

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

**SLEDOVÁNÍ EUTROFIZACE VODY MODELOVÝCH  
VODNÍCH NÁDRŽÍ ČESKA POMOCÍ DAT DÁLKOVÉHO  
PRŮZKUMU ZEMĚ**

(diplomová práce)

**MONITORING OF WATER EUTROFIZATION IN  
MODEL RESERVOIR OF CZECH REPUBLIC BY REMOTE  
SENSING DATA**

Petra Běhounová

Vedoucí práce: RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

PRAHA 2009

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracovala sama, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje

Dražice 27. 8. 2009

.....

### **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat panu RNDr. Přemyslu Štychovi, Ph.D. za vedení práce, cenné náměty, připomínky a rady. Dále chci poděkovat panu RNDr. Martinu Haisovi, Ph.D., který byl mým odborným konzultantem, za rady a náměty na zlepšení. Mé díky patří též panu RNDr. Jindřichu Durasovi, Ph.D. z Povodí Vltavy za poskytnutí dat z pozemního měření, a panu Doc. RNDr. Josefu Hejzlarovi, CSc. za data pozemního měření z profilu Frymburk. V neposlední řadě musím také poděkovat mým rodičům za podporu v době studia a za starostlivé hlídání syna a též mému manželovi za trpělivost a psychickou podporu.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá možnostmi sledování eutrofizace vody pomocí dálkového průzkumu Země v ČR. V teoretické části jsou popsány základní spektrální charakteristiky vody a jejich změny způsobené eutrofizací. Jako kvantitativní ukazatel míry trofie je zvolen chlorofyl-a. Jsou popsány metody, jak s pomocí družicových dat ze skeneru TM a ETM+ družice Landsat a z dat z pozemního měření získat hodnoty koncentrace chl-a.

Ve výzkumu jsou využity tři regresní rovnice využívající různé kanály nebo poměry kanálů družice Landsat. Regresní rovnice jsou vyzkoušeny na třech družicových snímcích z roku 2001, 2004 a 2007 na modelovém území Vltavské kaskády, tedy na vodních nádržích Lipno, Hněvkovice, Kořensko a Orlík. Nejlepší výsledky dává regresní rovnice  $\ln(\text{chl-a}) = a \cdot \text{TM2} + b \cdot \text{TM3} + c \cdot \text{TM4} + d$ , kde se koeficient determinace ( $R^2$ ) pohybuje od 0,245 do 0,422. Na základě vymodelovaných hodnot chl-a jsou vytvořeny mapy zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a ve vodní nádrži Lipno a v části vodní nádrže Orlík.

**Klíčová slova:** *dálkový průzkum Země, chl-a, Landsat, v.n. Lipno, Orlík, eutrofizace*

## **ABSTRACT**

Present study compares possibilities of monitoring water eutrophication in the Czech republic using remote sensing. The theoretical part describes basic spectral characteristics of water and their change caused by eutrophication. Chlorophyll-a was chosen as the quantitative indicator of trophic rate. Methods of obtaining value of chlorophyll-a content from scanner TM and ETM+ Landsat satellite data and from in situ measurements data are described.

Three regression equations, that employ variety of channels or channel ratios of Landsat data were utilized. The regression equations were applied on three satellite images of model area of Vltava's steps (water reservoirs of Lipno, Hněvkovice, Kořensko and Orlík) from the years 2001, 2004 and 2007. The regression equation  $\ln(\text{chl-a}) = a.\text{TM2} + b.\text{TM3} + c.\text{TM4} + d$  gives the best results, where the determination coefficient varies from 0,245 to 0,422. Maps showing distribution of chlorophyll-a concentration in water reservoir Lipno and in the part of water reservoir Orlík were created based on obtained results.

**Keywords:** *remote sensing, chl-a, Landsat, Lipno, Orlík, eutrofication*

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ</b>                          | <b>8</b>  |
| <b>SEZNAM ZKRATEK</b>                                    | <b>9</b>  |
| <b>1. ÚVOD</b>   | <b>10</b> |
| 1.1 VÝCHOZÍ TEZE   | 10        |
| 1.2 CÍLE A HYPOTÉZY PRÁCE                                | 11        |
| 1.3 MODELOVÉ NÁDRŽE                                      | 11        |
| <b>2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b>                           | <b>13</b> |
| 2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU                 | 13        |
| 2.2 ZÁŘIVÉ VELIČINY                                      | 13        |
| 2.3 INTERAKCE ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ S VODOU         | 16        |
| 2.4 SLOŽENÍ VODY A JEJÍ SPEKTRÁLNÍ CHOVÁNÍ               | 18        |
| 2.5 EUTROFIZACE A DPZ                                    | 20        |
| 2.6 STUPNĚ TROFIE  | 22        |
| 2.7 ZÁKLADNÍ SKUPINY FYTOPLANKTONU                       | 23        |
| 2.8 VYBRANÉ PROVEDENÉ VÝZKUMY VE ZJIŠŤOVÁNÍ KVALITY VODY | 24        |
| <b>3. DATA</b>   | <b>26</b> |
| 3.1 POZEMNÍ DATA   | 26        |
| 3.2 DRUŽICOVÁ DATA                                       | 29        |
| 3.2.1 PROGRAM LANDSAT                                    | 29        |
| <b>4. METODIKA</b>                                       | <b>31</b> |
| 4.1 POUŽITÝ SOFTWARE                                     | 31        |
| 4.2 OBECNÉ METODY PRO ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ      | 31        |
| 4.2.1 PŘEDZPRACOVÁNÍ                                     | 32        |
| 4.3 MODELOVÁNÍ S OBRAZOVÝMI DATY                         | 34        |
| 4.3.1 ZÍSKÁNÍ HODNOT RADIANCE                            | 34        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.3.2 ÚPRAVY DAT V PROSTŘEDÍ ARCGIS            | 36        |
| 4.3.3 REGRESNÍ ANALÝZY                         | 37        |
| 4.3.3.1 PROVEDENÍ MNOHONÁSOBNÉ REGRESE         | 40        |
| 4.3.4 VYMODELOVÁNÍ CHARAKTERISTIK KVALITY VODY | 40        |
| 4.4 VYTVOŘENÍ VÝSLEDNÉ MAPY                    | 41        |
| 4.5 VÝSLEDNÉ ANALÝZY                           | 42        |
| <b>5. VÝSLEDKY</b>                             | <b>43</b> |
| 5.1 VÝSLEDKY REGRESNÍCH ANALÝZ                 | 43        |
| 5.2 ZPĚTNĚ VYMODELOVANÉ HODNOTY CHL-A          | 45        |
| 5.3 VÝSLEDNÉ MAPY                              | 48        |
| <b>6. DISKUZE</b>                              | <b>50</b> |
| 6.1 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH DAT                   | 50        |
| 6.2 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH METOD                 | 52        |
| 6.3 VYMODELOVANÉ HODNOTY CHL-A                 | 53        |
| 6.4 VYSVĚTLENÍ VÝSLEDNÝCH MAP                  | 54        |
| 6.5 NÁVRH MOŽNÉHO ZLEPŠENÍ PRÁCE               | 56        |
| <b>7. ZÁVĚR</b>                                | <b>57</b> |
| <b>8. POUŽITÉ ZDROJE</b>                       | <b>59</b> |
| 8.1 LITERATURA                                 | 59        |
| 8.2 ELEKTRONICKÉ ZDROJE                        | 63        |
| 8.3 DALŠÍ ZDROJE                               | 65        |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH</b>                           | <b>66</b> |

## SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulka 1: Hraniční hodnoty pro klasifikaci úživnosti povrchových vod podle OECD (1992).

Tabulka 2: Data odběrů pozemních vzorků za jednotlivá odběrová místa a jejich sladění s družicovými daty.

Tabulka 3: Souřadnice odběrových míst, které musely být posunuty.

Tabulka 4: Charakteristiky senzorů družice Landsat 5 TM a Landsat 7 ETM+.

Tabulka 5: Hodnoty horní a spodní radiance a „gain“ a „offset“ pro Landsat TM.

Tabulka 6: Hodnoty horní a spodní radiance a „gain“ a „offset“ pro Landsat ETM+.

Tabulka 7: Velikost bufferů u odběrových míst.

Tabulka 8: Koeficienty vícenásobné lineární regrese  $\ln(\text{chl-a})$  s různými poměry pásem a jejich koeficienty determinace.

Tabulka 9: Odběrová místa, která vstupovala do regresních analýz.

Tabulka 10: Vypočítané koeficienty regresí a jejich koeficient determinace pro rok 2001.

Tabulka 11: Vypočítané koeficienty regresí a jejich koeficient determinace pro rok 2004.

