

Prostorová heterogenita nádrží a její důsledky pro kvalitu vody

Studium prostorového rozložení fytoplanktonu ve vodním prostředí přináší cenné poznatky umožňující lepší pochopení procesů v těchto ekosystémech a má význam i pro sledování jakosti vody v nádržích. Výrazné rozdíly v distribuci fytoplanktonu jsou známy např. v podélných profilech přehradních nádrží, ale jak se v poslední době ukazuje, častá mohou být i tzv. podpovrchová maxima chlorofylu. V souvislosti s globální změnou klimatu nabývá celosvětově na významu problematika kvality a dostupnosti vody. Pojem kvalita vody však není snadné univerzálně definovat, protože měřítka pro posuzování kvality vody se mění s vývojem vědeckého poznání a odrážejí i celospolečenský názor na funkci vodních ekosystémů v krajině. Požadavky se mění geograficky i v čase. Obecně lze říci, že kvalitou vody rozumíme ohodnocení jejich fyzikálních, chemických a biologických vlastností z hlediska vhodnosti pro různé druhy využití. Je tedy zřejmé, že jinak se na kvalitu vody budou dívat např. zemědělec, vodohospodář a chemik, nebo mikrobiolog zkoumající fytoplankton. A právě z pohledu „fytoplanktonáře“ bychom se rádi na toto téma podívali i my.

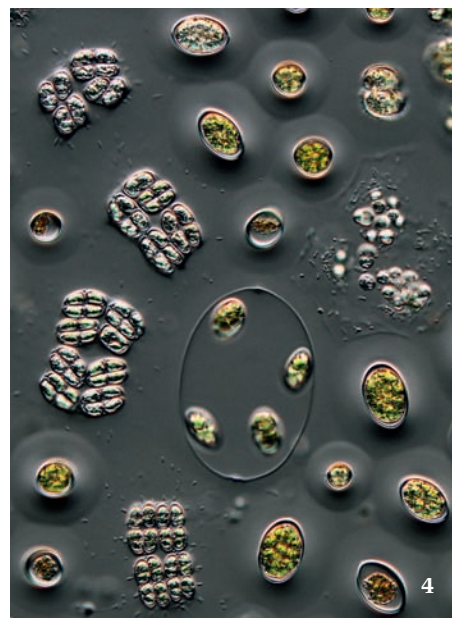
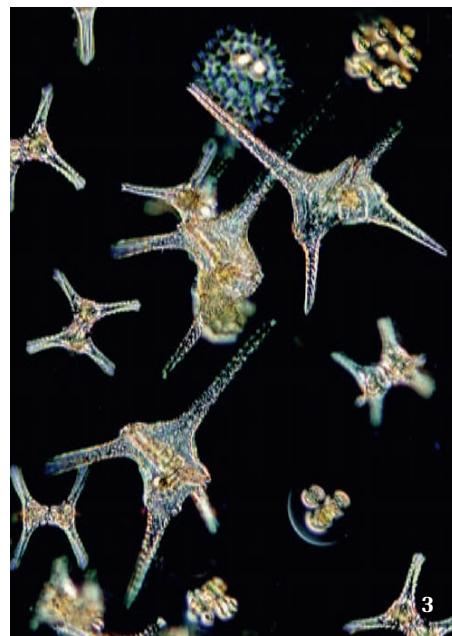
Jak jsme už zmínili, kvalitu vody určuje řada parametrů, které jsou navíc vzájemně provázané a mohou se měnit z roku na rok a také během sezony. Jedním z nejvýznamnějších ukazatelů ovlivňujících kvalitu vody v nádržích je množství a složení fytoplanktonu (ten kvalitu ovlivňuje, ale i reflektuje).

