

ACTA HYGIENICA
 EPIDEMIOLOGICA
 ET MICROBIOLOGICA
 3/2021



Využití metod dálkového průzkumu Země pro detekci a monitoring koupacích míst v České republice

Filip Kothan

Lenka Mayerová

Petr Pumann

Dana Baudišová

Tereza Pouzarová

Martina Myšáková

Václava Maťašovská

Lucie Jašíková

Tomáš Fojtík

Státní zdravotní ústav

ISSN 1804-9613

Využití metod dálkového průzkumu Země pro detekci a monitoring koupacích míst v České republice

Abstrakt: Toto monotematické číslo časopisu vzniklo jako jeden z výsledků projektu TJ02000091 „Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu a kvality koupacích míst v České republice“. Jsou v něm shrnuty výsledky terénních šetření vod ke koupání dosažených v rámci projektu. Dále je ukázáno, jak lze využít volně dostupná data z družic Sentinel 2 při monitorování vod ke koupání. Pravděpodobně největším přínosem dat z družic Sentinel 2 je schopnost rychle odhalit nehomogenní rozložení některých ukazatelů kvality vody (především množství fytoplanktonu) na větších nádržích. Na problém nehomogenního rozložení jsou pak zaměřeny i výsledky získané pomocí terénních šetření.

Klíčová slova: voda ke koupání, monitorování, dálkový průzkum země, Sentinel 2, fytoplankton, Česká republika

Use of remote sensing methods for identification and monitoring of bathing waters in the Czech Republic

Summary: This monothematic issue has been prepared as one of the results of the project TJ02000091 „Use of remote sensing methods for monitoring the status and quality of bathing waters in the Czech Republic“. Summarised are the results of field monitoring of bathing water achieved within the project. Further, it is shown how to use free accessible data from the Sentinel 2 satellite for bathing water monitoring. The most suitable contribution of the Sentinel 2 data is its capability to identify non-homogenous distribution of some water quality parameters (phytoplankton quantity) in large reservoirs. The results obtained from field monitoring within the project are focused on the problem of non-homogenous distribution as well.

Key words: bathing water, monitoring, remote sensing, Sentinel 2, phytoplankton, Czech Republic

Doporučená citace: Kothan F, Mayerová L, Pumann P, Baudišová D, Pouzarová T, Myšáková M, Maťašovská V, Jašíková L, Fojtík T. Využití metod dálkového průzkumu země pro detekci a monitoring koupacích míst v České republice. Acta Hyg Epidemiol Microbiol. 2021;(3):1-36.

© Státní zdravotní ústav 2021

Žádná část časopisu nesmí být reprodukována tiskem, fotografickou cestou, počítačovými soubory dat nebo jinými způsoby bez předchozího písemného svolení vydavatele.

Redakční rada:

Prof. MUDr. Vladimír Bencko, DrSc., Ústav hygieny a epidemiologie 1. LF UK

RNDr. František Rettich, Centrum epidemiologie a mikrobiologie, Státní zdravotní ústav

MUDr. Jaroslav Volf, Oddělení pracovního a preventivního lékařství, FN Ostrava

Mgr. Jana Veselá, Středisko vědeckých informací, Státní zdravotní ústav

Adresa redakce:

Státní zdravotní ústav, redakce časopisu AHM, Šrobárova 49/48, 100 00 Praha 10, telefon: 267082288, e-mail: vaclava.novakova@szu.cz

Publikováno 31. 8. 2021

ACTA HYGIENICA
EPIDEMIOLOGICA
ET MICROBIOLOGICA

Využití metod dálkového průzkumu Země pro detekci a monitoring koupacích míst v České republice

Mgr. Filip Kothan¹, Ing. Lenka Mayerová, Ph.D. ¹, Mgr. Petr Pumann¹,
RNDr. Dana Baudišová, Ph.D. ¹, Tereza Pouzarová¹, Ing. Martina Myšáková¹,
Ing. Bc. Václava Maťašovská², Mgr. Lucie Jašíková, Ph.D. ², Ing. Tomáš Fojtík²

¹Státní zdravotní ústav, Centrum zdraví a životního prostředí, Národní referenční centrum pro pitnou vodu, Praha

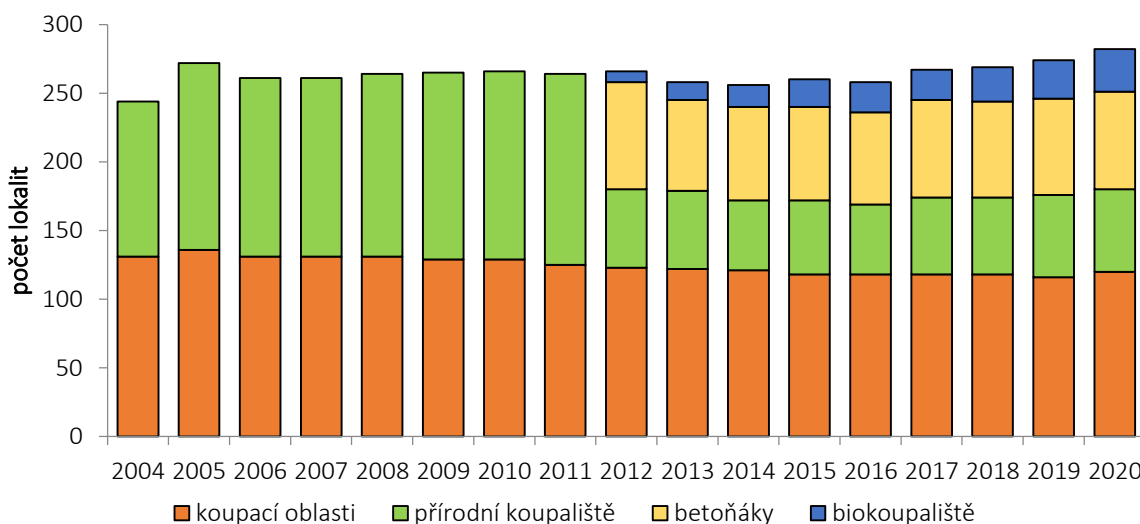
²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha

Text tohoto čísla časopisu AHEM byl připraven v rámci projektu Technologické agentury ČR TJ02000091 „Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu a kvality koupacích míst v České republice“ v programu Zeta.

Úvod

Sledování koupacích vod podle platné legislativy představuje kompromis mezi tím, co by bylo vhodné pro skutečný obrázek o kvalitě vody, a tím, co je technicky možné a finančně únosné. V některých případech se kvalita vody mění výrazně rychleji, než je možné postihnout při sledování s četností jedenkrát týdně. To je až na výjimky nejvyšší četnost, se kterou se v současnosti koupací vody sledují. Stejně jako proměnlivost v čase může představovat problém značná prostorová heterogenita. Tu lze z části pokrýt vhodným výběrem míst odběru či vhodnými technikami vzorkování. Zvyšování počtu odběrových míst však zvyšuje finanční i časovou náročnost vzorkování. Je jasné, že při konvenčním pozemním monitorování, tak jak je v současnosti prováděno, se budou vyskytovat situace, kdy hodnocení kvality vody nebude odpovídat skutečnosti, na kterou koupající se lidé u vody narazí. Jakékoli doplňující informace, které můžou pomoci tento stav vylepšit, jsou pochopitelně velmi žádoucí.

Koupání v přírodě se děje nejen na místech, která jsou k tomu oficiálně určena, ale i na velkém počtu dalších lokalit. V České republice se dlouhodobě pohybuje počet sledovaných přírodních koupacích vod kolem 280 (obr. 1). O tom, kolik je nesledovaných lokalit, na nichž se lidé alespoň občas koupou, neexistují přesné údaje. O těchto lokalitách většinou nejsou k dispozici vůbec žádné informace o kvalitě vody. Například v mobilní aplikaci projektu *Swimplaces*, která je postupně doplňována uživateli, je v současné době uvedeno zhruba 1400 různých nádrží a tekoucích vod (1). Odečteme-li od nich necelých tři sta oficiálně sledovaných lokalit, vychází počet těch nesledovaných na více než tisíc. Ovšem jen část z nich je využívána ke koupání v míře, která by neměla zcela uniknout pozornosti kompetentních institucí (orgánů ochrany veřejného zdraví, vodoprávních úřadů, místních samospráv). Pokud se na některých z těchto lokalit nějaké sledování provádí, je to obvykle z jiného důvodu než kvůli koupání, a proto je poměrně obtížné využít získaná data pro hodnocení toho, zda je voda vhodná ke koupání. I zde by se nástroj, který by přinesl alespoň nějaké informace o kvalitě vody, velmi hodil.



Obr. 1. Počet sledovaných přírodních vod ke koupání v České republice v letech 2004–2020.

Zdroj dat: IS PiVo.

Technický pokrok s sebou přináší různé možnosti, jak snížit nedostatky, které současné monitorování kvality koupacích vod má. V první řadě se může jednat o rychlejší a přesnější metody terénních a laboratorních rozborů, kam např. patří stanovení sinic a fytoplanktonu pomocí fluorescenčních metod (2), použití molekulárně biologických metod pro stanovení mikrobiálního znečištění (3, 4) nebo původců cercáriové dermatitidy (5). Vhodnější jsou pochopitelně metody, které poskytují výsledky rychle, nejlépe v reálném čase. Ideální by byl samozřejmě i výhled do budoucnosti a možnost předpovědět, jak se bude situace vyvíjet v řádu dnů až týdnů. Ani to již není utopie. V Nizozemí předpověď výskytu sinic na vodách ke koupání na následující dva týdny již provádějí několik let (6). Využití nových metod v současné době brání jejich vyšší náklady, z části v některých případech technická náročnost či nedostupnost a pro některé metody také to, že je nezmiňuje legislativa.

Mezi nové technické postupy využitelné pro monitorování vod ke koupání nepochybně patří také metody dálkového průzkumu Země (DPZ). Na rozdíl od většiny nových metod nekladou na koncového uživatele, s výjimkou počítače a připojení na internet, žádné další požadavky na přístrojové vybavení a materiální náklady, což z nich činí velmi lákavou možnost k rozšíření aktuálně používaných metod k monitorování vod ke koupání. To byla také hlavní snaha v projektu Technologické agentury ČR „Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu a kvality koupacích míst v České republice“ (TJ02000091), který byl řešen v letech 2019 až 2021. K monitorování vod ke koupání byla v tomto projektu využita volně dostupná data z družic Sentinel 2, která mají vysoké prostorové rozlišení (v některých pásmech až 10 m) a jsou dostupná s dostatečnou četností. Cílem projektu bylo pomocí kombinace dat z dálkového průzkumu Země (DPZ) a pozemního šetření, za využití relevantních metod a nástrojů, identifikovat rozsah a intenzitu znečištění (především rozvoje řas a sinic) vod využívaných ke koupání.

Hlavní výhodou metod DPZ ve srovnání s pozemním monitorováním je možnost rozpoznat nehomogenní distribuci některých ukazatelů ve větším prostorovém měřítku (v rámci dostatečně velkých nádrží). Nehomogenní distribuce je určitě jedním ze závažných metodických problémů, se kterými se monitorování vod ke koupání potýká. Proto se jím v této publikaci zabýváme nejen na datech z družic Sentinel 2, ale také na výsledcích, které byly naměřeny při pozemních šetřeních (především v rámci našeho projektu).

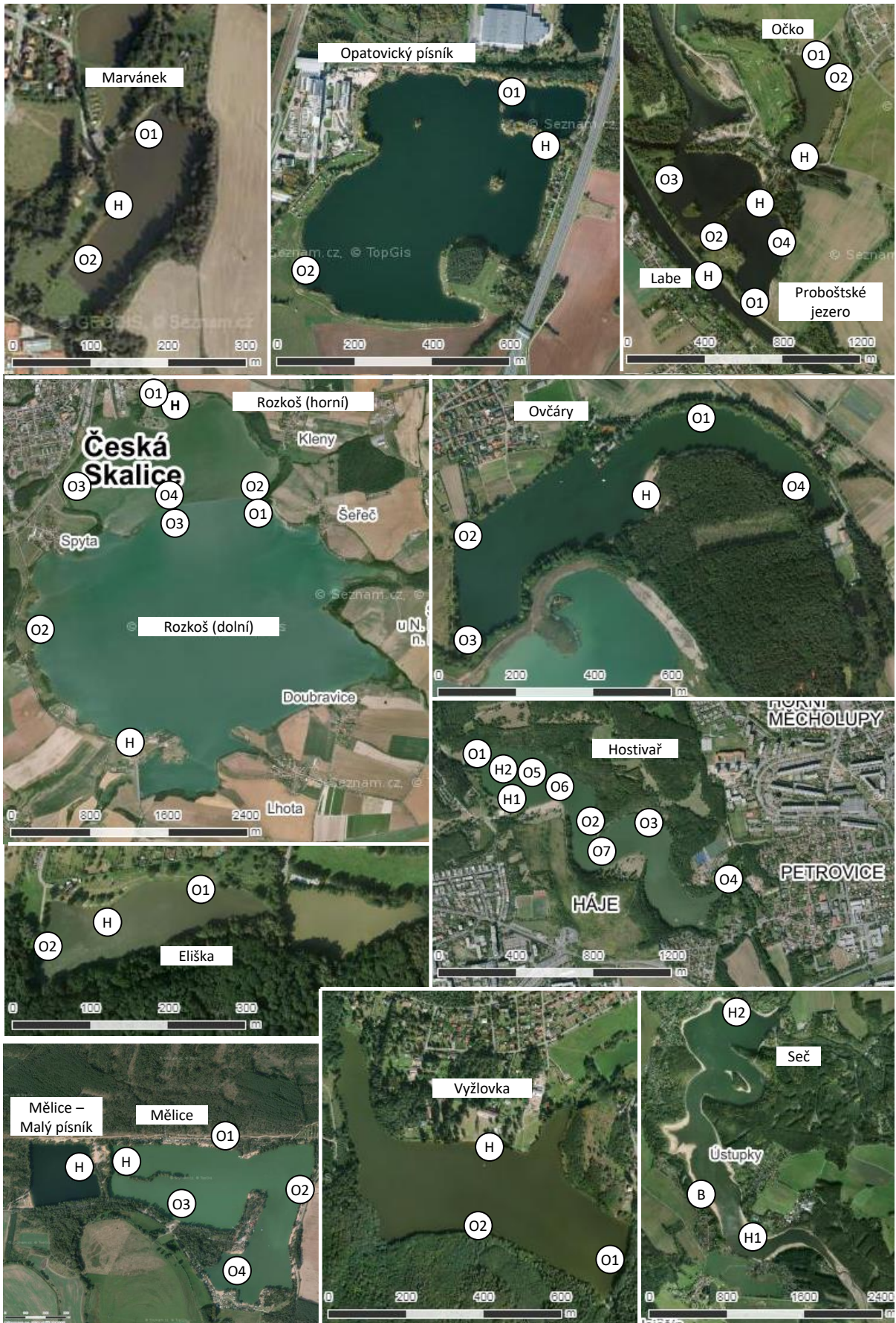
Metody využívané v projektu

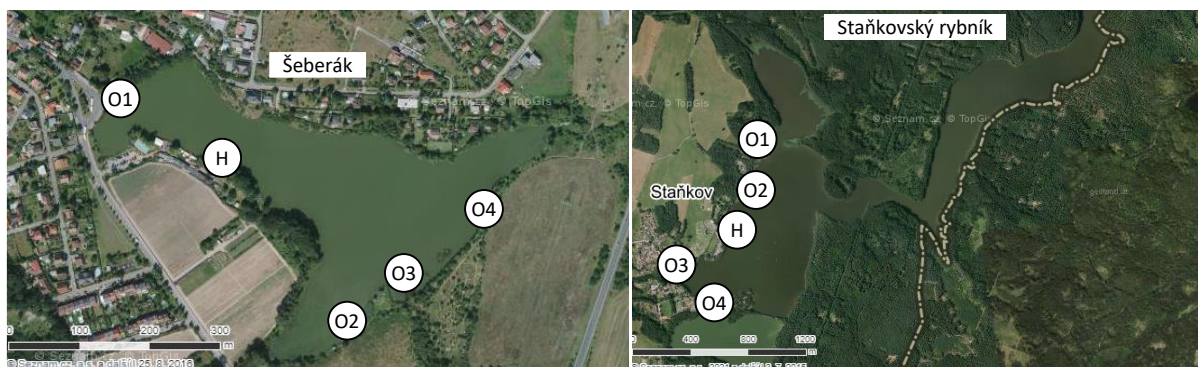
Lokality

V období června až začátku října 2019 bylo vzorkováno čtrnáct nádrží a jedno místo na větší řece (Labe) v Praze a ve Středočeském, Pardubickém, Královehradeckém kraji a Jihočeském kraji. S výjimkou dvou lokalit (Očko u Staré Boleslavi, Labe pod Starou Boleslaví) se jednalo o nádrže hojně využívané ke koupání. V devíti případech to byly oficiálně sledované lokality (tabulka 1). Byly vybrány typově různé nádrže (nádrže po těžbě písku a štěrkopísku, přehradní nádrže, rybníky), lišící se velikostně (od malých jako je rybník Eliška v Praze – Horních Počernicích, až po velké jako jsou Seč nebo Rozkoš) i oživením fytoplanktonem (od nádrží s velmi nízkým oživením, jako je Opatovický písník nebo Mělice, až po nádrže s pravidelně se vyskytujícími vodními květy, jako jsou horní nádrž Rozkoš, Seč nebo Hostivař). V úvahu byla brána nejen kvantita, ale i předpokládané složení fytoplanktonu.