Tabulka 12: Vypočítané koeficienty regresí a jejich koeficient determinace pro rok 2007.

Tabulka 13: Vypočítané koeficienty regresí a jejich koeficient determinace za všechny roky dohromady.

Tabulka 14: Přehled vymodelovaných hodnot chl-a v  $\mu\text{g/l}$  za jednotlivé roky, jejich rozsah, průměr a medián.

Tabulka 15: Korelační koeficienty ukazující míru závislosti vymodelovaných hodnot chl-a a hodnot chl-a pozemně změřených pro jednotlivé regresní rovnice a roky.

Tabulka 16: Stav úživnosti (trofie) podle VÚV.

Obrázek 1: Znázornění jednotlivých složek výsledné záře zaznamenané na dálkových senzorech.

Obrázek 2: Příklady specifického absorpčního koeficientu pro koncentraci chlorofylu  $1 \text{ mgm}^{-3}$ .

Obrázek 3: Graf odrazivosti a absorpce vody.

Obrázek 4: Křivky spektrální odrazivosti.

Obrázek 5: Spektrální křivky pro vodní sloupec s různými koncentracemi chlorofylu.

Obrázek 6: Odrazivost v procentech změřená těsně nad vodním povrchem pro roztok sinice druhu *Microcystis*.

Obrázek 7: Úprava bodů míst odběru vzorků na příkladu místa Otava-Štědrónín.

Obrázek 8: Úprava umístění odběrového místa Orlík-Hladná.

Obrázek 9: Empirický model - grafické zobrazení závislosti.

Obrázek 10: Srovnání korelace mezi pozemně změřenými hodnotami chl-a a vymodelovanými hodnotami chl-a v jednotkách  $\mu\text{g/l}$  u regresí s jejich korelačními koeficienty pro rok 2001(VYSL1).

## **SEZNAM ZKRATEK**

AISA – Airborne Imaging Spectrometer for Applications  
ASCII – American Standard Code for Information Interchange  
CDOM – colored dissolved organic matter (rozpuštěné organické látky)  
ČOV – čistička odpadních vod  
ČSN – česká státní norma  
DMÚ 25 – digitální model území v měřítku 1 : 25 000  
DN – digital number  
DPZ – dálkový průzkum Země  
ESA – European Space Agency  
ETM+ - Enhanced Thematic Mapper  
GIS – geografické informační systémy  
GOES – Geostationary Operational Environmental Satellites  
GPS – Global Positioning System  
H – vysoký („gain“ režim)  
Chl-a - chlorofyl-a  
IOP – Inherent Optical Properties (základní optické vlastnosti)  
IRS – Indian Remote Sensing  
ISVS – Informační systémy veřejné správy  
JETE – jaderná elektrárna Temelín  
L – nízký („gain“ režim)  
MERIS – Medium Resolution Imaging Spectrometer  
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
MS – Microsoft  
OECD – Organization for Economic Co-operation and Development  
RMSE – Root Means Square Error (střední kvadratická chyba)  
SDT – Secchi Disk Transparency (průhlednost)  
S- JTSK – systém jednotné topografické sítě katastrální  
SPOT – Satellite Pour l'Observation de la Terre  
TM – Thematic Mapper  
TSI – trophic state index (index úživnosti)  
VD – vodní dílo  
VN – vodní nádrž  
VÚV – Výzkumný ústav vodohospodářský  
VYSL1 – první výsledky, při užití odběrových míst za jednotlivé roky  
VYSL2 – druhé výsledky, při užití všech odběrových míst dohromady

# 1. ÚVOD

## 1.1 VÝCHOZÍ TEZE

Vodní ekosystémy jsou nedílnou součástí krajiny, voda na Zemi zabírá plochu 74% veškerého zemského povrchu. I když povrchová voda zaujímá jen 0,02% celkových zásob vod, pro život na Zemi je velice důležitá. V posledních letech se objevuje problém znečištění povrchových vod, riziko jejich kontaminace se zvyšuje v hospodářsky intenzivně využívaných zemích. Česká republika leží na evropském rozvodí, vody odtékají do Severního, Černého i Baltského moře, změny v zemědělských praktikách mohou významně ovlivnit kvalitu vod v hlavních řekách odvodňujících naše území.

Voda nadměru zatížená dusičnany byla identifikována na více než 40% zemědělsky využívaného území státu, a to hlavně z důvodu intenzivního způsobu hospodaření. Se vzrůstem obsahu živin ve vodách koresponduje jev eutrofizace. Eutrofizace povrchových vod je obecně chápána jako nadprodukce biomasy řas a vodních rostlin následkem trvale vysokého přísunu živin z povodí, zejména dusíku a fosforu. Mezi hlavní problémy při eutrofizaci z hlediska využívání vody pro potřeby obyvatelstva lze zahrnout zvyšování nákladů při úpravě vody obsahující plankton a sinice, úhyn ryb následkem kyslíkových deficitů, zarůstání mělkých partií nádrží makrovegetací a v neposlední řadě také snížení estetické a rekreační hodnoty nádrže. „Eutrofizace, téma skloňované, popisované a studované v minulosti z mnoha stránek, se dnes opět dostává do popředí. Je to díky jejím nepříznivým důsledkům, mezi které musíme aktuálně zařadit také problematiku vodních květů sinic.“ (Maršálek & Keršner & Marvan, 1996, str. 3). V posledních letech pozorujeme vliv vodních květů sinic na složky vodních ekosystémů, zejména na zooplankton, bakterie, řasy a ryby, ale také na vodárenské a rekreační využití vodních nádrží. Díky masovému nárůstu sinic vodního květu v devadesátých letech minulého století ve všech vyspělých zemích světa se tímto problémem začínají zabývat celé pracovní skupiny odborníků.

Ve většině případů se vodní květy monitorují pomocí pozemního průzkumu, který je ovšem nákladný nejen na finance, ale zejména na čas. Proto se v této práci chci zaměřit na jiné nástroje, které umožňují sledovat eutrofizaci ve vodních nádržích, a to na metodu dálkového průzkumu Země (DPZ). Technika DPZ může skrývat velký potenciál pro tuto

oblast. V současné době u nás tento problém není moc řešený. Také proto bych ve své práci chtěla ukázat, jak je možné techniku DPZ využít v oblasti hodnocení kvality vod, jaké jsou limity pro její použití atd.

## **1.2 CÍLE A HYPOTÉZY PRÁCE**

Práce je zaměřena na výzkum kvality vody pomocí DPZ. V práci bych chtěla dosáhnout těchto cílů:

- Nastudovat problematiku kvality vody a zjistit, jaké ukazatele se používají pro měření míry eutrofizace.
- Zjistit spektrální chování eutrofizované vody na družicovém snímku.
- Nalézt nejvhodnější metody zjišťování eutrofizace pomocí DPZ pro modelové území.
- Na modelových vodních nádržích vymodelovat míru eutrofizace na základě družicových snímků a pozemního měření.
- Zhodnotit přínos studované metody detekce kvality vody z hlediska použitelnosti v praxi (zvláště pro Českou republiku, zda je tato metoda vhodná či nikoli, jaké jsou limity atd.).

S pomocí doposud nastudované literatury jsem formulovala následující hypotézy, které bych chtěla v této diplomové práci ověřit.

- Použití metod DPZ je možné i při monitoringu kvality vody v českých nádržích, hlavně v těch plošně větších.
- U nádrží Lipno a Orlik je vhodné použití multispektrálních dat z družice Landsat, u menších vodních nádrží Hněvkovice a Kořensko už je použití omezené prostorovým rozlišením dat.
- Použití poměru kanálů TM1/TM3 vykáže dobrou korelaci s množstvím chlorofylu-a ve vodě.

## **1.3 MODELOVÉ NÁDRŽE**

Výzkum byl prováděn na celkem čtyřech vodních nádržích (VN). K jejich výběru byla použita následující kritéria: plošná velikost, nadmořská výška, zvýšená míra

eutrofizace a v neposlední řadě i možnost získat za tyto nádrže pozemní data a data družicová. Vybrány byly VN Vltavské kaskády Lipno, Hněvkovice, Kořensko a Orlík.

Vodní nádrž Lipno je největší nádrž v České Republice, nachází se na jihozápadě jižních Čech v dolní části pohoří Šumava v nadmořské výšce 726 m n. m. Hráz se nachází na 329 říčním km. Zatopená plocha při maximálním vzduťi dosahuje 4870 ha, objem nádrže je 309,502 mil. m<sup>3</sup>, délka břehů 150 km. Průměrná hloubka činí 6,5 m, maximální hloubka je 25 m. Účelem VN Lipno je akumulace vod k nalepšení průtoků pro energetiku, odběry pro průmysl a částečná ochrana před vlivem velkých vod. Nádrž je využívána též k rekreačním účelům, rybímu hospodářství a plavbě.