Mluvíme-li o fytoplanktonu, míníme tím společenstvo fotosyntetizujících mikroorganismů vznášejících se ve vodním sloupci. Je tvořen hlavně dvěma skupinami – sinicemi (což jsou fotosyntetizující bakterie produkující kyslík) a řasami (velká skupina eukaryotních organismů). Řasy se dělí do velkého množství dalších více či méně příbuzných skupin. Pro ilustraci nesmírné rozmanitosti fytoplanktonu můžeme jmenovat např. rozsivky, tvořící dvoudílnou složitě ornamentovanou křemitou schránku (obr. 1), estetické krásivky (obr. 2 a na 3. str. obálky), obrněnky, vybavené celulózním pancířem (obr. 3),

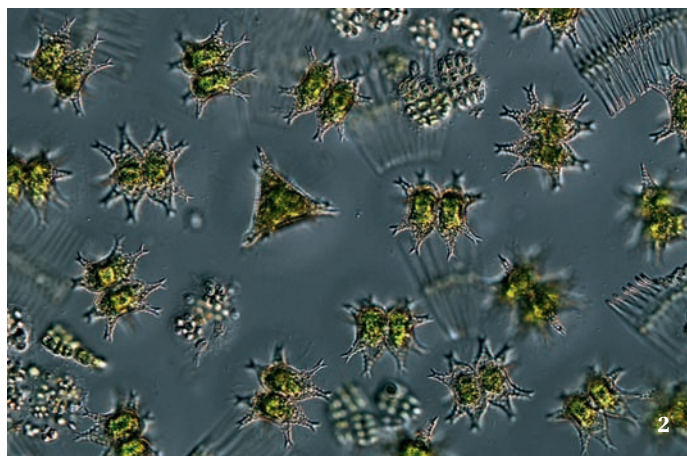
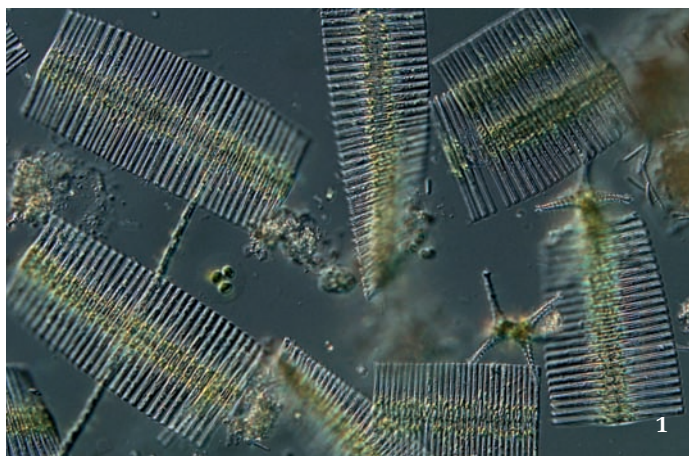
nebo zelené řasy různých tvarů (obr. 4), mezi nimiž se nacházejí nejbližší příbuzní suchozemských rostlin.

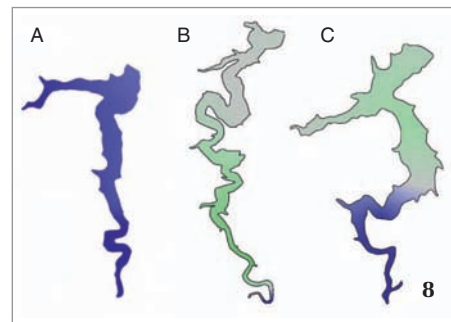
Společnou vlastností všech skupin fytoplanktonu je schopnost fotosyntetizovat, tedy za pomoci světla přeměňovat anorganický uhlík na organické látky, přičemž se spotřebovává oxid uhličitý a uvolňuje kyslík. Při fotosyntéze probíhají na membránách složitě fotochemické děje za pomoci fotosyntetických barviv – tím základem u všech skupin fytoplanktonu je chlorofyl *a*. Protože koncentrace chlorofylu *a* je zpravidla úměrná množství fytoplanktonu ve vodě a jelikož se dá poměrně rychle a snadno stanovit, používá se společně s dalšími parametry k hodnocení kvality povrchových vod.

Prostorová distribuce sinic a řas ve vodě bývá velmi různorodá, protože ani vodní prostředí není homogenní a existují zde velké rozdíly ve fyzikálních (teplota, světlo; blíže také v Živě 2022, 3: LXXVII–LXXX,



1 Rozsivka *Fragilaria crotonensis* – běžný druh našich nádrží, vytvářející charakteristické žebříčkovité kolonie
2 Běžný zástupce planktonních krásivky – rohaté buňky rodu *Staurostrum*
3 Nápadná obrněnka rodu trojrožec *Ceratium hirundinella* – velké buňky s typickými dlouhými výběžky (rohy)
4 Směs koloniálních zelených řas *Oocystis marssonii* a *Willea vilhelmii*





a 4: CVII–CX) i chemických parametrech (hlavně v gradientech živin – pro fytoplankton jsou z rozpuštěných látek nejzásadnější fosfor a dusík). Všechny tyto parametry se mění v různých časových měřítkách – minutách, hodinách, denních a sezonních cyklech, v rámci dlouhodobých trendů včetně globálních změn. Fytoplankton tuto heterogenitu odráží a na změny v podmínkách prostředí díky své krátké generační době citlivě reaguje.

