



Zemědělská
fakulta
Faculty
of Agriculture

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Katedra aplikované ekologie

Diplomová práce

**Hodnocení znečištění stojatých vod zelenými řasami a sinicemi
pomocí jejich spektrálních vlastností**

Autor práce: Bc. Radka Laštovičková

Vedoucí práce: Ing. Václav Nedbal, Ph.D.

České Budějovice
2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracovala pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....
Podpis

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením znečištění stojatých vod zelenými řasami a sinicemi za pomoci jejich spektrálních vlastností. Jako modelové území pro vyhodnocování byly zvoleny nádrže Hracholusky a Švihov. V těchto vodách bylo znečištění vyhodnocováno pomocí určení koncentrace chlorofylu-a a získáním hodnot odrazivosti jak ze spektrometru, tak ze satelitních snímků.

Na základě výsledků jsme dokázali určit, že v obou vodních nádržích dochází k vysokému výskytu koncentrace chlorofylu-a, který slouží jako ukazatel míry znečištění povrchových vod. Obecně lze tvrdit, že koncentrace chlorofylu-a roste na místech, kde nedochází k cirkulaci vody. V těchto nádržích se jedná o začátek vzduší a také o břehy. Výsledky dále ukázaly vhodnost použití dat dálkového průzkumu Země pro hodnocení znečištění velkých vodních ploch řasami a sinicemi.

Klíčová slova: Řasy a sinice, znečištění povrchových vod, chlorofyl-a, monitoring

Abstract

This diploma thesis deals with the evaluation of pollution of stagnant waters by green algae and cyanobacteria using their spectral properties. We chose the Hracholusky and Švihov reservoirs as a model area for evaluation. In those waters, the degradation was evaluated by determining the chlorophyll- α concentration and by obtaining an evaluation reflectance from both the spectroradiometer and satellite images.

Based on the results, we are able to determine that a high incidence of chlorophyll- α concentration occurs in both water reservoirs, which serves as an indicator of the degree of polluting the body's surface water. In general, it can be argued that the concentration of chlorophyll-a increases in places where no water circulation occurs. In those tanks it is the beginning of the swell and also the shores. The results also demonstrate the great suitability of using Earth remote sensing data to assess the pollution of large bodies of water by algae and cyanobacteria.

Keywords: Algae and cyanobacteria, surface water pollution, chlorophyll-a, monitoring

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Václavu Nedbalovi, Ph.D. za všestrannou pomoc, množství inspirativních a cenných rad, podnětů, doporučení, připomínek a zároveň za velkou trpělivost a obdivuhodnou ochotu při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce.

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Literární přehled.....	8
2.1	Charakteristika řas a sinic.....	8
2.1.1	Řasy.....	8
2.1.2	Sinice.....	10
2.1.3	Absorbce slunečního záření a asimilační barviva	10
2.2	Povrchové vody	12
2.2.1	Tekoucí vody.....	12
2.2.2	Stojaté vody.....	12
2.3	Znečištění povrchových vod	13
2.3.1	Bodové znečištění	13
2.3.2	Plošné znečištění	14
2.3.3	Znečišťující látky odpovědné za růst sinic a řas	14
2.4	Důsledky znečištění povrchových vod.....	15
2.4.1	Trofie.....	15
2.4.2	Eutrofizace	17
2.5	Možnosti monitoringu	18
3	Metodika	19
3.1	Modelové území.....	19
3.2	Odběry vzorků.....	19
3.3	Sběr spektrálních dat	19
4	Výsledky	21
4.1	Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí spektrometru.....	21
4.2	Závislost algoritmu spektrální odrazivosti na koncentraci chlorofylu-a	23
4.3	Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí satelitních snímků	26
5	Diskuse.....	34

5.1	Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí spektrometru.....	34
5.2	Závislost algoritmu spektrální odrazivosti na koncentraci chlorofylu-a	35
5.3	Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí satelitních snímků	36
Závěr	39
Seznam použité literatury	40
Seznam tabulek	46
Seznam příloh	47

1 Úvod

Voda je nejdůležitější a nejrozšířenější látkou na naší planetě a je podmínkou pro existenci života. Pokrývá více než dvě třetiny povrchu Země a vyskytuje se v pevném, kapalném i plynném skupenství (*Kleczek, 2011*). Jelikož se žádný člověk nemůže vyhnout konzumaci pitné vody, je pro nás velmi důležité udržovat ji v co nejlepším stavu. Tuto pitnou vodu získáváme úpravou vod povrchových – ze studní, pramenišť, vrtů, potoků, rybníků, řek nebo vodních nádrží. Řasy a sinice vyskytující se v takových vodách mohou při extrémním nárůstu zapříčinit narušení celého vodního ekosystému.

V dnešní době se potýkáme s mnohem vyšším znečištěním povrchových vod než před padesáti lety. Důvodem je zvýšená lidská činnost, která má nejen pozitivní, ale i negativní dopady. Mezi negativa patří především zemědělská činnost a s ní používání průmyslových hnojiv. Mezi látky obsažené v hnojivech, které jsou odpovědné za eutrofizaci patří hlavně fosforečnany a dusičnany. Nárůst fotosyntetizujících řas a sinic je podpořen také globálním oteplováním, vysokými teplotami v letních epizodách a snížením výskytu srážek (*Nedbal a Brom, 2019*).

Vzhledem k tomu, že tak s postupem času na našem území narůstá problém znečištění povrchových, zvláště stojatých vod řasami a sinicemi, je nutné míru tohoto znečištění měřit a monitorovat pro účely jejich ochrany a nakládání s těmito povrchovými vodami. Laboratorní rozborů vzorků z rozsáhlých vodních ploch jsou časově i finančně náročné. V poslední době však díky rozvoji metod dálkového průzkumu Země rostou možnosti monitoringu znečištění vodních ploch řasami a sinicemi těmito prostředky.

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením znečištění povrchových vod zelenými řasami a sinicemi za pomoci jejich spektrálních vlastností, technikami dálkového průzkumu Země.

Dílčí cíle:

- sestavení závislosti laboratorně naměřených dat o obsahu chlorofylu ve stojatých vodách a spektrálních dat ze spektrometru a satelitního senzoru
- interpretace dat v souvislosti s prostředím vodních nádrží
- vyhodnocení rozdílu naměřených dat ze spektrometru a ze snímků pořízených satelitem

Modelové území bylo zvoleno tak, aby sledované vodní nádrže měly dostatečnou rozlohu pro možnost sledování spektrálních vlastností vody satelitním senzorem.

2 Literární přehled

2.1 Charakteristika řas a sinic

Řasy a sinice označujeme jako primárními producenty, které z anorganických látek produkují organickou hmotu. Ta slouží jako potrava pro další organismy. Zachycují sluneční záření a vyskytují se v prostředí s různou přístupností k vodě. Záleží také na tom, jestli je voda stojatá nebo tekoucí. Řasy dokážou velmi rychle růst, protože tato schopnost je jejich jedinou zbraní proti predátorům (Bratrych, 2005).

2.1.1 Řasy

Řasy (řecky *Phykos*, latinsky *Algae*) jsou fotosyntetizující mikroorganismy s eukaryotickou stavbou buňky a jsou rozšířené po celé Zemi. Jejich tělo je tvořeno jednobuněčnou nebo mnohobuněčnou stélkou. Vzhledem k pigmentaci se řasy dříve nazývaly zelenými, modrozelenými, žlutozelenými, hnědými, zlatohnědými a červenými (Kalina, 2005; Vávra Ambrožová, 2016).

Podle Kaliny (2005) řasy rozdělujeme (Tab. 1) na čtyři oddělení: *Glaucophyta*, *Ruduchy*, *Zelené řasy a Parožnatky*. Bratrych (2005) rozděluje řasy na *Rhodophyta*, *Dinophyta*, *Cryptophyta*, *Chromophyta*, *Phaeophyceae*, *Euglenophyta* a *Chlorophyta*.

Na většině stanovišť fungují jako primární producenti v potravinovém řetězci, produkující organický materiál ze slunečního světla, oxidu uhličitého a vody. Chloroplasty nalézající se v buňkách obsahují sadu funkčně a biochemicky odlišných fotosyntetických pigmentů, z nichž je nejdůležitější chlorofyl (Sambamurty, 2005).

Impérium	Říše	Oddělení
<u>Prokarya</u>	Bakterie (<u>Bacteria</u>)	Sinice (<u>Cyanobacteria</u>)
<u>Eukarya</u>	Prvoci (<u>Protozoa</u>)	<u>Eugleny (Euglenophyta)</u>
		<u>Obrněnky (Dinophyta)</u> <u>Chlorarachniophyta</u>
	<u>Chromista</u>	<u>Skrytěnky (Cryptophyta)</u> <u>Heterokontophyta</u>
<u>Rostliny (Plantae)</u>	<u>Rostliny (Plantae)</u>	<u>Glaucophyta</u>
		<u>Ruduchy (Rhodophyta)</u>
		<u>Zelené řasy (Chlorophyta)</u>
		<u>Parožnatky (Charophyta)</u>

Tab. 1: Přehled řasových oddělení a jejich zařazení (Kalina, 2005)

Řasy nalezneme ve sladkých i slaných vodách. Vyskytují se převážně v rybnících, proudech, jezerech, teplých pramenech atd. Řadíme je mezi thalofyty, protože nemají kořeny, stonky ani listy. Vyskytují se téměř ve všech prostředích na Zemi, pouze je důležité pro jejich přežití viditelné světlo. Mikroby vyskytující se v těchto prostředích nazýváme extremofily. Řasy se liší také svojí velikostí. Nejmenší rozměry jednobuněčných řas dosahují velikosti 3 až 10 nanometrů, které jsou neviditelné pro lidský zrak. Vávra (2016) uvádí, že některé chaluhy mohou dosahovat až 70 metrů, podle Gilpina, (2007) se jedná pouze o 53 metrů, ale Brytrych (2005) uvádí, že můžou dorůst do délky až 100 metrů. Tyto obří stélky Kalina (2005) přisuzuje druhu *Macrocystis pyrifera*, které jsou svojí délkou srovnatelné se suchozemskými rostlinami. V následujících odstavcích jsem rozdělila řasy na oddělení zelených, červených a hnědých. Mezi nimi je rozdíl v obsahu a množství asimilačních barviv, která jsou pro tuto diplomovou práci klíčová.

Extremofily dělíme do mnoha různých kategorií podle extrémního charakteru jejich prostředí, jako jsou velmi vysoké nebo velmi nízké teploty, hodnoty pH, slanost, suchost, vysoká koncentrace těžkých kovů, velmi vysoké nebo nízké úrovně záření, zejména ultrafialové záření a do určité míry anaerobní prostředí (Sambamurty, 2005).

Termofily jsou organismy, milující vysoké teploty. Rostou v horkém prostředí jako jsou například horké prameny. Nejvyšší teplota pro řasy je 50 °C, pro sinice cca 70 °C (Seckbach, 2007).

Zelené řasy tvoří druhově velmi početnou skupinu a patří mezi nejrozšířenější. U zástupců zelených řas se objevují všechny typy stélek. Mezi jejich asimilační barviva patří nejen chlorofyl-a, ale také chlorofyl-b, karoten, lutein, violaxantin, zeaxantin atd. Do tohoto oddělení řadíme 5 tříd: Zelenivky, Kadeřnatkovité, Trubicovité, Spájkivky a Parožnatky (Kalina, 2005; Vávra Ambražová, 2016).

Červené řasy neboli ruduchy jsou zbarveny červeným fykoerytrinem, ale obsahují i další asimilační barviva, například chlorofyl. Nalezneme je v mořích a méně ve sladkovodních vodách. Zde řasy obsahují méně fykoerytrinu, což zapříčiňuje nahnědlou, málo načervenalou až špinavě zelenou barvu (Hartman, 2005; Jelínek, 2014).

Hnědé řasy až na některé výjimky nalezneme v moři, až do hloubky sta metrů. Nejčastěji se vyskytují na pobřeží. Jedná se vždy o mnohobuněčné organismy, které mají různé stélky a jejich rozměry můžeme srovnávat se suchozemskými rostlinami. Suché jsou hospodářsky využívané jako palivo, mokré jako krmivo pro ovce. Mají značné nároky na světlo a řadíme je mezi fotoautotrofní řasy (Kalina, 2005).

2.1.2 Sinice

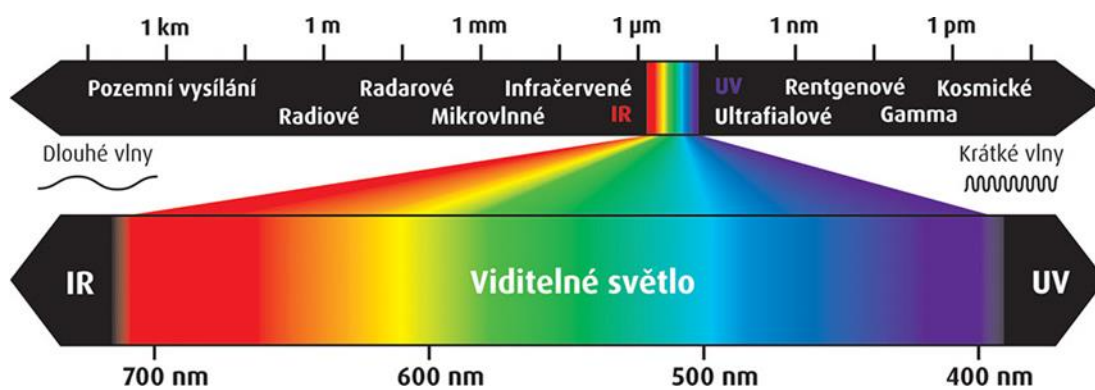
Sinice (*Cyanophyta*) patří mezi nejstarší organismy na planetě Zemi. První paleontologické nálezy datujeme do doby před 3,2 miliardami lety, kdy se podílely na sycení atmosféry kyslíkem. Patří do skupiny bakterií, protože se jedná o prokaryotní buňky. Jako všechny živé organismy mají schopnost růstu a vyvíjení se, metabolismování, využívání nebo uvolňování energie, rozmnožování se, obsahují genetický materiál, odpovídají na vnější podněty a mají buněčné membrány, díky které řídí výměnu chemických látek. Sinice jsou fotosyntetizující organismy, které se podobají řasám. Nalezeme je ve vodním prostředí, nicméně je můžeme také objevit na různých vlhkých místech, například na půdě, na skále, na stěně, v litorálu, na dně, v nárostech, ale i na pouštích nebo polárních oblastech (Kvasničková, 2018; Jelínek, 2014; Gilpin, 2007).