Tabulka 1. Seznam lokalit zařazených do studie, jejich pozice, rozdělení podle typu, velikosti a jejich zařazení na seznam koupacích vod podle § 6g zákona 258/2000 Sb. (včetně počtu míst odběru)

Lokalita	Typ	Výměra (km ²)	Seznam koupacích vod	Oficiální místa odběru	Rok 2019		Rok 2020	
					počet míst odběru	počet odběrů	počet míst odběru	počet odběrů
Očko	písník	0,11	ne	x	3	4	1	3
Ovčáry	písník	0,17	ne	x	5	4	2	3
Proboštské jezero	písník	0,27	ano	1	4	4	5	3
Opatovický písník	písník	0,31	ano	1	3	4	x	x
Mělice	písník	0,43	ano	1	5	4	5	3
Mělice – Malý písník	písník	0,10	ne	x	1	4	1	3
Eliška	nádrž	0,02	ne	x	3	4	3	3
Marvánek	nádrž	0,02	ne	x	3	4	x	x
Vyžlovka	nádrž	0,20	ano	1	3	4	x	x
Hostivař	nádrž	0,35	ano	1	9	7	8	4
Seč	nádrž	1,62	ano	3	3	4	x	x
Rozkoš (horní)	nádrž	8,95	do 2018	dříve 1	4	4	5	3
Rozkoš (dolní)			ano	1	3	4	3	3
Šeberák	nádrž	0,08	ano	1	x	x	5	4
Labe (Stará Boleslav)	řeka	x	ne	x	1	4	1	3
Staňkovský rybník	nádrž	2,72	ano	1	5	2	5	2





Obr. 2. Pozice odběrových míst na modelových lokalitách.

Zdroj: *Mapy.cz*, © *Seznam.cz, a.s. 2021, upraveno.*

Odběry a terénní šetření

Lokality měly vždy jedno hlavní odběrové místo (označené na obr. 2 písmenem H). Místo H bylo na oficiálně sledovaných lokalitách totožné s místem odběru provozovatele či krajské hygienické stanice (s výjimkou Opatovického písníku). Na hlavním odběrovém místě byly z horizontu 0–30 cm (standardní odběr pro koupací vody) Andělovou tyčí odebírány vzorky pro stanovení chlorofylu-a, zákalu, fluorometrické stanovení fytoplanktonu a mikroskopický rozbor. V souladu s postupem ČSN 75 7717 byl vytvořen směsný vzorek z několika dílčích vzorků (zpravidla z pěti) z okruhu několika metrů, kde hloubka dosahovala minimálně 1 m. Pro vytvoření představy o přítomnosti a složení větších zástupců fytoplanktonu (především sinic) byl odebírán vzorek s použitím planktonní sítě s oky o průměru 20 μm . Odběry vzorků z horizontu 0–10 cm (těsně pod hladinou) byly využity pro fluorometrické stanovení fytoplanktonu a zákalu. Současně byla stanovena průhlednost vody, přítomnost vodního květu a další přímo pozorovatelné ukazatele kvality koupacích vod a změřena teplota v obou horizontech odběru.

Kromě odběrových míst (H) byl vytipován i různý počet vedlejších odběrových míst (O) podle plochy modelové lokality. Jejich počet je patrný z tabulky 1. Vzhledem ke zkušenostem z roku 2019 byl v roce 2020 počet odběrových míst u nádrží s malou prostorovou heterogenitou zredukován (Očko, Ovčáry), na druhou stranu u míst s velkou prostorovou heterogenitou byl počet odběrových míst zvýšen (horní nádrž Rozkoš, Proboštská jezera). Na těch byly vzorky odebírány pouze z horizontu těsně pod hladinou. Odběry byly prováděny vstupem do vody, z mola, v některých případech z lodi. V případě vzorků odebíraných těsně pod hladinou byla na některých místech k odběru použita pětimetrová tyč s připevněnou plastovou kádinkou (obr. 3).

Na některých místech byly odebrány také vzorky pro mikrobiologický rozbor. Jednalo se buď o lokality nezařazené do seznamu vod ke koupání (o nichž nejsou k dispozici data v IS PiVo), nebo o lokality, o nichž bylo známo, že jsou mikrobiálně znečištěné (Mělice, Staňkovský rybník).



Obr. 3. Odběr pomocí odběrové tyče z horizontu 0 – 10 cm.

Zdroj: archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu

Laboratorní analýzy

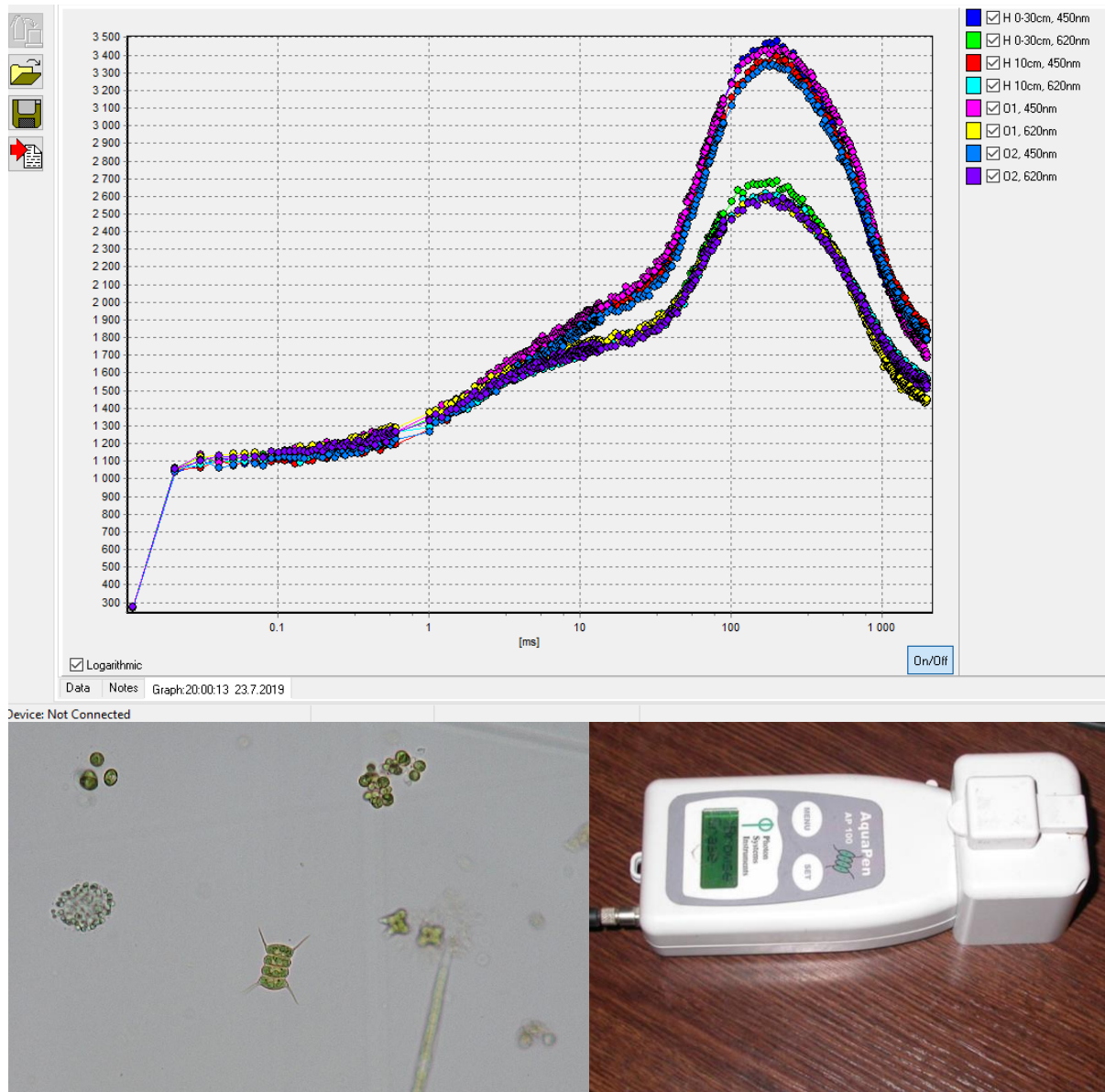
Ke kvantifikaci fytoplanktonu byly využity výsledky získané pomocí fluorometru AquaPen AP100 (firma PSI), který měří odezvu vzorků excitovaných při dvou vlnových délkách (450 nm a 620 nm – možnost rozlišit řasy a sinice, i když to má některé metodické problémy). Před změřením byla kvjeta se vzorkem ponechána alespoň 30 sekund v temnu (v přístroji). Prováděli jsme stanovení okamžité fluorescence (Ft) při 450 nm a 620 nm a také protokolu OJIP při obou vlnových délkách. Pro navázání na družicová data byly nakonec využity výsledky získané pomocí protokolu OJIP (obr. 4), který byl ve srovnání s okamžitou fluorescencí výrazně robustnější a citlivější. Jako hodnota charakterizující kvantitu přítomných řas a sinic byl využit součet hodnot Fixed area pro 450 nm a 620 nm z protokolu OJIP. Fluorescenční analýzy byly vždy prováděny po návratu do laboratoře v den odběru.

Chlorofyl-a byl stanoven pomocí standardní metody ČSN ISO 10260. Filtrace a extrakce vzorků pro stanovení chlorofylu-a byly vždy prováděny po návratu do laboratoře v den odběru, měření na spektrofotometru pak následující den.

Mikroskopický rozbor byl prováděn kvalitativně i kvantitativně v souladu s ČSN 75 7717 (stanovení sinic) a ČSN 75 7712 (stanovení biosestonu). Kvalitativní rozbor byl prováděn na živém i fixovaném vzorku, kvantitativní pouze na vzorku fixovaném Lugolovým roztokem (úprava dle Utermohla).

Stanovení zákalu bylo prováděno ve všech vzorcích přístrojem HACH 2100P obvykle v den návratu do laboratoře.

Pro stanovení *E. coli* byla použita metoda MPN dle ČSN EN ISO 9308-2. Pro stanovení intestinálních enterokoků byla použita metoda podle normy ČSN EN ISO 7899-2. Pro identifikaci jednotlivých druhů enterokoků byla v některých případech použita metoda MALDI-TOF (7).



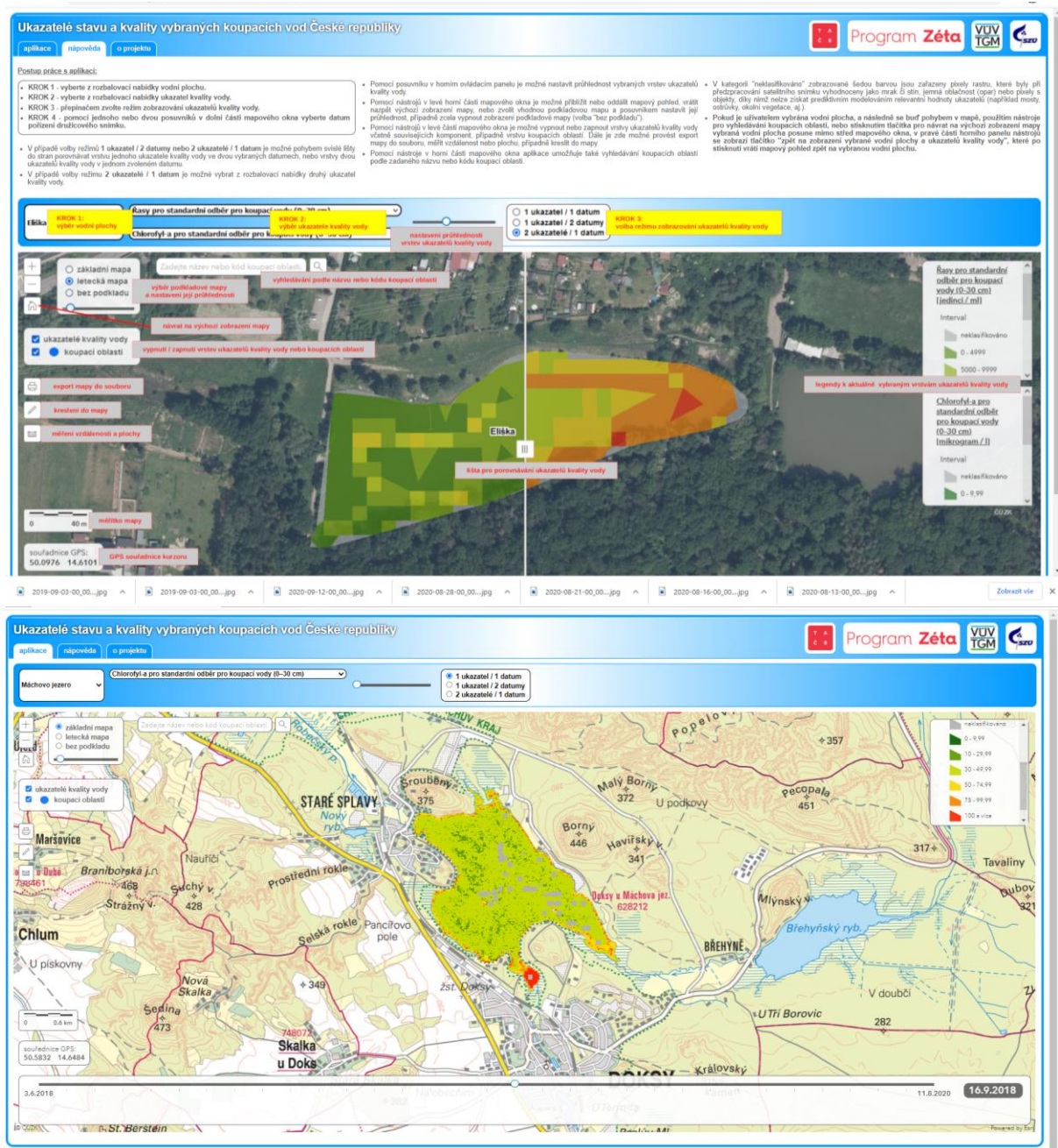
Obr. 4. Fluorimetr AquaPen AP100 a ukázka mikroskopického obrazu a křivky OJIP na příkladu vzorku z Vyžlovky ze dne 23. 7. 2019.

Zdroj: archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu

Metody dálkového průzkumu Země (DPZ)

V DPZ lze využívat mnoho datových zdrojů a k jejich zpracování je možno používat mnoho různých metod. Zájemce o obecné informace odkazujeme na jiné výstupy vzniklé v tomto projektu (8, 9). V těchto volně dostupných publikacích jsou rovněž detailně popsány postupy využití v našem projektu, proto je na tomto místě zmíníme pouze telegraficky. Pracovali jsme výhradně s daty z družic Sentinel 2. Tyto družice jsou vybaveny senzorem *MultiSpectral Imager*, který snímá data ve 13 pásmech ve vysokém prostorovém rozlišení (10–60 m). Multispektrální obraz byl následně zpracován (např. převzorkování jednotlivých pásem na stejné rozlišení 10 m nebo provedení atmosférických korekcí).

Prediktivní modelování bylo založeno na metodách Random Forests a Partial Least Square regression (9). Výsledky modelování na konkrétních lokalitách jsou k dispozici v Atlase koupacích vod ČR (9) a ve webové mapové aplikaci (obr. 5). Data v aplikaci jsou zpracována zatím pro 40 lokalit, mezi kterými jsou jak vody ze seznamu vod ke koupání, tak lokality neoficiální. Typově se jedná o různě velké lokality, mezi kterými jsou velké přehradní nádrže, rybníky i zatopené lomy.