Velmi nápadným projevem nerovnoměrného horizontálního rozložení fytoplanktonu je nahromadění sinicového vodního květu na určitém místě nádrže, většinou u břehu. Příčinou bývá nejčastěji vítr. Jako dobře zdokumentovaný příklad může posloužit jihočeský rybník Dehtář (obr. 5), kde v r. 2019 proběhlo několik detailních měření. Dehtář je 10. největší rybník v České republice, ležící asi 15 km na západ od Českých Budějovic (více na str. 243–248). Během jediného červencového dne došlo vlivem větru nejen k hromadění fytoplanktonu na návětrné straně rybníka, ale také k výrazným rozdílům v teplotě vody a koncentraci rozpuštěného kyslíku podél rybníka. Během slunečného dne vítr způsobil v tomto relativně hlubokém rybníce přesun prohřátých povrchových vodních mas po směru větru, čímž došlo k cirkulaci podobné dopravníkovému pásu a chladnější a anoxická voda (bez kyslíku) u dna se pohybovala opačným směrem. Výsledkem byl nejen výrazný rozdíl teplot v se-

vero–jižní ose rybníka, vycházející zhruba na 4 °C, ale i velmi dramatický rozdíl v koncentracích rozpuštěného kyslíku: 3 mg/l na severu a 24 mg/l na jihu, tedy řádový rozdíl! Večer, kdy se vítr uklidnil, se tyto rozdíly začaly postupně snižovat. K takovému působení větru jsou samozřejmě náchylnější lokality v relativně otevřené krajině, jako jsou často právě rybníky nebo nádrže typu Lipno, tedy rozsáhlejší vodní plochy se širokou hladinou.

V menší míře vítr působí v úzkých kaňonovitých nádržích typu Orlík a Římov. Neznamená to však, že by v nich byl fytoplankton rozložen stejnoměrně. Naopak, prostorová heterogenita fytoplanktonu často může být velmi výrazná, jen příčina bývá jiná. Představíme-li si typickou kaňonovitou nádrž vzniklou přehrazením říčního údolí, je zřejmé, že má v jednom směru výrazně protáhlý tvar a vyznačuje se charakteristickým podélným gradientem hloubky s maximem u hráze. Díky tomuto tvaru se zde mohou vyvinout podélné gradienty fyzikálních, chemických i biologických podmínek prostředí, na které potom reagují nejrůznější skupiny vodních organismů včetně fytoplanktonu.

Podélné gradienty v nádržích

Na vznik a trvání gradientů v nádrži má vliv mnoho parametrů (např. počasí, morfologie nádrže – její tvar, délka, doba zdržení vody) a jejich vzájemné kombinace. Naprosto zásadním činitelem je přítok do

nádrže. Záleží na jeho teplotě, průtoku (ovlivňujícím dobu zdržení) i koncentraci přinášených živin; bývá nejdůležitějším zdrojem živin pro růst fytoplanktonu. Teplota vody v přítoku určuje, kam se bude přitékající voda zanořovat. Představme si přehradní nádrž v létě, kdy bývá fytoplanktonu nejvíce. Voda v ní nemá stejnou teplotu v celém vodním sloupci, ale u hladiny je míchaná vrstva teplé vody (epilimnion), směrem do hloubky metalimnion s termoklinou, kde se teplota skokově mění, a následuje spodní vrstva s velmi nízkou teplotou vody (hypolimnion, blíže také Živa 2022, 2: XLV–XLVII). Fytoplankton se zpravidla nachází v horní vrstvě, kde je dostatek světla pro fotosyntézu (viz dále). Pokud má přítok stejnou teplotu jako voda u hladiny nádrže, může fytoplankton využít přinášené živiny pro svůj rozvoj. Je-li naopak chladnější, přítoková voda se řadí do spodní nemíchané vrstvy a živiny nejsou pro fytoplankton přímo dostupné.