Jejich asimilační barviva se skládají převážně ze zeleného chlorofylu-a (výjimečně chlorofylu-b, -c, -d), modrého fykocyaninu a červeného fykoerythrinu, ale také obsahují proteinová barviva a B-karoten. Tato asimilační barviva jsou volně a koncentricky rozptýlená ve vnější plazmě kolem jaderné hmoty, nikoli v chromatoforech, jak je tomu u vyšších rostlin. Zbarvení sinic není stálé. Můžou mít ocelovou, sinou, načervenalou, žlutozelenou, modrou a nejčastěji modrozelenou barvu (Hartman, 2005; Kalina, 2005).

Kalina (2005) uvádí, že sinice se množí buněčným dělením a fragmentací vláken. Některé druhy jsou schopné fixovat plynný dusík a po jejich rozkladu a odumření se obohacuje voda i půda vodních toků.

2.1.3 Absorbce slunečního záření a asimilační barviva

Část slunečního záření spadá do spektrální oblasti, které je viditelné pro lidské oko, a to od 380 do 680 nanometrů. Jedná se o část spektra, u kterého dokážeme vnímat barvy, jejich kombinace i intenzitu. V různých vlnových délkách dokážeme rozpoznat barevné spektrum (Obr. 1). Pro vlnovou délku 380–425 nm rozeznáváme fialovou barvu, pro 425–490 nm modrou, pro 490–510 nm modrozelenou, pro 510–550 nm zelenou, pro 550–585 nm žlutou barvu, pro 585–640 nm oranžovou a pro 640–680 nm červenou. Od 700 nm vlnové délky přestává být pro lidské oko záření viditelné a označuje se za touto hranicí jako infračervené. Do tohoto spektra mezi 380–710 nm náleží i radiační energie elektromagnetického záření, které zelené rostliny používají pro fotosyntézu (Kincl a Krpeš, 2006; Hnilička, 2005).



Obr. 1: Viditelné barevné spektrum (Dušek, 2012)

Fotosyntéza u rostlin by nemohla vzniknout, pokud by neobsahovaly asimilační barviva neboli fotosyntetické pigmenty, na které se vážou fotony získané ze slunečního záření. Tyto pigmenty u řas a sinic dělíme na základní skupiny: chlorofyly, fykocyaniny, fykoerythrinu a karotenoidy (Kincl a Krpeš, 2006).

Chlorofyly jsou nejdůležitější právě tím, že absorbují fotony převážně v oblasti červené a modré části slunečního spektra. Většinou zelené rostliny obsahují 7 typů chlorofylu: chlorofyl-a, -b, -c, -d, -e, dále pak bakteriochlorofyly-a a -b. Jejich tvorba je podmíněná přítomností železa (Hartman, 2005; Kalina, 2005; Hnilička, 2005).

Modrozelený chlorofyl-a patří mezi nejdůležitější, protože po absorpci fotonu se dostane do vybuzeného stavu a tím uvolňuje energeticky bohatý elektron. Najdeme ho u sinic, řas a vyšších zelených rostlin (Tab. 2). Společně s chlorofylem-b je řadíme mezi hlavní barviva sběrných komplexů. Absorbují záření v oblasti od 380 do 470 nanometrů a dále od 650 do 680 nanometrů. Řasy a sinice vidíme zeleně zbarvené právě proto, že absorbují modrofialovou a červenou oblast slunečního spektra, ale zelenou barvu odráží (Chalupová-Karlovská, 2010; Kincl a Krpeš, 2006).

Chlorofyl-a	Sinice, řasy, vyšší zelené rostliny
Chlorofyl-b	Krásnoočka, zelené řasy a vyšší rostliny
Chlorofyl-c	Chaluhy, obrněnky, zlativky, rozsivky
Chlorofyl-d	Některé druhy ruduch

Tab. 2: Výskyt chlorofylů v přírodě (Kincl a Krpeš, 2006)

Žlutozelený chlorofyl-b se vyskytuje převážně u zelených řas, vyšších rostlin a krásnooček. Chlorofyl-c má odlišnou biosyntézu než ostatní typy chlorofylů, a proto není považován za pravý chlorofyl. Není obsažen v membráně, nemá fytolový výběžek a je vodorozpustný (Kalina, 2005; Hnilička, 2005).

Fykoerythrin se vyskytují u sinic, ruduch a skrytěnek a mají červené nebo červenofialové zbarvení (*Vymetalová, 2010*).

Fykocyanin nalezneme také u sinic, ruduch a skrytěnek a obsahují modré až modrozelené barvivo (*Vymetalová, 2010*).

Karotenoidy jsou žluté, oranžové až červené barvy, které využívají pro absorpci část slunečního spektra od 480 do 570 nanometrů, tzn. od fialové po modrozelenou barvu. Zachycená energie fotonů se dále přenáší na chlorofyly. Rozdělujeme je na dvě skupiny: xantofyly a karoteny. Žlutooranžové karoteny obsahují až třicet látek, mezi něž patří například betakaroten nebo alfa-karoten. Jejich nejvyšší absorpce je od 410–485 nanometrů. Žlutozelené xantofyly absorbují slunečné záření od 450–500 nm a mezi nejčastěji vyskytující se látky řadíme lutein nebo neoxanthin (*Kalina, 2005; Hnilička, 2005*).

2.2 Povrchové vody

Na zemském povrchu se přirozeně vyskytuje povrchová voda, kterou nalezneme nejen v řekách a vodních plochách, ale i v přirozených dutinách pod zemským povrchem. Jakmile se srážková voda dotkne povrchu Země, je vnímána jako voda povrchová, která nejen že teče po povrchu, ale také může být zadržována v přirozených depresích nebo v umělých nádržích. Zahrnuje vodu v rybnících, jezerech, řekách, potocích, umělých vodních nádržích a mokřadech s volnou hladinou. Stav vody v jezerech a řekách se mění podle kolísání odtoku a přítoku. Každoročně řeky odvedou cca 20 miliard tun materiálu z pevnin do oceánů (*Kvítek, 2017; Slavík a Neruda, 2007; Kleczek, 2011; Holcová, 2012*).

2.2.1 Tekoucí vody

Tekoucí vody jsou charakterizovány jako trvalé či občasné jednosměrné proudění vody. Díky pohybu vody je blokován, či velmi potlačen větší nárůst sinic a řas, proto horské potoky, řeky i bystřiny jsou výrazně čistší než stojaté vody. Vyskytuje se v nich více kyslíku a tím se stávají více vyhovujícím prostředím pro ryby a další vodní organismy. Můžeme je dělit podle délky, velikosti nebo sklonu toku a dále je můžeme dělit na škálu typů – vlastní prameny, bystřiny, pramenné stroužky, horské potoky, říčky, potoky, řeky a veletoky (*Šimik, 2007; Sukop, 2006*).

2.2.2 Stojaté vody

Hlavním rozdílem mezi tekoucí a stojatou vodou je to, že u stojatých vod neexistuje trvalé jednosměrné proudění vody. To znamená, že v těchto vodách může docházet k

cirkulaci vody zejména poryvem větru nebo konvekčního proudění nebo naopak ke stagnaci. Nejedná se tedy o jednosměrný a neustálý pohyb vody. Pohyb celého vodního sloupce zaznamenáváme především u mělkých nádrží, kde je způsobený vlněním vody. U hlubokých částí se vlnění hladiny téměř neprojevuje. Stojaté vody dělíme na rybníky, jezera, rašeliniště s volnou hladinou vody, tůň, údolní nádrže, slatiny s volnou hladinou vody zatopené lomy atd. Všechny typy stojatých vod poskytují možnost života (*Sukop, 2006; Gilpin, 2007*).

2.3 Znečištění povrchových vod

Znečištění povrchových vod má negativní dopady nejen pro lidi, ale také pro živočichy a všechny druhy žijící ve vodě. Znečištění vody chápeme jako ničení důležitého zdroje změnou jeho fyzikálních a chemických podmínek. Kontaminace vody chemikáliemi mohou způsobit dlouhodobé nebo bezprostřední škody na zdraví lidí i jiných organismů, jež s ní přijdou do kontaktu. Umělá hnojiva, lidské odpady, průmyslové odpady, detergenty a erodovaná půda jsou častým zdrojem velkého množství fosforu a dusíku, které jsou dále odplavovány do řek, rybníků a jezer, čímž dochází k eutrofizaci. Díky zvýšené koncentraci fosfátů a dusičnanů, jako nejdůležitějších anorganických sloučenin těchto dvou prvků v prostředí může v povrchových vodách růst obsah řas a sinic, které při vysokém množství vytvářejí pod hladinou (tzv. vodní květ). Eutrofizace vod je proces, který probíhá přirozeně ve vodním prostředí. V důsledku lidské činnosti míra přesáhla přirozené meze, kdy hlavní příčinou je vysoký přísun živin do vodního ekosystému (*Primack et al., 2011; Velišek, 2014*).

Podle Hartmana (2005) dělíme znečištění na bodové a plošné a podle Hubačkové a Oppeltové (2009) můžeme znečištění vod dělit na fyzikální, chemické a organické. Mezi chemické znečištění povrchových vod řadíme především znečištění chloridy, sírany, dusičnany, fosfáty, pesticidy nebo těžkými kovy, pocházejícími z lidské činnosti. U biologických látek se setkáváme s toxickými látkami, mikroorganismy, bakteriemi, zplodinami hnilobného rozkladu vody nebo se zárodky různých chorob. U znečištěných povrchových vod se setkáváme s kombinacemi právě antropogenního i přírodního původu.

2.3.1 Bodové znečištění

Bodové znečištění má původ v jednom, prostorově rozsahem omezeném místě, a jeho šíření lze obvykle účinně zamezit. Při znečištění ropnými produkty lze využít norné stěny, naopak biologické stěny lze použít u organického znečištění. Toto znečištění

můžeme dále dělit na znečištění průmyslovými a komunálními odpadními vodami (Kvítek, 2017; Hartman, 2005).

2.3.2 Plošné znečištění

Plošné znečištění se hůře pozoruje a je mnohem nebezpečnější, protože probíhá často nepravidelně v kombinaci s půdními, proměnlivými meteorologickými, porostními a morfologickými podmínkami. Mezi plošné zdroje znečištění vodního prostředí patří látky mající původ v rozsáhlejších plochách, např. zemědělské živiny, přírodní živiny a eroze. Důsledkem je pak rozsáhlý smyv těchto látek nebo jejich trvalý vnos do povrchových vod (Kvítek, 2017; Kaličinská, 2006; Hartman, 2005).

2.3.3 Znečišťující látky odpovědné za růst sinic a řas

Za nárůstem sinic a řas v povrchových vodách stojí vedle fyzikálních faktorů (malé nebo žádné proudění vody, prohřívání vodního sloupce, vysoký příkon sluneční energie) především přísun živin, zejména dusičnanů a fosfátů (fosforečnanů).

Dusičnany (NO_3^-) vznikají při nitrifikaci amoniakálního dusíku. Vyskytují se v čistých vodách jen ve stopovém množství a v menším množství skoro ve všech vodách a v některých potravinách. Ve vyšších koncentracích se do vodního prostředí dostávají z prostředí znečištěného zvířecími a lidskými exkrementy, dále ze zemědělství, využívajícím dusíkatá hnojiva. Zde se vyskytují v odpadních vodách nebo se do vodního prostředí dostává z atmosféry díky srážkám. V orníční vrstvě se nachází přibližně 0,1–0,2 % dusíku. Koncentrace dusičnanů kolísá se změnou vegetačního období. V letním období jsou dusičnany odčerpávány řasami a sinicemi, které redukovat dusičnany na dusitany a tím je využívají jako zdroj dusíku k vytváření chlorofylu, syntézu aminokyselin nebo nukleových kyselin. Naměřené koncentrace dusičnanů se výrazně liší v závislosti na místech odběru, kdy nižší množství očekáváme v jezerních vodách a horních tocích řek. Vysoká koncentrace dusičnanů v pitné vodě může zapříčinit methemoglobinemii. Společně s fosforečnany způsobují eutrofizaci vod (Kučerová *et al.*, 2011; Kvítek a Tipl, 2003; Pitter, 2009; Velíšek, 2014).

Fosforečnany (PO_4^{3-}) se do vodního prostředí dostávají díky vyluhování a rozpouštění některých minerálů, hornin a půd. Lidskou činností se do půdy dostávají skrze prací a mycí prostředky. Dalším zdrojem jsou fosforečná hnojiva nebo živočišné exkrementy. Fosfor patří mezi prvky, které jsou nezbytné pro růst živočichů a rostlin a hraje velkou roli při tvorbě DNA (deoxyribonukleová kyselina), RNA (ribonukleová

kyselina), ADP (adenosindifosfát) a ATP (adenosintrifosfát). Forma rozpustných fosforečnanů má klíčový význam pro eutrofizaci jezer a rybníků, kdy za jejich přítomnosti dochází k masivnímu nárůstu sinic a řas. Dále přispívají k eutrofizaci rybníků a jezer tím, že dochází k masivnímu nárůstu sinic a řas v povrchových vodách. Fosfáty jsou řasami a sinicemi zabudovávány do biomasy díky čemuž se fosfor stává součástí koloběhu ve vodním ekosystému. Znečištěné stojaté vody eutrofizací obsahují v letních epizodách nižší koncentrace fosforu než v jiných epizodách, protože dochází k fotosyntetické asimilaci, při níž je fosfor spotřebováván vodními organismy (*Housecroft a Sharpe, 2014; Pitter, 2009; Krása, 2013; Shock a Pratt, 2003*).

