústupu acidifikace (1992-2014). Červená šipka označuje první úspěšnou a významnou reintrodukci sivena amerického (1998).

Bezobratlí predátoři

Pro ověření, zda se v pelagiálu nádrže Josefův Důl i při současné stabilní, přirozeně se rozmnožující populaci sivena amerického (*Salvelinus fontinalis*) a masovém vytírání střeve potoční (*Phoxinus phoxinus*) stále nevyskytují bezobratlí predátoři planktonních organismů (ploštice, případně brouci), použili jsme doporučené světelné pasti (M. Papáček, ústní sdělení). Tři světelné pasti byly exponovány po dvě noci, ani do jedné pasti však nebyl zachycen možný zástupce bezobratlých predátorů. Vyloučili jsme tak na Josefově Dole predaci bezobratlými organismy, která by mohla mít vliv na chování korýšů ve vodním slouci a naše výsledky studia diurnálních vertikálních migrací.

Diskuse

Chemismus

Charakter nádrže Josefův Důl je dán povodím, ve kterém převládá smrková monokultura a velký obsah huminových kyselin vyluhovaných z rašelinišť, u nichž může hodnota pH klesat i pod 4,0 (Lhotský, 1963). V polovině 80. let 20. století, když v oblasti Jizerských hor vrcholila antropogenní acidifikace, měla voda v nádrži pH kolem 4,4 (J. Křeček, Z. Hořická, nepublikovaná data). Běžné hodnoty pH povrchových vod se pohybují v rozmezí 6,0 – 8,5. Jak uvádí Pitter (2009), nízké hodnoty pH ovlivňují toxické frakce kovů. Optimální pH vody pro ryby je 6,5 – 8,5 s tím, že pH nižší než 4,8 vede k poškození ryb (Čítek a kol., 1997). S nárůstem koncentrace síranů a dusičnanů v nádrži klesaly koncentrace hořčíku a vápníku, tudíž klesala hodnota alkality a vodivosti. Dnes žije v nádrži stabilní populace acidotolerantního sivena amerického (*Salvelinus fontinalis*) a v litorálu se úspěšně vytírá střevle potoční (*Phoxinus phoxinus*).

Zjevné zotavování z acidifikace se zlepšením chemických parametrů vody v nádrži ukazují Tab. 1 a 2. Tento trend je podobný i v šumavských jezerech (Kopáček a kol., 2001). Vrba a kol. (2000) udávají, že pH šumavských jezer zasažených silnou acidifikací se v létě 1999 pohybovalo mezi 4,3 a 6,2.

Přežití zooplanktonu v době vrcholící acidifikace v Jizerských horách (na rozdíl od většiny jezer na Šumavě i jinde) bylo zřejmě umožněno velkým množstvím huminových látek ve vodě, které tvoří komplexy s toxickými kovy (Pitter, 2009).

Josefodolská nádrž se dnes nachází v pokročilém stádiu zotavování z antropogenní acidifikace. V oživení se tyto změny projevují jako nepředvídatelná sukcese s občasnými sezónními maximy některých organismů. V posledních letech se jedná o masové namnožení pikosinic r. *Merismopedia*. Tyto sinice se dříve v nádrži uplatnily hlavně v zimním období, v roce 2014 suverénně dominovaly ve fytoplanktonu již od srpna, a to v celém vodním sloupci. Blomqvist et al. (1989) také pozorovali nástup rychle se množících sinic rodu *Merismopedia* ve skandinávských jezerech.

Sezónní vývoj zooplanktonu v horské hluboké nádrži

Důsledkem okyselení došlo ve vodách ke snížení druhové diverzity zooplanktonu a bentosu, silnému poklesu početností populací těchto organismů a úhynu ryb. Acidifikace postihla mnohá území Evropy a Severní Ameriky. Z oblasti Vysokých Tater byl popsán takzvaný „tatranský fenomén“, kdy nad hranicí lesa došlo k úplnému vymizení zooplanktonu z jezer (Stuchlík a kol., 1985). K podobnému jevu došlo i na Šumavě. V Čertově jezeře, kde se od konce 70. let až do začátku 90. let drželo pH na hodnotě 4,4, se také nevyskytovali žádní planktonní korýši (Fott, 1982).

Již od napuštění Josefova Dolu se jedná o nádrž dystrofního charakteru s malým počtem druhů planktonních korýšů. Jedná se především o druhy vyskytující se v rašelinných vodách. Vody s vysokým obsahem organických kyselin přitékají z četných rašelinišť v povodí. Dále se jedná o druhy se širokou ekologickou valencí, kterým nevadí nízké pH. Toto pozorovali Stuchlík a kol. (1997) v Jizerských horách v době dozrívání silné acidifikace. Výsledky této práce ukazují, že nádrž Josefův Důl je od poloviny 90. let v pokročilém stádiu biologického zotavování z acidifikace a spíše než abiotické faktory prostředí již zooplankton ovlivňují biotické parametry jako dostupnost, množství a kvalita potravy, kompetice (soupeření o životní prostor a potravu), predace (vztahy mezi dravci a jejich kořistí) a životní strategie druhů.

Dominantním filtrátorem v nádrži během sezóny 2014 byla perloočka *Ceriodaphnia quadrangula*. Palmer a kol. (2013) řadí tento druh mezi acidotolerantní druhy, které vykazují větší toleranci vůči prostředí se zvýšenými toxickými frakcemi kovů. Je typickou perloočkou dystrofních vod. Fott (1982) popisuje návrat této perloočky do Čertova jezera na začátku 80. let jako do prvního z jezer, která byla od roku 1979 naprosto bez crustaceoplanktonu. Do pelagiálu Černého jezera se navrátila až v roce 1997 (Vrba a kol., 2003). Tato velká perloočka při svém nástupu do ekosystému vytlačí menší a kompetičně méně schopné druhy (Kerfoot a kol., 1985). Výsledkem silného filtračního tlaku těchto perlooček a vyčerpání živin první vlnou namnoženého fytoplanktonu pak přichází v červnu v jezerech fáze čisté vody (Brönmark a Hansson, 1998). Tomu odpovídá průhlednost měřená v nádrži Josefův Důl, která byla v tomto období přes 3 metry. Perloočka *Ceriodaphnia quadrangula* je běžnou potravou planktivorních ryb (Šrámek-Hušek a kol., 1962). S růstem teploty roste i predací tlak ryb zaměřených na tyto velké a

snadno ulovitelné druhy. Podle Bímové (2013) dosahoval druh *Ceriodaphnia quadrangula* v 90. letech na Josefově Dole početnosti až 900 000 ind·m⁻².

V červnu 2014 dosahovala nejvyšších počtů perloočka *Holopedium gibberum*. Tato velká perloočka s rosolovitým obalem těla je dobře chráněná proti rybí predaci a dobře snáší velký rozsah hodnot pH. Podle Šrámka-Huška a kol. (1962) je pro ni optimální prostředí s hodnotami pH mezi 4,5 – 6. V Josefově Dole se vyskytuje teprve od roku 1999. Její prudké snížení početnosti v sezoně 2014 z planktonního společenstva připisují rybí predaci. Koncem jara 2014 představovaly tyto perloočky největší zástupce korýšů v nádrži. Stenson (1973) popisuje ze švédských jezer silný predační tlak lososovitých ryb na tuto perloočku.