Díky podélným rozdílům v podmínkách prostředí se dá typická přehradní nádrž rozdělit do tří částí. Horní, vstupní část (nejdále proti proudu) je nejvíce ovlivněna přítokem, vyznačuje se silnějším prouděním vody a často větším zákalem, způsobeným přinášeným sestonem (živými i neživými mikroskopickými částicemi), než dolní části nádrže. Koncentrace živin je tu nejvyšší. Ve střední části, často zvané přechodná zóna, již bývá efekt proudění zanedbatelný. Dostatek světla v kombinaci s dostatečnými koncentracemi živin vedou k tomu, že zde zpravidla dochází k největšímu rozvoji fytoplanktonu. Pro část nádrže nacházející se u hráze (často se nazývá jezerní část, protože je nejpodobnější přirozeným jezerům) jsou pak typické nejnižší koncentrace živin.

Tato postupná změna podmínek v podélném profilu nádrže (podélný gradient) je hezkou ukázkou samočisticích procesů ve vodě. Samočisticí procesy si můžeme

5 Rybník Dehtář poblíž Českých Budějovic – desátý největší rybník v České republice

6 Horní část jihočeské vodní nádrže Římov s patrným sinicovým vodním květem (říjen 2021)

7 Vodárenská nádrž Klíčava, obklopená lesy Lánské obory (Středočeský kraj)

8 Příklad podélného rozmístění fytoplanktonu ve vodárenských nádržích Klíčava (A), Římov (B) a Žlutice (C; září 2020). Intenzita zelené barvy znázorňuje množství fytoplanktonu. Rozměry nádrží nejsou ve vzájemném měřítku.

9 Vodní nádrž Orlík – masivní vodní květ sinic na soutoku Vltavy a Otavy pod hradem Zvíkov (září 2020)

představit jako schopnost vodního ekosystému eliminovat znečištění. Důležitou roli v nich zastávají jak fyzikální procesy, např. sedimentace nerozpuštěných látek nebo odplavování usazenin, tak děje chemické – různé srážecí a neutralizační reakce, oxidačně-redukční procesy. Největší podíl na samočištění vod má však biologická složka. Organické látky přinášené přítokem slouží jako zdroj energie a sloučenin pro různé mikroorganismy (hlavně bakterie a houby), dostupné živiny jsou zabudovány do organické hmoty a následně alespoň částečně odstraněny z koloběhu (sedimentací, akumulací v dlouhověkých konzumentech). Tento samočisticí systém je velmi efektivní a zpravidla dokáže odstranit přírodní znečištění vody. Jako příklad můžeme uvést vodárenskou nádrž Římov (obr. 6) v jižních Čechách, která slouží jako zdroj pitné vody pro jihočeský region a podélné gradienty mívá dobře vyvinuté. Koncentrace živin (hlavně fosforu) u hráze, odkud se odebírá voda pro úpravnu pitné vody, může být i desetinašobně nižší než u přítoku, což názorně ukazuje účinnost přírodních samočisticích procesů.

Gradienty nemusejí být v nádrži vyvinuty vždy, což vybízí k otázce, zda i v takovém případě samočisticí procesy fungují, či nikoli. Obě odpovědi jsou možné. Pokud je přítok neznečištěný, přináší málo živin a organických látek, budou gradienty velmi slabé nebo žádné. Zde můžeme zmínit např. vodárenskou nádrž Klíčava (obr. 7) nedaleko hradu Křivoklát, která zásobuje pitnou vodou Kladno a okolí. Zejména v letech s nízkými přítoky v ní nejsou gradienty příliš vyvinuté, ale neznamená to, že by tam samočisticí procesy neprobíhaly, jen je povodí této nádrže bez výrazných zdrojů znečištění. V jiných případech může absence gradientů naopak znamenat i to, že samočisticí procesy přestávají fungovat. K takovým extrémním případům patří povodně. Ty představují výrazný impulz a velký přísun živin a často mají za následek úplné zrušení gradientů, které byly v nádrži před povodní. Mohou také transportovat biomasu fytoplanktonu z vyšších částí k hrázi, což má za následek prudké zhoršení kvality vody v její jezerní části. V souvislosti s globální změnou klimatu se často mluví o zvýšení četnosti extrémních jevů, včetně povodní. Zvýšená frekvence takových událostí může významně ovlivnit samočisticí procesy v nádržích a tím i kvalitu zdrojů vody.