Vodní dílo Hněvkovice se nachází 5 km jižně od Týna nad Vltavou, na 210 km řeky Vltavy. Hladina nádrže je v nadmořské výšce 372 m n. m, celkový objem představuje 21,1 mil. m<sup>3</sup>. Vodní nádrž zabírá plochu 267,67 ha a délka vzduťi je 16,2 km. Hlavním účelem VN je zajistit požadované odběry vody pro jadernou elektrárnu Temelín (JETE), ale také využít hydroenergetického potenciálu řeky.

Vodní nádrž Kořensko byla vybudována společně s nádrží Hněvkovice u soutoku řek Vltavy a Lužnice. Hráz se nachází 2 km pod ústím Lužnice do Vltavy v oblasti vzduťi nádrže Orlík na říčním kilometru 200,405. Kořensko zajišťuje trvalou hladinu v Týně nad Vltavou, homogenizaci odpadních vod JETE a provoz malé vodní elektrárny.

Vodní dílo Orlík se nachází na 145 km řeky Vltavy. Svým objemem se Orlík řadí na první místo mezi všemi přehradami Česka. Celková délka břehů vodního díla je přes 300 km, zabírá plochu 2640 ha a objem je 703, 8 mil. m<sup>3</sup>. Hlavním účelem VN je akumulace vody pro nalepšení průtoků na spodní části Vltavy a Labe a výroba elektrické energie. Nádrž je také hojně využívána pro rekreační účely (<http://www.pvl.cz/portal/jvn/cz/index.htm>).

## 2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

### 2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU

Základní technikou použitou v diplomové práci je dálkový průzkum Země. „Dálkový průzkum je metoda, pomocí které je možno získávat informace o objektech a jevech bezkontaktními metodami“ (Halounová & Pavelka, 2005, str.1). Pro přenos informací využívá DPZ elektromagnetické záření. V dnešní době jsou nejvíce využívaným přístrojem v DPZ družice nebo letadla. Princip družicového snímání může být pasivní nebo aktivní. Při pasivním snímání družice zaznamenává záření, jehož zdrojem je Slunce a toto záření se odrazilo od zemského povrchu. V případě aktivního snímání samy přístroje vysílají svoje záření a mluvíme o radarech.

Z dat získaných pomocí DPZ můžeme vytvářet obrazová data a to buď v analogové nebo digitální podobě. Analogová data se využívají především v letecké fotogrammetrii, z družicových systémů v současné době získáváme digitální data. Digitální satelitní obraz sestává z gridu (mřížky) obsahujícího čísla. Jednotlivá buňka gridu se nazývá pixel, to je odvozeno z anglického „picture element“, a tato buňka obsahuje hodnoty nazývané „digital number“ (DN). Pomocí hodnot DN grid reprezentuje určitou kvantitu, jako je elevace, svahový gradient nebo spektrální jas, a je často nazýván digitálním obrazem (Verbyla, 1995).

Jedním z cílů satelitního DPZ je proces přeměny originálních digitálních obrazů do co nejpřesnějších a použitelných klasifikovaných tříd. Klasifikované třídy nám určují typ povrchu na Zemi; tři základní skupiny tvoří pevný povrch bez vegetace, vegetační povrch a voda.

Príslušnost k té či oné skupině krajinného objektu můžeme vyjádřit pomocí druhových parametrů, které mají kvalitativní povahu. Rozlišujeme, zda jde o louku, dům, silnici nebo rybník. Stavové parametry udávají stav daného objektu a vyjadřují kvantitativní povahu, jako je vlhkost, příměsí, stáří, hustota apod. Zářivé vlastnosti objektu popisujeme spektrálními vlastnostmi, které vyjadřují závislost množství odraženého či pohlceného záření na vlnové délce.

### 2.2 ZÁŘIVÉ VELIČINY

V této diplomové práci jsou používány regresní rovnice vycházející ze základních vzorců pro radiometrické veličiny, proto je vhodné na tomto místě základní zářivé veličiny

vysvětlit. Základní veličinou je zářivá energie  $Q$ , která je nesená elektromagnetickou vlnou a její velikost závisí na vlnové délce. Zářivá energie se udává v J. Rychlost přírůstku nebo úbytku zářivé energie v daném místě se vyjadřuje veličinou zářivý tok  $\Phi$  [ $W = J \cdot s^{-1}$ ]. Zářivý tok v jednotkovém prostorovém úhlu se označuje veličinou zářivost  $I$ , přičemž prostorový úhel  $\Omega$ , udávaný v jednotkách sr (steradián), je dán podílem plochy  $A$ , kterou na sférické ploše o poloměru  $r$  vymezuje tato plocha (Halounová & Pavelka, 2005):

$$\Omega = A/r^2 \text{ (rovnice 1)}$$

Zářivý tok se může měnit nejen v závislosti na prostorovém úhlu, ale i na směru. V tomto případě pak mluvíme o záři  $L$ , která vyjadřuje zářivý tok do jednotkového prostorového úhlu do daného směru jednotkovým plošným průmětem plochy do roviny kolmé na daný směr (Halounová & Pavelka, 2005):

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta} \text{ (rovnice 2)}$$

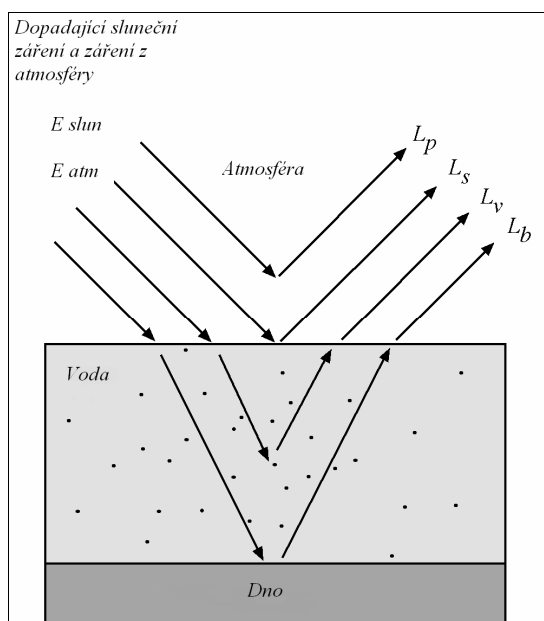
V dálkovém průzkumu jsou nejběžnější přístroje užívané v monitoringu kvality vody pasivní senzory. Celková záře (radiance) změřená pasivními přístroji se skládá z několika komponentů. Záření vysílané od Slunce se rozšiřuje skrze atmosféru a rozhraní vody a vzduchu do vody. Ve vodě je záření jednak pohlceno a jednak odraženo. Část záření odražená od vodních molekul a jiných vodních příměsí je rozptýlena zpět k povrchu a poté putuje skrze rozhraní vody a vzduchu přes atmosféru zpět k senzoru. Všechny tyto kroky mají vliv na výslednou intenzitu a spektrální model záření a v konečném důsledku i na odhad kvality vody (Koponen, 2006).

Výsledná záře ( $L_t$ ), která je zaznamenaná přístrojem DPZ je tvořena ze čtyř zdrojů (Jensen, 2006):

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b \text{ (rovnice 3)}$$

První z nich je přenosová záře  $L_p$ , která je výsledkem dopadajícího slunečního záření ( $E_{slun}$ ) a záření atmosféry ( $E_{atm}$ ). Tuto záři se snažíme z naměřené hodnoty odstranit, protože vodního tělesa nikdy nedosáhne. Záře z rozhraní vodní plochy a atmosféry  $L_s$  pronikne pouze asi milimetr do vodního sloupce a poté je odražena. Tato

odražená energie obsahuje spektrální informaci charakteristickou pro vodu na povrchu. Podpovrchová záře  $L_v$  pronikne za rozhraní vody a vzduchu a působí na organické a anorganické složky vody. Tento druh záře poskytne informace o vnitřních charakteristikách vodního sloupce. Poslední část záře se dostane až ke dnu vodního tělesa, odraží se od něj a postupuje zpět skrz vodní sloupec. Tato zář  $L_b$  je důležitá, jestliže chceme zjistit informace o dnu (Jensen, 2006). Všechny druhy záře jsou vyobrazeny na obrázku 1.