2.4 Důsledky znečištění povrchových vod

Značné množství fosforečnanů a dusičnanů se dostává do stojatých povrchových vod hlavně ze zemědělství (dusíkatá a fosforečná hnojiva). Tyto sloučeniny zapříčiňují masivní nárůst řas a sinic, díky čemuž znepřístupní průnik světla na dno. Ponořené zelené rostliny nejsou schopné fotosyntézy, u dna pak dochází k nedostatku kyslíku. Na druhou stranu v povrchových vrstvách vody v takové nádrži dochází v poledních hodinách k překysličení a vyčerpání veškerého oxidu uhličitého, čímž narůstá zásaditost vody, která může způsobit úhyn ryb plyným amoniakem. Komplexem těchto dějů dochází k naprostému narušení vodního ekosystému, který je nevhodný pro spoustu vodních organismů. Z hlediska využití je takto znečištěná voda nepoužitelná nejen pro vodohospodářské využití, ale i pro koupání.

Zvýšení koncentrace dusíkatých nebo fosforečnanových sloučenin se projevuje vysokou produktivitou některých organismů na úkor jiných, které jsou citlivější. Nejdříve je potlačen růst makrofyty (např. rákos obecný, stulík žlutý, rdesno obojživelné), které jsou vhodné pro rozmnožování některých živočichů, dále dochází k narušení ekosystému, snížení biodiverzity a růst řas a sinic se naopak zvyšuje. Dochází k anoxii a vymírání ryb a tento děj nazýváme kulturní eutrofizací (*Velíšek, 2014; Townsend, 2010*).

2.4.1 Trofie

Typizace vod podle jejich úživnosti (trofie) se určuje podle fyzikálně chemických parametrů a obsahu chemických látek, které se vyskytují ve znečištěných vodách. Trofii můžeme dělit na skupiny: oligotrofní, mezotrofní, eutrofní, slabě hypertrofní a silně hypertrofní (Tab. 3). Díky lidské činnosti začalo přibývat celkové eutrofizace a úživnosti vody zvyšováním obsahu fosforečnanů a dusičnanů v zemědělských půdách, kde

nejdou spotřebovány při produkci. Pro vyhodnocení těchto znečištěných vod existuje celá řada metod, např.: určení průhlednosti, prognóza rozvoje fytoplanktonu, stanovení chlorofylu-a, trofický potenciál nebo poměrování živin (Adámek, 2010; Hartman, 2005; Kvítek a Tippl, 2003).

Trofie	Oligotrofie	Mezotrofie	Eutrofie	Slabá hypertrofie	Silná Hypertrofie
P-celkový (μg/l)	< 15	15–50	50–200	200–800	> 800
Chlorofyl-a (μg/l)	< 3	3–7	7–30	30–500	> 500
Průhlednost (m)	> 5	2–5	0,5–2	0,2–0,5	< 0,2

Tab. 3: Ukazatele trofie vodních nádrží (Hartman, 2005)

Oligotrofie jsou vody s nízkým obsahem živin a jedná se především o horské toky, hluboké nádrže bez bahnitých usazenin a bez mělčin nebo jezera na žulovém podloží. Hladina i dno vodního prostředí obsahuje dostatek kyslíku a díky nedostatku živin nedochází k rozvoji makrofyt nebo fytoplanktonu. Mezi oligotrofní vody řadíme v České republice šumavská jezera a jezera ze zbytkových jam lomů Barbora u Teplic a Chabařovic. Vodní oligotrofní prostředí se na našem území postupem času díky vysokému přísunu živin ze zemědělství a lidských zdrojů mění na eutrofní až hypertrofní, čímž se zvyšuje produkce zelených řas a sinic. Ty vytvářejí zastínění a tím zabraňují růstu vyšších rostlin na dně.

Mezotrofie je termín stádium mezi oligotrofií a eutrofií. Jedná se o vodní prostředí obohacené vysokým druhovým bohatstvím vodních organismů. Řadíme sem zatopené kamenolomy a pískovny.

Eutrofie vystihuje vody, které mají vyšší koncentraci fosforu a jsou bohaté na živiny. Vodní prostředí je zbarveno řasami a sinicemi, které se vyskytují především v mělkých vodních nádržích obsahujících větší množství živin. Takto znečištěné vody jsou vhodným prostředím pro růst břehových porostů zabraňujících přístupu k vodě, dále se zde vyskytují vodní makrofyty ztěžující plavání a také řasy rostoucí na dně těchto vod, které se někdy uvolňují a tím způsobí pokryv hladiny jezera.

Hypertrofie je termín pro velmi znečištěné vody zapříčiněné enormním přísunem živin hlavně díky lidské činnosti. V takových vodách dochází k velkému rozvoji fytoplanktonu potlačující rozvoj makroskopických vodních rostlin. Průhlednost vody sahá pouze k několika decimetrům až centimetrům. (Sukop, 2006; Kleczek, 2011; Townsend et al., 2010).

2.4.2 Eutrofizace

Výskyt řas a sinic přispívá k estetické degradaci vodních zdrojů prostřednictvím urychlené eutrofizace, problémům s chutí a zápachem a k produkci toxinů, které mohou mít vážné nepříznivé účinky na lidské zdraví. Řasy a sinice přitahují stále větší pozornost orgánů ochrany životního prostředí, vodohospodářských úřadů a organizací pro ochranu zdraví, protože mohou představovat řadu problémů s kvalitou vody. Problémy tohoto druhu mohou dosáhnout značného rozsahu, např. v Baltském moři každé léto dochází k masivnímu rozvoji řas a sinic, které pokrývají oblasti větší než 100 000 km² (Randolph et al., 2008; Kutser et al., 2006).

Eutrofizaci chápeme jako biologický děj, který dokáže ohrozit nejen zdraví lidí, ale i zvířat. Při zvýšení obsahu dusíku a fosforu pocházejícího především ze zemědělství může nastat nadměrný růst některých typů sinic a řas. Dělíme ji na přirozenou a antropogenní. Přirozená je způsobena uvolňováním fosforu a dusíku z půdy z odumřelých organismů a rostlin. Nelze ji zpravidla ovlivnit. Antropogenní eutrofizace nastává častěji, a to kvůli vlivu člověka na vodní prostředí, kde dochází k narušování koloběhu živin (především se jedná o fosfor a dusík). Největší podíl této antropogenní eutrofizace zapříčiňuje intenzivní zemědělská výroba, kde dochází ke splachování fosforečných a dusíkatých hnojiv ze zemědělských pozemků. Další podíl tvoří vypouštění zemědělských, komunálních a průmyslových odpadních vod a používání polyfosforečanů v pracích prostředcích (Velišek, 2014; Hubáčiková, 2008).

V letních epizodách se objevuje v povrchových vodách vysoký nárůst vodního květu, tzn. sinic, které se drží ve vysokých koncentracích u hladiny vody (*Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Planktothrix*). Tyto sinice jsou schopny plavat při hladině pomocí nitrobuněčných membránových váčků naplněných plynem neboli plyných vakuol. Do okolí produkují velmi jedovaté látky – cyanotoxiny, které dokážou vyhubit značnou část organismů a tímto jevem omezit druhovou diverzitu. Mohou se rozmnožit až na milióny buněk v 1 ml, díky zvýšené teplotě vody a zvýšenému příkonu slunečního záření. Sinice jsou schopné poutat vzdušný dusík na rozdíl od jiných zástupců fytoplanktonu (Kleczek, 2011; Velišek, 2014; Adámek, 2010; Sukop, 2006).

Sinice způsobují v jezerech po celém světě rozsáhlé problémy. Jedná se o rizika pro lidské zdraví, anoxii a úhyn ryb a problémy s chutí a zápachem. Sinice jsou zvláště znepokojující jak v rekreačních vodách, tak v povrchových vodách, sloužících jako zdroje pro výrobu pitné vody kvůli jejich husté biomase a riziku expozice toxinů.

Úspěšné hodnocení pomocí satelitů může poskytnout indikátor ochrany lidského a ekologického zdraví (*Clarc et al., 2017*).

Vliv na nárůst řas a sinic mají bezpochyby znečištěné vody. Dále se na tomto nárůstu podílí snížení množství srážek a zvýšení průměrných teplot vzduchu, protože tyto faktory pozitivně působí na podmínky vývoje těchto organismů (snížení vodního sloupce, jeho snazší prohřívání). Se změnami klimatu můžeme pozorovat zvyšující se nárůst znečištění povrchových vod řas a sinicemi (*Velíšek, 2014; Nedbal a Brom, 2019*).

Omezení eutrofizace je možné biologickou i chemickou cestou. Primárně můžeme snížit přísun fosforu a dusíku do vodního prostředí tím, že budeme regulovat dusíkatá a fosforečná hnojiva v zemědělství. Dále můžeme využít biomanipulaci, např. snížením rybní obsádky, požírající filtrující zooplankton v dané vodní nádrži, který tak může napomoci ke snížení produkci řas a sinic (*Townsend, 2010*).

2.5 Možnosti monitoringu

Včasné monitorování, detekce a kvantifikace množství řas a sinic jsou obzvláště důležité pro kontrolu rizik pro veřejné zdraví a pochopení dynamiky vodních ekosystémů. Díky výhodám simultánního sběru dat ve velkých zeměpisných oblastech a velkému časovému pokrytí, usnadňují metody dálkového průzkumu monitorování řas a sinic ve vnitrozemských vodách (*Shi et al., 2019*).

3 Metodika

V této práci hodnotíme obsah chlorofylu-a jako ukazatele množství řas a sinic v povrchových vodách dvou vodních nádrží (Hracholusky a Švihov). V nádržích byly na různých místech odebrány vzorky vody, ve kterých byl laboratorně stanoven obsah chlorofylu-a. Zároveň byla tato odběrová místa vyhodnocena co do spektrálních vlastností pomocí spektrometru a satelitního senzoru. Byl tak sestaven matematický vztah mezi laboratorními a spektrálními daty a ten byl použit k vyhodnocení obsahu chlorofylu-a na celé ploše nádrží pomocí satelitního snímku.

3.1 Modelové území

Vodní nádrž Hracholusky byla vybudována v letech 1959–1964 na 22,7 říčním kilometru řeky Mže. Hlavním úkolem tohoto díla je akumulovat vodu pro energetické, průmyslové a zemědělské využití v západočeském regionu. Dalším účelem je ochrana území před účinky velkých vod a může sloužit také k rekreaci (Klich, 2017).

Vodní nádrž Švihov na Želivce patří mezi nejvýznamnější vodárenské zdroje povrchové vody v ČR, byla postavena v letech 1965–1975 a to v místě 4,29 kilometru nad soutokem vodních toků Sázavy a Želivky. Mezi hlavní účely tohoto díla patří zásobování pitnou vodou hlavního města Prahy a dále Středočeského, část Jihočeského a Východočeského kraje. Jedná se o největší vodárenskou nádrž nejen v ČR, ale i ve střední Evropě. Obvod tohoto díla při maximální hladině nádrže dosahuje více jak 150 km (Kvítek, 2017).

Cílem této práce je ukázat míru eutrofizace v těchto dvou vodních nádržích.

3.2 Odběry vzorků

Vzorky povrchových vod byly odebírány do polyethylenových lahví o objemu jednoho litru, a to takovým způsobem, aby nedošlo k jejich kontaminaci. Každá láhev byla označena dle místa odběru. Po odebrání všech vzorků, byly láhve převezeny do laboratoře a uloženy v chladu. Analýza koncentrace chlorofylu-a proběhla spektrometrickou analýzou.

3.3 Sběr spektrálních dat

Odrazivosti slunečního záření od hladiny vody byly v místech odběru vzorků vod změřeny spektroradiometrem. Spektroradiometr je přístroj, který měří intenzitu odraženého slunečního záření pro různé vlnové délky. Sluneční záření dopadne na určitý povrch, část tohoto záření se od povrchu odrazí a spektrometr toto odražené záření za-

chytí a změří jeho intenzitu. Podle typu povrchu se v různých vlnových délkách intenzita odraženého záření mění. Např. od červených předmětů se odráží v maximální míře červené záření, tedy záření o vlnové délce kolem 650 nm. Proto v této části spektra zjistí spektrometr při odrazu od červených předmětů větší intenzitu záření než v jiných částech spektra. Pomocí spektroradiometru tak byly v našem případě vyhodnoceny odrazivosti záření v rozsahu vlnových délek od 400 do 900 nm v jednotlivých odběrových bodech obou nádrží, se spektrálním rozlišením 2 nm. Tyto naměřené hodnoty odrazivosti pak byly využity pro hodnocení spektrálních vlastností vod, zasažených různým stupněm znečištění řasami a sinicemi.

Obsah chlorofylu-a, tedy zeleného barviva řas a sinic se projevuje vysokou odrazivostí od buněčné struktury na vlnové délce 709 nm a nízkou odrazivostí na vlnové délce 665 nm, kde chlorofyl-a nejvíce záření absorbuje. Proto bude podíl odrazivosti na vlnových délkách 709 a 665 nm citlivě korelovat s obsahem chlorofylu-a (*Randolph et al., 2008*). Poměr odrazivosti v těchto vlnových délkách byl tedy z dat ze spektrometru vypočítán a použit jako algoritmus ke zjištění vztahu s obsahem chlorofylu-a. Podobně byl tento poměr vypočten ze satelitních dat. Byly použity satelitní snímky senzoru družice SENTINEL 2 Evropské vesmírné agentury (ESA), konkrétně kanál odrazivosti červené barvy (vlnová délka 665 nm) a blízkého (hraničního) infračerveného záření (vlnová délka 704 nm). Kanál pro vlnovou délku 709 nm totiž tento satelitní senzor neobsahuje.

Hodnoty spektrálních algoritmů jak z dat ze spektroradiometru (709/665 nm a 704/665 nm), tak ze satelitního senzoru (pouze 704/665 nm) byly dány do vztahu s koncentracemi chlorofylu-a ve vodě v odebraných vzorcích. S pomocí tohoto vztahu u satelitních dat byly pak vytvořeny satelitní mapy koncentrace chlorofylu-a pro celé plochy obou sledovaných nádrží.