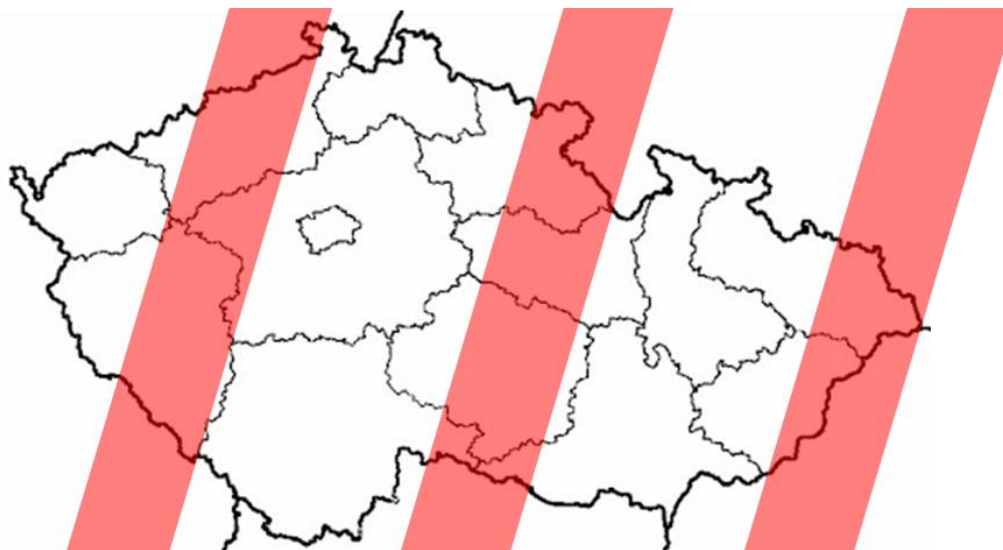


Obr. 5. Jeden z výsledků projektu – webová mapová aplikace (<http://geoportal.vuv.cz/aplikace/dpz-koupaci-vody-zeta>), ve které je možné zobrazit vybrané nádrže a hodnoty pro modelované ukazatele.

Nevýhodou pro praktické využití webové mapové aplikace je omezení na vybrané nádrže a také omezení časové na sezóny 2018–2020. Předpokládáme, že problematikou se budeme dále zabývat, takže se nejedná o konečný stav. Nicméně chceme určitě ukázat i další možnosti, jak lze výsledky DPZ plnohodnotně využít již nyní.

Jednou z možností je v létě 2021 spuštěná on-line aplikace RemoteGuard (<https://remotewaterquality.com>), za kterou stojí tým z Jihočeské univerzity. Zde je možné získat údaje o chlorofylu-a z 12 tisíc nádrží v ČR. Jedná se však o komerční produkt – za přístup do aplikace je nutno platit.

Jinou volně dostupnou alternativou, jak se velmi snadno dostat ke snímkům z družic Sentinel 2, je využití webové aplikace EO Browser. Snímky jsou dle naší zkušenosti k dispozici již v den jejich pořízení. Pro větší část území ČR jsou snímky dostupné v četnosti dvakrát za pět dní (pravidelně se střídají dvoudenní a třídní intervaly mezi snímky). Pro menší část ČR jsou snímky k dispozici pouze jedenkrát za pět dní (obr. 6).

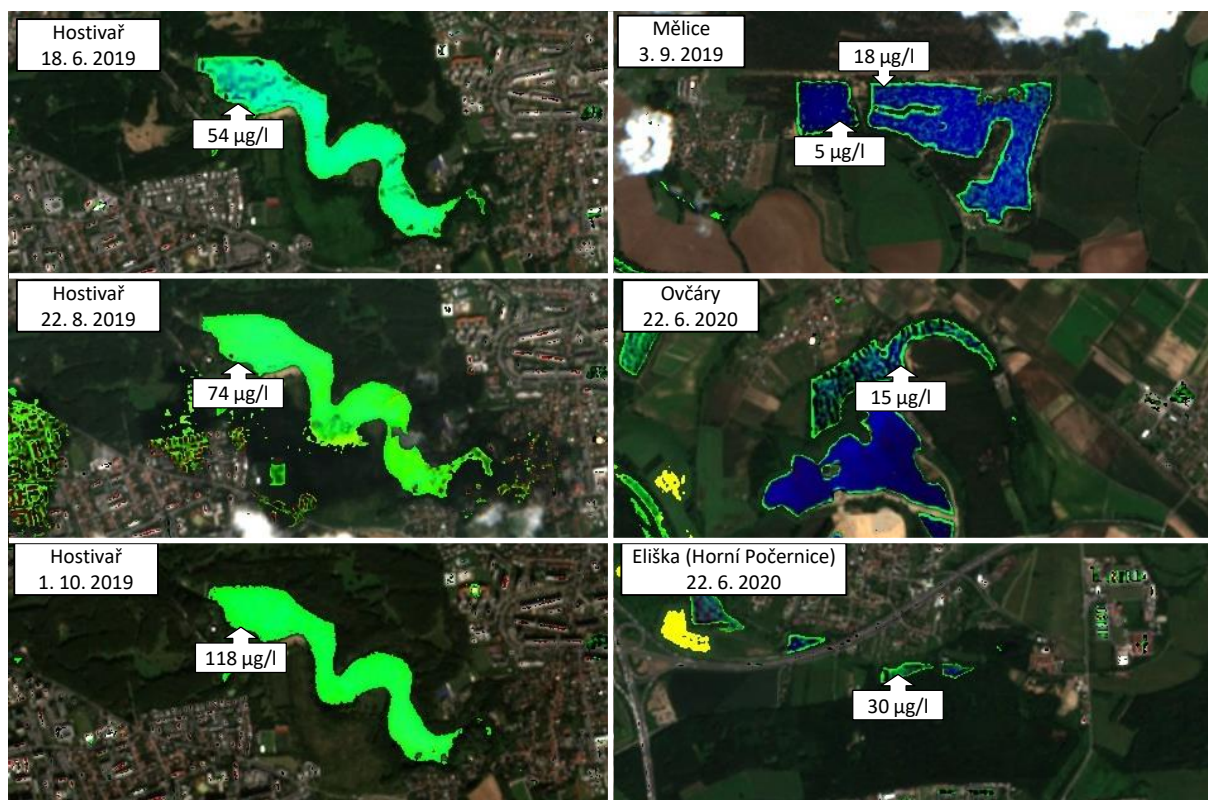


Obr. 6. Dostupnost snímků z družic Sentinel 2 na portálu EO Browser pro území ČR. V červeně zbarvených pásech jsou snímky dostupné jedenkrát za pět dní, v nepodbarvených částech je to dvakrát za pět dní (tj. každý druhý nebo třetí den).

Pro data z družic Sentinel 2 má EO Browser devět předdefinovaných kompozic, např. zobrazení v pravých a nepravých barvách (true color, false color), několik indexů (např. NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) nebo Scene classification map, kterou lze využít k identifikaci některých rušivých vlivů (viz dále). Všechny předdefinované kompozice je možné uživatelsky upravovat. Je také možné vytvářet vlastní kompozice či využívat kompozice vytvořené jinými uživateli, pokud je zveřejní.

Z hlediska oživení vod (nejen koupacích) nám připadá velmi užitečný Aquatic Plants and Algae Custom Script Detector (APA Script). Jedná se o uživatelsky vytvořený doplněk, který je dostupný prostřednictvím aplikace EO Browser. APA script představuje rychlou alternativu pro odhad oživení fytoplanktonem. Jak už název napovídá, pokud jsou v povrchové vodě vyšší rostliny, zobrazuje je stejně jako fytoplankton. K odhadu koncentrace chlorofylu-a neposkytuje APA script žádnou stupnici. Oživení je odhadováno pocitově podle barev. APA script ukazuje slabě oživené nádrže jako modré, více oživené jako tyrkysové a hodně oživené jako zelené. Pokud se někde vytvoří silný příhladinový vodní květ sinic, je zobrazen žlutou barvou, pokud je ve vodě silný zákal, který není tvořen fotosyntetickými organismy, je zobrazen červeně (viz Labe na obr. 18). Na obr. 7 je uvedeno několik případů z našich modelových nádrží, na kterých je ukázáno vybarvení pomocí APA scriptu a koncentrace chlorofylu-a, kterou jsme v ten den naměřili v nádrži (horizont 0–30 cm). První náznaky tyrkysové se začínají objevovat při

koncentracích chlorofylu-a zhruba na hladině mezi 10–20 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a. Koncentrace převyšující 100 $\mu\text{g/l}$ jsou již intenzivně zelené a lze je považovat za horní rozsah metody. Uživatelskou úpravou koeficientů ve scriptu lze změnit intenzitu barev, a tím pádem rozsah, ve kterém lze vnímat rozdíly v koncentraci (i když to asi neodpovídá originálnímu nastavení). Pro podrobnosti odkazujeme na internetovou stránku přímo věnovanou APA scriptu (10). I když jsme neprováděli žádnou exaktní validaci, v naprosté většině případů nebyly námi naměřené koncentrace chlorofylu-a v rozporu s výstupy, které poskytuje APA script. Určitě je však potřebné pracovat s APA scriptem obezřetně a uvědomovat si limitaci metody (viz následující kapitola). To se však týká metod DPZ obecně.

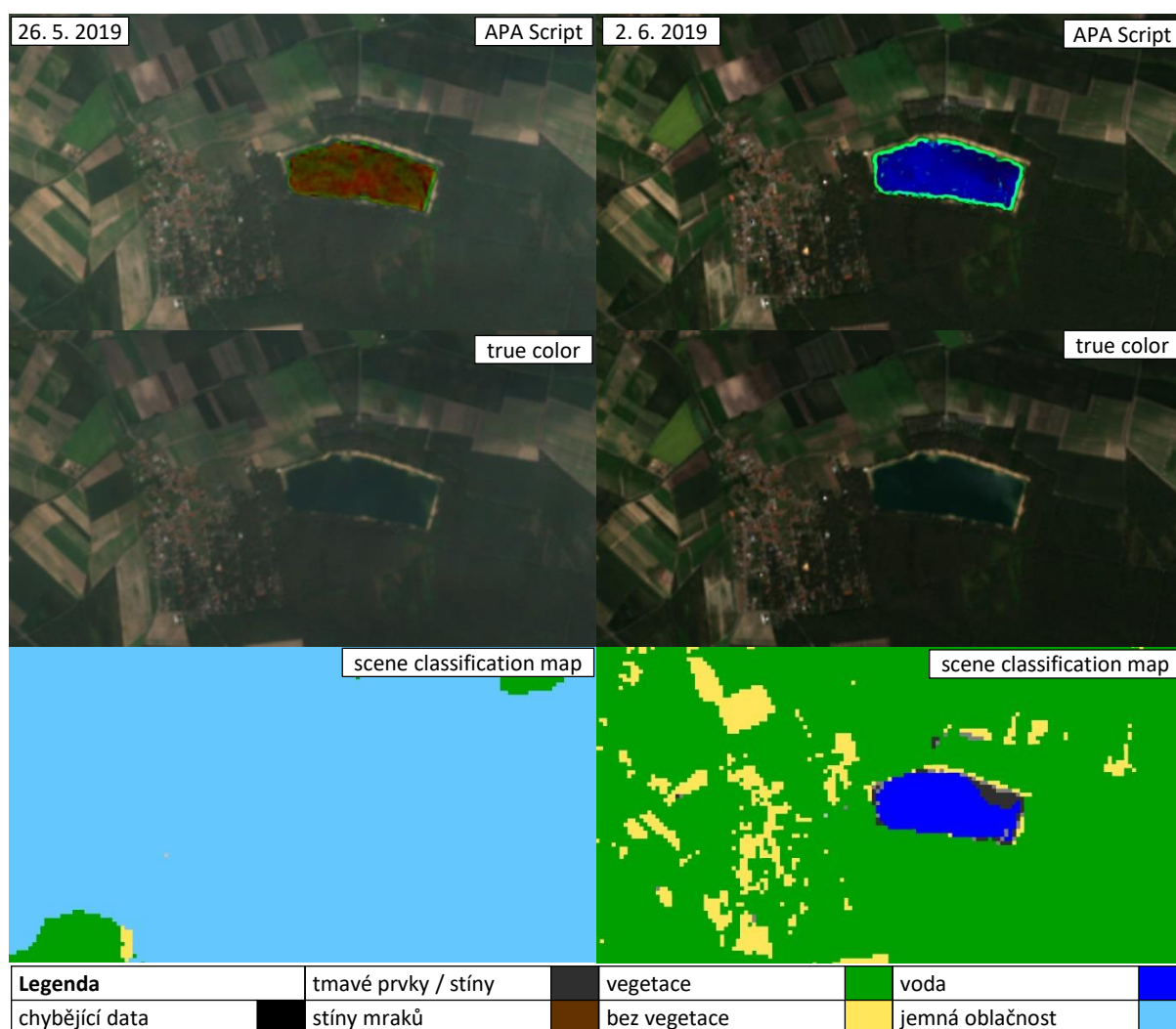


Obr. 7. Příklady zobrazení dat z družic Sentinel 2 pomocí APA scriptu na některých modelových nádržích s doplněnými koncentracemi, které byly v ten den naměřeny v odebraných vzorcích.

Zdroje: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

Problémy spojené s metodami dálkového průzkumu Země

Metody DPZ mají pochopitelně jako všechny metody různá úskalí, na které je nutné pamatovat a zohlednit je při jejich využití v praxi. Prvním problémem, na který při využití dat z družic Sentinel 2 narážíme, je frekvence použitelných výsledů. Dostupná data jsou k dispozici, jak bylo uvedeno výše, každý pátý den a pro část území dokonce dvakrát za pět dní. Jenže mnoho z nich je znehodnoceno oblačností. U 50 nádrží, které figurovaly v širším výběru pro atlas vzniklý v tomto projektu (9), oblačnost překrývající lokalitu zcela znehodnotila 45 % snímků. Částečně znehodnoceno bylo 16 % (cca 2/3 plochy byly překryty u 8 %, cca 1/3 rovněž u 8 %). Jen 39 % snímků bylo zcela bez oblačnosti. Oblačností znehodnocená data navíc jsou rozmístěna v čase značně nerovnoměrně, takže se může stát, že období bez použitelného snímku přesáhne jeden měsíc.

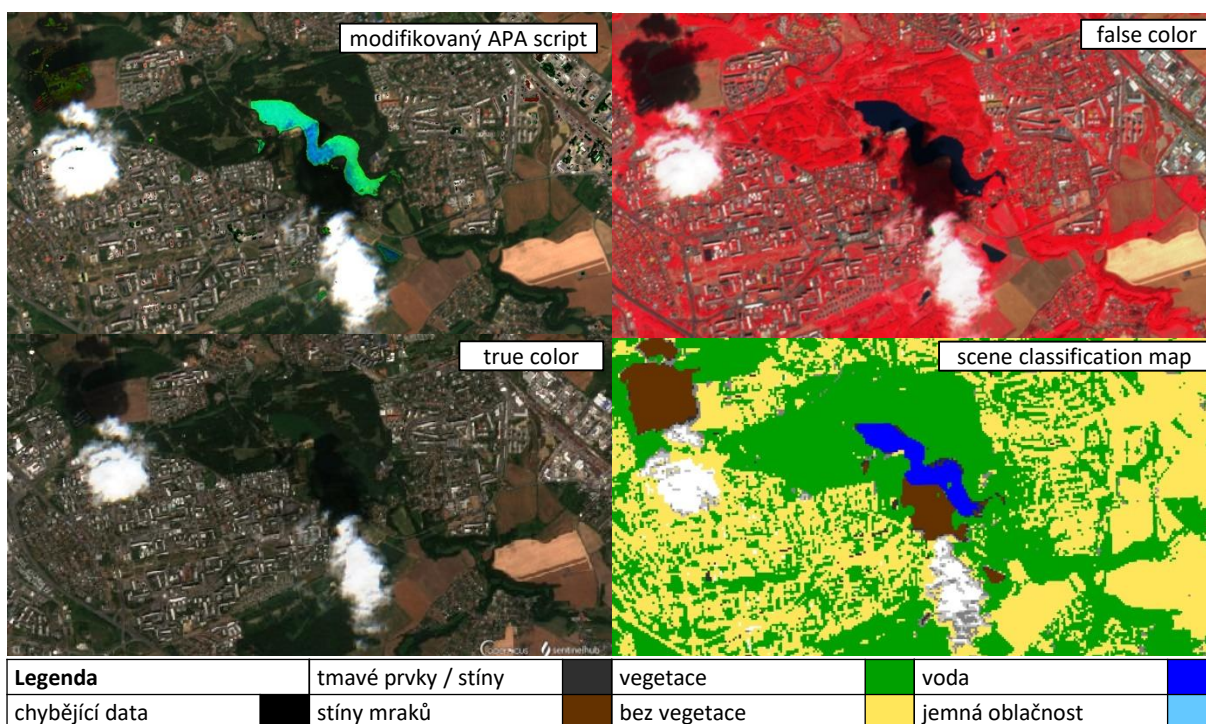


Obr. 8. Přírodní koupaliště Lhota má obvykle dobrou kvalitu vody. Na horních obrázcích jsou vidět velké rozdíly mezi hodnotami ve dnech 26. 5. 2019 a 2. 6. 2019, jak byly zobrazeny pomocí APA scriptu. Na horních i prostředních snímcích v pravých barvách (true color) vidíme nepatrný rozdíl v ostrosti a jasnosti barev mezi oběma dny. Snížená ostrost snímků z 26. 5. 2019 je způsobena jemnou oblačností, což je dobře patrné na kompozici „Scene classification map“, kterou lze aplikovat na snímek v aplikaci EO Browser. Téměř celé zobrazené území bylo vyhodnoceno jako „jemná oblačnost“.