Obr. 1 Znáornění jednotlivých složek výsledné záře zaznamenané na dálkových senzorech. Zdroj: Jensen (2006)

Koponen (2006) uvádí pět radiačních komponentů:

$$L_d = T_{atm} (L_w + L_s + L_b) + L_a + L_l, \text{ (rovnice 4)}$$

kde  $L_w$ ,  $L_s$ ,  $L_a$ ,  $L_b$  a  $L_l$  jsou radiační komponenty z vodního objemu, vodního povrchu, atmosféry, dna a přilehlých oblastí a  $T_{atm}$  je prostupnost atmosférou. Všechny komponenty jsou závislé na geometrii v okamžiku měření (tj. sluneční úhel a úhel snímání senzoru) a na vlnové délce.

Základní termín ve vodní optice a dálkovém průzkumu je odrazivost vody  $R(\lambda, z)$ . Tato odrazivost je nazývána také objemovou odrazivostí („volume reflectance“) nebo

odrazivostí ozáření („irradiance reflectance“) a závisí na vlnové délce  $\lambda$  a hloubce  $z$  pod rozhraním voda-vzduch.  $R(\lambda, z)$  vyjadřuje nahoru směřující část („upwelling“) záření  $E_u(\lambda, z)$  v dané hloubce  $z$  normalizované dolů směřujícím („downwelling“) zářením  $E_d(\lambda, z)$  ve stejné hloubce (Bukata, 1995):

$$R(\lambda, z) = \frac{E_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} \quad (\text{rovnice 5})$$

Jelikož při použití senzorů dálkového průzkumu se měří záření, je vhodné užívat termín odrazivost záření  $R_{RS}$  (Koponen, 2006):

$$R_{RS}(\lambda) = \frac{L_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (\text{rovnice 6}),$$

kde  $L_u$  je záření směřující nahoru, které v sobě zahrnuje záření z vodního objemu, vodního povrchu a ze dna ( $L_u = L_w + L_s + L_b$ ). Hlavní rozdíl mezi  $R(\lambda)$  a  $R_{RS}(\lambda)$  je, že u  $R_{RS}(\lambda)$  směřuje  $L_u$  k malému prostorovému úhlu, kdežto pro  $R(\lambda)$  je užitá polovina zeměkoule (Koponen, 2006).

### 2.3 INTERAKCE ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ S VODOU

Při proniknutí elektromagnetického záření do tělesa vody dochází jednak k absorpci a jednak k rozptylu záření (Strömbeck, 2001). Absorpce i rozptyl snižují intenzitu záření, rozptyl navíc může změnit směr dopadajícího elektromagnetického záření (Bukata et al., 1995). Procesy absorpce i rozptylu mohou být kvantitativně vyjádřeny jako zlomek pohlceného nebo rozptýleného záření z paralelního světelného paprsku procházejícího velmi malou vrstvou vody (Strömbeck, 2001). Abychom vyjádřili absorpci a rozptyl, je třeba nejprve zavést termín pohltivost  $A$ . Pohltivost je výslednicí poměru absorbovaného zářivého toku ( $\phi_a$ ) ku náhodnému zářivému toku v paralelním paprsku ( $\phi_0$ ):

$$A = \phi_a / \phi_0 \quad (\text{rovnice 7})$$

Absorpční koeficient  $a$  je dán rovnicí 8.  $\Delta r$  v této rovnici představuje tloušťku vodního tělesa.

$$a = \Delta A / \Delta r \quad (\text{rovnice 8})$$

Koeficient odrazu  $b$  je analogický k absorpčnímu koeficientu a u obou koeficientů platí, že jsou závislé na vlnové délce  $\lambda$  (Stömbeck, 2001).

Bukata et al. (1995) obdobně označuje absorpční koeficient  $a(\lambda)$  (viz rovnice 3.9) a vychází přitom z rovnice 10, kde  $\Phi_{inc}$  znamená počáteční hodnotu zářivého toku,  $\Phi_{trans}$  znamená konečnou hodnotu zářivého toku a  $\Delta r$  je tloušťka vodního tělesa, kterým zářivý tok prochází a kde dochází k jeho ztenčení.

$$a(\lambda) = -\frac{[\partial\Phi(r, \lambda)]_{abs}}{\Phi(r, \lambda)\partial r} \cdot m^{-1} \quad (\text{rovnice 9})$$

$$\Phi_{trans} - \Phi_{inc} = -a\Phi_{inc}\Delta r \quad (\text{rovnice 10})$$

V rovnici 10 vyjádřená absorpční ztráta paprskové energie se dá zapsat také jako funkce vlnové délky  $\lambda$  (viz. rovnice 9) a z ní je odvozena konečná rovnice pro absorpční koeficient:

$$\Phi(r, \lambda) = \Phi(0, \lambda)e^{-a(\lambda)r} \quad (\text{rovnice 11})$$

Zářivý tok se také mění zásluhou odrazu. Odrazový koeficient (viz. rovnice 12) je definován jako část zářivé energie odražená z paprsku světla za jednotku vzdálenosti, dokud nepřekročí určitou nekonečně malou vzdálenost  $\partial r$ .

$$b(\lambda) = -\frac{[\partial\Phi(r, \lambda)]_{scatt}}{\Phi(r, \lambda)\partial r} \cdot m^{-1} \quad (\text{rovnice 12})$$

Součet koeficientů  $a(\lambda)$  a  $b(\lambda)$  dává celkový koeficient zředění  $c(\lambda)$ . Tyto tři koeficienty se pak označují jako základní optické vlastnosti (Bukata, 1995; Strömbeck, 2001).

Koponen (2006) uvádí jako tři základní optické vlastnosti (IOP)  $a(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  a  $b_b(\lambda)$ , tedy absorpční koeficient, odrazový koeficient a koeficient zpětného odrazu. Ten je stejný jako odrazový koeficient, ale s úhlem rozptylu  $90^\circ$ - $180^\circ$ . Odrazivost záření  $R_{RS}$  je vyjádřena rovnicí (Koponen, 2006):

$$R_{RS} = \frac{L_u(\lambda, 0+)}{E_d(\lambda, 0+)} = 0,83 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (\text{rovnice 13}).$$

## 2.4 SLOŽENÍ VODY A JEJÍ SPEKTRÁLNÍ CHOVÁNÍ

Pro přírodní vodu mohou být identifikovány čtyři samostatné opticky významné hmoty. Je to čistá voda, fytoplankton, suspendované anorganické látky a rozpuštěné organické látky, které mohou vodu zbarvit (Koponen, 2006). Čistá voda obsahuje molekuly vody, absorpční a odrazový koeficient jsou považovány za konstantní (Koponen, 2006). Fytoplankton je primární produktivitou vody a je složen z rozmanitých mikroskopických organismů. Pohlcení slunečního záření u fytoplanktonu se odehrává ve fotosyntetických pigmentech, kde je nejběžněji analyzovaným ukazatelem chlorofyl-a (chl-a). Chl-a má dva absorpční vrcholy na 430 nm a 665 nm (viz. obr. 2). Někteří autoři preferují k popsaní absorpce spektra chlorofyl+phaeophytin (Arst, 2003). Suspendovaný anorganický materiál zahrnuje písek, jílu a další dnové sedimenty, které se do vody dostávají přítokem z řek a také prachem z atmosférických zdrojů. Optické vlastnosti těchto materiálů závisí na geologii sledovaného území, například na tvaru a velikosti distribuovaných částic. Proto pro místa s různým geologickým materiálem nelze použít stejné optické vlastnosti (Koponen, 2006). Rozpuštěné organické látky (CDOM) jsou směsí skládající se z různých humusových a říčních kyselin vznikajících například rozkladem fytoplanktonu nebo průtokem řeky skrz les nebo bažinu. Spektrální křivka CDOM kopíruje exponenciální funkci ve viditelném spektru, nejvyšší absorpce je na krátkých vlnových délkách, nejmenší absorpce na vlnové délce 700 nm (Koponen, 2006).

Individuální odrazové a absorpční vlastnosti jednotlivých složek vody mohou být použity k sestavení celkového absorpčního (rovnice 14) a odrazového koeficientu (rovnice 15), jak uvádí Koponen (2006):

$$a_{tot}(\lambda) = a_w(\lambda) + a_y(\lambda) + C_{ph} a_{ph}(\lambda) + C_s a_s(\lambda) \quad (\text{rovnice 14})$$

$$b_{b,tot}(\lambda) = b_w(\lambda) + C_{ph} b_{ph}(\lambda) + C_s b_s(\lambda) \quad (\text{rovnice 15})$$

$C_{ph}$  a  $C_s$  představují koncentraci fytoplanktonu a suspendovaných anorganických látek, koeficienty  $w$ ,  $y$ ,  $ph$  a  $s$  označují vodu, CDOM, fytoplankton a suspendovaný anorganický materiál. Odrazový koeficient neobsahuje složku CDOM, protože v dálkovém průzkumu může být odraz CDOM ignorován (Koponen, 2006).