Bosmina coregoni je drobná perloočka s nižší filtrační schopností, stejně jako druh *Holopedium gibberum* (Geller a Müller, 1981). Podle Henniga a kol. (1991) si tento malý druh perloočky vybírá malé partikule o velikosti 0,5 – 5 µm v celém vodním sloupci, což ho dělá více tolerantním k namnožení sinic, než ostatní druhy. Během sezóny 2014 se začal druh *Bosmina coregoni* vyskytovat ve větších počtech až od září, kdy už dominovala ve fytoplanktonu sinice rodu *Merismopedia*. Gannon (1975) potvrzuje, že se *Bosmina coregoni* ve Velkých jezerech v USA vyskytuje od konce léta v hloubkách až do 30 m. V eutrofních jezerech Evropy dominuje na jaře a na podzim (Mayers a kol., 1997). Tyto poznatky naprosto odpovídají situaci v Josefově Dole v průběhu roku 2014.

Překvapivým nálezem ve vzorcích byla perloočka *Daphnia longispina* gr. Míra ústupu kyselosti a zotavení z acidifikace již umožnila návrat perloočky, která je velmi citlivá na nízké pH a zvýšené koncentrace toxických frakcí kovů (Webster a kol., 2013). Z toho důvodu se dosud nikdy v nádrži nevyskytla. Studie některých autorů ukazují, že hyne a bývá nahrazena jiným druhem už při pH pod 5,5 (Fott a kol., 2001). V roce 2014 jsem ji ve vzorcích zaznamenal při odběrech v srpnu, říjnu a prosinci. V nádržích Souš a Bedřichov se tento druh vyskytuje od poloviny 90. let. Na Souši díky jejímu pravidelnému vápnění dokonce v zooplanktonu v roce 1996 dominovala, než se stala potravou sivenů (Bímová, 2013).

Po roce 1989 začalo docházet ke zdatnému zlepšení chemismu šumavských jezer, avšak planktonní perloočky na Plešném jezeře zcela chyběly. Kohout a Fott (2003) se zabývali otázkou pravděpodobných preacidifikačních druhů v jezerech a

v rámci jejich projektu byla v roce 2004 perloočka *Daphnia longispina* uměle vysazena do Prášilského jezera, kde se dříve běžně vyskytovala (Kohout a Fott, 2004).

Jediným zástupcem klanonožců v Josefodolské nádrži je v mých výsledcích vznášivka *Eudiaptomus gracilis*. Ve Skandinávii a Skotsku je tento druh považován za acidotolerantní, jelikož se v jezerech vyskytoval po celou dobu acidifikace i v období po ní. Na Šumavě se nevyskytuje (Vrba a kol., 2004). Podle Bímové (2013) se tento druh vznášivky objevil v Josefově Dole až v roce 2010 a dva roky nato již tvořil bohatou populaci (téměř 9000 ind·m⁻²). Winder (2002) uvádí, že v alpských jezerech začíná začátkem léta reprodukce těchto vznášivek a na podzim v populaci převažují dospělí jedinci. Mé výsledky pro tento druh jsou odlišné. Začátkem sezóny převažovala nedospělá stádia vznášivek. Nejvíce dospělců bylo ve vodě přítomno v červenci. V srpnu a září převládla kopepoditová stádia a od října dominovala naupliová stádia (Obr. 10).

Ojedinělé nálezy litorálních a bentických perlooček jako je *Alona affinis*, *Alona quadrangularis*, *Alonella nana* a *Chydorus sphaericus* jsou méně významné, jedná se však veskrze o druhy běžné v kyselých vodách. Například *Alona affinis* je druh tolerující rozpětí pH 3,9 – 9,1 (www.nina.no 1).

Diurnální vertikální migrace

Sluneční svit poskytuje vedle světla pro nádrž klíčový faktor – teplo. To udává rychlost embryonálního a postembryonálního vývoje a reprodukce živočichů (turnover time). Na světle jsou závislé fotosyntetizující organismy, které slouží jako zdroj potravy filtrujícímu zooplanktonu. Právě světelné poměry diverzifikují tuto hlubokou nádrž na světlejší a teplý epilimnion a temný a chladný hypolimnion o velkém objemu. Pro život málo příznivý hypolimnion představuje přes den temné refugium, kde se může zooplankton ukrýt před predací rybami. Je přes 100 let známo, že kvůli vyhnutí se rybí predaci zooplankton opouští na potravu bohatý epilimnion a migruje do hypolimnia (Hays, 2003; Rinke a Petzold, 2008). Při

setmění, když utichá rybí žír, stoupá zooplankton opět vzhůru k hladině, kde je dostatek potravy.

Na Josefově Dole byla koncem července 2014 provedena studie těchto migrací. Výsledky odpovídají předpokladu, že se herbivorní korýši v noci přesouvají za potravou do horních vrstev vody, zatímco během dne se skrývají před predátory.

V roce 1997 Kohout a Fott (2000) prováděli výzkum perlooček rodu *Daphnia* na Prášilském jezeře. Jelikož z odběrů zooplanktonu bylo patrné, že dochází k vertikálním migracím, prozkoumali jezero echolotem. Ten vyloučil přítomnost ryb v jezeře, zato objevil populace dravých klešťanek horských (*Glaenocorisa propinqua*). Stejný druh klešťanek byl autorem objeven i na Josefově Dole, který byl v té době ještě kyselý a bez ryb. Klešťanky zde přes den migrovaly do hloubky 6 – 7 m (Kohout a Fott 2000).

Světelné pasti však v roce 2014 nezachytily klešťanky ani jiného dravce z bezobratlých.

V případě Josefova Dolu je zjevně spouštěčem migrace přítomnost kairomonů rybiho predátora, sivena amerického, který byl do nádrže úspěšně vysazen v roce 1998 a poté ještě dosazován v letech 1999 a 2000. Je víc než pravděpodobné, že lososovité ryby dravé ploštice v nádrži vyhubily.

Protože ryby si potravu vybírají zrakem, zooplankton sestoupením do hlubších vrstev minimalizuje šanci být spatřen a tím zmenšuje i risk predace (Zaret a Suffern, 1976). Takové obranné mechanismy potravy mění chování i u dravce (bezobratlí, ryby, mořští savci), který začne hledat potravu tam, kde doopravdy je (Hays, 2003). Kvůli této skutečnosti vykonávají větší druhy a dospělí jedinci větší amplitudu migrace než juvenilní stádia či malé druhy zooplanktonu (Rinke a Petzoldt, 2008). Z mých výsledků je patrné, že největší migraci za potravou vykazovala perloočka *Ceriodaphnia quadrangula*, která dosahuje velikostí 0,4 – 1,2 mm (www.nina.no 2).

Chování malých nedospělých perlooček druhu *Ceriodaphnia quadrangula* vykazuje jiný trend, než zbytek populace. Při terénním výzkumu pozorovali Johnsen a Jakobsen (1987) i Ringelberg a kol. (1991), že malé neonáty perlooček rodu *Daphnia* zůstávají po celý den i noc v epilimniu. Z Obr. 12 je patrné, že v Josefově Dole zůstávaly neonáty během dne v horních vrstvách, kde se nacházelo největší

množství chlorofylu-*a* (fytoplanktonu). Naopak ve 21 hodin při západu slunce, kdy už probíhala migrace dospělých samic, byly neonáty vytlačeny hlouběji, stejně jako v 1 hodinu v noci. Mnohem více se neonáty zanořily pouze v pravé poledne a v 9 hodin ráno.

Ringelberg (1999) uvádí, že v rámci druhu se často vyskytují i nemigrující jedinci. Na celkovém průběhu migrace na Obr. 13 vidíme, že ve spodních vrstvách zůstává po celých 24 hodin stabilní část populace. Většinou se jedná o dospělé samice. U mnohých z nich jsem pozoroval zásoby tukových kapének, znamená to tedy, že byly dobře živěné a nemusely putovat za potravou do nebezpečného epilimnia.

Drobné perloočky *Bosmina coregoni* byly po celý den rovnoměrně rozmístěny ve svrchních vrstvách vody. Podobně tomu bylo i u vznášivky *Eudiaptomus gracilis*, která se zanořila hlouběji pouze v pravé poledne.