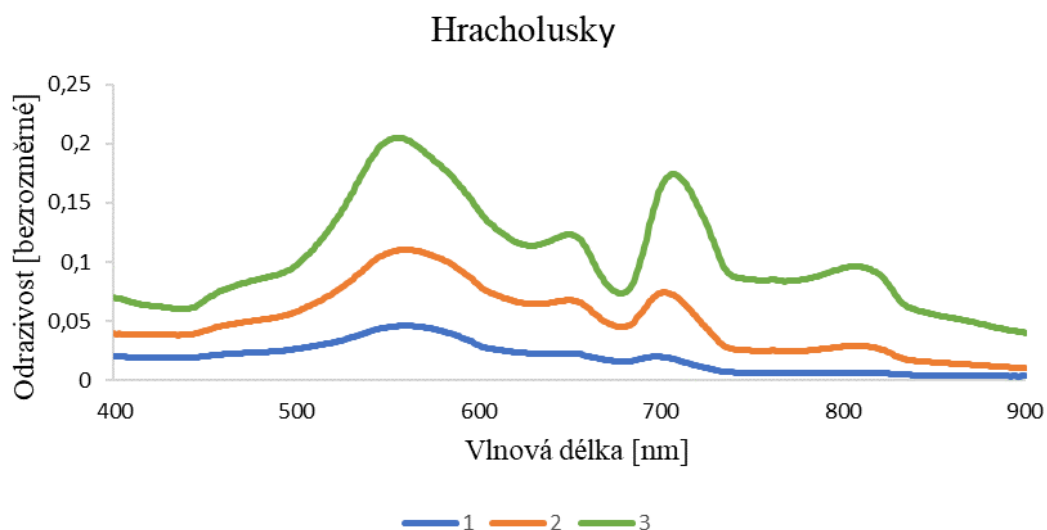
4 Výsledky

Tato kapitola shrnuje výsledky měření získané v rámci hodnocení znečištění vod zelenými řasami a sinicemi pomocí jejich spektrálních vlastností.

4.1 Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí spektrometru

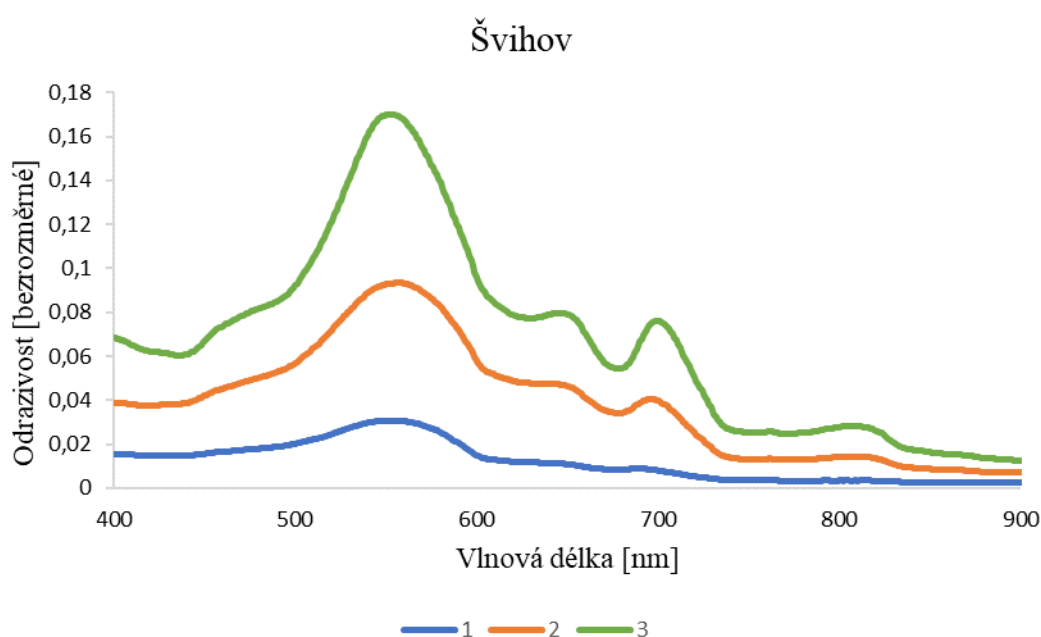
Pro měření byly použity vzorky z vodních nádrží Hracholusky a Švihov za použití spektrometru. Hodnoty naměřené ve vodních nádržích jsou získány v různých místech vodních nádrží, od hráze po začátek vzduť. V grafech odrazivosti (Obr. 1 a Obr. 2) jsou pro přehlednost ukázána měření vždy ve třech místech nádrží, tj. v dolní části nádrže, ve středu nádrže a u začátku vzduť vodní nádrže.

Ve vodní nádrži Hracholusky (Obr. 2) byla v dolní části (bod p2) laboratorně naměřena koncentrace 15 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a. Spektrometrem v tomto místě byla naměřena nejvyšší hodnota odrazivosti na vlnové délce 560 nm, spektrální křivka je ale vcelku plochá. Ve středu nádrže (bod p12) byla naměřena koncentrace 58 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a a na stejném místě byla naměřena nejvyšší hodnota odrazivosti na vlnové délce 560 nm. Vysoká hodnota ale byla zjištěna i na vlnové délce kolem 710 nm. Na začátku vzduť vodní nádrže (bod p15) byla naměřena koncentrace 200 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a a měření spektrometru vykazovalo nejvyšší hodnoty odrazivosti opět na vlnové délce 560 nm. I zde však byla zjištěna velmi vysoká odrazivost na vlnové délce kolem 710 nm. Hodnoty odrazivosti výrazně rostly se zvyšující se koncentrací chlorofylu-a, především na zmíněných vlnových délkách 560 a 710 nm.



Obr. 2: Odrazivost slunečního záření od hladiny vody vodní nádrže Hracholusky, v závislosti na vlnové délce záření v rozsahu 400 až 900 nm. Křivky znázorňují nízké (1) (bod p2), střední (2) (bod p12) a vysoké (3) (bod p15) znečištění chlorofylem-a.

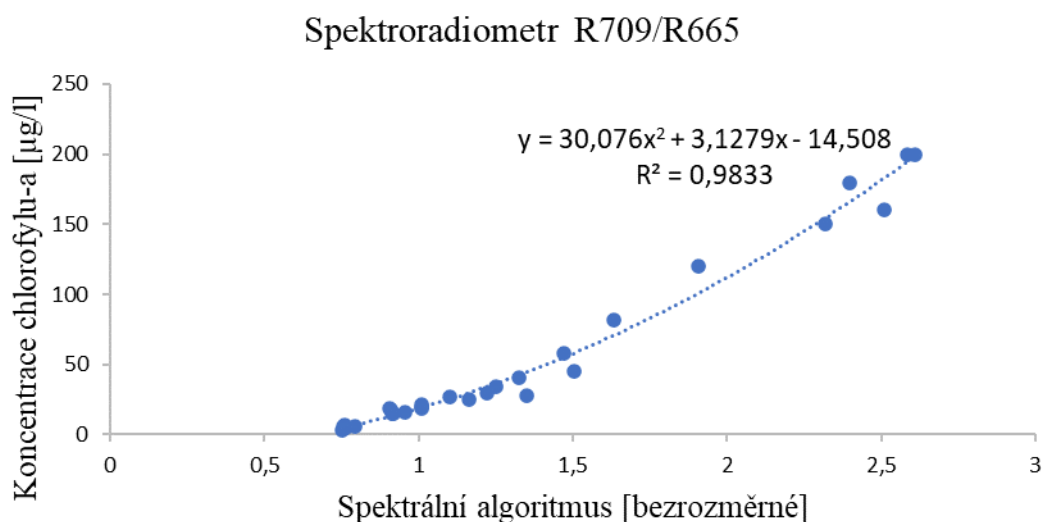
V nádrži Švihov (Obr. 3) byla v dolní části (bod p3) nádrže naměřena koncentrace 2,8 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a. Nejvyšší hodnotu odrazivosti spektrometr naměřil ve stejném místě na vlnové délce 556 nm a vysoké hodnoty byly zaznamenány taky ve vlnové délce 710 nm. Ve středu nádrže (bod p5) byla naměřena koncentrace 16 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a a zároveň byla naměřena nejvyšší hodnota odrazivosti ve stejném místě na vlnové délce 558 nm. Podobně jako u nádrže Hracholusky byla i v tomto místě naměřena velmi vysoká hodnota na vlnové délce kolem 710 nm. Na začátku vzdutí vodní nádrže (bod p11) byla naměřena koncentrace 28 $\mu\text{g/l}$ chlorofylu-a a na spektrometru se nejvyšší naměřená hodnota pohybovala na vlnové délce 551 nm a i v tomto případě se opět hodnota zvýšila na vlnové délce 710 nm.



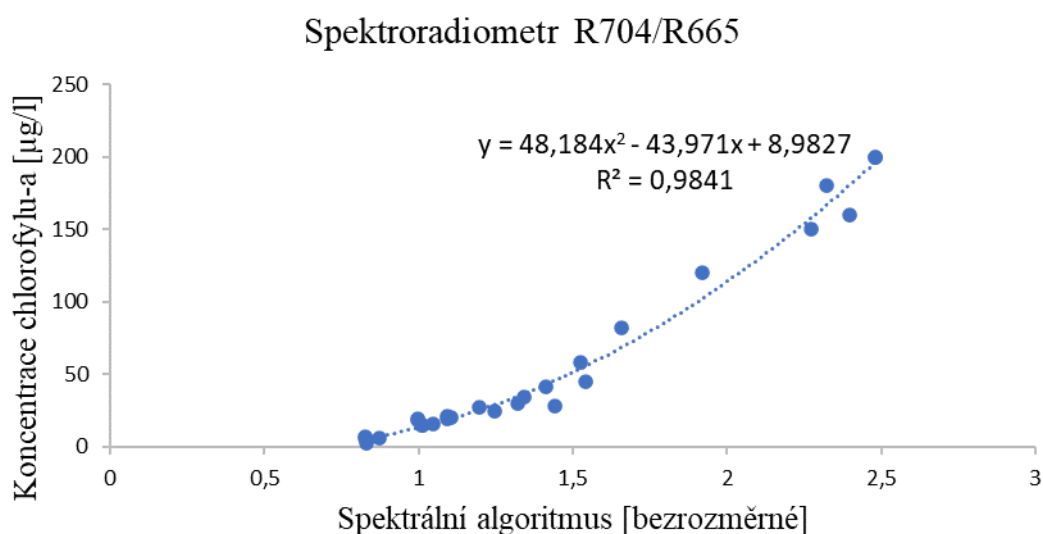
Obr. 3: Odráživost slunečního záření od hladiny vody vodní nádrže Švihov, v závislosti na vlnové délce v rozsahu 400 až 900 nm. Křivky znázorňují nízké (1) (bod p3), střední (2) (bod p5) a vysoké (3) (bod p11) znečištění chlorofylem-a.

4.2 Závislost algoritmu spektrální odrazivosti na koncentraci chlorofylu-a

Jak je uvedeno v kapitole Metodika, při zvyšující se koncentraci chlorofylu-a roste i poměr odrazivosti vlnových délek 709 a 665 nm, neboť při vlnové délce 709 se záření nejvíce odráží od buněčné struktury řas a sinic a při vlnové délce 665 nm chlorofyl-a sluneční záření nejvíce absorbuje. Lze tedy sestavit graf závislosti koncentrace chlorofylu-a, naměřené spektrometrem na sledovaných vodních nádržích a spektrálního algoritmu (poměru odrazivosti na vlnových délkách 709 a 665 nm) (Obr. 4).

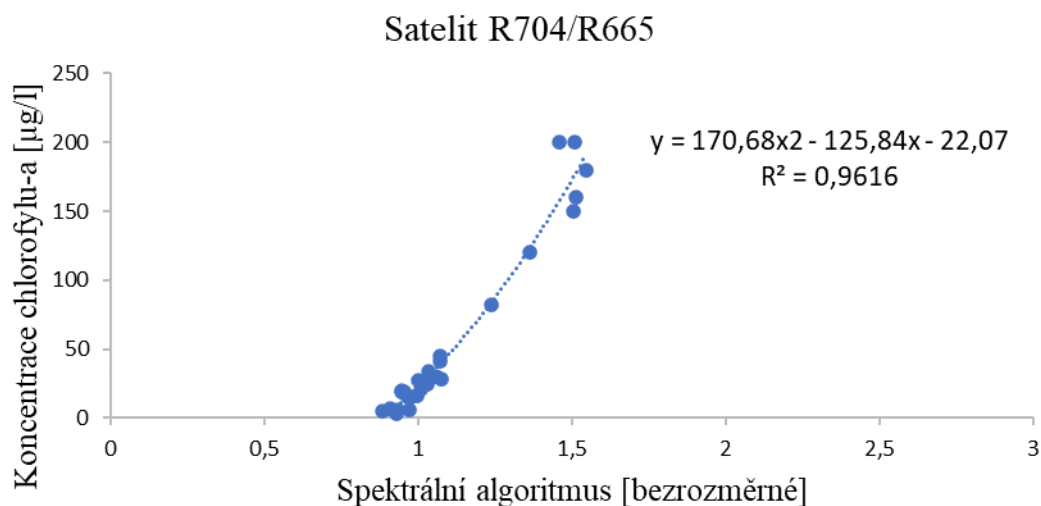


Obr. 4: Měření odrazivosti slunečního záření spektrometrem od hladiny vody vodních nádrží Hracholusky a Švihov o vlnových délkách 704/665 nm v poměru ke koncentraci chlorofylu-a.



Obr. 5: Měření odrazivosti slunečního záření spektrometrem od hladiny vody vodních nádrží Hracholusky a Švihov – užití poměru odrazivosti na vlnových délkách 709/665 nm v poměru ke koncentraci chlorofylu-a.

Vzhledem k tomu, že jsou níže využita i data odrazivosti ze satelitního snímku, který namísto vlnové délky 709 nm užívá vlnovou délku 704 nm, jsou v dalších grafech (Obr. 5 a Obr. 6) pro porovnání vyobrazena měření ze spektrometru i satelitního snímku v poměru vlnových délek 704 nm a 665 nm.



Obr. 6: Měření odrazivosti slunečního záření za pomoci satelitu od hladiny vodních nádrží Hracholusky a Švihov o vlnových délkách 704/665 nm v poměru ke koncentraci chlorofylu-a.