Strömbeck (2001) oba koeficienty také rozděluje do několika složek (rovnice 16 a 17):

$$a(\lambda) = a_{ys}(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) + a_w(\lambda) \quad (\text{rovnice 16}),$$

$$b(\lambda) = b_{SPIM}(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_w(\lambda) \quad (\text{rovnice 17}),$$

kde  $y_s$  značí rozpuštěnou hmotu,  $ph$  znamená fytoplankton,  $d$  úlomkovitý materiál,  $SPIM$  částečně suspendované anorganické látky a  $w$  značí čistou vodu. Každá z těchto složek má spektrální odrazivost charakteristickou pro vodní sloupec.

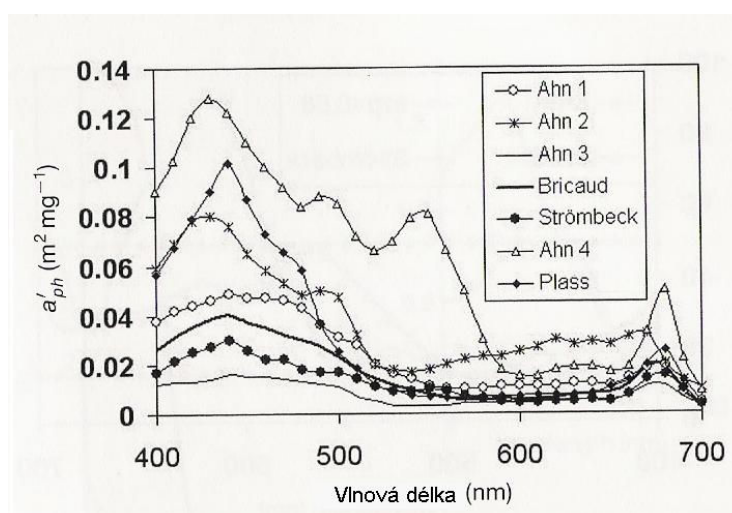
Arst (2003) vyjadřuje celkový absorpční koeficient  $a$  jako:

$$a = a_w + a_{ph} + a_y + a_s = a_w + a'_{ph}C_{chl} + a'_yC'_y + a'_sC_s \quad (\text{rovnice 18}),$$

kde  $a_w$  je absorpční koeficient absolutně čisté vody;  $a_{ph}$ ,  $a_y$  a  $a_s$  jsou absorpční koeficienty fytoplanktonu, žlutých substancí a suspendovaného materiálu;  $a'_{ph}$ ,  $a'_y$  a  $a'_s$  jsou specifické absorpční koeficienty těchto substancí; a  $C_{chl}$ ,  $C'_y$  a  $C_s$  jsou jejich koncentrace ve vodě. Arst (2003) odvozuje také empirický vztah mezi specifickým absorpčním koeficientem ( $a'_{ph}$ ) a koncentrací chlorofylu ( $C_{chl}$ ):

$$a'_{ph}(\lambda) = A(\lambda)C_{chl}^{-B(\lambda)} \quad (\text{rovnice 19}),$$

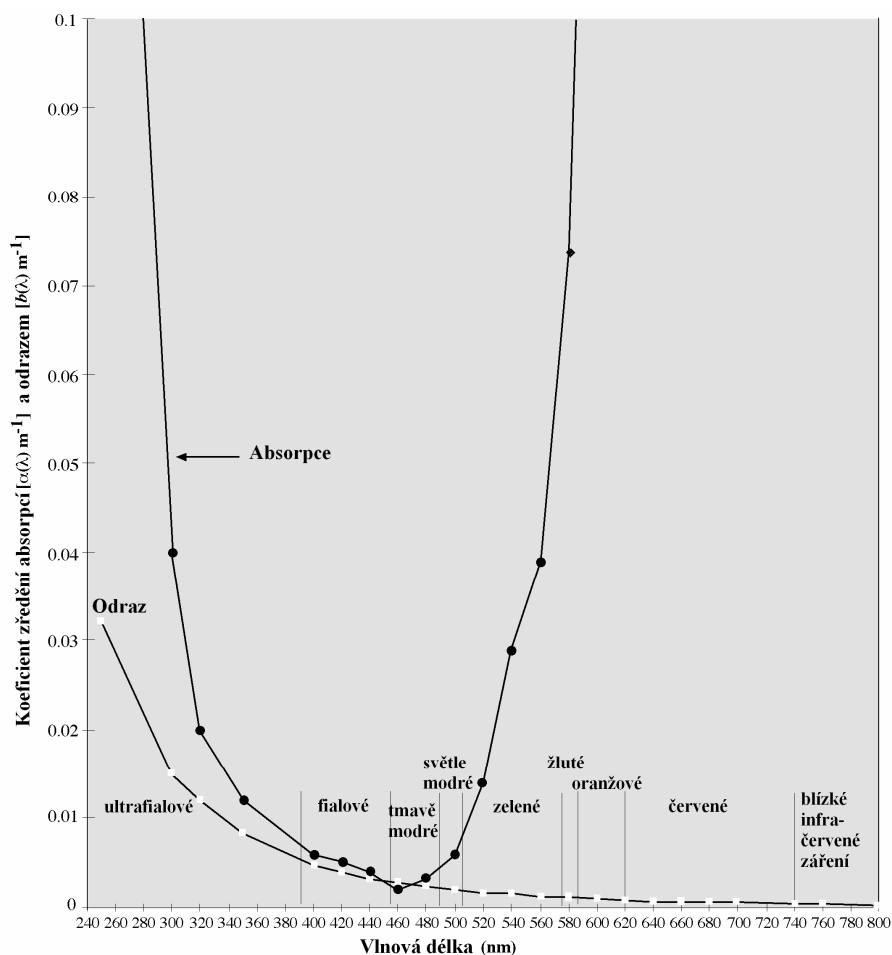
kde  $A$  a  $B$  jsou kladné, na vlnové délce závislé parametry (tabelovány v Bricaud et al., 1995). Příklady  $a'_{ph}$  pro hodnotu  $C_{chl} = 1$  u různých autorů jsou prezentovány na obr.2. Zde jsou vidět dva absorpční vrcholy na 440 nm a 680 nm .



Obr. 2 Příklady specifického absorpčního koef. pro koncentraci chlorofylu  $1 \text{ mgm}^{-3}$  založené na výsledcích Plass et al. (1978), Ahn et al. (1992), Bricaud et al. (1995), Strömbeck & Pierson (2001). „Ahn 1, 2, 3 a 4“ představují různé druhy řas. Zdroj: Arst (2003)

Voda absorbuje dominantně v ultrafialové (<400 nm) a ve žluté části spektra skrze blízkou infračervenou část spektra (>580 nm). Na vlnových délkách 740 – 2500 nm (blízké a střední infračervené záření) je téměř všechen zářivý tok vstupující do čirého vodního

tělesa zanedbatelně rozptylován. Odraz vodního sloupce je důležitý na vlnových délkách 400 – 500 nm. Tyto vlnové délky charakterizují barvy fialovou, tmavě modrou a světle modrou, proto se našim očím jeví voda modrá (Jensen, 2006). Na obrázku 3 je znázorněn graf odrazivosti a absorpce vody.



Obr. 3 Graf odrazivosti a absorpce vody. Zdroj: Jensen (2006)

## 2.5 EUTROFIZACE A DPZ

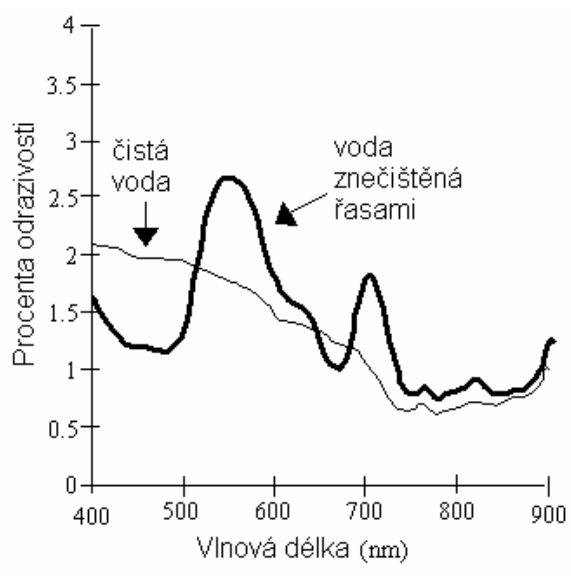
Tato diplomová práce je zaměřena na zjišťování eutrofizace pomocí DPZ. Při eutrofizaci se objevuje buď vysoká biomasa fytoplanktonních organismů, jako jsou sinice a řasy, nebo nastává zvýšený rozvoj vodní makrovegetace, případně makroskopické nárůsty vláknitých sinic a řas na ponořených podkladech (Rulík, 2007). Pro odhad obsahu těchto organismů je potřeba dobře znát jejich spektrální chování na družicových snímcích.