Wataru a Syuhei (1998) pozorovali DVM klanonožců v oligotrofním jezeře Toya (Japonsko). V tomto jezeře do května celá populace buchanky *Cyclops strenuus* vykazovala vertikální migraci. Po ustálení teplotní stratifikace však migrace ustala. Kopepoditová stádia nebyla schopná toto rozvrstvení vody překonat.

Shrnutí

Diplomová práce je detailní studií crustaceoplanktonu hluboké stratifikované nádrže Josefův Důl v Jizerských horách, která se nachází ve stádiu pokročilého zotavení z acidifikace.

V roce 2014 byly prováděny měsíční odběry zooplanktonu z nejhlubšího místa nádrže, a to na vertikálním profilu od hladiny ke dnu. Na podzim byl odebrán také vertikální tah planktonní sítí o velikosti ok 200 μm ode dna k doplnění dlouhodobých dat o zooplanktonu nádrže. Za bezměsíčné letní noci byla provedena studie diurnálních vertikálních migrací zooplanktonu. V letním období byly použity světelné pasti na ověření, že se v nádrži s rybami již nevyskytují bezobratlí predátoři.

Doplnění dlouhodobého záznamu o struktuře korýšů v nádrži Josefův Důl (Bímová 2013) o roky 2013 a 2014 potvrdilo, že po období doznívající silné acidifikace a počátcích biologického zotavování z acidifikace (1996-2000) nastoupilo období dynamických změn v druhovém složení i početnostech korýšů, na kterých se podílelo také vysazení ryb, vztahy mezi organismy a posun klimatických poměrů. Postupně vymizela dravá perloočka *Polyphemus pediculus*, naopak se v posledních letech objevily vznášivka *Eudiaptomus gracilis* a perloočka *Daphnia longispina* gr., které indikují významný ústup kyselosti vody. Zajímavostí zooplanktonu Josefodolské nádrže je dlouhodobě vysoký výskyt perloočky *Holopedium gibberum*.

Zjistil jsem, že sinice rodu *Merismopedia* se vyskytovaly v nádrži po celý rok, ale ve fytoplanktonu zcela převládly až na vrcholu léta a do konce roku byly hlavní součástí fytoplanktonu. V prvních letech výskytu na této nádrži se obvykle masově uplatnily až v zimním období.

Druhové spektrum korýšů a jejich početní zastoupení, původně extrémně chudé, je nyní bohatší a stále se mění. Dynamika těchto změn již pravděpodobně odráží jiné parametry než chemismus – vztahy mezi organismy a posun klimatu.

Hlavními druhy korýšů v nádrži byly perloočky *Ceriodaphnia quadrangula*, *Bosmina coregoni*, *Holopedium gibberum* a vznášivka *Eudiaptomus gracilis*. Jejich počty byly nejvyšší od července až do října a většina jejich populací se při odběrech

kolem poledne vyskytovala v horní části nádrže (do 15 metrů), což odpovídalo oblasti s nejvyšší teplotou vody a nejvyšším množstvím fytoplanktonu.

Všechny druhy korýšů vykazovaly vertikální migrace během dne a noci, s určitými rozdíly mezi některými druhy a věkovými kategoriemi. Zdá se, že část populace druhu *Ceriodaphnia quadrangula* (dospělé samice s tukovými kapénkami) nemigruje a zdržuje se ve spodní části nádrže.

Literatura

- Balatka B., 2009: Horopis Jizerských hor. In: Karpaš R. (ed.), Jizerské hory – o mapách, kamení a vodě. Nakladatelství RK, Liberec. 576 s. ISBN 978-80-87100-08-0
- Brendelberger, 1991: Filter mesh size of cladocerans predicts retention efficiency for bacteria. *Limnol. Oceanogr.* 36: 884-894
- Bímová T., 2013: Struktura zooplanktonu v nádržích Jizerských hor v období vrcholící antropogenní acidifikace a zotavování z acidifikace (1992-2012). Diplomová práce, PřF UK, Praha. 103 s.
- Blomqvist P., 2001: Phytoplankton responses to biomanipulated grazing pressure and nutrient additions – enclosure studies in unlimed and limed Lake Njupfatet, central Sweden. *Environ. Pollut.* 111: 333-348
- Blomqvist P., Olsson H., Olofsson H., Broberg O., 1989: Enclosure experiments with low-dose additions of phosphorus and nitrogen in the acidified Lake Njupfatet, central Sweden. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 6: 611-631
- Borůvka L., Mládková L., Drábek O., Vašát R., 2004: Prostorové rozložení ukazatelů acidifikace na území Jizerských hor. In: Neuhöferová, P. (ed.), Obnova lesních ekosystémů Jizerských hor. KPL FLE ČZU, Praha: 59-70
- Brierley A. S., 2014: Diel vertical migration. *Curr. Biol.* 24 (22): 1074-1076
- Broža V., Bláha J., Vinklát P. D., 2005: Přehradý Čech, Moravy a Slezska. Povodí Labe. Kniha 555, Liberec. 256 s. ISBN 80-86660-11-7
- Brönmark Ch., Hansson N. A., 1998: The biology of lakes and ponds. Oxford University Press, New York. 216 s. ISBN 01-985-4971-7
- Bowman J., 1991: Acid sensitive surface waters in Ireland. The impact of a major new sulphur emission on sensitive surface waters in an unacidified region. Environmental research unit, Dublin. 273 s.
- Březina P., Burda J., Dolák J., Farský K., Hušek J., Mejzrová J., Pavlů L., Pelc F., Švejdová K., Vetešník P., Vlk Z., Vonička P., Vršovský V., 1997: Plán péče CHKO Jizerské hory. CHKO Jizerské hory, Liberec. 131 s.
- Cammarano P., Manca M., 1997: Studies on zooplankton in two acidified high mountain lakes in the Alps. *Hydrobiologia* 356: 97-109
- Čítek J., Svobodová Z., Tesařík J., 1997: Nemoci sladkovodních a akvariálních ryb. Informatorium, Praha. 218 s.

- Dodson S., 1988: The ecological role of chemical stimuli for the zooplankton predator-avoidance behaviour in *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* 33: 1431-1439
- Enright J. T., 1977: Diurnal vertical migration: adaptive significance and timing. Part 1. Selective advantage: a metabolic model. *Limnol. Oceanogr.* 22: 856-872
- Fott J., 1982: Hrozí našim vysokohorským vodám acidifikace? In: Sborník referátů VI. limnologické konference Vodní ekosystémy: funkce – vývoj – ochrana: 285-290
- Fott J., Kohout L., Pražáková M., 2001: Zooplankton šumavských jezer: 130 let změn a perspektivy dalšího vývoje. *Aktuality šumavského výzkumu*, Srní 2.-4. dubna 2001, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk: 58-59
- Forsyth D. J., James M. R., Cryer M., 1990: Alteration of seasonal and diel patterns in vertical migration of zooplankton by *Anabaena* and planktivorous fish. *Arch. Hydrobiol.* 117: 385-404
- Gannon J. E., 1975: Horizontal distribution of crustacean zooplankton along a cross-lake transect in Lake Michigan. *J. Great Lakes Res.* 1 (1): 79-91
- Geller W., 1986: Diurnal vertical migration of zooplankton in a temperate great lake (L. Constance): a starvation avoidance mechanism? *Arch. Hydrobiol.* 74: 1-60
- Geller W., Müller H., 1981: The filtration apparatus of Cladocera: filter mesh-sizes and their implications on food selectivity. *Oecologia* 49: 316-321
- Hays G. C., 2003: A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. *Hydrobiologia* 503: 163-170
- Henning M., Hertel H., Wall H., Kohl J. G., 1991: Strain-specific influence of *Microcystis aeruginosa* on food ingestion and assimilation of some cladocerans and copepods. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 76 (1): 37-45
- Hořická Z., 2005. Okyselování potoků a jezer. In: Bratrych V. a kol. (eds), *Živel voda*. Agentura Koniklec, Praha: 26-29
- Hořická Z., Bímová T., Procházková L., Stuchlík E., Vondrák D., 2013a: Biological recovery of reservoirs in the Jizera Mountains, the Czech Republic, from acidification. In: Skjelkvåle B. L., Wathne B. M., de Wit H., Rogora M. (eds), *Proceedings of the 28th Task Force meeting of the ICP Waters Programme, Verbania Pallanza, Italy, October 8-10, 2012*. NIVA-report LNO 6472-2013, Oslo. ICP Waters report 112/2013: 27-30. ISBN 978-82-577-6207-0
- Hořická Z., Vondrák D., Koza V., Macek M., Rederer L., 2013b: Zooplankton – neviditelní obyvatelé stojatých vod. In: Karpaš, R. (ed.), *Jizerské hory 2 – o rašeliništích, květeně a zvířené*. Nakladatelství RK, Liberec: 283-289. ISBN 978-80-87100-23-3