Prostorové rozložení fytoplanktonu

Na základě sledování řady českých přehradních nádrží můžeme prostorové rozložení fytoplanktonu obecně shrnout do tří charakteristických scénářů (obr. 8). V prvním případě chybí jakýkoli gradient, nebo je jen velmi slabý. Jde o situaci typickou hlavně pro zimní období, kdy nejsou obecně gradienty v nádržích příliš vyvinuté a množství fytoplanktonu bývá navíc nízké. Tuto situaci ale nezřídka pozorujeme např. na již zmiňované Klíčavě (obr. 8A). Druhá varianta odpovídá gradientu s narůstajícím množstvím fytoplanktonu od přítoku k hrázi (obr. 8C). Toto rozmístění může být např. důsledkem posunu biomasy fytoplanktonu ze střední části nádrže k hrázi vlivem vysokého přítoku. Třetím a velmi častým scénářem je pak ideálně vyvinutý podélný profil (obr. 8B), u něž nacházíme nejvíce fytoplanktonu zpravidla v přechodné zóně, pak už jeho množství klesá. Často se pak i liší složení fytoplanktonu v přechodné zóně nádrže a u hráze, přičemž se v horních částech nádrže vyskytují sinice, z nichž některé produkují toxiny ovlivňující kvalitu vody pro zpracování na pitnou, i třeba rekreační využití atd., zatímco u hráze žijí neškodné řasy. Maximum fytoplanktonu v horních částech dobře vidíme na příkladu naší největší přehrady Orlík (obr. 9). Každoročním jevem jsou zde zákazy koupání kvůli rozvoji fytoplanktonu a zhoršené kvalitě vody. Tyto problémy nastávají hlavně u přítoků a ve středním úseku přehrady, v dolní části bývá situace lepší. Příčinou zhoršení jakosti vody je nepřekvapivě zatížení živinami. S nadsázkou se dá říct, že veškerá odpadní voda z celých jižních Čech nakonec skončí v Orlíku (viz také článek na str. 273–276). Jde o problém, který nemá snadné řešení, protože žádná nádrž není izolovaná, ale odráží stav svého povodí. Případná účinná opatření ke zlepšení by tak musela zahrnovat celé povodí Orlíku, a to by samozřejmě vyžadovalo mnoho úsilí a finančních prostředků. Praktická rada vyplývající ze studia heterogenity fytoplanktonu by tedy pro návštěvníky nejen Orlíku mohla být, koupejte se raději v dol-

ních částech nádrže. Šance na čistší vodu je tam větší než nahoře, kde hrozí vyšší riziko snížené kvality vody kvůli nadměrnému rozvoji fytoplanktonu.

Již bylo zmíněno, že fytoplankton je tvořen fotosyntetickými organismy, které ke svému růstu a rozmnožování potřebují světlo. Protože intenzita světla ve vodě s rostoucí hloubkou ubývá, můžeme ve vodním prostředí pozorovat i výraznou vertikální heterogenitu v distribuci fytoplanktonu – ten se snaží být tam, kde má dostatek světla. Fytoplankton můžeme teoreticky rozdělit podle hustoty do tří skupin – lehčí než voda (některé sinice), těžší než voda (např. rozsivky s křemitou schránkou) a se stejnou hustotou jako voda (pikoplankton). Každá skupina má jiné strategie a schopnosti, jak zůstat v osvětlené vrstvě. Sinice se často ve velkém množství hromadí u hladiny díky unikátní schopnosti regulovat vztlak a aktivně tak ovlivňovat svou pozici ve vodním sloupci. Slouží jim k tomu zvláštní struktury uvnitř buněk, které na průřezu připomínají včelí plást. Nazývají se aerotopy, jsou naplněné směsí plynů rozpuštěných ve vodě a nadlehčují tak buňky. Jejich množství může buňka aktivně měnit. Během dne se drží blízko hladiny, kde je dostatek světla, umožňující intenzivní fotosyntézu. Vlivem narůstající koncentrace fotosyntetických produktů v buňce dochází ke snížení počtu aerotopů, zvýšení hustoty buněk a sinice postupně klesají do nižších vrstev. Během noci, kdy fotosyntéza neprobíhá, obnoví svůj vztlak a opět stoupají k hladině. Tato schopnost představuje velkou evoluční výhodu, protože zajišťuje přístup ke světlu i k živinám nacházejícím se ve větších hloubkách, ale ke svému fungování vyžaduje stabilní podmínky se stálou horní prohrátou vrstvou vody. Intenzivní míchání vody tuto jejich schopnost výrazně narušuje.