Zdroj: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

To, že se přímo nad nádrží nenachází žádná na první pohled zřejmá oblačnost, ještě automaticky neznamená, že lze snímky bez bližšího prozkoumání bez obav použít. Pozornost je nutné věnovat i velmi jemné oblačnosti (oblaka typu Cirus). Při podrobnější kontrole zobrazených výsledků bývá v takových případech zřejmé, že naprosto neodpovídají očekávaným hodnotám (obr. 8). Je nutné vnímat i ostrost zobrazovaných snímků, případně na ně aplikovat postupy, které jemnou oblačnost umí odhalit (obr. 8).

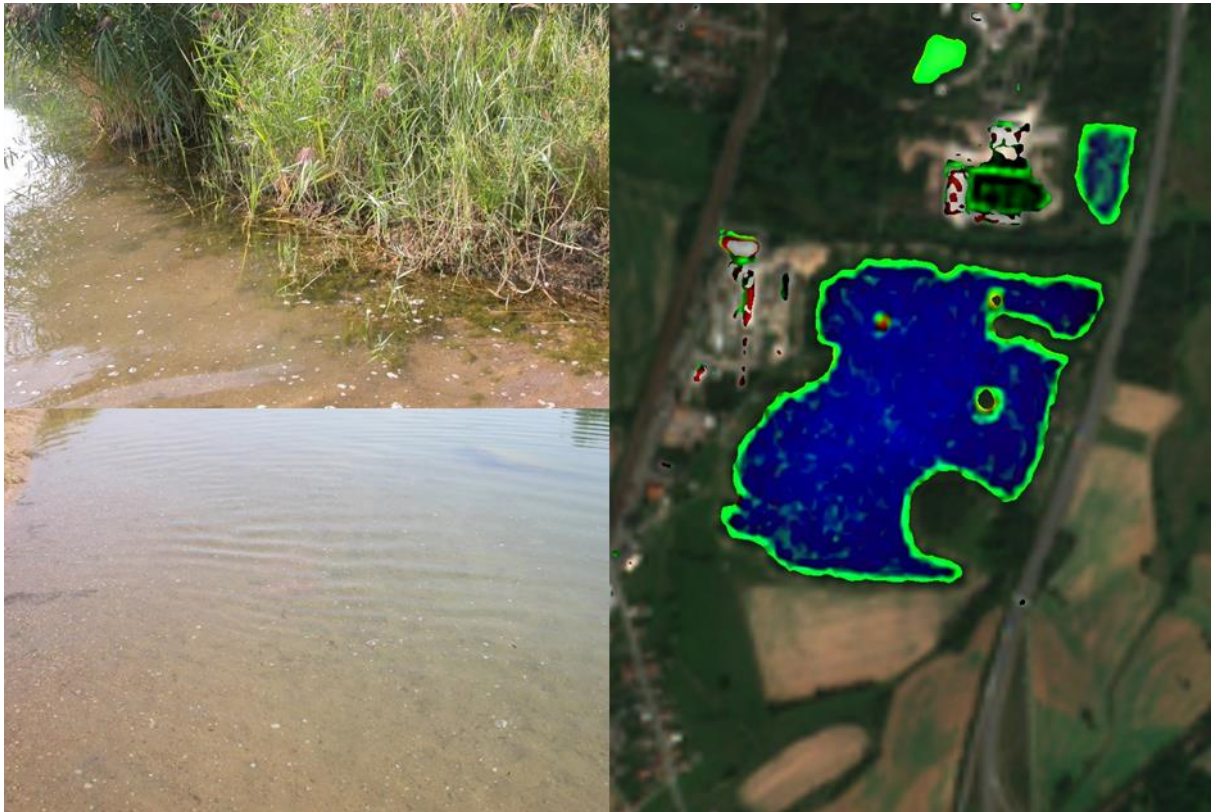
Obláčnost může způsobovat problém i v případě, že se nenachází přímo nad nádrží, ale pouze vrhá na její hladinu stín. V takovém případě jsou výsledky pro zastíněnou část nádrže odlišné od přilehlých nezastíněných úseků. Oživení na místech ovlivněných zastíněním je tak zdánlivě nižší (obr. 9). Vzhledem k pozici Slunce v době snímání jsou stíny severozápadně od oblaku. Pozornost je tak nutné věnovat především oblačnosti situované jihovýchodním směrem od nádrže (obr. 9).



Obr. 9. Obláčnost jižně od nádrže Hostivař vrhá stín a způsobila tak znatelně nižší hodnoty zobrazené pomocí APA skriptu. Stíny lze pozorovat poměrně dobře v nepravých barvách (false color) nebo na kompozici „Scene classification map“, kterou lze aplikovat na snímek v aplikaci EO Browser. Stíny však nemají na této kompozici prioritu před vodou, takže je nutné věnovat pozornost stínům bezprostředním okolí vodní plochy.

Zdroj: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

Data z družic Sentinel 2 jsou také velmi obtížně použitelná pro posouzení kvality vody při okrajích nádrží, na čemž se bude podílet více faktorů, jako je příbřežní vegetace, která může zasahovat i nad hladinu nádrží nebo na ni vrhat stín, vysoké břehy, které také mohou hladinu zastínit nebo odraz světla od břehů či dna (v malých hloubkách u břehu). Nezkoumali jsme detailně, který z uvedených faktorů je nejdůležitější či zda roli nehraje ještě nějaký další faktor. Ze zkušeností při modelování v rámci našeho projektu nebo z práce s APA skriptem je zřejmé, že u méně oživených nádrží vypadají všechny příbřežní oblasti jako by byly značně oživené (obr. 10). To bohužel limituje využití výsledků pro identifikaci slabších vodních květů, které se často kumulují právě v těsné blízkosti břehů.



Obr. 10. Na příkladu Opatovického písničku dne 29. 8. 2019 je zjevná nepoužitelnost APA scriptu pro část nádrží v těsné blízkosti břehů. Příbřežní zóny nádrží s nízkým oživením fytoplanktonem se jeví jako vysoce oživené. V některých případech k tomu mohou přispět porosty vodních rostlin (rákosiny) nebo vyšší rostliny na břehu. Falešně pozitivní vysoké nálezy mají však i místa, kde jsou písčné pláže téměř bez vyšších rostlin.

Zdroje: snímky vlevo archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu; vpravo modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

Problematika výskytu fytoplanktonu

Prostorová proměnlivost fytoplanktonu

Výskyt planktonních sinic a řas v rámci jedné nádrže není prostorově homogenní. Proto bývá u větších nádrží monitorování prováděno z více míst, obvykle pravidelně rozmístěných v podélném profilu nádrže. Na řadě menších nádrží využívaných ke koupání bývá však obvykle jen jedno odběrové místo. Při hodnocení se pak výsledky z tohoto místa charakterizuje celá nádrž a příliš se neuvažuje o tom, že to v některých případech může být velmi vzdáleno od skutečnosti. Z tohoto pohledu mohou být výsledky DPZ velmi užitečné, protože lépe než pozemní monitorování zvládnou zobrazit nehomogenní distribuci řas a sinic v nádrži.

Na základě dat z pozemního monitorování z roku 2019 provedeného v rámci projektu byl pro konferenci Vodárenská biologie 2020 připraven příspěvek (11), ze kterého čerpáme v této kapitole. Text je navíc doplněn o obrázky z družic Sentinel 2.

Prostorová heterogenita fytoplanktonu v jednotlivých modelových nádržích je patrná z tabulky 2. Největší rozdíly mezi výsledky na jednotlivých místech odběru byly nalezeny v horní nádrži na Rozkoši, což je dobře vidět také na družicových snímcích (obr. 11). Na této nádrži od července dominovaly sinice rodů *Microcystis* a *Woronichinia*. Pokud se sinice udržují ve formě příhladinového vodního květu, mohou být přesouvány větrem na závětrnou stranu nádrže, kde se kumulují. Lze očekávat, že obdobně by se chovaly i další sinice při vytvoření příhladinového vodního květu (především rody *Dolichospermum* a *Aphanizomenon*). Na Rozkoši vzhledem k velikosti nádrže a její otevřenosti v relativně ploché krajině i vzhledem k vysoké úživnosti, a tím i vysoké kvantitě sinic, byl vliv větru v některých případech dobře patrný. Přesné údaje o větru však nemáme k dispozici, použity byly pouze záznamy z přímého pozorování při odběru. Navíc bude záviset i na směru a intenzitě větru v předchozích hodinách. V mírnější podobě bylo možné pozorovat vliv větru i na dalších nádržích (např. v zářijovém odběru na Mělicích, kdy dominovalo *Dolichospermum*). U lokalit s dominancí vláknitých sinic se solitérními vlákny, jako jsou *Planktothrix* či *Aphanizomenon gracile* (Hostivař, Očko), nebyl významný vliv větru pozorován.

Druhou lokalitou s velmi výraznými rozdíly mezi jednotlivými odběrovými místy bylo Proboštské jezero, což je nádrž vzniklá těžbou štěrkopísku a úzkým kanálem propojená s Labem. Zde se v době dominantního výskytu obrněnky rodu *Ceratium* objevovaly až řádové rozdíly mezi některými místy, což také není neznámá skutečnost (upozorňuje na ní i Reynolds ve své monografii (12)). Situace se navíc může velmi rychle měnit v rámci dne. To je patrné z rozdílu na odběrovém místě H mezi horizontem 0–30 cm a vzorkem odebraným pod hladinou u srpnového a zářijového odběru z Proboštského jezera. Velmi vysoké rozdíly byly mezi hladinou a dnem v příbřežních částech nádrže pozorovány i v roce 2020. Tohoto jevu si snadno všimnou i laici. Během zářijového odběru v roce 2019 se místní rybáři ptali, proč je občas voda úplně černá. Na rozdíl od vodních květů sinic, které většina populace pozná (i podle zelené barvy), u tmavě hnědých vegetačních zákalů způsobených obrněnkami bude laická interpretace většinou mylná. Velké rozdíly v distribuci fytoplanktonu jsou patrné i na datech z DPZ, což vynikne ve srovnání s nedaleko ležící nádrží Očko, kde dominují různé vláknité sinice, které však nevytvářejí vodní květy, a kde byla distribuce fytoplanktonu v rámci jednotlivých odběrových dnů víceméně homogenní (obr. 12).

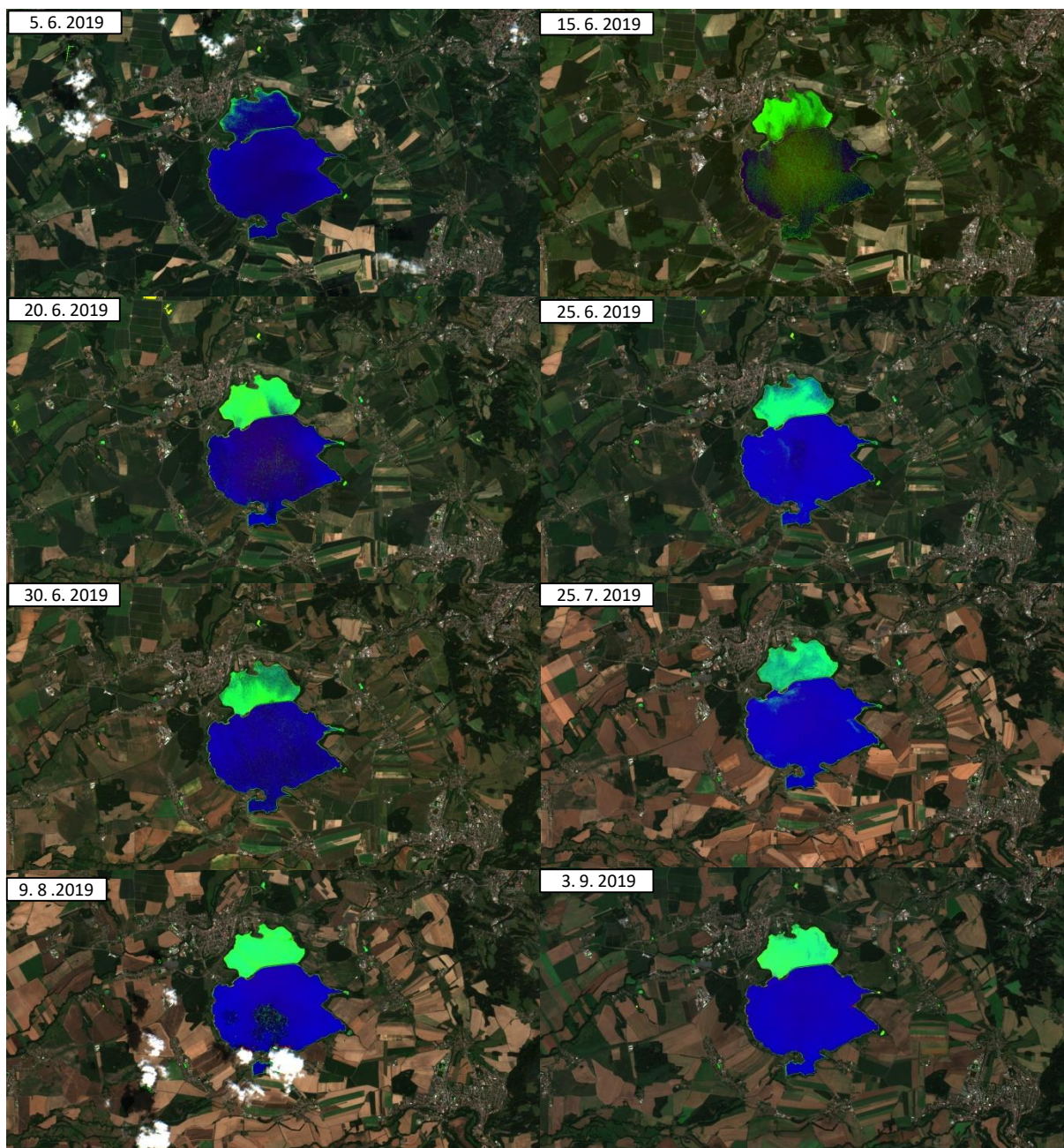
Obdobně jako obrněnky se mohou chovat i skrytěnky. Na zkoumaných lokalitách se to však projevilo mnohem slaběji než u rodu *Ceratium* na Proboštském jezeře. Výskytem skrytěnek lze vysvětlit rozdíly v červnovém odběru na Vyžlovce nebo v některých odběrech na Marváneku. Za nehomogenitou v srpnovém odběru na Elišce zase stály obrněnky rodu *Peridinium*. Marvánek i Eliška jsou řádově menší lokality (tabulka 1) než další nádrže zařazené do studie a neočekávali jsme u nich výrazné prostorové rozdíly ve výskytu fytoplanktonu. Nejedná se sice o oficiálně sledované koupací vody, nepředpokládáme však, že by se v případě jejich zařazení do seznamu určilo více odběrových míst než jedno.