Řasy jsou zelené, protože jejich pigmenty pohlcují modré a červené světlo, ale mají minimální absorpci v zeleném regionu. Vrchol zelené odrazivosti je na 550 nm, je

ovlivňován množstvím zpětného rozptylu buněčných stěn; neorganická suspenze také přispívá k zpětnému rozptylu. Minimální odrazivost na 670 nm vyplývá z absorpce chl-a, ale Gitelson et al. (2000) našel, že lehký rozptyl buněčnými stěnami vyrovná tuto absorpci tak, že odrazivost spektra bude necitlivá k hustotě řas na 670 nm. Vrchol odrazivosti na 700 nm vyplývá z nižší absorpce chl-a a silnější odrazivosti od řasových buněčných stěn (Menken & Brezonik & Bauer, 2005).

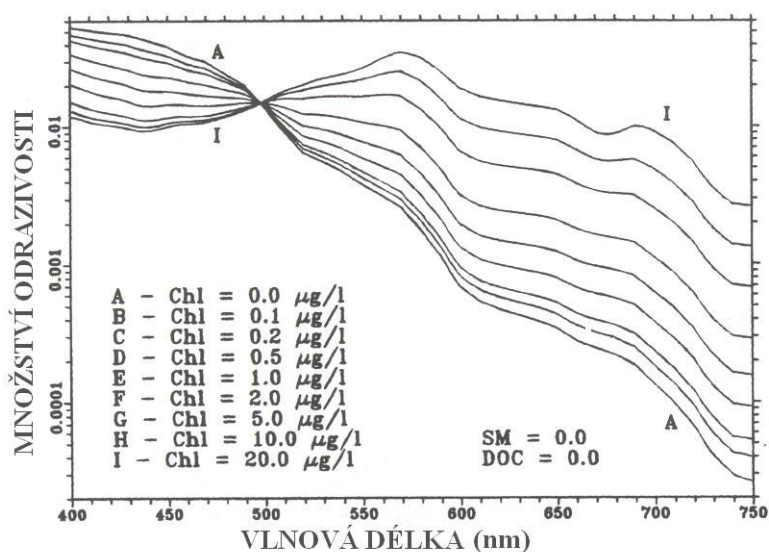
Plankton je široký termín, který se používá k popisu všech živých organismů ve vodě, které nejsou schopné odolávat proudu. Plankton může být dále členěn do rostlinných organismů (fytoplankton), živočichů (zooplankton), bakterií (bakteria-plankton) a nižších rostlinných forem jako řasové houby. Fytoplankton jsou malé jednotlivé buňky, které se skládají z hmoty obsahující uhlík. Všechny fytoplankton ve vodním tělese obsahuje fotosynteticky aktivní barvivo chlorofyl a (Jensen, 2006).

Dálkový odhad koncentrace vodních komponentů je podmíněný přesnou znalostí spektrální křivky (jinak označované jako specifický absorpční a odrazový koeficient) vodního tělesa (Bukata et al., 1995). Rozdíl mezi odrazivostí čisté vody a vody s řasami je znázorněn na obrázku 4. Křivka spektrální odrazivosti vody s řasami vykazuje dvě výrazné sníženiny, které odpovídají absorpci chl-a v modré části spektra (400 až 500 nm) a v červené části spektra (675 nm) (Jensen, 2006).



Obr. 4 Křivky spektrální odrazivosti. Zdroj: Jensen (2006)

Bukata et al. (1995) vytvořil křivky spektrální odrazivosti pro vody s různým obsahem chl-a (viz. obr. 5). V hypotetickém vodním sloupci byla odrazivost měřena jen pro rozhraní voda-vzduch a koncentrace suspendovaných minerálů a rozpuštěné organické hmoty byly udržovány na nule, zatímco koncentrace chl-a se pohybovala mezi 0 a 20  $\mu\text{g/l}$ . Z obrázku je patrné, že vodní sloupec s žádnou nebo malou koncentrací chl-a vykazuje výraznou odrazivost v modré části spektra a naopak minimální odrazivost v červené části spektra. Se vzrůstající koncentrací chl-a ve vodním sloupci je dobře viditelné maximum v červené části spektra.



Obr. 5 Spektrální křivky pro vodní sloupec s různými koncentracemi chlorofylu. Zdroj: Bukata (1995)

Arst (2003) uvádí typický rys vod s dominancí řas – maximum odrazivosti na vlnové délce okolo 550 nm, monotónní vzrůstající odrazivost v oblastech fialového a modrého spektrálního regionu a někdy vzrůstající odrazivost na 680 nm. Vrchol odrazivosti na 680 nm je často pozorován ve vodách s vysokým obsahem chlorofylu a toto vlnové pásmo je mnoha autory využito k vyvíjení algoritmů pro odhad koncentrace chl-a.

## 2.6 STUPNĚ TROFIE

Trofie znamená úživnost vody a je dána množstvím živin a jejich dostupností pro řasy, sinice a vyšší rostliny ve vodním prostředí. Často se mluví o eutrofizaci, což je kategorie trofie, zvýšená úživnost vody. Pro hodnocení úrovně eutrofizace povrchových vod se vychází z údajů o koncentraci celkového fosforu, dusíku a chlorofylu-a ve vodě. Koncentrace chl-a je pak používána jako měřítko přítomné biomasy fytoplanktonu

(Desortová, 2002). Na úrovni EU byl zpracován návrh limitních koncentrací pro hodnocení parametrů eutrofizace a rozdělení do pěti tříd klasifikační stupnice (viz. tab. 1).

Tab. 1: Hraniční hodnoty pro klasifikaci úživnosti povrchových vod podle OECD (1992).  
Zdroj: Rulík (2007)

| Kategorie jednotky   | $P_{\text{celk}}$ ,<br>$\text{mg m}^{-3}$ | prům. chl-a<br>$\text{mg m}^{-3}$ | max. chl-a,<br>$\text{mg m}^{-3}$ | prům. průhlednost,<br>m | min. průhlednost,<br>m |
|----------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Oligotrofie</b>   | < 10                                      | < 2,5                             | < 8                               | > 6                     | > 3                    |
| <b>Mezotrofie</b>    | 10 - 35                                   | 2,5 - 8                           | 8 - 25                            | 6 - 3                   | 3 - 1,5                |
| <b>Eutrofie</b>      | 35 - 100                                  | 8 - 25                            | 25 - 75                           | 3 - 1,5                 | 1,5 - 0,7              |
| <b>Hypereutrofie</b> | > 100                                     | > 25                              | > 75                              | < 1,5                   | < 0,7                  |

Vysvětlivky:

$P_{\text{celk}}$  – průměrná roční koncentrace celkového fosforu v nádrži či jezeře

prům. chl-a – průměrná roční koncentrace chlorofylu *a* v povrchové vrstvě

max. chl-a – maximální roční koncentrace chlorofylu *a* v povrchové vrstvě

prům. průhlednost – průměrná roční průhlednost (naměřená pomocí Secchi desky); v případě mělkých, větrem nebo přítokem míchaných nádrží mohou být na všech úrovních úživnosti hodnoty nižší kvůli resuspenzím sedimentů ze dna

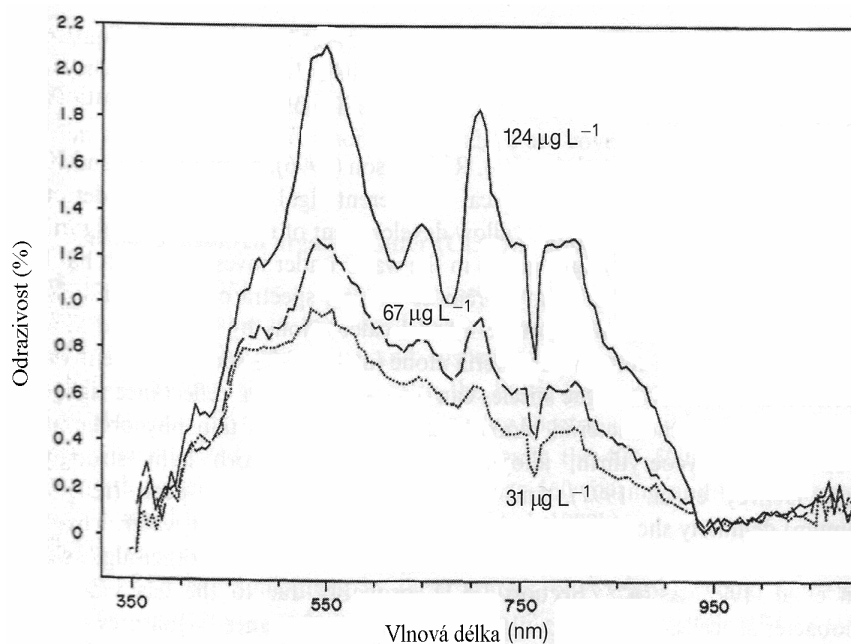
min. průhlednost – minimální roční průhlednost