- Hruška J., Cienciala E., 2002: Dlouhodobá acidifikace a nutriční degradace lesních půd – limitující faktor současného lesnictví. Ministerstvo životního prostředí, Praha. 159 s. ISBN 80-7212-190-1
- Hruška J., Kopáček J., 2005: Kyselý déšť stále s námi – zdroje, mechanismy, účinky, minulost a budoucnost. Edice Planeta, odborný časopis pro životní prostředí. Ministerstvo životního prostředí, Praha: 5-12
- Hruška J., Majer V., 1996: Retence antropogenní síry v půdách: faktor bránící okyselení šumavských povrchových vod. *Silva Gabreta* 1: 143-149
- Hruška J., Majer V., Fottová D. 2006: Vliv kyselé depozice na chemismus povrchových vod v Krkonoších. *Opera Corcontica* 43: 95-110
- Hruška J., Majer V., Krám P., Oulehle F., Kopáček J., 2009: Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy - III. Okyselení potoků a jezer. *Živa*, 4: 189–192
- Hornstrom E., 1999: Long-term phytoplankton changes in acid and limed lakes in Sweden. *Hydrobiologia* 394: 93-102
- Chaloupský J., 1989: Geologie Krkonoš a Jizerských hor. Academia, Praha. 288 s.
- Jensen O. P., Hansson S., Didrikas T., Stockwell J. D., Hrabik T. R., Axenrot T., Kitchell J. F., 2011: Foraging, bioenergetic and predation constraints on diel vertical migration: field observations and modelling of reverse migration by young-of-the-year herring *Clupea harengus*. *J. Fish Biol.* 78: 449-465
- Johnsen G. H., Jakobsen P. J., 1987: The effect of food limitation on vertical migration in *Daphnia longispina*. *Limnol. Oceanogr.* 32: 873-880
- Koza V., Kořínek V., 1985: Adaptability of the filtration screen in *Daphnia*: another answer to the selective pressure of the environment. *Ergeb. Limnol.* 21: 193-198
- Karpaš R. a kol., 2009: Jizerské hory – o mapách, kamení a vodě. Nakladatelství RK, Liberec. 576 s. ISBN 978-80-87100-08-0
- Kerfoot W. C., De Mott W. R., De Angelis D. L., 1985: Interactions among cladocerans: Food limitation and exploitative competition. *Arch. Hydrobiol. – Beih. Ergebn. Limnol.* 21: 431-452
- Kohout L., Fott J., 2000: Diel vertical migration of *Daphnia longispina* (Cladocera) in an acid, fishless lake. *Silva Gabreta* 4: 233-244
- Kohout L., Fott J., 2003: Zotavování zooplanktonu šumavských jezer z acidity v období reverze chemismu a možnosti repatriace klíčových druhů. In: Bitušík P., Novíkmec M. (eds), Proceedings of the 13th conference of Slovak limnological society and Czech limnological society, *Acta facultatis ecologiae* 10 (1): 119-122

- Kohout L., Fott J., 2004: Obnova zooplanktonu Plešného jezera pomocí repatriace dvou klíčových druhů. Aktuality šumavského výzkumu II, Srní 4.-7. října 2004, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk: 172-175
- Komínský J., Žák J., Fediuk F., Bělohradský V., Žák K., Veselovský F., Táborský Z., Jarchovský T., Ondruš P., Gabašová A., Malý K., 2003: Geologická a strukturní charakteristika granitoidů u tunelu v Bedřichově v Jizerských horách. Závěrečná zpráva. Správa úložišť radioaktivních odpadů. 58 s.
- Kopáček J., 1997: Vliv atmosférické depozice na acidifikaci a trofii povrchových vod horských oblastí. Disertační práce, PŘF UK, Praha. 51 s.
- Kopáček J., Hejzlar J., Kaňa J., Norton S. A., Stuchlík E., 2015: Effects of acidic deposition on in-lake phosphorus availability: A lesson from lakes recovering from acidification. *Environ. Sci. Technol.* 49 (5): 2895-2903
- Kremer P., Kremer J. N., 1988: Energetic and behavioral implications of pulsed food availability for zooplankton. *Bull. Mar. Sci.* 43: 797-809
- Křeček J., Hořická Z., 2001: Degradation and recovery of mountain watersheds: the Jizera Mountains, Czech Republic. *Unasylva* 207 (52): 43-49
- Lampert W., 1987: Laboratory studies on zooplankton and cyanobacteria interactions. *New Zeal. J. Mar. Fresh. Res.* 21: 483-490
- Lampert W., 1993: Ultimate causes of diel vertical migration of zooplankton: new evidence for the predator-avoidance hypothesis. *Arch. Hydrobiol. – Beih. Ergebn. Limnol.* 39: 79-88
- Lampert W., Brendelberger H., 1996: Strategies of phenotypic low-food adaption in *Daphnia*: Filter screens, mesh sizes, and appendage beat rates. *Limnol. Oceanogr.* 41: 216-223
- Lampert W., McCauley E., Manly B. F. J., 2003: Trade-offs in the vertical distribution of zooplankton: ideal free distribution with costs? *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 270: 765-773
- Lampert W., Tollrian R., Stibor H., 1994: Chemical induction of defence mechanisms in freshwater animals. *Naturwissenschaften* 81: 375-382
- Larsson P., 1997: Ideal free distribution in *Daphnia*? Are daphnids able to consider both the food patch quality and the position of competitors? *Hydrobiologia* 360: 143-152
- Laws E. A., 2000: Aquatic pollution: an introductory text. John Wiley & Sons, New York. 611 s. ISBN-10: 0471348759