Výrazné rozdíly jsou patrné také na výsledcích z Hostivaře, kde byly vyšší hodnoty fluorescence na místě O3 a nízké na místě O4 (tabulka 2). Zde se jedná spíše o efekt korytovitých nádrží, u nich bývají místa blíž přítoku oživena silněji než místa blíže k hrázi (místa O1 a O2 byly obvykle méně oživené než místo O3). Místo O4, které je hned na začátku vzdutí, do naznačeného trendu nezapadá zřejmě proto, že se zde ještě nestačily živiny z přítoku realizovat v podobě fytoplanktonu. O tom, že se u místa O4 se jedná o „jiný svět“ než ve zbytku nádrže (místa O1 až O3 a H), svědčí i fakt, že se výrazně lišilo i složení fytoplanktonu. Hostivař díky své poměrně malé velikosti není však typická korytovitá nádrž jako Orlický Slapy či Vranov. Na obr. 13 je zobrazena další, typická korytovitá nádrž Hracholusky na řece Mži. Obě její odběrová místa jsou situována až dolní části nádrže, kde rozvoj fytoplanktonu v koupací sezóně zdaleka nedosahuje hodnot z horní části. Přesto pro pracovníka, který má provádět hodnocení kvality vody ke koupání, má informace o stavu nad standardními odběrovými místy cenu jednak z hlediska předpokládaného vývoje do příštího odběru a rovněž proto, že lidé se pochopitelně koupou nejen na oficiálních místech (např. podél celé Hracholuské nádrže se nachází velké množství chat).

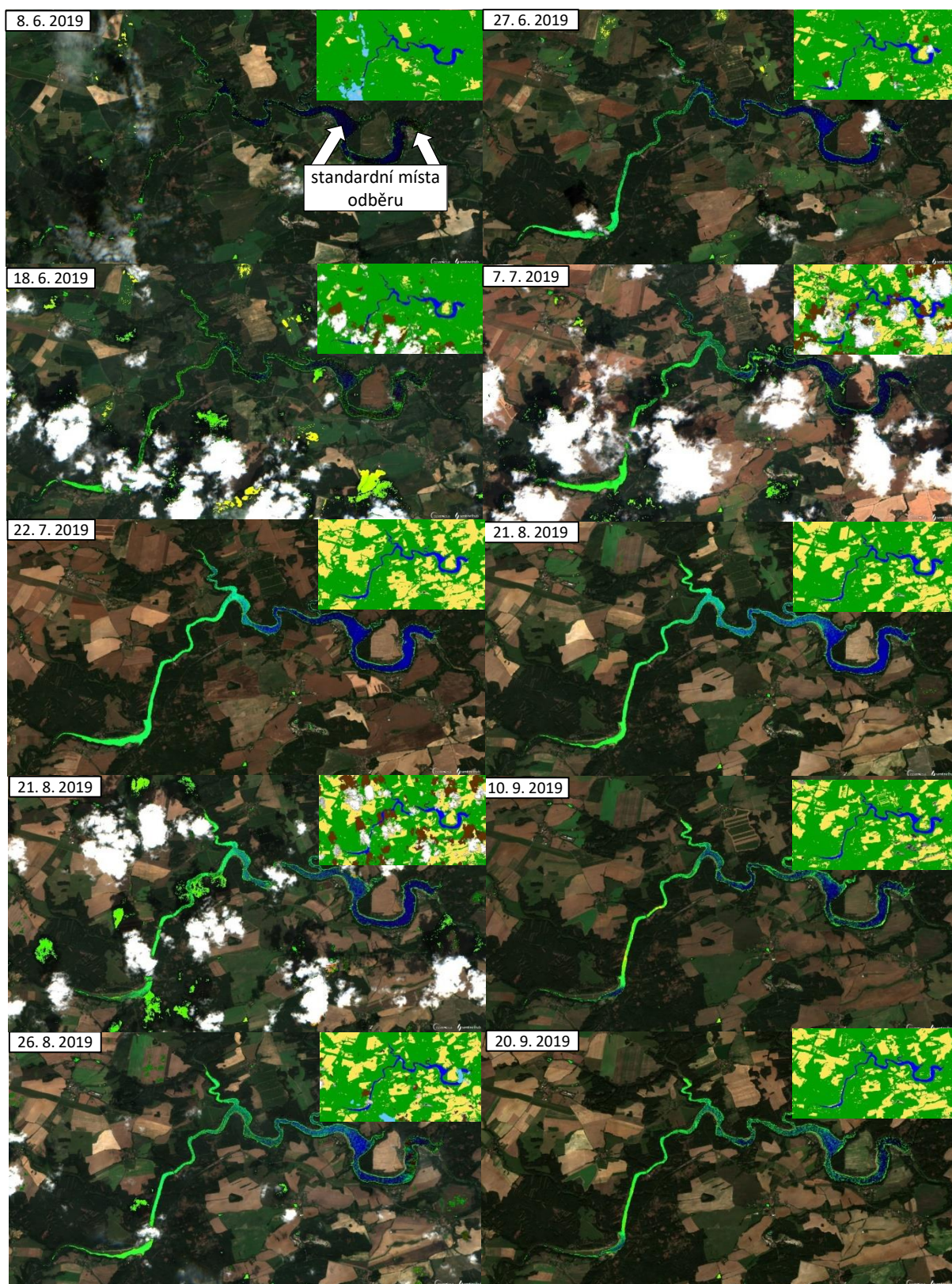
Tabulka 2. Výsledky chlorofylu-a, fluorescence (v % ve vztahu k fluorescenci na místě H z horizontu 0–30 cm) a složení dominantní skupin fytoplanktonu (++ dominantní skupina, + subdominantní skupina) v roce 2019. Všechny hodnoty z vrstvy těsně pod hladinou z míst H a O1 až O4 jsou vztaženy jednak k hodnotě chlorofylu-a z místa H z hloubky 0–30 cm, a pak k součtu Ft-450 nm a Ft-620 nm z téhož horizontu. Při vyhodnocení neuvádíme absolutní hodnoty fluorescence, ale jen její procento ve srovnání s referenční hodnotou z místa H z hloubky 0–30 cm. Tučně jsou vyznačeny hodnoty lišící se alespoň o 30 % od referenční hloubky 0–30 cm. Zkratky: Cya – sinice, Bac – rozsivky, Chlo – zelené řasy, Cry – skrytěnky, Chry – zlativky, Din – obrněnky, Plankt – Planktothrix, Woro – Woronichinia, Aph. – Aphanizomenon, Doli – Dolichospermum, Micro – Microcystis, Limno – Limnothrix, Cyl – Cylindrospermopsis)

lokality	datum	H _{0-30cm} chl-a µg/l	fluorescence v 10 cm (% H _{0-30cm})					složení fytoplanktonu
			H _{10cm}	O _{10cm}	O _{20cm}	O _{30cm}	O _{40cm}	
Vyžlovka	18. 6.	47	97	55	83	x	x	Cry++, Chlo+
	23. 7.	126	99	102	101	x	x	Chlo++, Bac+
	22. 8.	181	94	71	93	x	x	Cya (Plankt)+, Chlo+, Bac+, Cry+
	1. 10.	132	98	100	99	x	x	Cya (Plankt)++, Chlo+
Marvánek	18. 6.	135	79	92	115	x	x	Cry++, Chlo+
	23. 7.	121	99	104	59	x	x	Cry++, Chlo+
	22. 8.	123	103	102	130	x	x	Cry++, Chlo+
	1. 10.	72	100	92	85	x	x	Cya (Microcystis)+, Chlo+, Bac+

lokality	datum	H _{0-30cm} chl-a µg/l	fluorescence v 10 cm (% H _{0-30cm})					složení fytoplanktonu
			H _{10cm}	O _{110cm}	O _{210cm}	O _{310cm}	O _{410cm}	
Hostivař	18. 6.	54	98	105	107	121	36	Chlo++
	10. 7.	72	91	94	96	135	34	Chlo++,Cya++(Aph. gracile)
	23. 7.	130	99	120	106	117	91	Cya++(Aph. gracile)
	22. 8.	74	112	100	113	138	35	Cya++(Aph. gracile),Cry+
	5. 9.	97	98	112	111	155	89	Cya++(Plankt, Aph. gracile)
	1. 10.	118	95	129	159	143	13	Cya++(Plankt, Aph. gracile)
Proboštské jezero	3. 6.	16	96	100	102	102	x	Cya++(Plankt, Aph. gracile)
	3. 7.	110	101	102	172	30	x	Din++, Chlo+, Cry+, Bac+
	7. 8.	236	50	15	12	11	x	Din++,Chlo++,Cry++
	26. 9.	85	161	20	23	30	x	Din++
Očko	3. 6.	43	130	121	115	x	x	Cya++(Limno, Plankt)
	3. 7.	73	115	123	118	x	x	Cya++(Limno, Plankt)
	7. 8.	74	95	83	87	x	x	Cya++(Limno, Plankt, Cyl)
	26. 9.	93	99	91	100	x	x	Cya++(Limnox, Plankt)
Ovčáry	3. 6.	8	91	100	88	85	100	Chlo++,Cya+
	3. 7.	14	86	97	92	74	89	Cya++ (Woro), Din+, Chlo+
	7. 8.	35	106	98	99	105	103	Cya++(Doli), Chlo++
	26. 9.	78	99	99	71	101	114	Cya++(Micro, Plankt, Woro, Aph)
Eliška	3. 6.	15	91	86	95	x	x	Chry++
	3. 7.	53	99	56	61	x	x	Dino++, Chlo+, Cya+
	7. 8.	63	144	78	153	x	x	Dino++, Chlo+
	26. 9.	16	90	87	84	x	x	Chry+, Din+
Mělice	6. 6.	6	110	95	116	95	85	Cya++(Plankt.), Din+ ,Chry+, Chlo+
	15. 7.	20	100	97	110	92	92	Cya++(Aph), Chry+
	14. 8.	12	104	110	102	92	133	Cya++(Doli, Plankt, Woro)
	3. 9.	18	109	123	140	105	145	Cya++(Doli, Plankt, Woro)
Seč	6. 6.	27	143	78	53	x	x	Bac++, Cya+
	15. 7.	14	88	97	97	x	x	Cya++(Doli), Bac+
	14. 8.	41	93	126	151	x	x	Cya++(Woro, Micro)
	3. 9.	30	97	102	92	x	x	Cya++(Woro, Micro)
Rozkoš horní nádrž	25. 6.	41	113	152	77	121	x	Bac++, Chlo++, Cry++, Cya+
	30. 7.	97	295	332	108	112	x	Cya++(Micro, Woro)
	29. 8.	59	102	611	172	667	x	Cya++(Micro, Woro)
	18. 9.	115	103	85	102	57	x	Cya++(Micro, Woro)
Rozkoš dolní nádrž	25. 6.	44	82	59	42	x	x	Chry++, Chlo++, Cya+,
	30. 7.	15	104	106	90	x	x	Cya++(Micro, Woro)
	29. 8.	9	131	107	89	x	x	Cya++(Micro, Woro),
	18. 9.	18	82	72	83	x	x	Cya++(Micro, Woro)
Opatovický písk (Březhrad)	25. 6.	2	98	87	110	x	x	Bac+, Chlo+
	30. 7.	1	100	106	112	x	x	Bac+, Chlo+
	29. 8.	3	101	125	96	x	x	Bac+, Chlo+
	18. 9.	13	99	82	95	x	x	Cya++(Micro), Din+

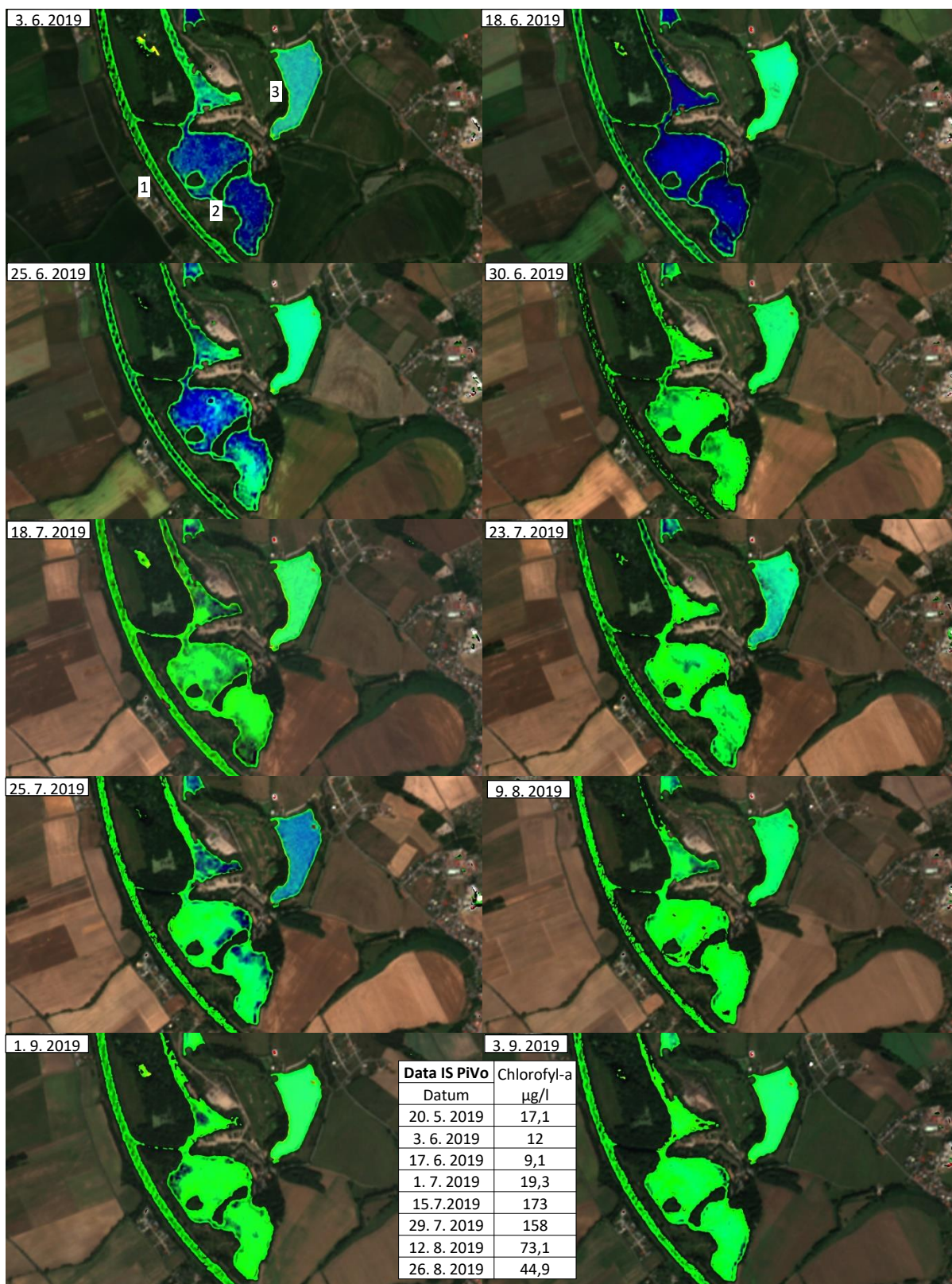


*Obr. 11. Nádrž Rozkoš v koupací sezóně 2019. Zatímco jižní (dolní) část nádrže je oživena fytoplanktonem poměrně málo, na severní (horní) části se pravidelně vyskytují sinicové vodní květy, které jsou v mnoha případech rozmístěny po nádrži velmi nehomogenně. V některých dnech je oživení vrchního horizontu nádrže natolik vysoké, že jsou překročeny horní limity pro zobrazení pomocí APA scriptu a nádrž je jednoduše zelená, i když distribuce fytoplanktonu nemusí být homogenní.
Zdroje: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021*



Obr. 12. Hracholusky jako příklad korytovité nádrže, u které k rozvoji fytoplanktonu dochází především v horních částech nádrže (dřívější nástup a celkově vyšší hodnoty). U takto dlouhých nádrží je dobré důsledně sledovat oblačnost (např. pomocí „Scene classification map“), protože zcela bezoblačných snímků vzhledem k velké ploše, kterou je nutno zobrazit, je méně než u malých nádrží.