Naměřenou odrazivost slunečního záření ze spektrometru o poměru vlnových délek 709/665 nm, 704/665 nm a dále satelitu o poměru vlnových délek 704/665 nm porovnáváme s naměřenými koncentracemi chlorofylu-a u hráze, ve středu nádrže a u začátku vzdutí vodní nádrže. Abychom mohli porovnat hodnoty ze spektrometru a satelitního senzoru je zapotřebí použít data o vlnové délce 704 nm, tedy poměr R704/665, protože satelitní senzor nedokáže měřit odrazivost na vlnové délce 709 nm. V nádrži Hracholusky byly naměřeny různé koncentrace chlorofylu-a (Tab. 4). Pro porovnání se spektrometrem a satelitem byly vybrány hodnoty 15, 58 a 200 µg/l, stejně jako v případě porovnání obsahu chlorofylu-a a odrazivosti v celém rozsahu sledovaného spektra (viz Obr. 2). Příloha 1: Měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Hracholusky spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a je tabulka rozvíjející Tab. 4, která obsahuje údaje o odrazivosti pro všechny získané vzorky.

Hracholusky			
Koncentrace chlorofylu-a [$\mu\text{g/l}$]	Spektroradiometr R704/R665	Spektroradiometr R704/R665	Satelit R704/R665
15 (p1)	0,91955563	1,015628701	1,076806
58 (p12)	1,469440848	1,524804836	1,348875
200 (p15)	2,609792895	2,48272854	1,937332

Tab. 4: Příklady měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Hracholusky spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a.

I v nádrži Švihov byly naměřeny rozdílné koncentrace chlorofylu-a, pro porovnání byly vybrány hodnoty 2,8, 16 a 28 $\mu\text{g/l}$ (Tab. 5), stejně jako v případě porovnání obsahu chlorofylu-a a odrazivosti v celém rozsahu sledovaného spektra (viz Obr. 3). Z obou tabulek můžeme vyvodit, že ve všech případech s rostoucí koncentrací chlorofylu-a roste i hodnota spektrálních algoritmů (poměrů odrazivostí vlnových délek 709/665 nm, resp. 704/665 nm). Příloha 2 je tabulka rozvíjející Tab. 5, která obsahuje data pro všechny naměřené koncentrace chlorofylu-a v nádrži Švihov.

Švihov			
Koncentrace chlorofylu-a [$\mu\text{g/l}$]	Spektroradiometr R709/R665	Spektroradiometr R704/R665	Satelit R704/R665
2,8 (p3)	0,751879	0,829813	0,931354
16 (p5)	0,955	1,048345	1,00193
28 (p11)	1,351832	1,440942	1,075391

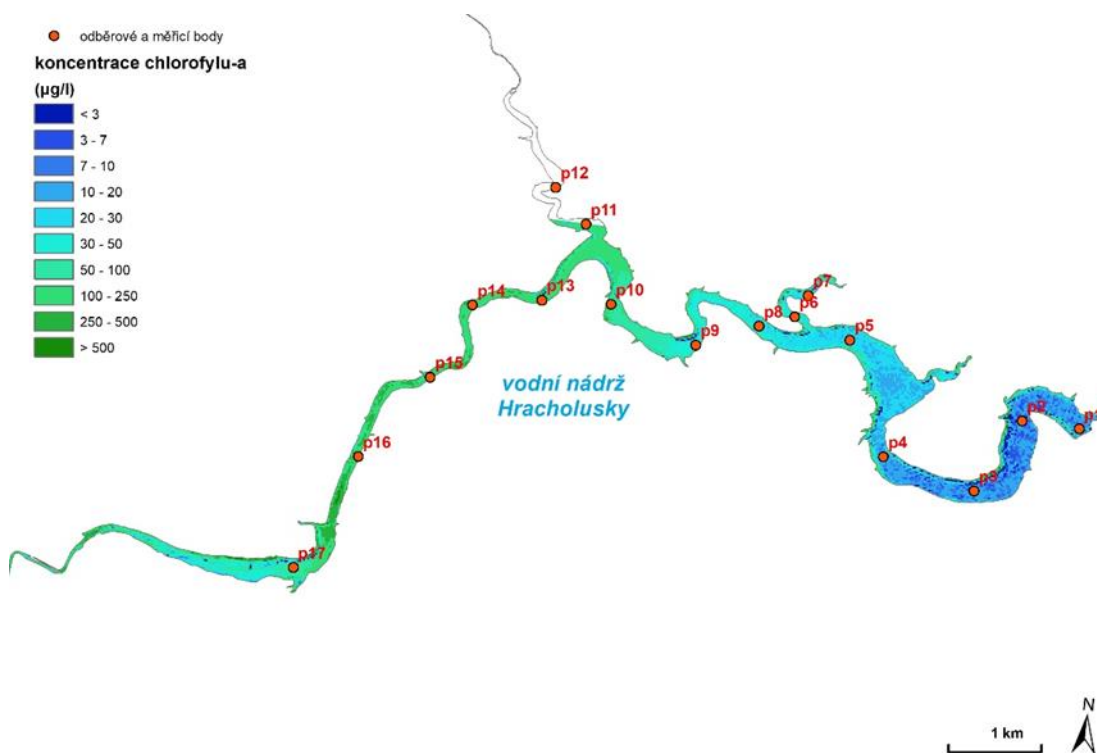
Tab. 5: Příklady měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Švihov spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a.

4.3 Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí satelitních snímků

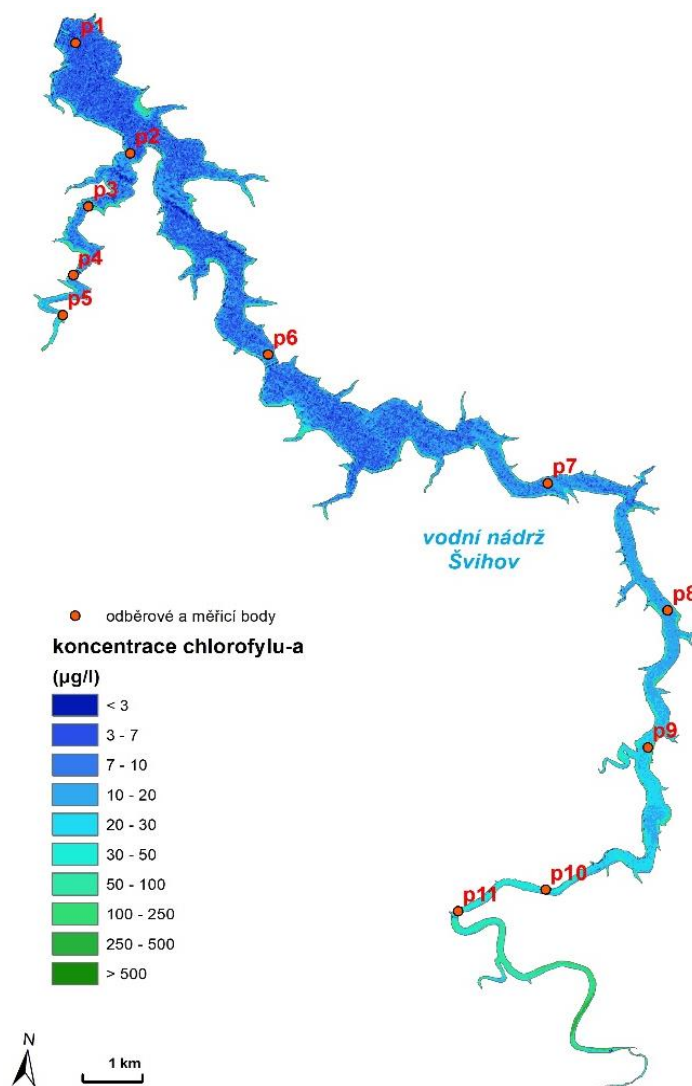
V nádržích Švihov a Hracholusky byly pro měření použity satelitní snímky družice SENTINEL 2 které jsou volně dostupné na webových stránkách Evropské vesmírné agentury. Snímky z obou nádrží vznikly výpočtem podílu odrazivosti vlnových délek 704 a 665 nm a přepočtem tohoto podílu na obsah chlorofylu-a podle vztahu, definovaného na grafu v Obr. 6. Vzniklé snímky (Obr. 7 a Obr. 8), tak znázorňují koncentrace chlorofylu-a pomocí modrozelené škály.

U těchto snímků tmavě modrá značí nejnižší hodnoty koncentrace chlorofylu-a (0–3 $\mu\text{g/l}$). Modrá barva značí nižší hodnoty koncentrace chlorofylu-a (3–20 $\mu\text{g/l}$), tyrkysová barva pak střední hodnoty (20–100 $\mu\text{g/l}$), vyšší hodnoty chlorofylu-a vykresluje zelená barva (100–500 $\mu\text{g/l}$). Tmavě zelená barva je přiřazena k nejvyšším hodnotám, tzn. vyšší než 500 $\mu\text{g/l}$ a v našich snímcích se tato barva neobjevuje.

Snímky ze satelitů obsahují červené body, ve kterých došlo k odběrům a laboratorní analýze koncentrace chlorofylu-a a k terénnímu měření odrazivosti spektrometrem.

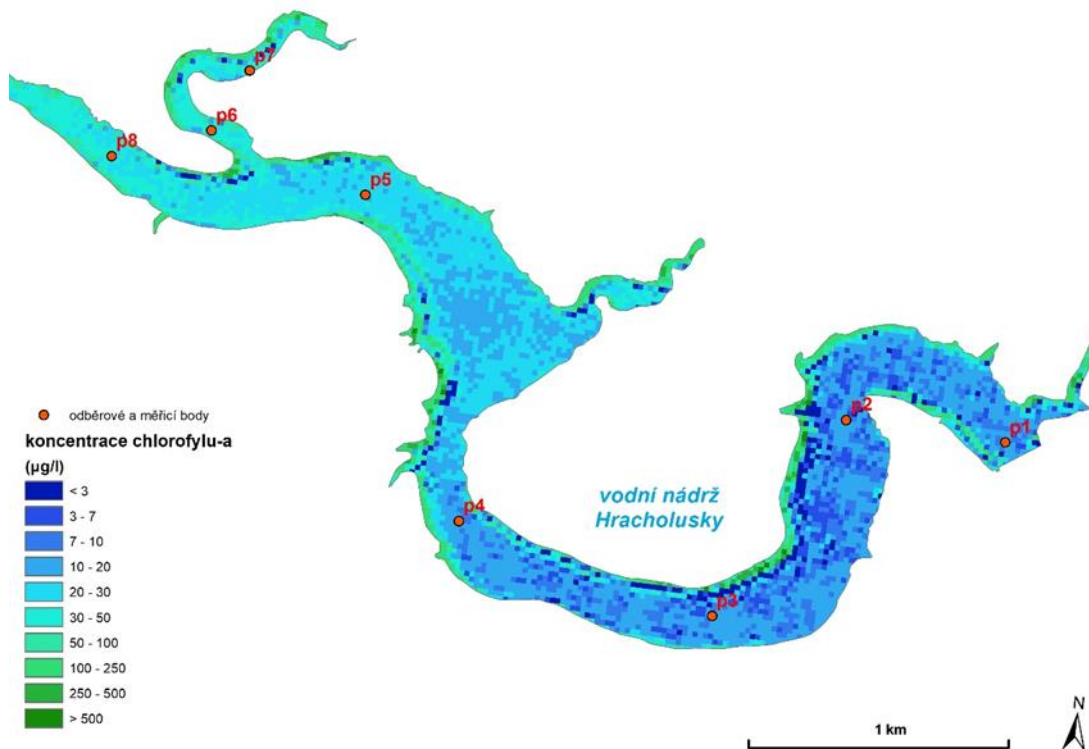


Obr. 7: Satelitní snímek celé vodní nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.



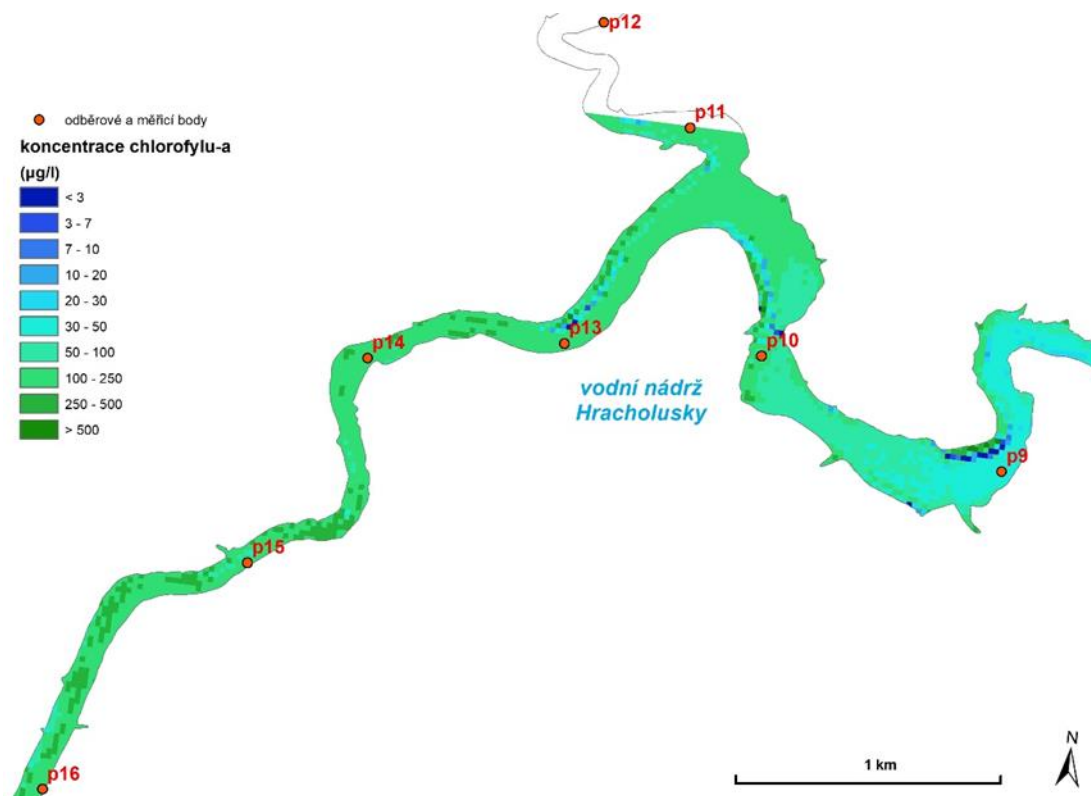
Obr. 8: Satelitní snímek celé vodní nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody, v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

Dolní část ve vodní nádrži Hracholusky (Obr. 9) vyobrazuje převážně modrou barvu, místy až tmavě modrou, která vypovídá o nízké koncentraci chlorofylu-a, ale u některých břehů je barva světle zelená. V užších místech nádrže se modrá zbarvuje do tyrkysové.