- Leech D., Williamson C., 2001: In situ exposure to ultraviolet radiation alters the depth distribution of *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* 46: 416-420
- Lhotský O., 1963: Vodní režim a vodohospodářský význam Jizerských hor. Severočeské museum, Liberec. 30 s.
- Loose C., Dawidowicz P., 1994: Trade-offs in diel vertical migration by zooplankton: the costs of predator avoidance. *Ecology* 75: 2255-2263
- Mackovčín P., Sedláček M., Kuncová J., 2002: Liberecko. In: Mackovčín, P., Sedláček M. (eds), Chráněná území ČR III. AOPK ČR a EkoCentrum Brno, Praha. 331 s.
- Macháček J., 2001: Chemické signály k sebeobraně perlooček. *Vesmír* 80: 629
- Mauer O., Palátová E., Hadaš P., Vavříček D., 2010: Nová vlna chřadnutí smrků v Krkonoších? *Opera Corcontica* 47: 251-264
- Mayer J., Dokulil M. T., Salbrechter M., Berger M., Posch T., Pfister G., Kirschner A. K. T., Velimirov B., Steitz A., Ulbricht T., 1997: Seasonal successions and trophic relations between phytoplankton, zooplankton, ciliate and bacteria in a hypertrophic shallow lake in Vienna, Austria. *Hydrobiologia* 342/343: 165-174
- McLaren I. A., 1963: Effects of temperature on growth of zooplankton and the adaptive value of vertical migration. *Fish. Res. Board Can.* 20: 685-727
- Meester L. D., 2009: Diel Vertical Migration. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Encyclopedia of Inland Waters*: 651-658
- Menz F. C., Seip H. M., 2004: Acid rain in Europe and the United States. *Environ. Sci. Policy* 7: 253-265
- Nedbalová L., Vrba J., Fott J., Kohout L., Kopáček J., Macek M., Soldán T., 2006: Biological recovery of the Bohemian Forest lakes from acidification. *Biologia, Bratislava* 61: 453-465
- Nevrlý M., 1961: Topografie živých rašelinišť Jizerských hor: metodická pomůcka pro dobrovolné spolupracovníky Severočeského musea a členy kroužku přátel Jizerských hor při Severočeském museu. Severočeské museum, Liberec. 55 s.
- Ohman M. D., Frost B. W., Cohen E. B., 1983: Reverse diel vertical migration: an escape from invertebrate predators. *Science* 220: 1404-1407
- Palmer E., Keller W. B., Yan N. D., 2013: Gauging recovery of zooplankton from historical acid and metal contamination: the influence of temporal changes in restoration targets. *J. Appl. Ecol.* 50: 107-118
- Pelc F., 1999: Program revitalizace imisně zatížených lesních ekosystémů Jizerských hor. Sborník Severočeského musea – Přírodní vědy, Liberec: 5-15.

- Pitter P., 2009: Hydrochemie. VŠCHT, Praha, 592 s. ISBN 978-80-7080-701-9
- Procházková L., Loučková P., Smetanová K., Hořická Z., 2013: Dlouhodobé změny ve složení fytoplanktonu vodárenských nádrží Jizerských hor (Souš, Josefův Důl) v souvislosti s jejich zotavením z acidifikace. In: Říhová Ambrožová, J. (ed.), Sborník konference Vodárenská biologie 2013, Praha, Česká republika, 6.-7.2.2013: 91-95. ISBN 978-80-86832-70-8
- Ringelberg J., 1991: Enhancement of the phototactic reaction in *Daphnia hyalina* by a chemical mediated by juvenile perch (*Perca fluviatilis*). *J. Plankton Res.* 13: 17-25
- Ringelberg J., Flik B. J. G., Lindenaar D., Royackers K., 1991: Diel vertical migration of *Daphnia hyalina* (sensu latiore) in Lake Maarsseveen. Part 1. Aspects of seasonal and daily timing. *Arch. Hydrobiol.* 121: 129-145
- Ringelberg J., 1999: The photobehaviour of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton. *Biol. Rev.* 74 (4): 397-423
- Ringeberg J., van Gool E., 2003: On the combined analysis of proximate and ultimate aspects in diel vertical migration (DVM) research. *Hydrobiologia* 491: 85-90
- Rinke K., Petzold T., 2008: Individual-based simulation of diel vertical migration of *Daphnia*: A synthesis of proximate and ultimate factors. *Limnologia* 38: 269-285
- Rosseland B. O., Eldhuset T. D., Staurness M., 1990: Environmental effects of aluminium. *Environ. Geochem. Health* 12: 17-27
- Rous I., Hudousková I., Karpaš R., Němec L., 2009: Rybníky, přehrady a další vodní díla. In: Karpaš R. (ed.), Jizerské hory – o mapách, kamení a vodě. Nakladatelství RK, Liberec. 576 s. ISBN 978-80-87100-08-0
- Ruther J., Meiners T., Steidle J., 2002: Rich in phenomena-lacking in terms. A classification of kairomones. *Chemoecology* 12: 161-167
- Růžičková J., 1998: Water insect community in streams of Bohemian Forest with different stages of acidification. *Silva Gabreta* 2: 199-210
- Sed'a J., Kolářová K., Petrusek A., Macháček J., 2007: *Daphnia galeata* in the deep hypolimnion: spatial differentiation of a "typical epilimnetic" species. *Hydrobiologia*. 594: 47-57
- Siebeck O., Vail T. L., Williamson C. E., Vetter R., Hessen D., Zagarese H., Little E., Balseiro E., Modenutti B., Seva J., Shumate A., 1994: Impact of UV-B radiation on zooplankton and fish in pelagic freshwater ecosystems. *Arch. Hydrobiol. – Beih. Ergebn. Limnol.* 43: 101-114

- Stenson J., 1973: On predation and *Holopedium gibberum* (Zaddach) distribution. *Limnol. Oceanogr.* 18 (6): 1005-1010
- Stenson J., Svensson J. E., Cronberg G., 1993: Changes and interactions in the pelagic community in acidified lakes in Sweden. *Ambio* 22: 277-282
- Sterner R. W., Hessen D. O., 1994: Algal nutrient limitation and the nutrition of aquatic herbivores. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 25: 1-29
- Stuchlík E., Stuchlíková Z., Fott J., Růžička L., Vrba J., 1985: Vliv kyselých srážek na vody na území Tatranského národního parku. In: *Zborník prác o Tatranskom národnom parku* 26: 173-211
- Stuchlík E., Hořická Z., Prchalová M., Křeček J., Barica J., 1997: Hydrobiological investigation of three acidified reservoirs in the Jizera Mountains, the Czech Republic, during the summer stratification. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2155: 56-64
- Šrámek-Hušek R., Straškraba M., Brtek J., 1962: Fauna ČSR, 16: Lupenonožci – Branchiopoda. ČSAV, Praha. 470 s.
- Vrba J., Kopáček J., Fott J., 2000: Long-term limnological research of the Bohemian Forest lakes and their recent status. *Silva Gabreta* 4: 7-28
- Vrba J., Kopáček J., Fott J., Kohout L., Nedbalová L., Pražáková M., Soldán T., Schaumburg J., 2003: Long-term studies (1871–2000) on acidification and recovery of lakes in the Bohemian Forest (central Europe). *Sci. Total Environ.* 310: 73-85
- Vrba J., Fott J., Kohout L., Kopáček J., 2004: Současné zotavování acidifikovaných jezer na Šumavě. *Aktuality šumavského výzkumu II*, Srní 4.-7. října 2004, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk: 99-103
- Wataru M., Syuhei B., 1998: Diel changes in vertical overlap between *Cyclops strenuus* (Copepoda; Cyclopoida) and its prey in oligotrophic Lake Toya, Hokkaido, Japan. *J. Marine Syst.* 15: 139-148
- Webster N. I., Keller W. B., Ramcharan C. W., 2013: Restoration of zooplankton communities in industrially damaged lakes: Influences of residual metal contamination and the recovery of fish communities. *Restor. Ecol.* 21 (6): 785-792
- Wright R. F., 1983: Acidification of freshwaters in Europe. *Wat. Qual. Bull.* 8: 137-142
- Williamson C. E., Olson O., Lott S., Walker N., Engstrom D. R., Hargreaves B. R., 2001: Ultraviolet radiation and zooplankton community structure following deglaciation in Glacier Bay, Alaska. *Ecology* 82 (6): 1748-1760

Winder M., 2002: Zooplankton ecology in high-mountain lakes. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology. Zürich. 154 s.