Zdroje: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

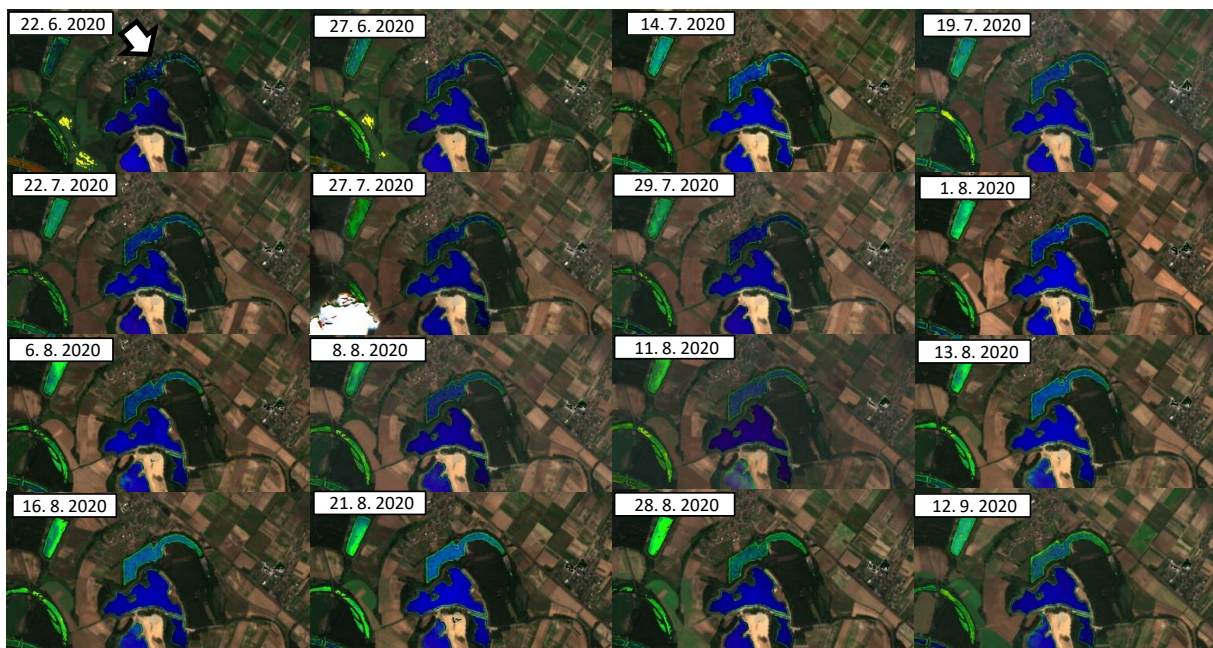


Obr. 13. Labe a přilehlé oblasti s nádržemi po těžbě štěrkopísku (označení na snímku vlevo nahoře 1 – Labe, 2 – Proboštská jezera, 3 – Očko) v koupací sezóně 2019. Zobrazeny pouze snímky, na kterých nebyl rušivý vliv oblačnosti. Vyhodnoceno pomocí APA scriptu.

Zdroje: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021; IS PiVo

Využití dálkového průzkumu Země pro informace na nesledovaných lokalitách

Na lokalitách zařazených do seznamu vod ke koupání může DPZ přinášet užitečné informace, jejich význam je však z hlediska hodnocení pouze doplňkový (vzhledem k aktuálně používaným postupům hodnocení, které vyplývají z platné legislativy). Naprosto rozdílná je situace u vod, které v seznamu zařazené nejsou. Zvláště v některých oblastech je počet lokalit, kde se lidé koupou, velké množství. To se týká často oblastí kolem dolních toků velkých řek (Labe, Morava, Orlice, Jizera, Lužnice a další), kde vzniklo velké množství nádrží díky těžbě štěrku. V takových oblastech je velmi obtížné a finančně neúnosné sledovat všechny lokality, kde se lidé koupou ve vysokých počtech. Data z DPZ přináší poměrně levnou alternativu, jak kvalitu vody alespoň nějak sledovat. Příklad zatopené pískovny v Ovčárech (u Kostelce nad Labem) je na obrázku 14.



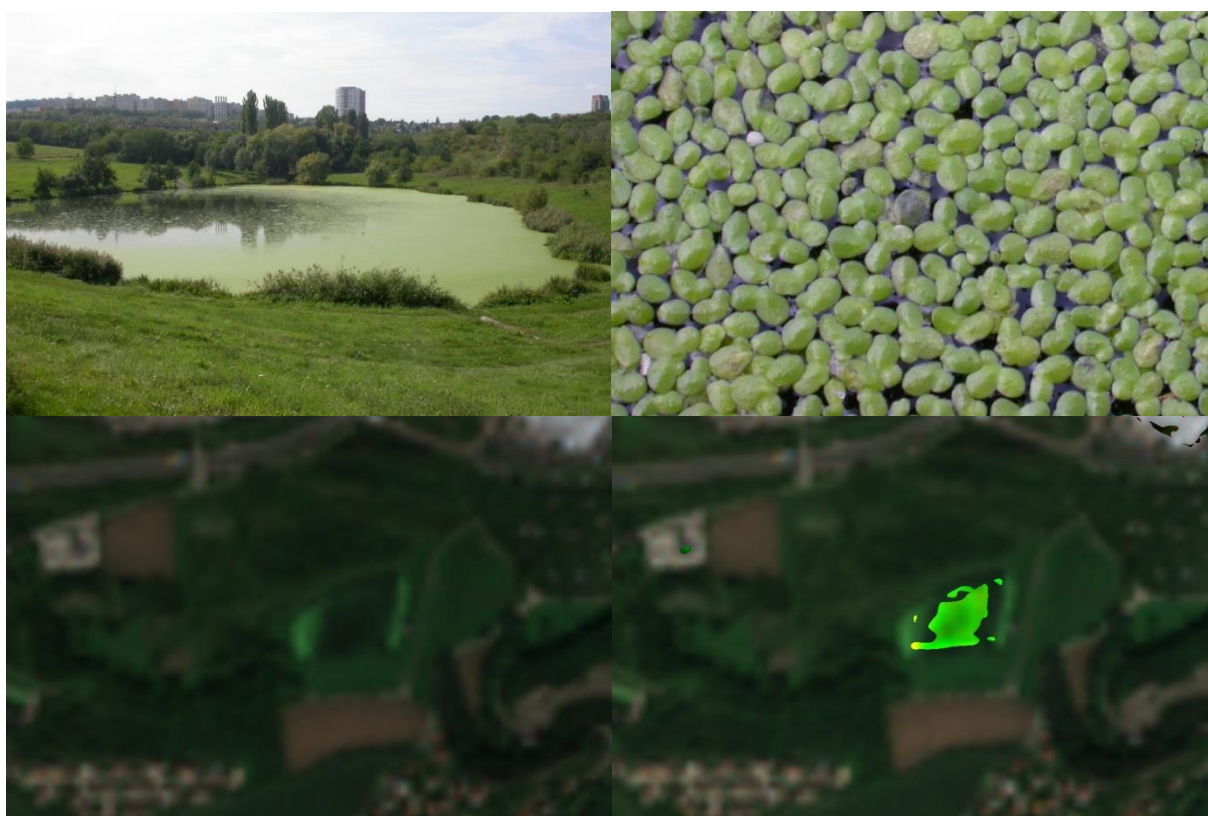
Obr. 14. Ke koupání a vodnímu lyžování hojně využívaná nádrž v Ovčárech (u Kostelce nad Labem) v koupací sezóně 2020 (na levém horním obrázku označena šipkou). Nádrž není v seznamu vod ke koupání, takže o kvalitě vody nejsou obvykle dostupné žádné informace z pozemního monitorování. Z dat z družic Sentinel 2 (APA script) lze usuzovat, že situace byla celou sezónu poměrně dobrá. K výraznějšímu zhoršení došlo až koncem srpna (mezi 21. a 28. srpnem). Ani to však nebylo nikterak dramatické.

Zdroje: modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

Pozorované povrchové jevy nesouvisející s výskytem fytoplanktonu

Na hladině nádrží a toků se poměrně běžně vykytují povrchové jevy, které jsou pozorovatelné pouhým okem (13). Pokud nejsou prostorově omezeny na malou plochu a nejsou lokalizovány v těsné blízkosti břehu (viz kap. *Problémy spojené s metodami dálkového průzkumu Země*), pravděpodobně budou ovlivňovat i výsledky DPZ (v některých případech možná v zanedbatelné míře). V první řadě se jedná o sinicové vodní květy, případně jevy spojené s hromadným výskytem řas. O těch již bylo pojednáno v předchozí kapitole. V této kapitole se chceme zaměřit na jevy jiného původu, které jsme pozorovali při našich terénních šetřeních provedených převážně v rámci projektu.

Prvním z pozorovaných jevů je poměrně běžná situace na menších úživných nádržích, kdy významná část hladiny poroste okřehkem (obr. 15). Nejedná se sice o běžný jev na vodách ke koupání, není však na nich ani vyloučen. V minulosti jsme zaznamenali významný výskyt např. na Šeberáku nebo dokonce na Orlíku (Radava). APA script okřehkek neodliší od fytoplanktonu, takže u neznámých menších nádrží je lepší být při interpretaci jeho výsledků obezřetný.



Obr. 15. Výskyt okřehku v září 2019 na nádrži Asuán v Praze – Jinonicích, která je neoficiálně využívána ke koupání. APA script (vpravo dole) vodní makrofyta od fytoplanktonu neodliší; vlevo dole snímek v pravých barvách (true color).

Zdroje: snímky nahoře – archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu, snímky dole – modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

Další nálezy jsou z hlediska kvality vody spíše zajímavé než zásadní. Bylo by vhodné do budoucna zjistit, zda jsou z dat družic Sentinel 2 detekovatelné, resp. zda neinterferují při stanovení fytoplanktonu. Jedná se o značné množství chmýří z topolů (obr. 16), což je počátkem koupací sezóny běžný jev na nádržích v nížinách (typicky nádrže po těžbě štěrkopísku). Druhým jevem bylo pokrytí hladiny

odumřelým zooplanktonem (obr. 17). Zarážející pro nás byl poměrně značný rozsah hladiny, kterou na nádrži Vyžlovka zaujímal. Nicméně i zde je to spíše podnět k dalšímu výzkumu do budoucna.

V úvahu připadají i další jevy, jako jsou utržené nárosty sinic plovoucí u hladiny (časté na začátku koupací sezóny), protože mají poměrně diskrétní povahu (různě velké kompaktní shluky s velkou biomasou v době, kdy je voda jinak velmi čistá), takže se špatně posuzují (kvantifikují) i pomocí pozemního monitorování. Dalšími problematickým jevem jsou viditelné žluté povlaky způsobené pylem jehličnanů.



Obr. 16. Na nádržích po těžbě štěrkopísku byla hladina během červnových odběrů v roce 2019 pokryta ve významné míře chmýřím z topolů, které často tento typ nádrží lemují. Na snímcích vlevo a vpravo nahoře bylo chmýří rovnoměrně rozptýlené na větší ploše hladiny. Na snímku vpravo kumulováno v podobě husté kaše v příbřežní zóně.

Zdroj: archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu



*Obr. 17. V oblasti hráze na rybníku Vyžlovka dne 18. 6. 2019 byla značná část hladiny pokryta jemným bílým povlakem. Při mikroskopickém rozboru bylo zjištěno, že jedná o schránky z mrtvých perloček (především rodu *Bosmina*).*

Zdroj: archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu

Prostorové a časové změny mikrobiálního znečištění vod

Koupání a další rekreační a sportovní aktivity jsou také spojeny s rizikem vzniku onemocnění, včetně onemocnění infekčních, která mohou být způsobena patogenními nebo podmíněně patogenními viry, bakteriemi, prvoky a dalšími organismy. Přímé sledování patogenů ve vodě je však většinou velmi komplikované. Patogenních organismů je mnoho a jejich výskyt v prostředí je obvykle nízký a diskontinuální, metody jejich stanovení jsou technicky náročné a drahé a pro některé patogenní organismy ani nejsou v rámci České republiky dostupné. Přímé stanovení patogenů je proto omezeno na specializované studie a šetření epidemií. V běžném monitorování je přímé stanovení patogenů nahrazeno sledováním různých indikátorových organismů, které by se měly vyskytovat v prostředí v dostatečné míře, většinou v závislosti na přísunu znečištění, a jejich stanovení je na rozdíl od stanovení patogenů relativně rychlé, snadné a levné. Současná legislativa EU pro koupací vody, která je transponována do národní legislativy ČR, předepisuje pro kontrolu přírodních koupacích vod dva indikátorové organismy, a to *Escherichia coli* a intestinální (střevní) enterokoky.

Mikrobiologické ukazatele – indikátory fekálního znečištění

***Escherichia coli*.** Gramnegativní fakultativně anaerobní tyčinka *Escherichia coli* (typový druh rodu *Escherichia* z čeledi *Enterobacteriaceae*) žije jako komensál v tlustém střevu člověka a teplotokrevných živočichů a slouží jako indikátor fekálního znečištění prostředí. Může však být příčinou řady onemocnění. Nejen že všechny kmeny *E. coli* mohou způsobovat sekundární infekce vyvolávající průjemy, infekce močového ústrojí a nozokomiální nákazy včetně septikémie a meningitidy, ale některé kmeny jsou i primárními patogeny (enterohemoragické kmeny *E. coli*, které produkují verocytotoxiny – VTEC – označované také jako Shiga-like toxiny) a další faktory virulence včetně faktorů invazivních a kolonizačních). Největší ohrožení tímto patogenem je v zemích s vysokou živočišnou výrobou a difúzním znečištěním (Velká Británie, USA apod.).

E. coli vždy pochází ze střevního traktu člověka či teplotokrevných živočichů a ve vodním prostředí se v našich zeměpisných šířkách nerozmnožuje. Zdrojem *E. coli* ve vodách jsou kromě přímé fekální kontaminace především bodové a difúzní zdroje znečištění. Její zvýšené počty se v civilizovaných zemích vyskytují především v souvislosti s odtoky z čistíren odpadních vod a dále je zvýšení významné v místech s nedokonalým nebo žádným čištěním odpadních vod. Zvýšená fekální kontaminace je tak v první řadě závislá na hustotě osídlení oblasti a adekvátním čištění odpadních vod.

Intestinální enterokoky. Za intestinální enterokoky (starší, již neužívaný název je fekální streptokoky) jsou považovány grampozitivní koky, většinou uspořádané do řetízků s antigenovou skupinou D a negativní katalázou. Mají schopnost množit se v rozmezí teploty 10–45 °C, rostou i při poměrně vysokých koncentracích solí (až 6,5 % chloridu sodného) a při hodnotě pH 9,1. Tolerují až 40 % žluči v prostředí. Podle současného taxonomického systému patří do rodů *Enterococcus* (rod v současnosti zahrnuje celkem 43 druhů, které lze na základě fylogenetické analýzy genu pro 16S rRNA rozdělit do několika vnitrodruhových fylogenetických skupin) (14) a *Streptococcus* (především druhy *S. equinus* a *S. bovis*). Kromě toho, že intestinální enterokoky indikují fekální znečištění, některé druhy patří mezi tzv. potenciální patogeny.

Voda představuje bohatý zdroj environmentálních kmenů enterokoků, které jsou považovány především v případě jejich zvýšené koncentrace za fekální kontaminanty živočišného či humánního původu (především druhy *E. faecalis* a *E. faecium*, které představují spolu s *E. durans* a *E. hirae*

nejčastější druhy vyskytující se ve vodě, jsou považovány za typické druhy související s fekální kontaminací). Je tedy zřejmé, že ukazatel „intestinální enterokoky“, i přes relativně přesnou definici, zahrnuje skupinu druhů, což je rozdíl oproti ukazateli „*Escherichia coli*“, kde se jedná pouze jeden bakteriální druh. V prostředí (např. ve vodním prostředí) se tak může vyskytovat širší společenstvo enterokoků, v závislosti na přísunu znečištění a přírodních podmínkách. Skutečnost, že se v přírodních koupacích vodách může vyskytovat více intestinálních enterokoků než *E. coli*, uvádějí např. Casanovas-Massana a Blanc (15). Limitní hodnoty pro intestinální enterokoky jsou podle evropské směrnice pro koupací vody (2006/7/EC) navíc přísnější než pro *E. coli*, a tak se tento ukazatel častěji podílí na nevyhovujících hodnoceních koupacích vod.