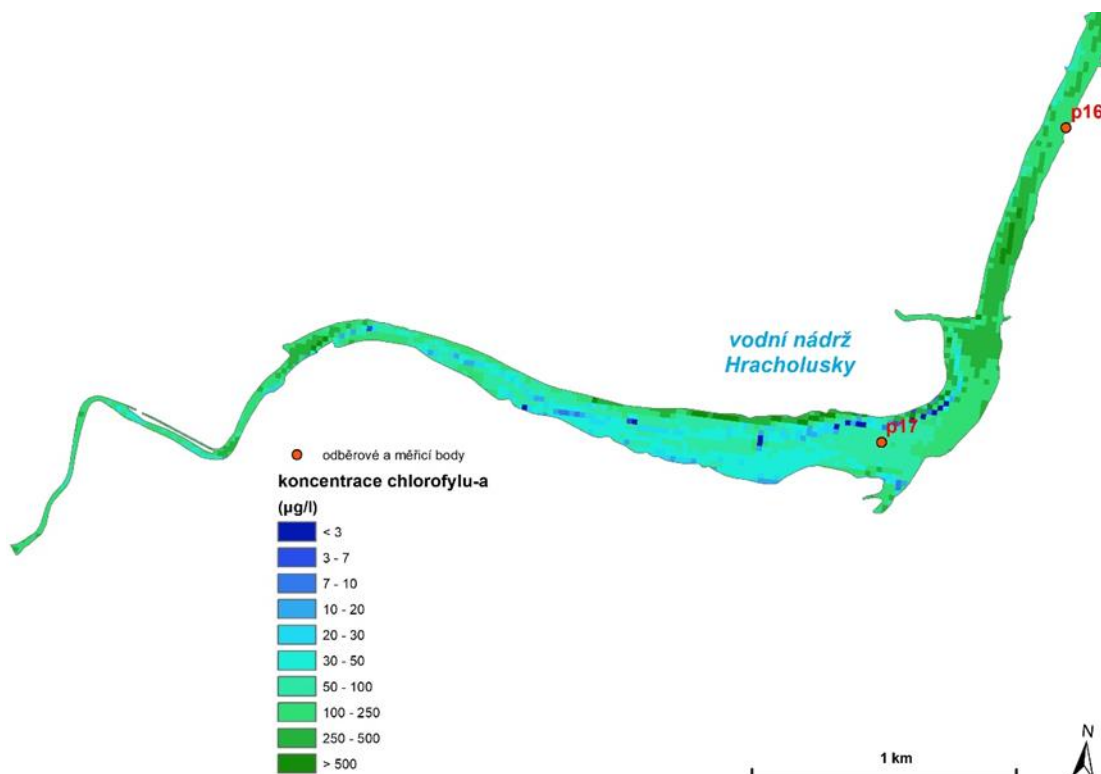
Obr. 9: Satelitní snímek dolní části nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

Ve střední části nádrže Hracholusky (Obr. 10) se modrá barva mění ve světle zelenou a zelenou barvu, která náleží vyšším hodnotám koncentrace chlorofylu-a. Přestože odrazivost v konkrétním pixelu v bodě p12 bylo možné zjistit (Tab. 4), je z důvodu oblačnosti jeho okolí na satelitním snímku vymaskováno bílou barvou.



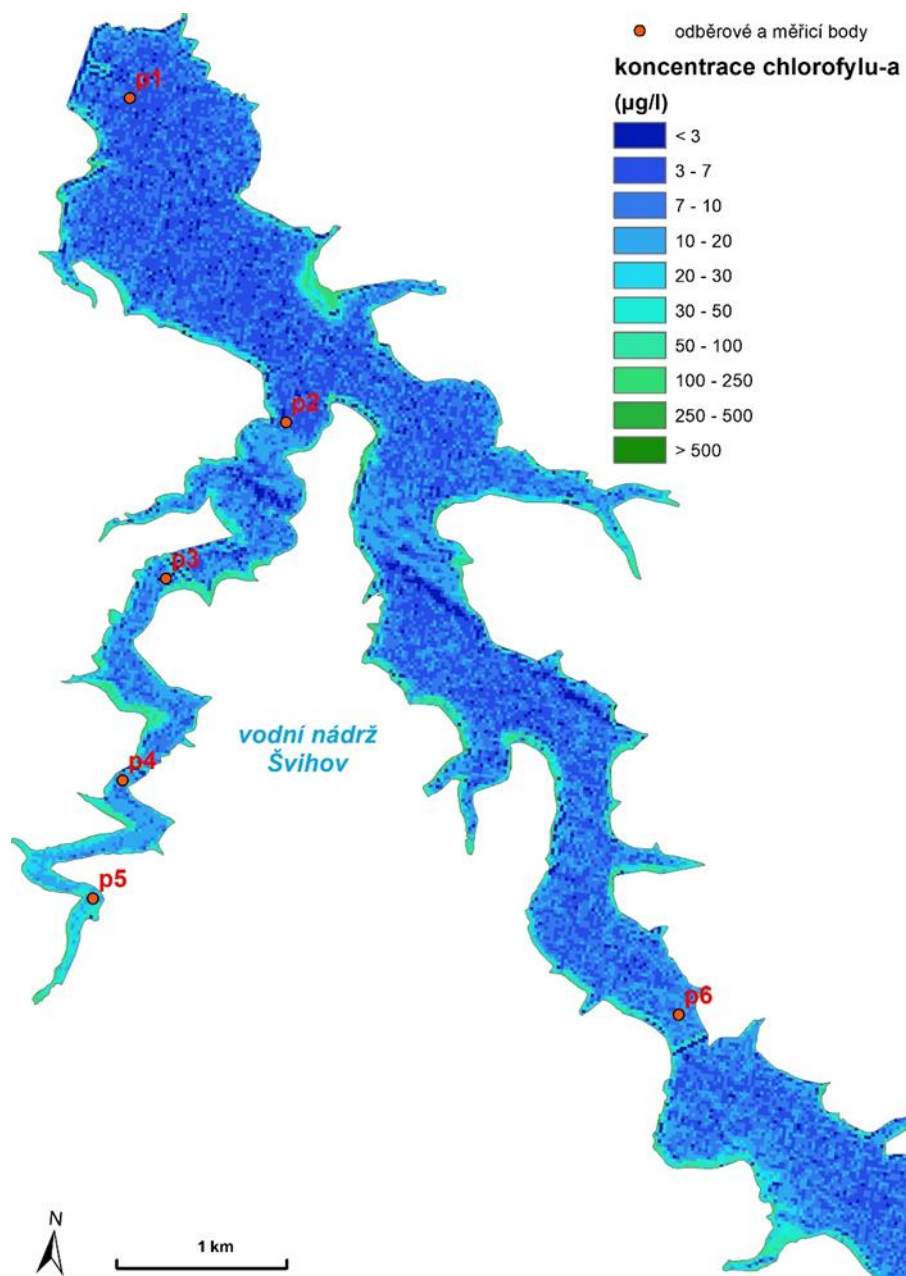
Obr. 10: Satelitní snímek dolní části nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

Horní část nádrže (Obr. 11) vykresluje více tyrkysové barvy a je zde patrné, že v porovnání se střední částí nádrže jsou koncentrace chlorofylu-a velmi podobné. Obecně se dá říct, že v úzkých místech nádrže se koncentrace chlorofylu-a zvyšuje.



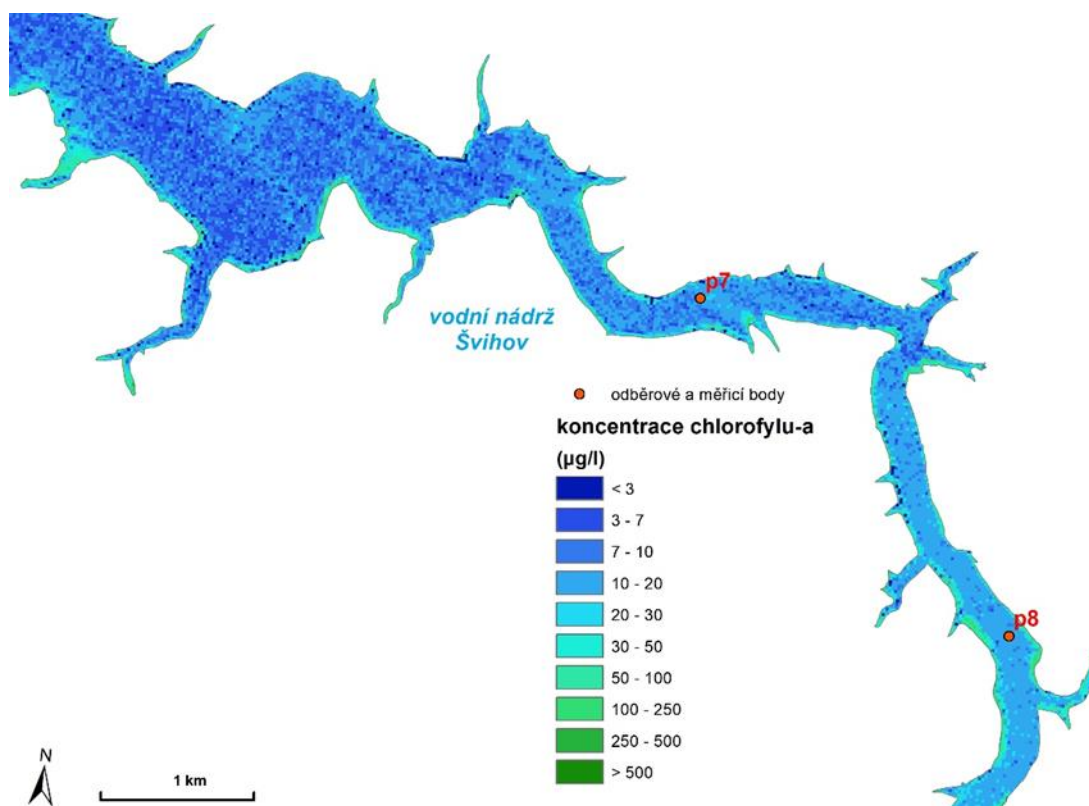
Obr. 11: Satelitní snímek horní části nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

Snímek dolní části nádrže Švihov (Obr. 12) vykresluje modrou, místy světlejší i tmavou barvu. Na březích se barva mění v tyrkysovou až světle zelenou.



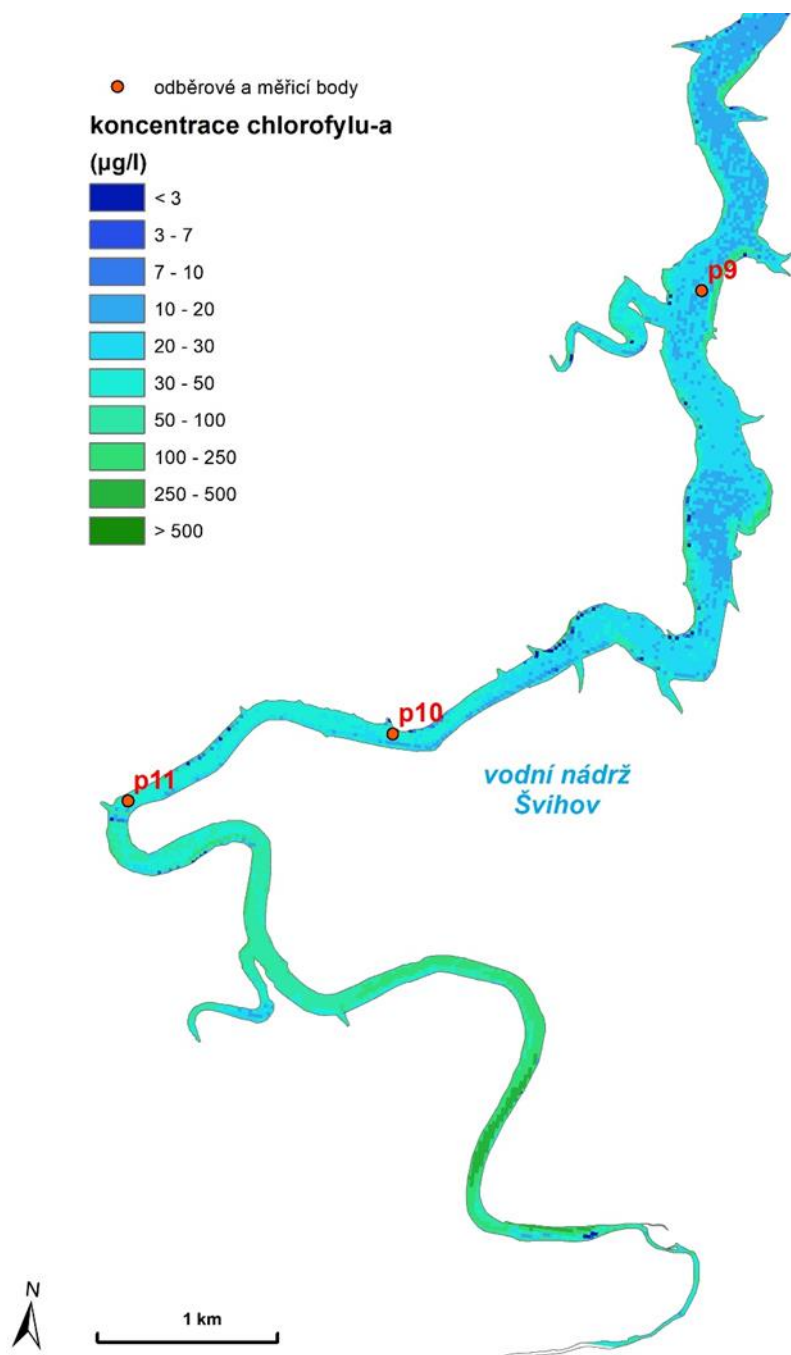
Obr. 12: Satelitní snímek dolní části nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

Snímek střední část nádrže (Obr. 13) je převážně tvořen modrou barvou, to vypovídá o nízké koncentraci chlorofylu-a. Směrem k horní části se barva mění ve světle modrou, naopak směrem k dolní části nádrže je koncentrace výrazně nižší.