Na míchání vody větrem naopak spoléhají rozsivky (obr. 1), které jsou těžší než voda, a pokud je vodní sloupec nemíchá, postupně nezadržitelně klesají až do hloubek, kde už nemají dostatek světla pro růst a rozmnožování.

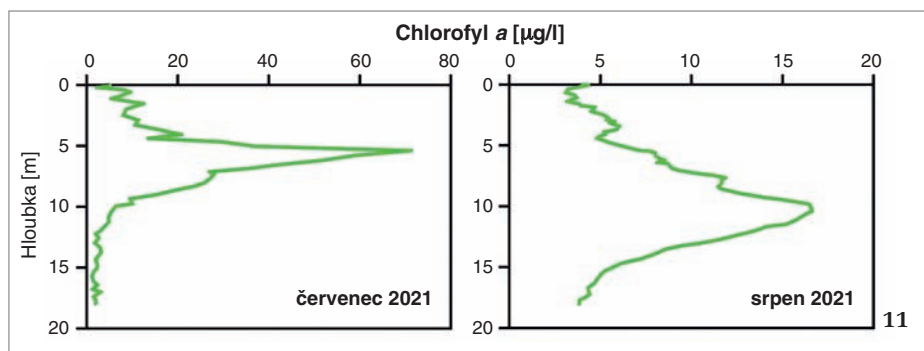
Zajímavým fenoménem spojeným s vertikálním rozmístěním fytoplanktonu je existence tzv. podpovrchových maxim chlorofylu. Fytoplankton se nemusí hromadit jen u hladiny, ale může vytvářet maxima i v určité hloubce pod míchanou vrstvou. Tento jev byl dříve znám z čistých hlubokých jezer a mořských ekosystémů a byl považován spíše za vzácný. Až v poslední době s rozvojem moderních monitorovacích metod se ukazuje, že je spíše běžný, společný teplotně stratifikovaným vodním prostředím. Podpovrchová maxima mohou vznikat řadou procesů – např. pasivní sedimentací buněk, rychlým růstem a dělením buněk v hloubce v důsledku zvýšeného přístupu živin z hlubších vrstev, selektivní konzumací zooplanktonem nebo aktivní migrací organismů (sinic a pohyblivých bičíkoviců).

Sledování vodárenských nádrží v ČR ukázalo, že i ve zdejších podmínkách jde o běžný jev, především v letním období. Ve více než polovině našich měření na vodárenských nádržích jsme tato maxima objevili. Jako příklad může sloužit nádrž Landštejn (obr. 10), která leží v okrese Jindřichův Hradec v oblasti zvané Česká Kanada. Podpovrchové maximum fytoplanktonu zde bylo v posledních letech nalezeno v 85 % provedených měření. Průměrně se maxima vyskytovala v hloubce 5,6 m a koncentrace chlorofylu *a* (odpovídající množství fytoplanktonu) v maximu byla průměrně 3,6krát vyšší než u hladiny. Zajímavým jevem je také různé složení fytoplanktonu u hladiny a v podpovrchovém maximu. Nejčastěji tvořily maxima zelenivky z rodu *Goniostomum*, jejichž výskyt v našich nádržích je velmi neobvyklý a bližší objasnění přítomnosti ve fytoplanktonu vodárenské nádrže Landštejn by stálo za podrobnější studií. Velmi často tvořily dominantu i rozsivky a méně často pak velké obrněnky (trojrožec *Ceratium hirundinella*, obr. 3). U ostatních námi sledovaných nádrží se dominantní druhy u hladiny a v maximu zpravidla nelišily.