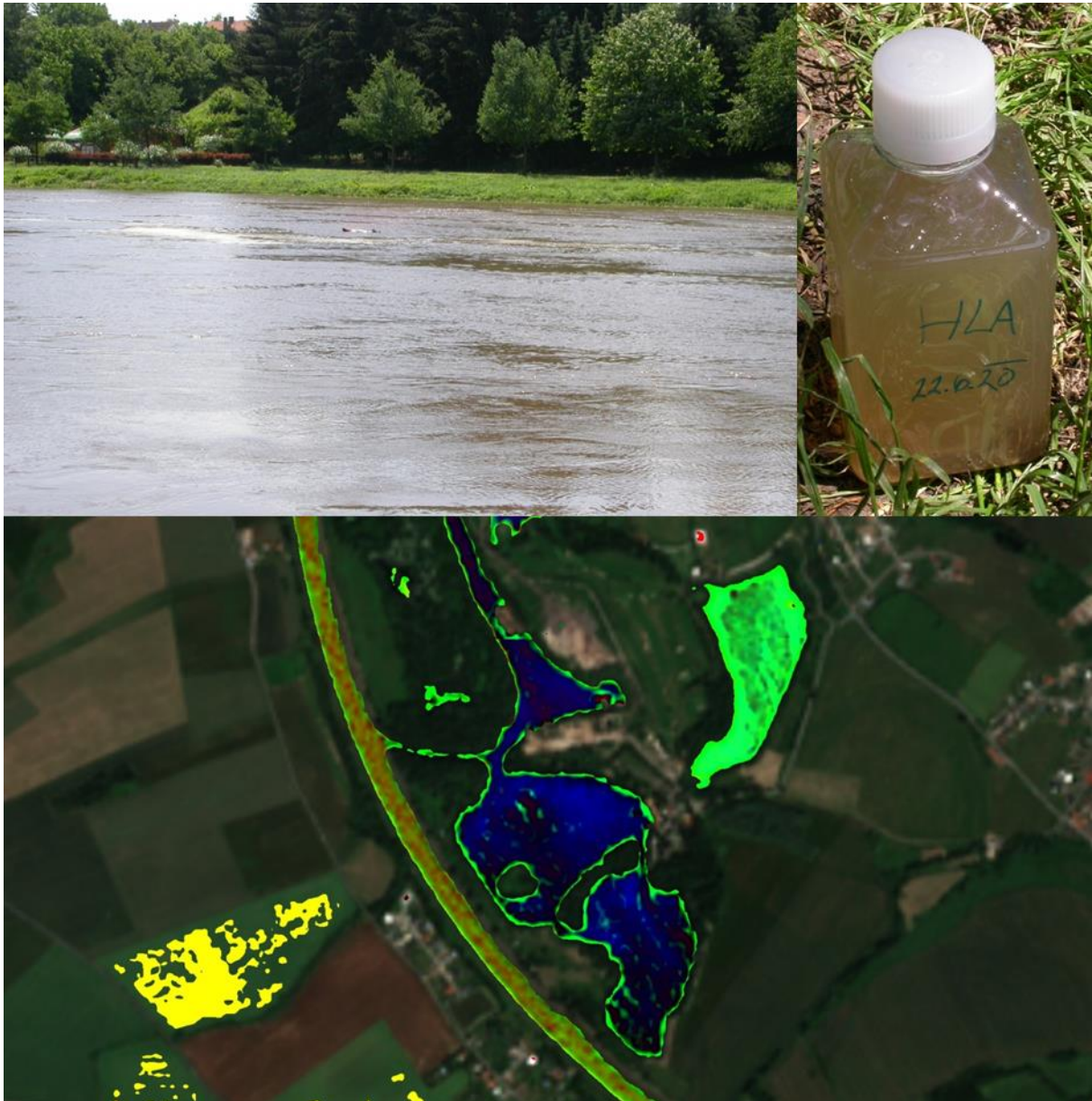
Prostorové a časové změny

Na rozdíl od fytoplanktonu není výskyt indikátorů mikrobiálního znečištění přímo pozorovatelný, takže využití metod DPZ pro monitorování koupacích vod nelze (alespoň zatím) příliš předpokládat. Pozorovat z družicových snímků určitě však lze některé průvodní jevy (viz níže).

Kolísání hodnot u mikrobiologických ukazatelů bývá značné. Navíc nemá (na rozdíl od biologických ukazatelů) sezónní průběh (charakter) a podílí se na něm řada faktorů:

- Vlastní rozptyl mikroorganismů ve vodním prostředí. Mikroorganismy jsou diskrétní jednotky a rozptýlení partikulí je nerovnoměrné jak ve vzorcích připravených v laboratoři, tak ve vzorcích pocházejících z prostředí. Nelze použít takové způsoby míchání vzorku, které sice zajistí dokonalé promíchání obsahu vzorkovnice, ale nezabrání ztrátě živých buněk (např. ultrazvuk). Rozptyl uvnitř vzorků je často významný a působí problémy při validaci mikrobiologických metod. Charakteristickým rysem mikrobiologických metod jsou náhodné rozdíly mezi paralelními vzorky, způsobené nestejným rozdělením partikulí dokonce i v dokonale promíchané suspenzi. Nejistoty mikrobiologických metod stanovení představují 30–40 %.
- Srážkové epizody včetně možných splachů z okolí a resuspendace sedimentů.
- Vliv koupajících se – v relativně velkém objemu vody v přírodních koupalištích se zdá být tento vliv ne příliš významný (16, 17).

Díky těmto a dalším vlivům (směr větru, rákosí, výška hladiny vody) se může mikrobiologická kontaminace lišit i v rámci jedné lokality (různá odběrová místa). Jedním z dalších ukazatelů, se kterým bývá do určité míry zaznamenaná souvislost mikrobiálního znečištění, je zákal (případně nerozpuštěné látky), což by mohlo vést k úvahám o využití této metody. Statisticky významná korelace mezi indikátory fekálního znečištění a zákalem však nebyla zaznamenaná (19). Pozorovat souběžný vysoký nález indikátorů fekálního znečištění a zákalu bylo možné i při jednom odběrovém dni v rámci projektu na Labi pod Starou Boleslaví (obr. 18). Průměrné hodnoty *E. coli* v této části Labe se pohybovaly (Lysá, Obříství) v devadesátých letech (1996) okolo 1000 KTJ / 100 ml, v roce 2006 okolo 300 KTJ / 100 ml (18).



Obr. 18. Labe a přilehlé nádrže u Staré Boleslavi dne 22. 6. 2020 po vysokých srážkových úhrnech v několika předchozích dnech. Labe mělo vysoký průtok a voda byla vysoce zakalená splavenými částicemi. Zákal, který není způsoben organismy s chlorofylem, je v APA scriptu zobrazen červenou barvou.

Zdroje: horní snímky - archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu; dolní snímek – modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021

Prostorové rozdíly v rámci nádrže jsme zkoumali na dvou problémových lokalitách. V rámci projektu jsme na dvou modelových lokalitách (Staňkovský rybník a písniček Mělice) zařazených do seznamu vod ke koupání, které měly podle dat z IS PiVo v předchozích letech vysoké nálezy fekálního znečištění, provedli stanovení, která měla podchytit především prostorovou variabilitu mikrobiálního znečištění v různých částech nádrže.

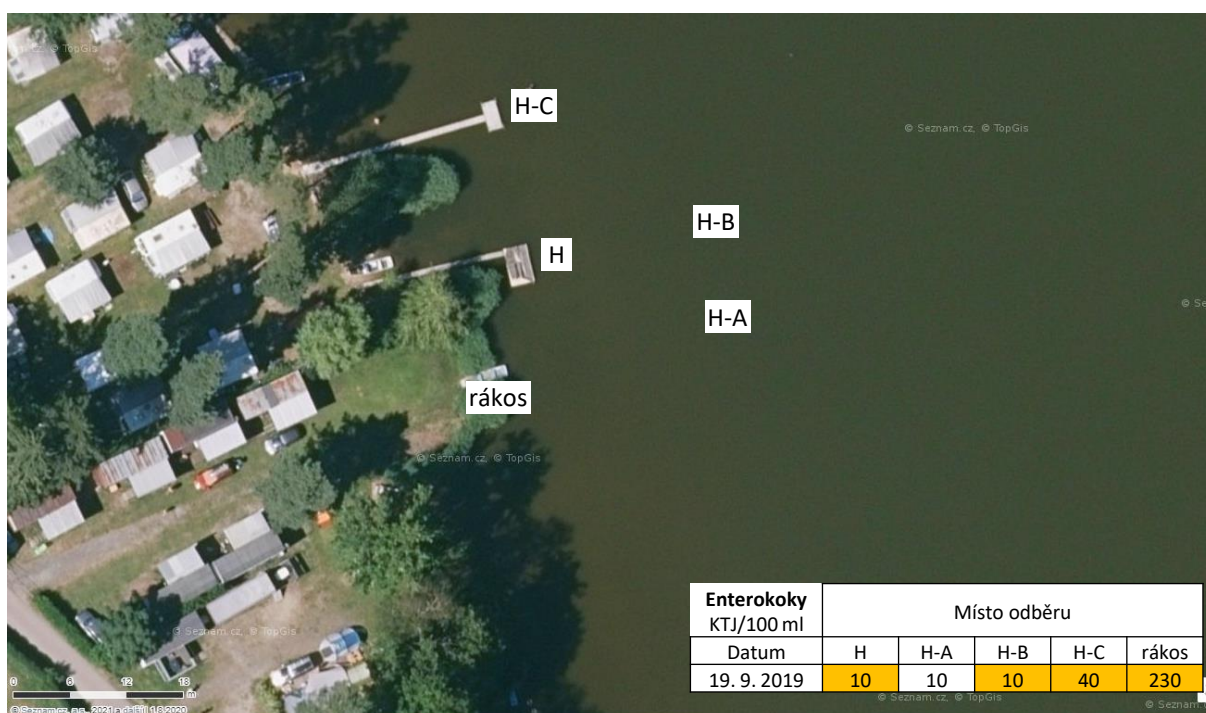
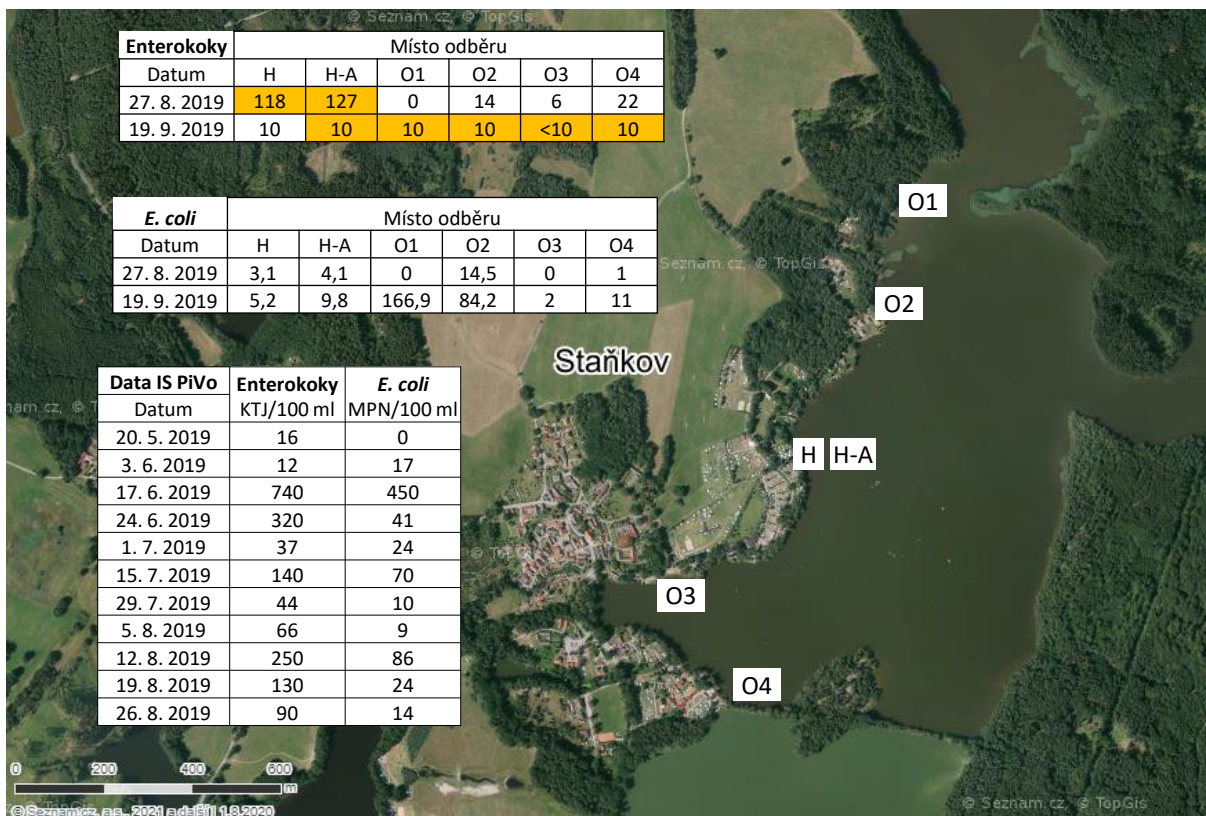
Kromě oživení fytoplanktonem jsme na těchto lokách provedli opakovaně série odběrů na různých místech nádrže (obr. 19 a 20). V Mělicích se jednalo o čtyři série odběrů. V případě Staňkovského

rybníka byly série jen dvě. V rámci druhé série jsme ještě provedli podrobnější odběry v blízkosti standardního odběrového místa (obr. 19 dole), které měly odhalit případný zdroj enterokoků.

I když ani na jedné z nádrží nebylo možné na základě našich rozborů po sezóně 2019 udělat definitivní obrázek o příčinách špatného stavu, byly pro další šetření učiněny tyto průběžné závěry:

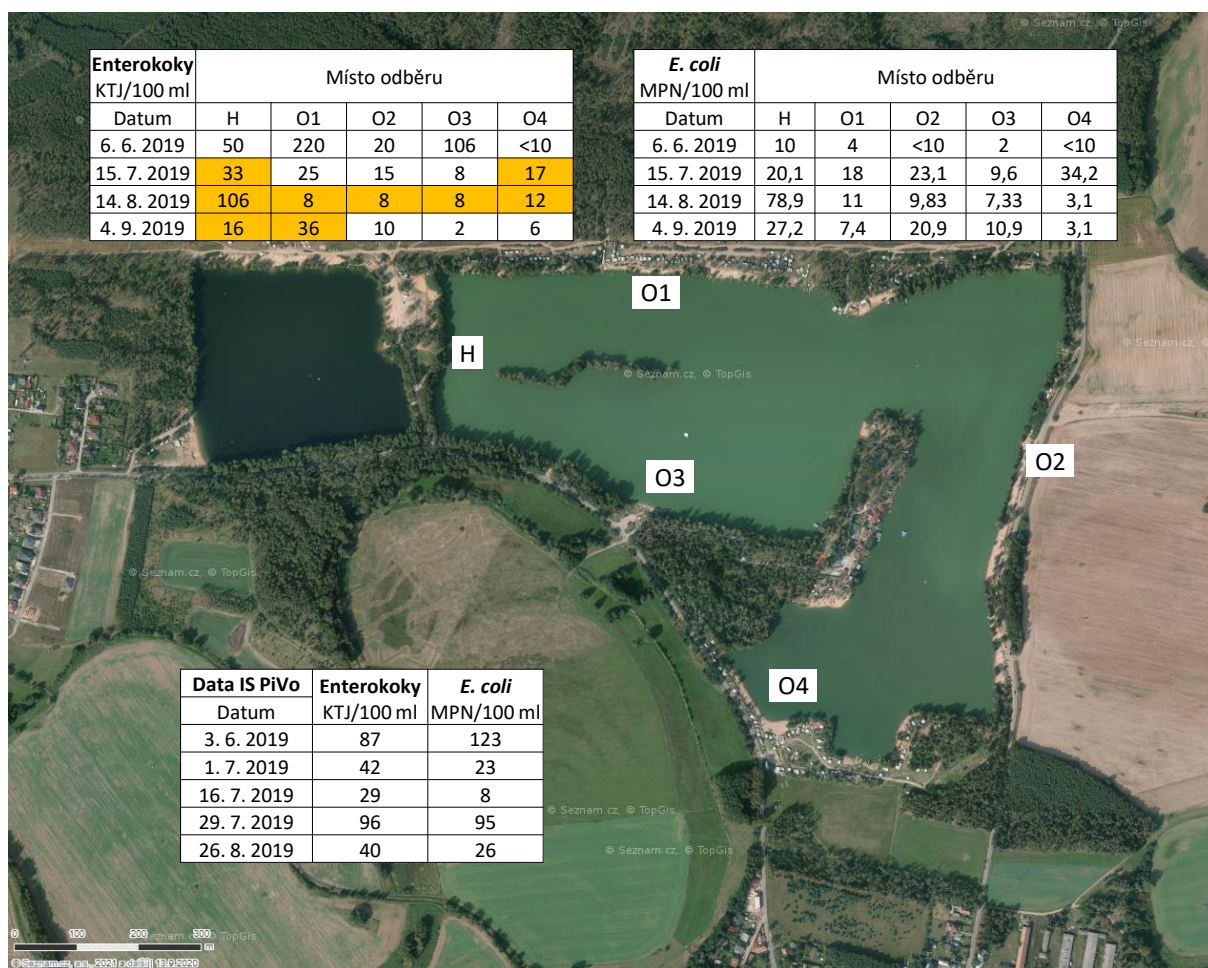
- V obou nádržích se bez pochybností poměrně často nachází zvýšené počty indikátorů fekálního znečištění, které pochází z nám neznámých zdrojů fekálního znečištění.
- Standardní odběrové místo je v obou případech spíše na více znečištěné části nádrže, což splňuje požadavek zákona č. 258/2000 Sb., že monitorovacím místem je, „místo, kde se očekává většina koupajících se osob, nebo místo, kde se [...] očekává největší riziko znečištění vody“. Je však otázka, vzhledem k přítomnosti rákosin na obou lokalitách a na Mělicích navíc i jemných dnových organicky bohatých sedimentů, zda se vždy jedná o enterokoky fekálního původu (standardně používanou metodou podle ČSN EN ISO 7899-2 totiž mohou být stanoveny také druhy, které nemají fekální původ).
- V některých případech (oranžově podbarvené buňky na obr. 19 a 20) byly zachyceny kolonie druhů rodu *Pediococcus* či druhu *Lactobacillus plantarum*, které sice na SB médiu nerostou jako červené kolonie, mají však pozitivní žluč-eskulinový test a při nepozorném odečtu mohou způsobovat falešně pozitivní výsledky. Podle velikosti, tvaru a barvy kolonie intestinálních enterokoků nelze určit druh. Vždy drobné kolonie vykazoval druh *E. haemoperoxidus* a převážně drobné kolonie vykazuje druh *E. casseliflavus*, který byl častěji detekován ve vzorcích z míst, kde jsou porosty rákosí.