Obr. 13: Satelitní snímek střední části nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

V horní části nádrže (Obr. 14) převažuje barva tyrkysová. Ojediněle se objevuje i tmavě modrá barva, a to převážně u břehu. V nejužších místech nádrže je vykreslena světle zelená barva. Na snímcích z vodní nádrže Švihov nenalezneme větší plochy tmavě zelené barvy.



Obr. 14: Satelitní snímek horní části nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.

5 Diskuse

5.1 Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí spektrometru

Pro porovnání koncentrace chlorofylu-a jsem vybrala vzorky naměřené u hráze, ve středu nádrže a u začátku vzduť vodních nádrží Hracholusky a Švihov. V grafech (Obr. 2 a Obr. 3) je viditelná závislost mezi naměřenými koncentracemi chlorofylu-a v obou nádržích. Z grafů je patrné, že s rostoucí koncentrací chlorofylu-a roste odrazivost v zelené části spektra.

V teoretické části jsme se dozvěděli, že zelená část spektra se vyobrazuje od 520 do 565 nm. Vzorky s nejvyššími koncentracemi chlorofylu-a získané z obou nádrží mají vysokou odrazivost právě kvůli vyššímu výskytu řas a sinic. Díky tomuto jevu se křivka znázorňující odrazivost v horní části nádrží v Obr. 2 výrazně zvedá nejvíce ve vlnové délce 560 nm a v Obr. 3 se zvedá průměrně ve vlnové délce 555 nm právě kvůli velkému zanesení sinicemi a řasami (tzv. kvůli zelenější vodě). Křivky náležející středním částem nádrže kopírují křivky s nejvyšší koncentrací chlorofylu, ale nedosahují tak vysokých odrazivostí – u nádrže Hracholusky byla naměřena koncentrace chlorofylu-a 58 $\mu\text{g/l}$ a u Švihova 16 $\mu\text{g/l}$. Tam, kde byla naměřena nízká koncentrace chlorofylu-a, se křivky znázorňující dolní část nádrží v zelené části spektra lehce zvedají a příčinou je voda, která dosahuje koncentraci chlorofylu v Hracholuskách 15 $\mu\text{g/l}$ a ve Švihově 2,8 $\mu\text{g/l}$.

Dalším ukazatelem přítomnosti zelených řas a sinic v nádržích jsou výrazně vysoké hodnoty odrazivosti v červené a infračervené části spektra, která se vyobrazuje od 625 do 740 nm. Křivky v obou grafech znázorňující odrazivost v horní části nádrže se zvedají nejvíce kolem 710 nm, ale tentokrát nedosahují tak vysokých hodnot odrazivosti, jako u zelené části spektra. Vyšší hodnoty jsou zapříčiněny odrazem záření od buněčné struktury řas a sinic. Stejně jako u zelené části spektra se křivky pro střední část nádrže mírně zvedají, a i zde se nejvíce zvedají ve vlnových délkách 710 nm. Křivky pro dolní část v této části spektra nevykazují téměř žádné zvýšené hodnoty. Příčinou je opět nízká koncentrace chlorofylu-a.

U křivek znázorňujících odrazivost v horní části nádrží můžeme v Obr. 2 a Obr. 3 vypořadovat náhlé snížení odrazivosti ve vlnových délkách delších než cca 810 nm, která náleží infračervené části spektra. Toto snížení je dáno tím, že v tomto rozsahu vlnových délek voda jako taková infračervené záření silně absorbuje a jeho odrazivost

tak výrazně klesá. V obrázku č. 1 křivky dosahují vyšších hodnot odrazivosti, než dosahují na obrázku č. 2, protože v nádrži Hracholusky je naměřena nejvyšší koncentrace chlorofylu-a až 200 µg/l, ale u nádrže Švihov se jedná pouze o 28 µg/l. Díky tomuto měření můžeme dojít k závěru, že nádrž Švihov je oproti Hracholuskám méně zanešená zelenými řasami a sinicemi.

5.2 Závislost algoritmu spektrální odrazivosti na koncentraci chlorofylu-a

Nejvyšší odrazivost zaznamenáváme ve vlnové délce 709 nm, protože se zde záření nejvíce odráží od buněčné struktury řas a sinic. Nejvyšší propad odrazivosti záření zaznamenáváme při vlnové délce 665 nm, neboť zde chlorofyl-a nejvíce absorbuje sluneční záření. Proto poměr odrazivosti záření ve vlnových délkách 709 a 665 nm koreluje s množstvím zelených řas a sinic ve vodě, a tedy s obsahem jejich zeleného barviva – chlorofylu-a. Díky množství nasbíraných dat ze sledovaných území bylo možné sestavit grafy (Obr. 4, Obr. 5 a Obr. 6) vyobrazující závislost algoritmů spektrálních odrazivostí (poměr odrazivostí vlnových délek 709/665 nm, resp. 704/665 nm) na koncentraci chlorofylu-a, která byla laboratorně naměřena.

Při zvyšující se koncentraci chlorofylu-a roste i poměr odrazivosti délek 709 a 665 nm (Obr. 4). Na tomto grafu jsou vykresleny body v poměru vlnových délek 709 a 665 nm z odběrových míst u obou nádrží, které jsou proloženy polynomickou křivkou s vysokou hodnotou spolehlivosti, kdy hodnota R^2 se může rovnat maximálně 1. V tomto případě se R^2 rovná 0,9833 neboli 98,33 %. Z tohoto grafu můžeme dále vytvořit rovnici grafu, která se rovná $y = 30,076x^2 + 3,1279x - 14,508$.

Pro porovnání měření ze spektrometru a satelitu musíme vzít data z vlnové délky 704 nm, protože satelitní snímky měří v širších rozpětí vlnových délek se středem na vlnové délce 704 nm, ke které je původní hodnota 709 nm nejbližší. Poměr 704/665 je znázorněn v grafu pro spektrometr (Obr. 5) a pro satelit (Obr. 6). U měření spektrometrem můžeme na první pohled říct, že grafy (Obr. 5 a Obr. 6) jsou si velmi podobné a došlo jen k nepatrným změnám. Hodnota spolehlivosti R^2 se rovná 0,9841 neboli 98,41 % a rovnice grafu se rovná $y = 48,184x^2 - 43,971x + 8,9827$.

Obr. 6 obsahující graf závislosti obsahu chlorofylu-a a dat ze satelitu o poměru vlnových délek 704 a 665 nm nám ukazuje, že v porovnání s předchozími grafy je tento odlišný, a to z hlediska strmější křivky, která je v mnohem menším rozsahu spektrálního algoritmu. Pro tento graf je míra spolehlivosti menší než u předchozích: $R^2 =$

0,9616 a rovnice grafu: $y = 170,68x^2 - 125,84x - 22,07$. Tuto rovnici jsme použili pro zhotovení satelitních snímků. Strmější křivka umístěná na menším rozsahu spektrálního algoritmu nemá zjevně důvod v použití odlišného vlnové délky odrazivosti od buněčné struktury (704 nm namísto 665 nm). Křivky ze spektrometru pro tyto dvě rozdílné vlnové délky (Obr. 4 a Obr. 5) totiž takový rozdíl neukazují. Příčinou bude zjevně nižší citlivost satelitního senzoru oproti spektrometru, který mám spektrální rozlišení pouhé 2 nm. Dalším důvodem bude pravděpodobně ovlivnění dat plyny v atmosféře, kterými musí signál k satelitu projít, zatímco sloupec vzduchu při měření spektrometrem je vysoký pouhých několik desítek cm. Na snímcích byly provedeny radiometrické i atmosférické korekce přímo distributorem. Přesto by po této stránce mohlo přinést zlepšení citlivosti satelitního senzoru použití korekcí, určeným ke zkoumání nikoliv terestrického, speciálně vodního prostředí.

V této práci pracuji se vzorky s naměřenými koncentracemi chlorofylu-a v dolní části nádrže, ve středu a na začátku vzduť vodních nádrží, a protože mám nasbíraná data pro odrazivost v daných oblastech jak ze spektrometru, tak i satelitu, mohla jsem vytvořit tabulky (Tab. 4 a Tab. 5), kde mezi sebou porovnávám naměřené hodnoty odrazivosti. Tab. 4 náleží nádrži Hracholusky a najdeme v ní odrazivost ze spektrometru 709/665, 704/665 a satelitu R704/R665 při koncentraci chlorofylu-a 15, 58 a 200 $\mu\text{g/l}$. Pro totéž platí u Tab. 5, kdy koncentrace chlorofylu-a je 2,8, 16 a 28 $\mu\text{g/l}$. Ve všech případech platí, že hodnoty algoritmu rostou s rostoucí koncentrací chlorofylu-a, jak z jeho principu vyplývá. Dále je i z těchto tabulkových dat možné pozorovat, že rozsah hodnot spektrálního algoritmu za satelitního senzoru je mnohem užší než ze spektrometru, jak je popsáno a vysvětleno výše.

5.3 Měření koncentrace chlorofylu-a a odrazivosti pomocí satelitních snímků

K eutrofizaci povrchových stojatých vod dochází i díky splachu zemědělských vod obsahující spoustu živin, včetně NO_3^- a PO_4^{3-} , které se podílejí na nárůstu řas a sinic (Nedbal a Brom, 2019). Problematické situace nastávají zvláště ve chvíli, kdy v eutrofizovaných vodách při značné dotaci slunečním zářením zelené organismy zvětší svou biomasu natolik, že svým objemem zabrání zcela a trvale průniku záření do větších hloubek. V hloubkách, nebo u dna žijící zelené organismy nemohou produkovat kyslík a fotosyntetizovat. Při jejich dýchání pak u dna dochází k deficitu kyslíku a k mobili-

zaci fosforečnanů, které pak pronikají výše do vodního sloupce a dále podporují eutrofizaci. Na povrchu takových vod dochází naopak k překysličení ve slunných odpoledních hodinách v důsledku přemnožení zelených organismů, což vede ke spotřebě rozpuštěného CO_2 a tím stoupá zásaditost vody. Může vzrůst až do té míry, že dojde k přeměně ve vodách přítomného vázaného amoniaku na plynný amoniak, který způsobí otravu ryb. V nočních a ranních hodinách naopak masivním dýcháním zelených organismů u hladiny může dojít k takovému deficitu kyslíku, že dojde k zadušení vyskytujících se ryb. To jsou situace, ke kterým dochází zejména v mělkých stojatých vodách (rybníky), nicméně problém se týká i velkých vodních nádrží. Proto je sledování těchto rozsáhlých vodních ploch z hlediska obsahu chlorofylu, a tedy zelených organismů přínosné, zvláště ve formě satelitních map, které ukazují plošné prostorové zasažení různých částí nádrže těmito organismy.

Pro měření koncentrace chlorofylu-a byly použity satelitní snímky, které vznikly za pomoci rovnice grafu závislosti obsahu chlorofylu-a a spektrálního algoritmu ze satelitního senzoru R704/665: $y = 170,68x^2 - 125,84x - 22,07$. Při výpočtu snímku s hodnotami koncentrace chlorofylu-a tak každý pixel vnikl tak, že do proměnné x jsme dosadili hodnotu spektrálního algoritmu (tedy poměru odrazivostí vlnových délek 704 a 665 nm). Díky tomu jsme získali obrázky 7–14 s koncentracemi chlorofylu-a vykreslující se modrozelenou škálou pro celé plochy nádrží. Výhodou těchto satelitních měření jsou získané hodnoty koncentrace chlorofylu-a celoplošně a nejenom z míst, které jsme laboratorně vyhodnocovali.

Satelitní snímek celé vodní nádrže Hracholusky (Obr. 7), vyobrazuje odrazivost slunečního záření od hladiny vody. V tomto snímku dokážeme rozeznat trofii v celé nádrži a vše vyhodnotit pomocí tabulky trofických úrovní povrchových vod (Tab. 3). Oligotrofie neboli koncentrace chlorofylu-a do 3 $\mu\text{g/l}$ poznáme díky tmavě modré barvě a ta se nachází hlavně v dolní části nádrže, a to velmi sporadicky (Obr. 9). V tomto snímku je viditelná z největší části eutrofie, mimo břehových zón. Hypertrofní vody se nachází jen u břehu. Příčinou je pohyb vody vlivem větru, kdy dochází k nafoukání vrstev zelených řas a sinic ke břehům. Z laboratorního měření jsme v bodě p2 naměřili koncentraci chlorofylu-a 15 $\mu\text{g/l}$ a satelitní snímek vyobrazuje hodnoty 10–20 $\mu\text{g/l}$ a. Ve střední části (Obr. 10) se převážně jedná o slabou hypertrofii (do 500 $\mu\text{g/l}$), která se objevuje nejčastěji v celé ploše. V této části jsem vybrala bod p12, ve kterém jsme laboratorně naměřili koncentraci 58 $\mu\text{g/l}$. Zde se setkáváme s úskalím

získávání odrazivosti pomocí satelitních snímků, protože pro tuto oblast nemáme vyobrazená žádná data. Tento problém zapříčinila oblačnost. Slabá hypertrofie se výrazně vyskytuje v horní části nádrže (Obr. 11). Najdeme zde výjimečně i místa, která jsou eutrofní a velice se zbarvením podobá střední části nádrže. Laboratorně jsme získali vzorek z bodu p16 s koncentrací chlorofylu-a 200 $\mu\text{g/l}$ a ze snímku se jedná o hodnoty 100–250 $\mu\text{g/l}$, přičemž data ze satelitu jsou opět správná. Na celém území nádrže můžeme pozorovat jev, kdy v centru vodní plochy je koncentrace chlorofylu-a nižší než na přítocích. To je dáno tím, že voda přinášející živiny z povodí zde zpomalí svůj tok, ale nachází se v dosud mělké části nádrže, kde je vodní sloupec dobře prohříván slunečním zářením a jsou tak vytvořeny dobré podmínky pro růst řas a sinic.