Podpovrchová maxima fytoplanktonu mohou samozřejmě negativně ovlivnit jakost vody pro vodárenské účely, zejména pokud se takové maximum vyskytuje v hloubce, ze které se odebírá tzv. surová voda pro úpravnu pitné vody. Situaci lze ilustrovat stavem zaznamenaným na Landštejně v létě 2021 (obr. 11). Koncentrace chlorofylu *a* u hladiny byla nízká a odpovídala dobré kvalitě vody, zatímco v surové vodě vstupující do úpravy byla koncentrace téměř 10krát vyšší, což indikovalo zhoršenou kvalitu a bylo třeba zvýšit frekvenci čištění filtrů na úpravně.

Při standardním limnologickém průzkumu, který tradičně zahrnuje pouze hladinový vzorek, nebývají podpovrchová maxima vůbec zachycena. S velkou pravděpodobností je neodhalí ani rutinní měření průhlednosti Secchiho deskou (standardní metoda zjišťování průhlednosti vody), protože se mohou vyskytovat hlouběji, než je naměřená průhlednost vody.

Narážíme zde na širší problém týkající se prostorové heterogenity fytoplanktonu, a sice že její výzkum bývá obtížný a časově náročný. Dříve se prostorová škála nebrala v úvahu vůbec, nebo jen velmi zřídka. A i dnes, kdy přibývá povědomí



10 Vodárenská vodní nádrž Landštejn v okrese Jindřichův Hradec. Snímky P. Znachora

11 Vertikální profily koncentrace chlorofylu *a* (měřítka množství fytoplanktonu) měřené ponornou fluorescenční sondou ve vodní nádrži Landštejn v červenci a srpnu 2021. Podpovrchové maximum bylo tvořeno rozsivkami. Orig. P. Rychtecký a P. Znachor

o tom, že znalost prostorového rozložení fytoplanktonu je důležitá pro lepší pochopení fungování vodních ekosystémů a může mít i praktické důsledky pro posouzení kvality vody a její využití, se často při výzkumu a monitoringu našich nádrží nebere v úvahu.

Technologický pokrok naštěstí dává naději, že se výzkum prostorového rozmístění fytoplanktonu usnadní. Dostupnější jsou boje s automatickými přístroji či multiparametrické a fluorescenční ponorné sondy, umožňující rychlé proměření celého vertikálního profilu nádrže a tím i detekci např. podpovrchových maxim přímo na místě. Stále je ale třeba lokalitu navštívit a provést měření v několika místech nádrže, což v případě velkých nebo vzdálených vodních ploch může být časově i logisticky náročné. Pro většinu laboratoří jsou zatím hůdkou budoucnosti moderní plně automatické sondy jako třeba YSI EccoMapper, což je v podstatě autonomní podvodní dron osazený řadou senzorů. Po předchozím naprogramování je schopen relativně samostatně zmapovat a proměřit celou nádrž a získat tak lepší představu o její celkové prostorové heterogenitě. Velký rozvoj zažívá rovněž dálkový průzkum

Země z vesmíru. Řada družic (např. Sentinel 2) je vybavena přístroji schopnými zaznamenat data o koncentraci chlorofylu *a* a tím zprostředkovat také o kvalitě povrchové vody. Vzhledem k charakteristice šíření světelného záření vodou se zatím nedají tímto způsobem spolehlivě zaznamenat podpovrchová maxima fytoplanktonu. I přes další nedostatky, zahrnující nemožnost získat data z dní s nevhodnými meteorologickými podmínkami a ne vždy dokonalé pokrytí žádané části povrchu Země, se bude tento výzkum nepochybně velmi rychle rozvíjet, zvláště pokud se dále zvýší prostorové rozlišení těchto družicových údajů. Velkými výhodami dálkového průzkumu je rychlost vyhodnocení i zmapování rozsáhlého území najednou, včetně informací o jinak nepřístupných vodních plochách. Údaje se dají získat i zpětně z historických snímků a hodnotit tak dlouhodobé trendy. Lze tedy doufat, že nastíněný technologický pokrok umožní věnovat fenoménu prostorového rozmístění fytoplanktonu a jeho důsledkům pro kvalitu vody větší pozornost.

Článek vznikl díky podpoře projektu financovaného z Evropského fondu pro regionální rozvoj a Evropského sociálního fondu (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007417), programu Voda pro život – Strategie AV21 Akademie věd ČR a projektu Grantové agentury ČR (22-33245S).

Seznam použité literatury uvádíme na webové stránce Živy.