Nelze s jistotou říct, který z uvedených bodů hraje zásadní úlohu ve špatném hodnocení obou nádrží. Je to otázka dalšího šetření, které mimo jiné probíhá v současnosti v rámci projektu řešeného v programu Zéta (TJ04000132).



Obr. 19. Odběrová místa a výsledky dvou odběrových dnů, které měly postihnout prostorovou variabilitu mikrobiálního znečištění na Staňkovském rybníku. Na spodním snímku rozmístění odběrových míst v okolí standardního odběrového místa. Oranžově podbarvené buňky značí přítomnost metodicky problematických organismů, které mohou být nesprávně pokládány za enterokoky. Doplněno o data ze standardního monitorování z databáze IS PiVo v roce 2019.

Zdroj: Mapy.cz, © Seznam.cz, a.s. 2021, upraveno.

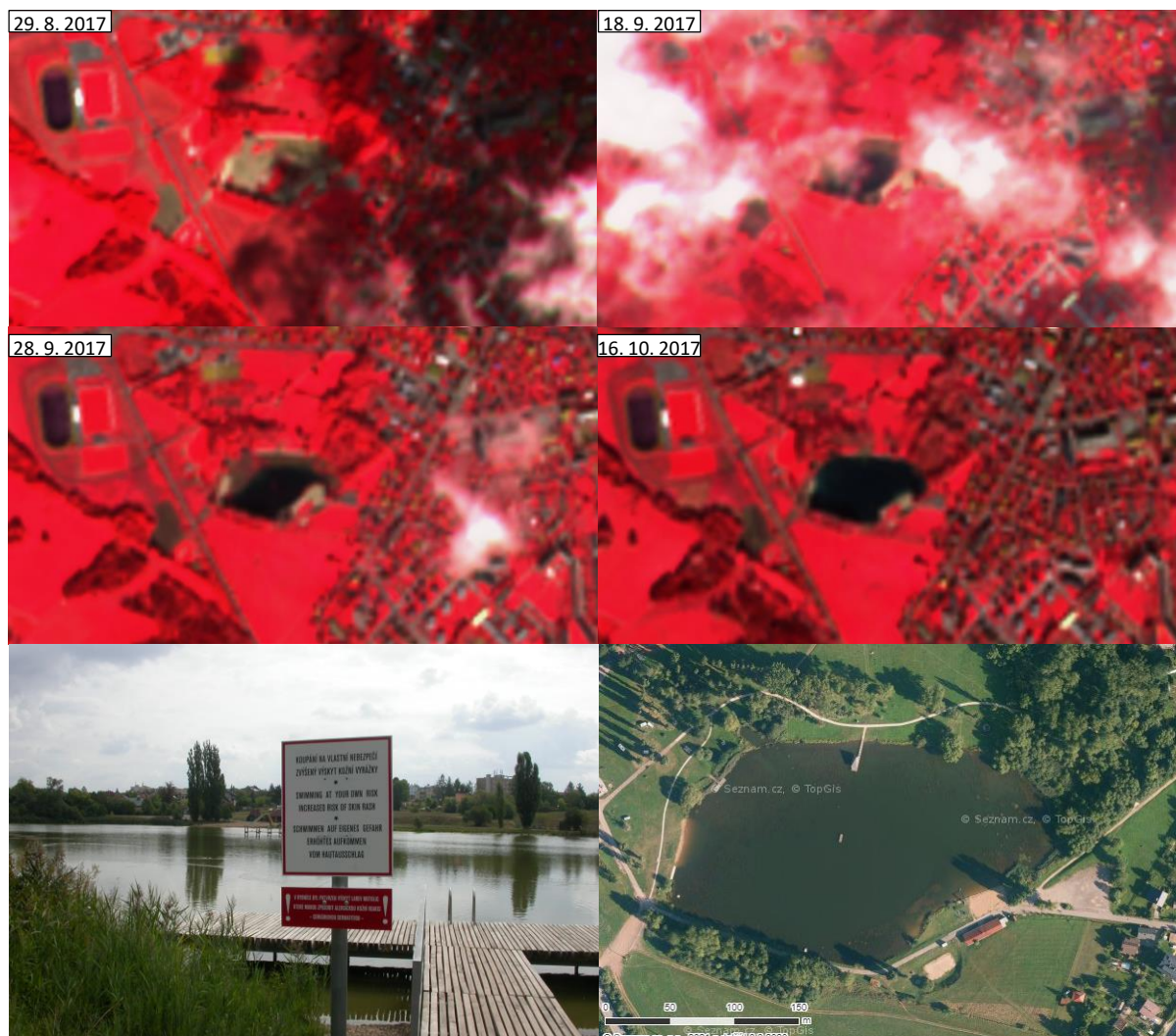


Obr. 20. Odběrová místa a výsledky čtyř odběrových dnů, které měly postihnout prostorovou variabilitu mikrobiálního znečištění na pískovně v Mělicích. Oranžově podbarvené buňky značí přítomnost metodicky problematických organismů, které mohou být nesprávně pokládány za enterokoky. Doplněno o data ze standardního monitorování z databáze IS PiVo v roce 2019.

Zdroj: Mapy.cz, © Seznam.cz, a.s. 2021

Využití dálkového průzkumu Země při řešení problematiky cercáriové dermatitidy

Monitorování původců cercáriové dermatitidy je založeno na sběru mezihostitelských vodních plíží a jejich laboratorním vyšetření. V budoucnu bude možná tento postup doplněn či nahrazen hledáním původců cercáriové dermatitidy (cercáriové stádium ptačích motolic) přímo ve vodě (resp. ve vzorcích koncentrovaných na filtrech či sítích) pomocí molekulárně-biologických metod. Vzhledem k tomu, že ani vodní plíže, ani cercárie není možné sledovat prostřednictvím družicových snímků, nejsou metody DPZ pro přímé monitorování původců cercáriové dermatitidy použitelné.



Obr. 21. Příklad, jak zjistit období, v němž byla vybraná nádrž napouštěna. Nádrž Vejspachy ve Vrchlabí byla zdrojem epidemie cercáriové dermatitidy v roce 2018. Její napouštění po předchozí rekonstrukci probíhalo především v září 2017, což je patrné z družicových snímků (nepravé barvy).

Zdroje: horní čtyři snímky – modifikovaná data Copernicus Sentinel 2021; snímek vlevo dole – archiv SZÚ, NRC pro pitnou vodu; snímek vpravo dole – Mapy.cz, © Seznam.cz, a.s. 2021

V širším kontextu však družicová data pro tuto problematiku využít lze. Většina epidemií cercáriové dermatitidy má původ v nádržích relativně slabě oživených fytoplanktonem (20). Jedná-li se o vody, které nejsou zařazeny do seznamu vod ke koupání, nebývají k dispozici žádná data o kvalitě vody nebo

jsou tato data jen velmi omezená. Jak bylo ukázáno v předchozích kapitolách, informace o tom, zda na lokalitě dochází k rozvoji fytoplanktonu, již pomocí metod DPZ získat lze. Problém může nastat kvůli velikosti nádrže. Cerkáriová dermatitida má totiž v mnoha případech původ v poměrně malých nádržích, pro které jsou metody DPZ jen omezeně využitelné. Dalším nebezpečím při využití metod DPZ může být záměna fytoplanktonu a vodních makrofyt, což bylo také výše diskutováno. Přitom vliv přítomnosti vodních makrofyt na výskyt mezihostitelských plžů a následně i původců cercáriové dermatitidy je bez pochyby pozitivní.

Metody DPZ lze v problematice cercáriové dermatitidy využít přinejmenším ještě jedním způsobem. Epidemie cercáriové dermatitidy často vznikají po koupání v nově napuštěných nádržích (21). Kolonizace plži však přeci jen nějakou dobu trvá. Proto je při vyšetřování epidemií dobré vědět, kdy přesně byla nádrž napuštěna. To sice v naprosté většině případů lze zjistit u majitele (správce, provozovatele atp.). Ne vždy je však jasné, na koho se pro tuto informaci obrátit. Navíc člověk je, jak známo, tvor omylný (zvláště, pokud se jedná o delší časový odstup). Přitom informaci o tom, kdy byla nádrž napuštěna, lze s dostatečnou přesností (týdny, nanejvýš měsíce) získat i z družicových snímků. Konkrétní případ pro epidemii cercáriové dermatitidy na nádrži Vejsplachy ve Vrchlábí lze vidět na obr. 21. Epidemie probíhala od května roku 2018 po celou koupací sezónu. Z družicových snímků je patrné, že napuštění nádrže po předchozí rekonstrukci probíhalo především v září 2017.

Závěr

Skončený projekt byl v rámci České republiky prvním pokusem, jak uplatnit metody DPZ přímo v hodnocení vod ke koupání. Je nepochybné, že k tomu, aby se metody DPZ staly nedílnou součástí monitorování kvality vod ke koupání, bude ještě nutné provést mnoho práce jak při výzkumu a vývoji metod, tak při jejich zavádění do praxe.

Toto monotematické číslo časopisu AHEM je určeno především pracovníkům krajských hygienických stanic a má jim ukázat, že lze již nyní metody DPZ v rutinní praxi používat jako velmi užitečný doplněk stávajících postupů. To však neznamená, že by v blízké budoucnosti mohly metody DPZ plně nahradit pozemní monitorování. Tím, že přinášejí zcela jiný pohled na kvalitu vody, však dají pracovníkům v praxi větší důvěru ve výsledky pozemních rozborů, pokud s nimi budou ve shodě, nebo naopak podnítí k podrobnějšímu šetření, pokud s nimi budou v rozporu. Domníváme se, že by díky metodám DPZ bylo možné monitorování provádět s nižší četností. Vzhledem k tomu, že se v současnosti připravuje revize směrnice 2006/7/ES, bude v dohledné době nutné novelizovat i naši národní legislativu pro vody ke koupání. Budou-li metody DPZ v té době dostatečně připraveny, existuje poměrně reálná možnost zapracovat metody DPZ i do našich předpisů.

Literatura

1. Swimplaces. Sport a rekreace [online]. Praha: Mapotic; 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.swimplaces.com/>.
2. Kring SA, Figary SE, Boyer GL, Watson SB, Twiss MR. Rapid in situ measures of phytoplankton communities using the bbe FluoroProbe: evaluation of spectral calibration, instrument intercompatibility, and performance range. *Can B Fish Aquat Sci* 2014;71(7):1087-95.
3. Bergeron P, Oujati H, Catalán Cuencac V., Huguet Mestre MJ, Courtois S. Rapid monitoring of *Escherichia coli* and *Enterococcus* spp. in bathing water using Reverse Transcription-quantitative PCR. *Int J Hyg Envir Heal* 2011 Nov;214(6):478-84.
4. Ferretti JA, Tran HV, Peterson SJ, Loftin V. Rapid method demonstration project at four New Jersey marine beaches using real time quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR). *Mar Pollut Bull.* 2013 Jun 15;71(1-2):51-63.
5. Rudko SP, Reimink RL, Froelich K, Gordy MA, Blankespoor CL, Hanington PC. Use of qPCR-Based Cercariometry to Assess Swimmer's Itch in Recreational Lake. *Ecohealth* 2018 Dec;15(4):827-39.
6. Ruitter H. Personal communication 24. 11. 2017.
7. Taucer-Kapteijn M. Occurrence of enterococci in the environment and their value as an indicator of water quality [dissertation]. Delft: Delft University of Technology; 2017.
8. Maťašovská V, Kothan F, Ledvinka O, Pumann P, Fojtík T, Makovcová M, Bendakovská L. Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu koupacích míst. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace.* 2021;6(1):37–45.
9. Maťašovská V. a kol. Atlas koupacích vod České republiky. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M.; 2021.
10. Péliova A, Garcia-Lozano C, Sitjar J. Aquatic plants and algae custom script detector (APA Script) [Internet]. San Francisco: GitHub; 2021 [cited 2021 Aug 9]. Available from: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/apa_script/.
11. Kothan F, Bendakovská L, Pumann P, Pouzarová T, Baudišová D, Maťašovská V, Fojtík T. (2020). Vliv pozice odběrového místa na hodnocení kvality koupací vody. In: Říhová Ambrožová J, Petráková Kánska K. (edit.) *Vodárenská biologie 2020: sborník konference: 5.-6.2.2020*; Praha. Chrudim: Vodní zdroje – Ekomonitor; 2014. 59–64.
12. Reynolds C. *Ecology of Phytoplankton.* Cambridge University Press; 2006.
13. Pumann P, Duras J. Atlas makroskopických jevů spojených s výskytem vodních květů sinic a dalších organismů v přírodních koupacích vodách. [online]. Praha: Státní zdravotní ústav; 2014 [cit. 2021-8-16]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/koupaliste-metody>.
14. Švec P. Systematika rodu *Enterococcus* [habilitační práce]. Brno: Masarykova univerzita Brno; 2019.
15. Cassanovas – Massana A, Blanch AR. Characterization of microbial populations associated with natural swimming pools. *Int J Hyg Environ Health.* 2013 Mar;216(2):132-7.
16. Šimková J. Proměnlivost ukazatelů kvality vody ve vybraném přírodním koupališti [diplomová práce]. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta; 2009.
17. Zelinková M. Vliv odběrového místa na hygienicky významné ukazatele kvality vody v přírodních koupalištích [diplomová práce]. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta; 2012.
18. Baudišová D. *Escherichia coli* v povrchových vodách. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace.* 2007; 49(3):4-5.
19. Baudišová D, Benáková A, Hlaváček J. Vliv zvýšených průtoků na změny mikrobiální kontaminace vody v povodí Olešky. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace.* 2012;54(1):13–16.

20. Duras J, Chanová M, Pumann P, Koubová R. (2014). Cerkáriová dermatitida a jak k ní přistupovat. In: Říhová Ambrožová J, editor. Vodárenská biologie 2014: sborník konference: 5.-6.2.2014; Praha. Chrudim: Vodní zdroje – Ekomonitor; 2014. 150–62.
21. Pokrupová Z. Ptačí schistosomy a cercáriová dermatitida v České republice: rozšíření, druhová diverzita a faktory ovlivňující jejich výskyt [diplomová práce]. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta; 2021.