Satelitní snímek celé vodní nádrže Švihov (Obr. 8) vyobrazující odrazivost slunečního záření se značně liší od nádrže Hracholusky a to tím, že je více oligotrofní, protože ve Švihově nalezneme méně zelených řas a sinic. V dolní části nádrže (Obr. 12) se vyskytuje oligotrofie, převážně však mezotrofie a eutrofie, u břehu i výjimečně i velmi slabá hypertrofie. Vybrala jsem vzorek p3 pro porovnání, ve kterém byla naměřena koncentrace chlorofylu-a 2,8 $\mu\text{g/l}$ a ze snímků se jedná o hodnoty 3–7 $\mu\text{g/l}$. Střední část nádrže (Obr. 13) je také z velké části mezotrofní až eutrofní. V užších místech nádrže při březích dochází až ke slabé hypertrofii. Vzorek z laboratorního měření jsem pro porovnání vybrala z bodu p5, který má hodnoty 16 $\mu\text{g/l}$ a satelitní snímek vyhodnotil toto místo na hodnoty 20–30 $\mu\text{g/l}$. I zde dochází k rozdílu, který opět můžeme přisoudit nepřesnosti způsobené díky jiné vlnové délce a použití méně vhodných atmosférických korekcí. Nicméně se jedná o malý rozdíl a obě hodnoty se hodnotí jako eutrofní. Slabá hypertrofie převažuje napříč celou horní částí nádrže, kde nejvyšší hodnoty koncentrace chlorofylu-a dosahuje v nejužších částech nádrže. Bod p11 s naměřenými hodnotami 58 $\mu\text{g/l}$ ze spektrometru jsem porovnála s daty ze snímku, který vykazuje hodnoty od 30 do 50 $\mu\text{g/l}$ (Obr. 14).

Vodní nádrž Švihov je zasažena zjevně méně rozvojem řas a sinic v porovnání s nádrží Hracholusky. Je to dáno tím, že jde o vodárenskou nádrž s vyloučením jakékoliv činnosti, která může způsobit zvýšený přísun znečišťujících látek do vod.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit znečištění stojatých povrchových vod zelenými řasami a sinicemi pomocí jejich spektrálních vlastností. Dalším cílem práce bylo sestavit závislosti laboratorně naměřených dat o obsahu chlorofylu-a ve stojatých vodách a spektrálních dat ze spektrometru a satelitního senzoru, interpretovat data v souvislosti s prostředím vodních nádrží a zhodnotit rozdíly naměřených dat ze spektrometru a ze snímků pořízených satelitem.

Na základě získaných informací byla charakterizována míra znečištění řasami a sinicemi pomocí parametru chlorofylu-a.

Chlorofyl-a byl stanoven laboratorně a jeho hodnoty byly dány do matematického vztahu se spektrálním algoritmem, vypočteným z multispektrálních satelitních a pozemně měřených dat. Pomocí tohoto vztahu pak byly zpětně určovány koncentrace chlorofylu-a pro celou plochu sledovaných nádrží Švihov a Hracholusky, nikoliv jen v odběrných místech, ze kterých byly vzorky vody laboratorně analyzovány.

Výsledky ukázaly výbornou použitelnost satelitních dat pro posouzení plošného znečištění vodních nádrží řasami a sinicemi.

Práce dále poukazuje na problém týkající se znečištění zdrojů pitné vody a další pokračování této práce by se mělo zabývat způsobem, jak toto znečištění eliminovat.

Seznam použité literatury

Cítace knihy

ADÁMEK, Z. (2010). *Aplikovaná hydrobiologie*. 2. rozšířené upravené vydání. Vodňany: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vod. ISBN 978-80-87437-09-4.

BRATRYCH, V. (2005). *Živel voda: člověk, příroda, technika, životní prostředí*. V Praze: Koniklec. ISBN 80-902606-5-9.

GILPIN, D. (2007). *Svět přírody*. Praha: Reader's Digest Výběr. ISBN 978-80-86880-57-0.

HARTMAN, M. et al. (2005). *Hydrobiologie*. 3., přepracované. vydání. Praha: Informatorium. ISBN 8073330466.

HNILIČKA, F. (2005). *Základy fyto techniky: (část botanika a fyziologie rostlin)*. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-1402-3.

HOLCOVÁ, K., et al. (2012). *Voda: vzdělávací modul geologie: výukový a metodický text*. Praha: P3K. ISBN 978-80-87186-87-9.

HOUSECROFT, C. E. a SHARPE A. G. (2014). *Anorganická chemie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7080-872-6.

HUBAČÍKOVÁ, V. a OPPELTOVÁ P. (2008). *Úpravy vodních toků a ochrana vodních zdrojů*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-243-9.

CHALUPOVÁ-KARLOVSKÁ, V. (2010). *Obecná biologie: středoškolská učebnice evoluce, biologie buňky, genetika*: 2. opravené vydání Olomouc: Nakladatelství Olomouc. ISBN 978-80-7182-282-0.

JELÍNEK, J. a ZICHÁČEK, V. (2014). *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 11. vydání. Olomouc: Nakladatelství Olomouc. ISBN 978-80-7182-338-4.

KALIČINSKÁ, J. (2006). *Monitorování životního prostředí*. Ostrava: Pavel Klouda. ISBN 80-86369-13-7.

KALINA, T. a VÁŇA, J. (2005). *Sinice, řasy, houby, mechorosty a podobné organismy v současné biologii*. Praha: Karolinum. ISBN 80-246-1036-1.

KINCL, M. a KRPEŠ, V. (2006). *Základy fyziologie rostlin*. 3. doplněné vydání Ostrava. ISBN 80-239-8375-x.

KLECZEK, J. et al. (2011). *Voda ve vesmíru, na zemi, v životě a v kultuře*. V Praze: Radioservis. ISBN 978-80-86212-98-2.

KLICH, I. (2017). *Vyhledky nad přítoky Vltavy*. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0550-2.

KRÁSA, J. (2013). *Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy: certifikovaná metodika pro praxi*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební. ISBN 978-80-01-05428-4.

KUČEROVÁ, R. et al. (2011). *Úprava a čištění vody*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2389-8.

KVASNIČKOVÁ, D. (2018). *Základy biologie a ekologie*. 4., přepracované a doplněné vydání. Praha: Fortuna. ISBN 978-80-7373-120-5.

KVÍTEK, T. (2017). *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce: význam retence vody na zemědělském půdním fondu pro jakost vody a současně i průvodce vodním režimem krystalinika*. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik. ISBN 978-80-270-2488-9.

KVÍTEK, T. a TIPPL M. (2003). *Ochrana povrchových vod před dusičnany z vodní eroze a hlavní zásady protierozní ochrany v krajině*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací. Zemědělské informace. ISBN 80-7271-140-7.

MALÝ, P. (2013). *Optika*. Vyd. 2., přepracované vydání. Praha: Karolinum. ISBN 9788024622460.

NEDBAL, V. a BROM, J. (2019). *Hodnocení znečištění povrchových vod pomocí satelitních snímků*. Vodní hospodářství, 5, s. 6-8.

PITTER, Pavel. (2009). *Hydrochemie*. 4., aktualizované vydání Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha. ISBN 978-80-7080-701-9.

POULÍČKOVÁ, A. (2011). *Základy ekologie sinic a řas*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-2751-5.

PRIMACK, B et al. (2011). *Úvod do biologie ochrany přírody*. Praha: Portál. ISBN 978-80-7367-595-0.

RANDOLPH, K. et al. (2008). *Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and Phycocyanin*, Remote Sensing of Environment, 112, 4009-4019.

SAMBAMURTY, A. (2005). *A textbook of Algae*. I.K. International Pvt. Ltd. New Delhi (India). ISBN-81-88237-44-2.

SECKBACH, J. (2007). *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments*. The Hebrew University of Jerusalem, Israel. Springer. ISBN-978-14-020-6111-0.

SLAVÍK, L. a NERUDA, M. (2007). *Voda v krajině*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí. ISBN 978-80-7044-882-3.

SUKOP, I. (2006). *Ekologie vodního prostředí*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-923-8.

TOWNSEND, C. R et al. (2010). *Základy ekologie*. V Olomouci: Univerzita Palackého. ISBN 978-80-244-2478-1.

VELÍŠEK, J. (2014). *Vodní toxikologie pro rybáře*. Vodňany: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vod. ISBN 978-80-87437-89-6.

VYMĚTALOVÁ, V. (2010). *Malý výkladový slovník biologických pojmů*. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04515-2.

Citace vědeckých publikací

BACELO, H. et al. (2020). *Performance and prospects of different adsorbents for phosphorus uptake and recovery from water*. Elsevier Science Sa, Lausanne, Switzerland. ISSN: 1385-8947.

CLARK, M. et al. (2017). *Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. ISSN: 1470-160X.

KUTSER, T. et al. (2006). *Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing*. Academic Press Ltd – Elsevier Science Ltd, London. ISSN: 0272-7714.

MOORE, T. et al. (2019). *Vertical distributions of blooming cyanobacteria populations in a freshwater lake from LIDAR observations*. Elsevier Science Inc, New York, Usa. ISSN: 0034-4257.

SHI, K. et al. (2019). *Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: present knowledge and future challenges*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. ISSN: 2095-9273.

SHOCK, C. a PRATT, K. (2003). *Phosphorus effect on surface water quality and phosphorus tmdl development*. Western Nutrient Management Conference. Salt Lake City, UT.

Citace webových zdrojů

DUŠEK, J. (2012). *Zelené a UV lasery*. [online] Mega Blog.cz [14. 03. 2021] Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>

Citace závěrečných prací

VÁVRA AMBROŽOVÁ, J. (2016). *Biologicky aktivní látky mořských a sladkovodních řas: Bioactive compounds of marine and freshwater algae: teze dizertační práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-80-7454-665-5.

Seznam obrázků

Obr. 1: Viditelné barevné spektrum (Dušek, 2012)	11
Obr. 2: Odrazivost slunečního záření od hladiny vody vodní nádrže Hracholusky, v závislosti na vlnové délce záření v rozsahu 400 až 900 nm. Křivky znázorňují nízké (1) (bod p2), střední (2) (bod p12) a vysoké (3) (bod p15) znečištění chlorofylem-a.	21
Obr. 3: Odrazivost slunečního záření od hladiny vody vodní nádrže Švihov, v závislosti na vlnové délce v rozsahu 400 až 900 nm. Křivky znázorňují nízké (1) (bod p3), střední (2) (bod p5) a vysoké (3) (bod p11) znečištění chlorofylem-a.	22
Obr. 4: Měření odrazivosti slunečního záření spektrometrem od hladiny vody vodních nádrží Hracholusky a Švihov o vlnových délkách 704/665 nm v poměru ke koncentraci chlorofylu-a.	23
Obr. 5: Měření odrazivosti slunečního záření spektrometrem od hladiny vody vodních nádrží Hracholusky a Švihov – užití poměru odrazivostí na vlnových délkách 709/665 nm v poměru ke koncentraci chlorofylu-a.	23
Obr. 6: Měření odrazivosti slunečního záření za pomoci satelitu od hladiny vodních nádrží Hracholusky a Švihov o vlnových délkách 704/665 nm v poměru ke koncentraci chlorofylu-a.	24
Obr. 7: Satelitní snímek celé vodní nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	26
Obr. 8: Satelitní snímek celé vodní nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody, v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	27
Obr. 9: Satelitní snímek dolní části nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	28
Obr. 10: Satelitní snímek dolní části nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	29
Obr. 11: Satelitní snímek horní části nádrže Hracholusky vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	30

Obr. 12: Satelitní snímek dolní části nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	31
Obr. 13: Satelitní snímek střední části nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	32
Obr. 14: Satelitní snímek horní části nádrže Švihov vyobrazující koncentraci chlorofylu-a, vypočtenou z odrazivosti slunečního záření od hladiny vody v poměru vlnových délek 704 a 665 nm.	33

Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled řasových oddělení a jejich zařazení (Kalina, 2005).....	8
Tab. 2: Výskyt chlorofylů v přírodě (Kincl a Krpeš, 2006).....	11
Tab. 3: Ukazatele trofie vodních nádrží (Hartman, 2005)	16
Tab. 4: Příklady měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Hracholusky spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a.	25
Tab. 5: Příklady měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Švihov spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a.	25

Seznam příloh

Příloha 1: Měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Hracholusky spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a	48
Příloha 2: Měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Švihov spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a	49

Přílohy

Příloha 1: Měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Hracholusky spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a

Hracholusky			
Koncentrace chlorofylu-a [µg/l]	<u>Spektroradiometr</u> R709/R665	<u>Spektroradiometr</u> R704/R665	Satelit R704/R665
15 (p1)	0,913343	1,009755	0,974138
15 (p2)	0,919556	1,015629	0,965591
19 (p3)	1,009177	1,092629	0,952965
20 (p4)	1,009786	1,103778	0,944785
27(p5)	1,101385	1,196173	1,00193
30 (p6)	1,222061	1,319645	1,057692
45 (p7)	1,503469	1,540802	1,072464
34 (p8)	1,252321	1,342931	1,032075
41 (p9)	1,324255	1,414129	1,07326
160 (p10)	2,509365	2,396285	1,514638
120 (p11)	1,907599	1,920052	1,361022
58 (p12)	1,469441	1,524805	-
150 (p13)	2,317017	2,272129	1,504026
200 (p14)	2,586503	2,480136	1,456753
200 (p15)	2,609793	2,482729	1,5088
180 (p16)	2,399176	2,322532	1,545593
82 (p17)	1,632466	1,659688	1,239437

Příloha 2: Měření odrazivosti slunečního záření v nádrži Švihov spektrometrem o vlnových délkách 709/665 nm, 704/665 nm a satelitu 704/665 nm v poměru k naměřeným koncentracím chlorofylu-a

Švihov			
Koncentrace chlorofylu-a [µg/l]	<u>Spektroradiometr R709/R665</u>	<u>Spektroradiometr R704/R665</u>	Satelit R704/R665
6,5 (p1)	0,758098	0,826557	0,908382
4,9 (p2)	0,762757	0,82963	0,88425
2,8 (p3)	0,751879	0,829813	0,931354
19 (p4)	0,906284	0,995724	0,948122
16 (p5)	0,955	1,048345	0,995475
6,2 (p6)	0,756935	0,827784	0,934524
5,6 (p7)	0,792439	0,874087	0,971881
18 (p8)	0,91103	0,998933	0,953488
21 (p9)	1,007397	1,093031	1,010043
25 (p10)	1,164842	1,24586	1,030086
28 (p11)	1,351832	1,440942	1,075391