## 2.7 ZÁKLADNÍ SKUPINY FYTOPLANKTONU

**Sinice** (*Cyanobacteria*) se řadí mezi bakterie a vyskytují se ve všech vodárenských nádržích, pouze v úživných (eutrofních) nádržích však způsobují intenzivní vodní květ. Vodní květ je intenzivní pomnožení planktonních sinic, kdy dochází k tvoření okem viditelných struktur, jako jsou vločky, žmolky, jehličky, hladinové čmouhy a povlaky. Největším problémem vodního květu je toxicita, mezi toxické sinice řadíme druhy *Microcystis aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*, *Aphanizomenon flosaquae*, sinice rodu *Anabaena* nebo *Planktothrix agardhi* (Geriš & Vrabcová, 2005). Arst (2003) prezentuje graf odrazivosti pro druh *Microcystis* (obr. 6).

**Rozsivky** (Bacillariophyceae) jsou jednobuněčné řasy, jejich buňka leží ve schránce z oxidu křemičitého. Preferují kalnější vodu a nižší teplotu. Způsobují hnědé zákaly a silné pachové závady vody, často převažují v jarních měsících (Geriš & Vrabcová, 2005).

**Zlativky** (Chrysophyceae) jsou řasy hnědozelené až zlatožluté barvy. Některé druhy vytváří schránku a preferují čistější a chladnější vodu, vyskytují se v jarních a podzimních měsících. Mohou způsobit zelenohnědé až zlatohnědé zbarvení vody spojené s pachovými a chuťovými závadami vody (Geriš & Vrabcová, 2005).



Obr. 6 Odrazivost v procentech změřená těsně nad vodním povrchem pro roztok sinice druhu *Microcystis*. Zdroj: Arst (2003)

**Skrytěnky** (Cryptophyta) řadíme mezi bičíkovce, jsou schopni účinného samostatného pohybu pomocí bičíků. Využívají situace, kdy jedno společenstvo řas mizí a druhé nastupuje a v této době využijí uvolněného životního prostoru pro své pomnožení. Většinou nezpůsobují velké vodárenské problémy, ale mohou zabarvit vodu do olivově zelena (Geriš & Vrabcová, 2005).

**Obrněnky** (Dinophyta) mají podobné pohybové schopnosti jako skrytěnky, ale jejich buňka je pokryta silným pancířem. Vzácně se mohou pomnožit a způsobit zelenohnědý nebo červenohnědý vegetační zákal a také pachové závady vody (Geriš & Vrabcová, 2005).

**Zelené řasy** (Chlorophyta) tvoří obrovskou skupinu rozmanitých řas, které mají společné složení barviv. V eutrofních a hypertrofních nádržích jsou schopny vytlačovat v letním období sinice. Řasy vytváří na povrchu vody typický zelený zákal (Geriš & Vrabcová, 2005).

## 2.8 VYBRANÉ PROVEDENÉ VÝZKUMY VE ZJIŠŤOVÁNÍ KVALITY VODY

Ekstrand (1998) využil snímky z družice Landsat TM pro odhad obsahu chl-a v místech ústí řek do moře. Práce ukázala, že blízký infračervený kanál TM4 silně koreluje

s koncentrací chlorofylu-a. Z výzkumu také vyplynulo, že viditelné kanály, nebo algoritmy založené na viditelných kanálech, nejsou vhodné pro zjišťování chl-a v ústí řek. Tyto kanály naopak hodně korelují s množstvím rozpuštěných látek ve vodě.

Kloiber & Brezonik & Bauer (2002) prováděli výzkum pro odhad průhlednosti jezer za pomoci družicových dat Landsat MSS a TM. Autoři uvádějí, že důležitým přínosem je vhodnost užití snímků Landsat v retrospektivních analýzách a dodávají, že metody založené na satelitním průzkumu mohou vhodně doplňovat tradiční pozemní monitoring.

Ve studii Olmanson & Bauer & Brezonik (2002) je zkoumáno využití snímků z družice Landsat TM při vytváření atlasu kvality vody na Minesotských jezerech. V práci je využito vztahu mezi pozemně změřenými hodnotami průhlednosti a poměru pásem Landsat TM 1 a TM 3, jako závisle a nezávisle proměnnými v regresní analýze. Výsledkem je mapa znázorňující plošné rozdělení indexu úživnosti (TSI).

Data z družice Landsat využívají ve své studii také Brezonik & Menken & Bauer (2005) při hodnocení charakteristik kvality vody, tedy průhlednosti a koncentrace chl-a. V tomto výzkumu jsou ke kalibraci využita data z pozemního měření. Autoři využívají metodu mnohonásobné regrese a jako nejlepší vztah, který nejvíce odpovídá skutečnosti, uvádějí kombinaci kanálů 1, 2 nebo 4 s poměrem pásem 1/3 u skeneru Landsat TM.

Na řece Ebro prováděl výzkum Álvares-Robles et al. (2006) s cílem získat index TSI, který operuje s parametry kvality vody: průhlednost, chl-a a koncentrace rozpuštěných látek. Jsou využita data z pozemního průzkumu i data družicová z družice Landsat 5 TM. Ve studii je rovněž použita vícenásobná regresní analýza, kde je jako nezávislá proměnná zvolen kanál TM2 a poměr kanálů TM1/TM2. Autoři uvádějí, že stanovení kvality vody prostřednictvím dálkového průzkumu je významně odlišné oproti pozemním metodám a vzhledem k velké heterogenitě studovaných vodních útvarů poskytne lepší ukazatele kvality vody technika dálkového průzkumu. Dodávají, že pro zlepšení výsledků by bylo dobré zajistit soulad pozemních dat s družicovými daty.

Koponen (2006) se ve svém výzkumu zaměřuje na sledování kvality vody ve finských jezerech pomocí hyperspektrálních družicových systémů MERIS, MODIS a AISA. Ve studii byly zjišťovány parametry chl-a, průhlednost, turbidita a obsah rozpuštěných látek. Hledání informací o kvalitě vody je založeno na algoritmech užívajících jednotlivé kanály nebo poměry kanálů, které jsou kalibrovány a testovány s pozemními daty. Hlavní nedostatek použité metody shledává autor v nutnosti kalibrace dat předtím, než mohou být použita s jinými družicovými daty.

### 3. DATA




Vstupem do vlastního výzkumu byla data jednak z pozemního průzkumu a jednak data družicová. Důležité bylo dbát na sladění datu pořízení, protože kvalita vody v nádržích se velice mění v čase. Maximální odstup mezi družicovým snímkem a pozemním měřením byl 20 dní (viz. tab.2).

#### 3.1 POZEMNÍ DATA

Data z pozemního průzkumu byla získána ze státního podniku Povodí Vltavy, a. s. Za jednotlivé nádrže (viz. kap. 1.3) byly zjišťovány charakteristiky o datu a místě odběru, obsahu chl-a a u některých nádrží i o průhlednosti (SDT) (viz. Příloha A). Celkem bylo použito 16 odběrových míst, ovšem ne pro všechny roky. Pro rok 2001 bylo použito 9 odběrových míst, pro rok 2004 5 odběrových míst a pro rok 2007 11 odběrových míst (tab. 2). Umístění míst odběru vzorků je znázorněno na mapkách v Příloze B.