Zaret T. M., Suffern J. S., 1976: Vertical migration in zooplankton as predator avoidance mechanism. *Limnol. Oceanogr.* 21: 804-813

Internetové zdroje

AOPK ČR. <http://jizerskehory.ochranaprirody.cz/> (červen 2015)

Plán péče CHKO JH – Plán péče o Chráněnou krajinnou oblast Jizerské hory na období 2011 – 2020, Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky 2010, Správa Chráněné krajinné oblasti Jizerské hory.
<http://jizerskehory.ochranaprirody.cz/ke-stazeni/plany-pece/> (červen 2015)

www.nina.no 1 - Norský institut pro výzkum přírody (srpen 2015).
http://www.nina.no/archive/nina/PppBasePdf/NINA-Infomateriell/2007/krepsdyrfaktaark/walseng_Alona%20affinis.pdf

www.nina.no 2 – Norský institut pro výzkum přírody (srpen 2015).
http://www.nina.no/archive/nina/PppBasePdf/NINA-Infomateriell/2007/krepsdyrfaktaark/walseng_Ceriodaphnia%20quadrangula.pdf

www.pla.cz – oficiální stránky Povodí Labe s. p. (květen 2015).
http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/prehrada_josefuvdul.pdf

Příloha Obrázek 1. Výřez mapy z www.mapy.cz (duben 2015).

Přílohy

Seznam příloh:

- Obrázek 1. Mapa lokality, šipkou vyznačeno místo odběru.
- Obrázek 2. Fotografie nádrže.
- Obrázek 3. Pohled od nádrže na obě hráze.
- Obrázek 4. Pohled z malé hráze na odběrovou věž a velkou hráz.
- Obrázek 5. Návrat skupiny vzorkařů.
- Obrázek 6. Roční průběh teploty v nádrži Josefův Důl, 2014.
- Obrázek 7. Sezónní hodnoty pH. Josefův Důl, 2014.
- Obrázek 8. Fytoplankton v nádrži Josefův Důl v roce 2014.
- Obrázek 9. Suma planktonních korýšů v grafu s teplotou a koncentrací chlorofylu-*a*.
- Obrázek 10. Relativní zastoupení druhů při diurnální vertikální migraci.
- Obrázek 11. DVM neonát perloočky *Ceriodaphnia quadrangula*.
- Obrázek 12. Světelná past.
- Obrázek 13. Umístění světelných pastí – den.
- Obrázek 14. Umístění světelných pastí – noc.



Obrázek 1. Mapa lokality, šipka ukazuje místo odběru. Oranžově je vyznačena hráz



Obrázek 2. Fotografie nádrže.



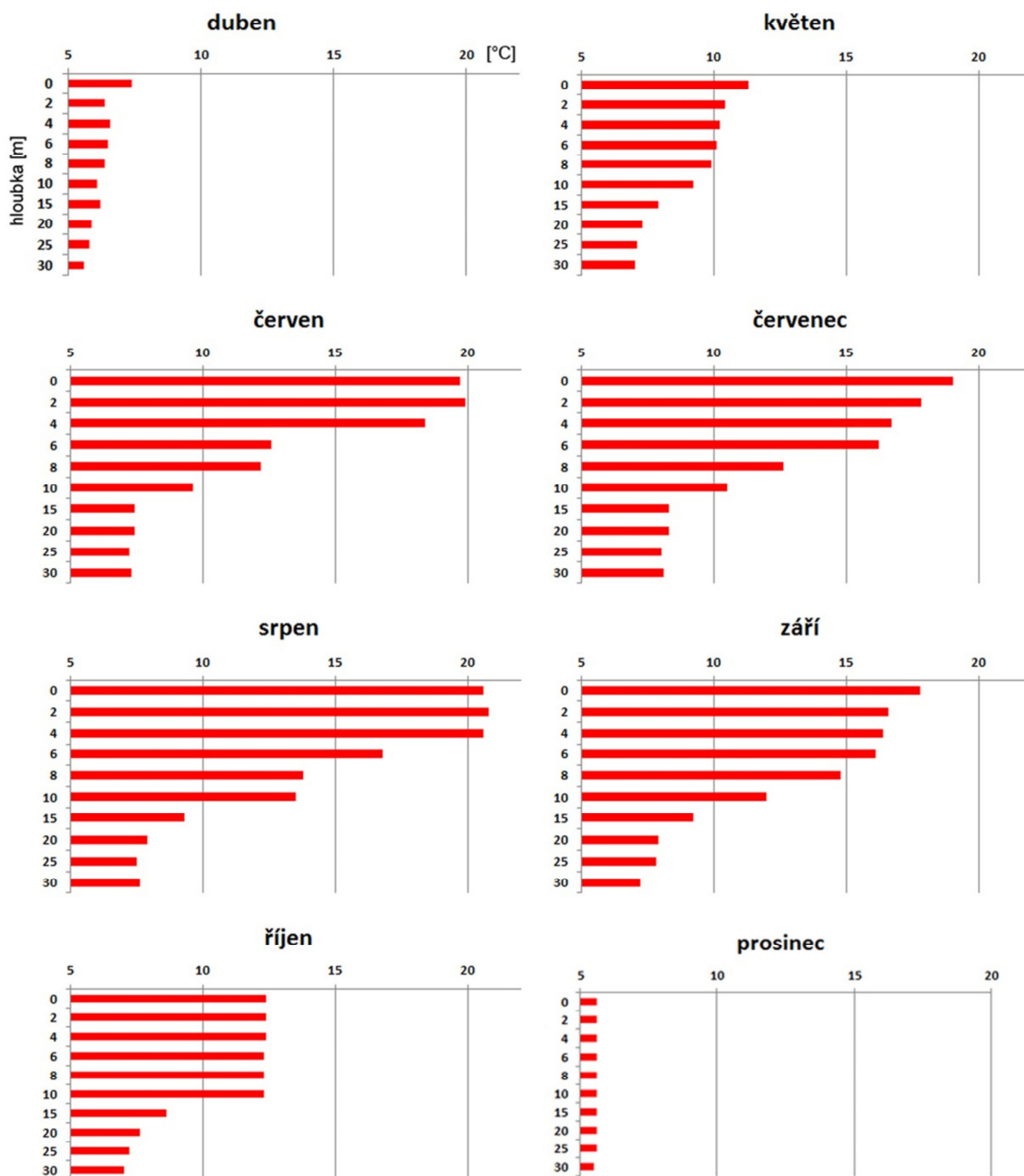
Obrázek 3. Pohled od zátoky na obě hráze.



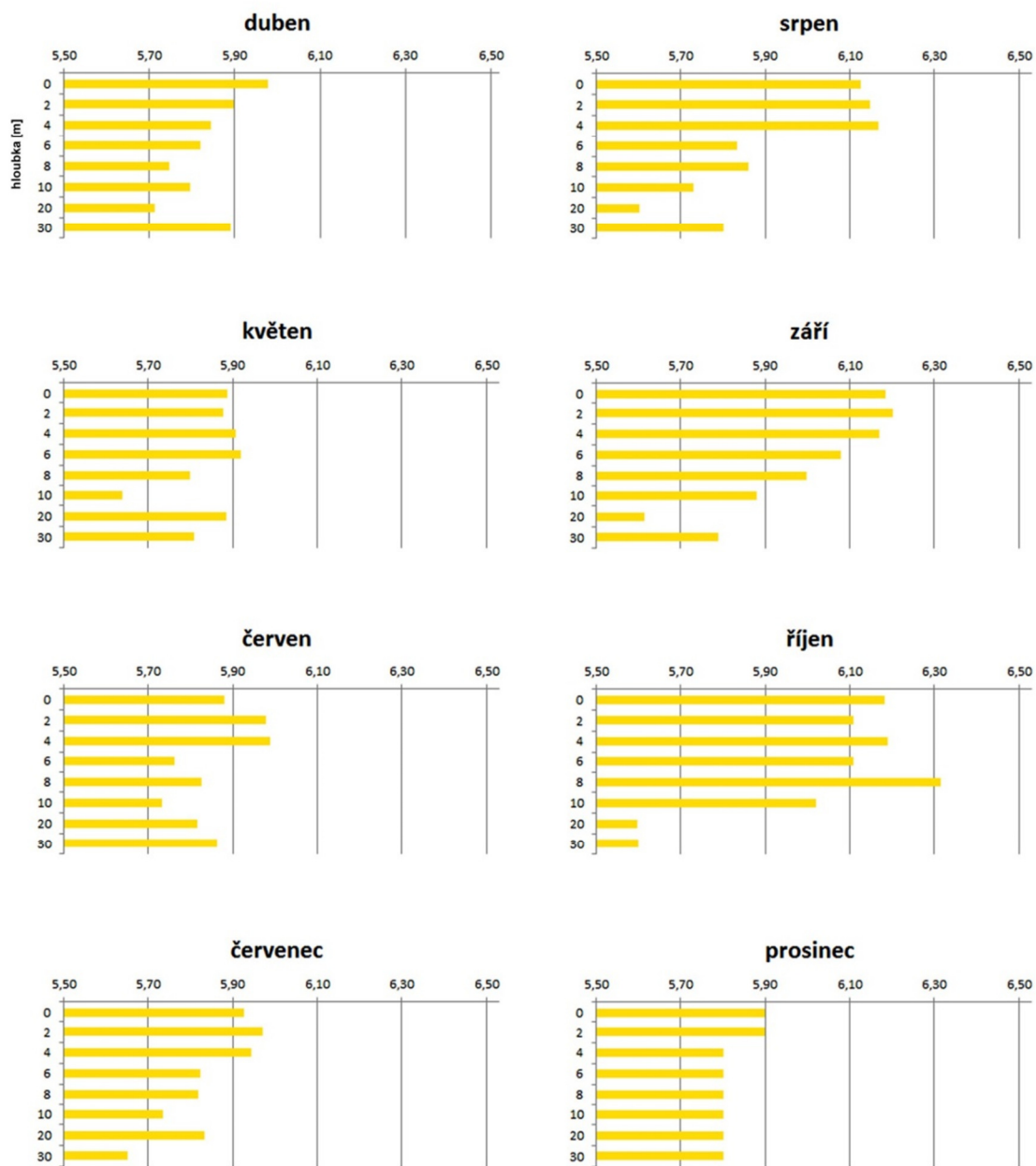
Obrázek 4. Pohled z malé hráze na odběrovou věž a velkou hráz.



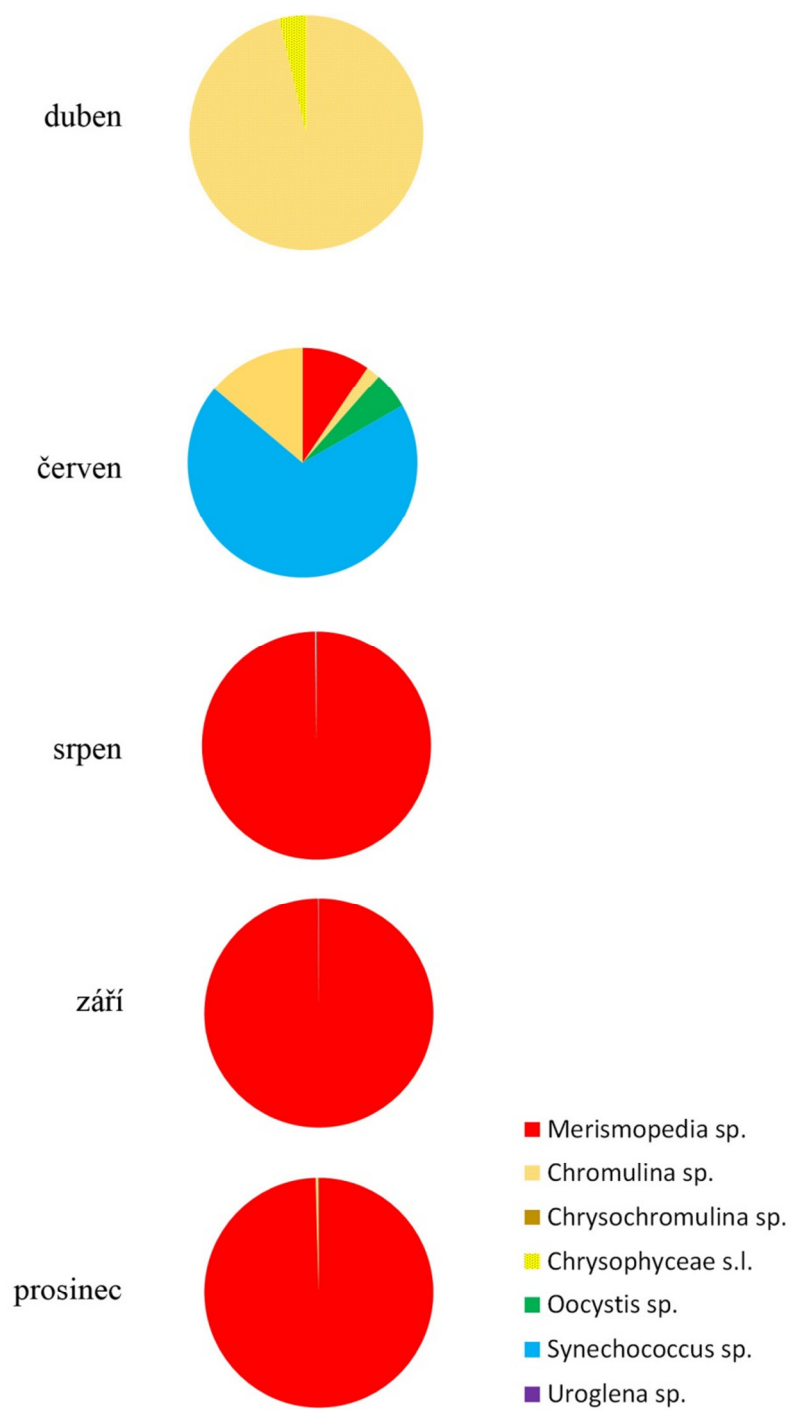
Obrázek 5. Návrat skupiny vzorkařů.



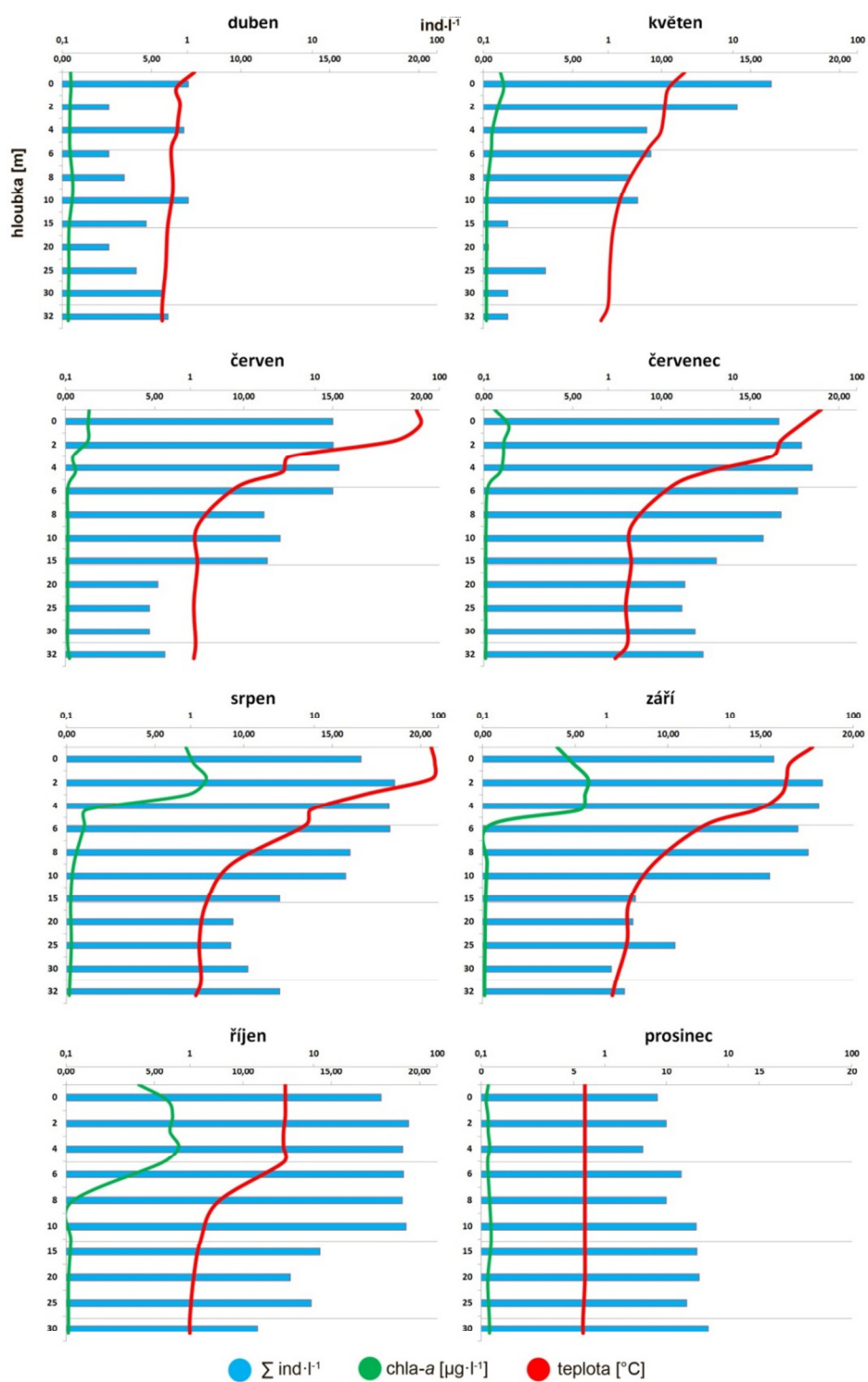
Obrázek 6. Roční průběh teploty v nádrži Josefův Důl, 2014.



Obrázek 7. Sezónní hodnoty pH. Josefův Důl, 2014.



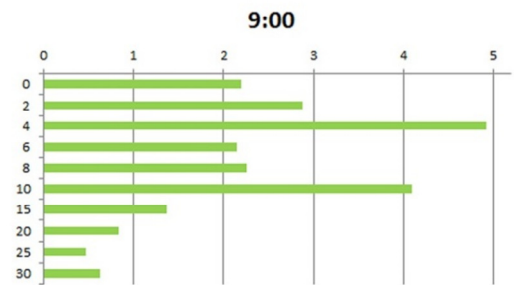
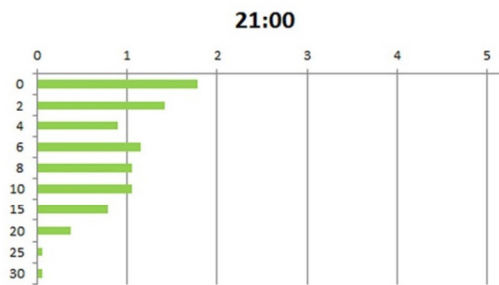
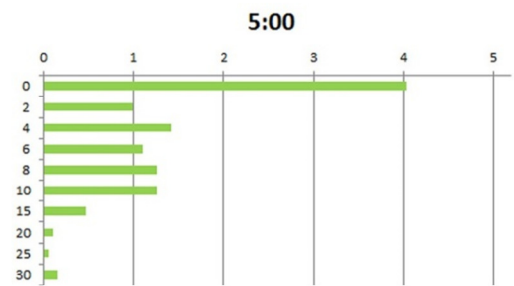
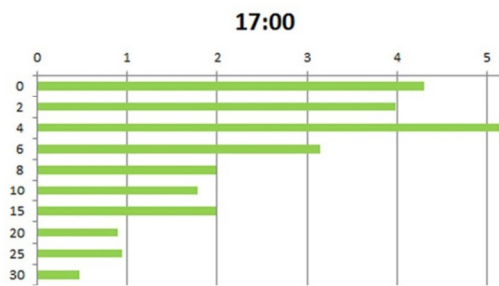
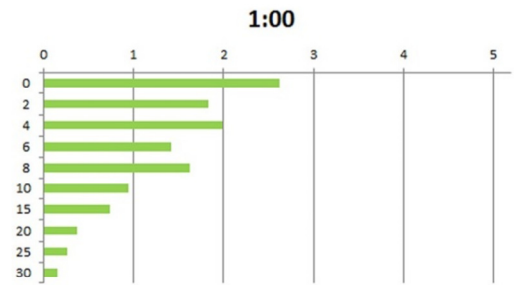
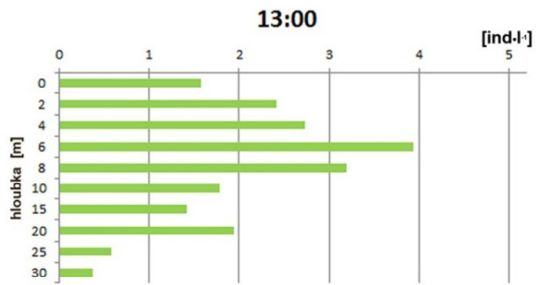
Obrázek 8. Fytoplankton v nádrži Josefův Důl v roce 2014.



Obrázek 9. Suma planktonních koryšů v grafu s teplotou a koncentrací chlorofylu-*a*.



Obrázek 10. Relativní zastoupení druhů při diurnální vertikální migraci.



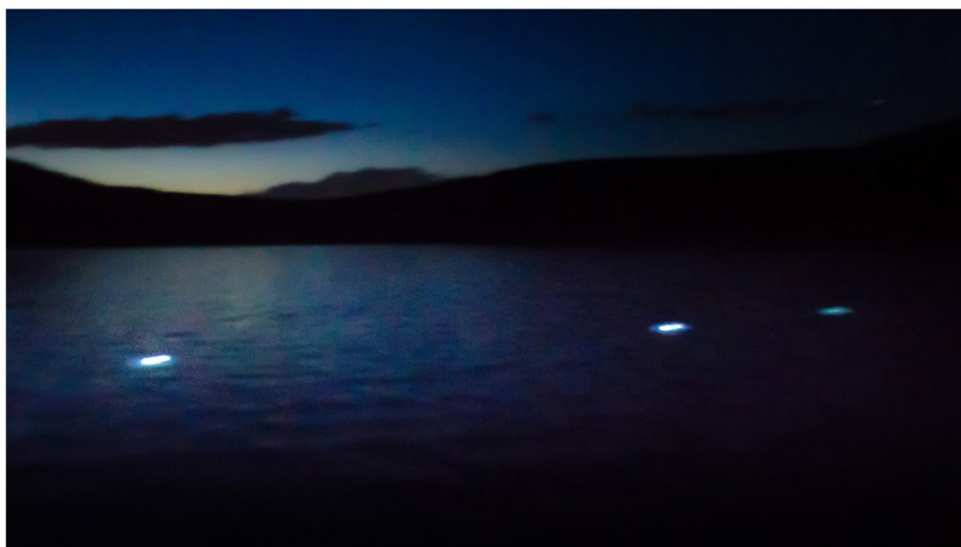
Obrázek 11. DVM neonát perloočky *Ceriodaphnia quadrangula*.



Obrázek 12. Světelná past.



Obrázek 13. Umístění světelných pastí – den.



Obrázek 14. Umístění světelných pastí – noc.