Tab.2 Data odběrů pozemních vzorků za jednotlivá odběrová místa a jejich sladění s družicovými daty.

| Místo odběru               | 6.8.2001 | 29.8.2001 | 18.8.2004 | 11.6.2007 | 13.6.2007 | 14.6.2007 | 20.6.2007 | 26.6.2007 |
|----------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| VN Lipno II hráz           |          |           | *         |           |           | *         |           |           |
| VN Lipno hráz              | *        |           | *         |           |           | *         |           |           |
| VN Lipno Frymburk          | *        |           | *         |           |           | *         |           |           |
| VN Lipno Dolní Vltavice    | *        |           | *         |           |           | *         |           |           |
| VN Lipno Horní Planá       | *        |           | *         |           |           | *         |           |           |
| VD Orlík - hráz            |          | *         |           |           |           |           | *         |           |
| D Orlík - Žďákovský most   |          | *         |           |           |           |           |           |           |
| VD Orlík Otava - Štědrónín |          | *         |           |           |           |           |           |           |
| VD Orlík - Zvíkovský most  |          | *         |           |           |           |           |           |           |
| VD Orlík - Podolský most   |          | *         |           |           |           |           |           |           |
| VD Orlík - Hladná          |          |           |           |           |           |           |           |           |
| Otava Topělec              |          |           |           | *         |           |           |           |           |
| VN Hněvkovice hráz         |          |           |           |           | *         |           |           |           |
| VN Kořensko pod            |          |           |           |           |           |           | *         |           |
| VN Kořensko hráz           |          |           |           |           |           |           | *         |           |
| Vltava Hluboká n.Vltavou   |          |           |           |           |           |           |           | *         |

aplikovaný družicový snímek z data:  26.8.2001 (ETM+) \* odebraný vzorek  
 19.8.2004 (TM)  
 25.6.2007 (TM)

Stanovení koncentrace chl-a se provádí odebráním vzorku speciálním odběrákem, transportem do laboratoře a extrakcí do etanolu podle platné normy ČSN. Koncentrace

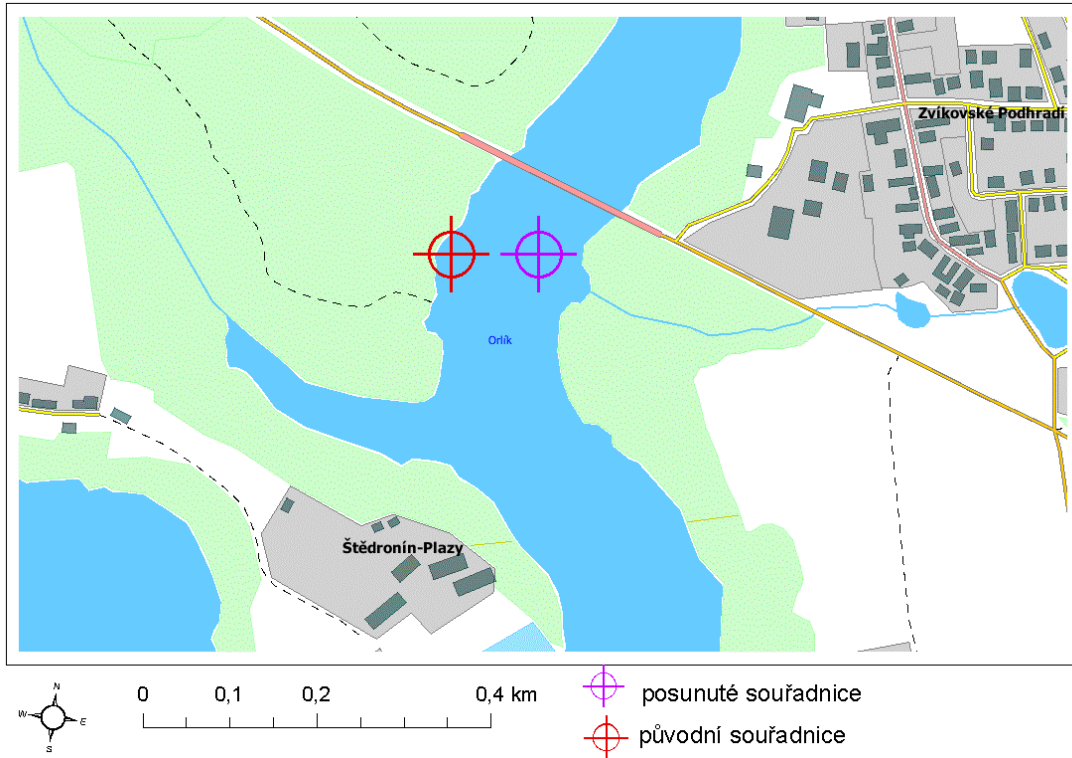
chl-a se udává v jednotkách  $\mu\text{g/l}$ . Z hodnoty koncentrace chl-a lze s vysokou přesností hodnotit úroveň výskytu řas a sinic v nádrži (<http://www.pvl.cz/portal/jvn/cz/index.htm>).

Průhlednost vody je měřena pomocí Secchiho desky. Je to kotouč o průměru 30 cm se čtyřmi výraznými kvadranty a kalibrovanou desetimetrovou šňůrou, který se ponořuje pod hladinu tak dlouho, dokud je viditelný. V okamžiku, kdy již nelze desku rozeznat, se provede odečet hloubky v cm. Stanovením průhlednosti lze postihnout závažné změny jakosti vody, které jsou vyvolány jednak rozvojem různých skupin organismů nebo anorganickými zákaly. Průhlednost se pohybuje v rozsahu několika decimetrů na letních eutrofizovaných nádržích až po sedmimetrové hodnoty na horských nádržích na podzim.

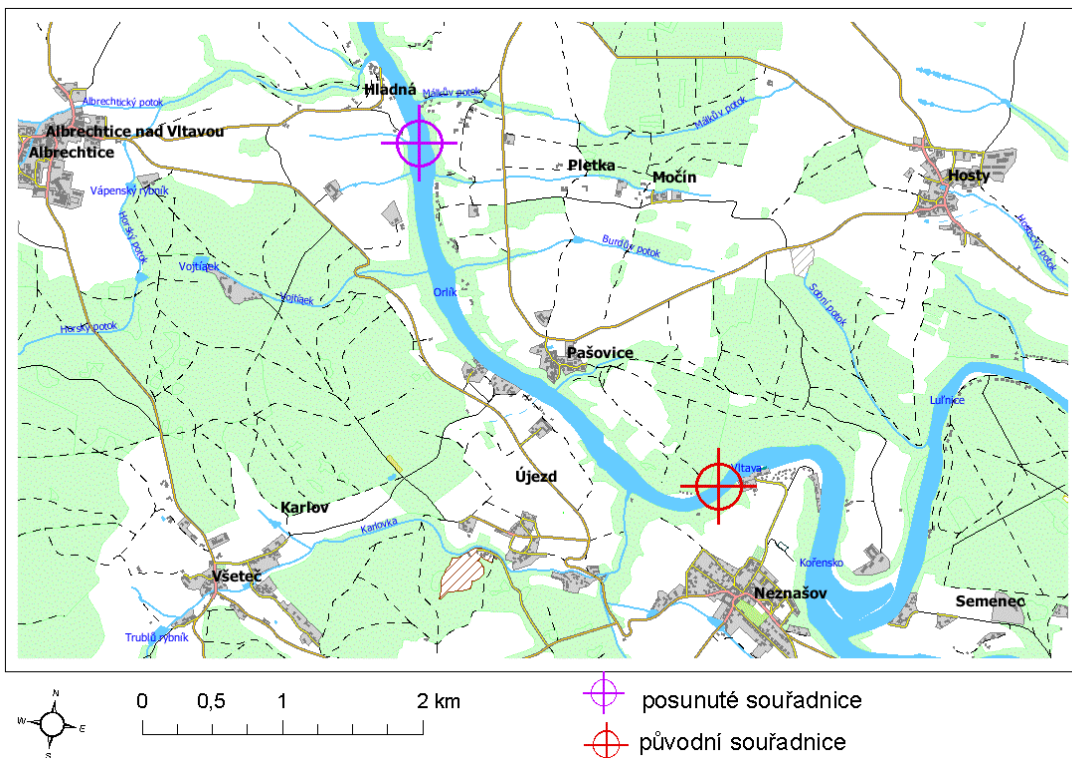
Data z pozemního měření byla dodána za jednotlivá odběrová místa, u nichž byly udány souřadnice GPS. Při překrytí míst odběru s družicovými snímky došlo v některých případech k tomu, že odběrová místa ležela mimo řeku či nádrž. Jednalo se o odběrová místa Hladná, Podolský most, Zvíkovský most a Štědrónín na vodní nádrži Orlík. Na vině bude patrně nepříliš přesné změření souřadnic pomocí GPS. Proto bylo nutné lokalizaci odběru upravit tak, aby se body nacházely ve vodě. Úprava byla vykonána tímto postupem: U bodů Štědrónín, Zvíkovský most a Podolský most jsem se snažila zachovat souřadnice X a posun byl proveden pouze ve směru osy Y tak, aby bod ležel ve vodě a nebyl blízko břehů (viz. obr. 7). U místa Hladná ovšem nastala jiná situace, původní bod byl umístěn blízko nádrže Kořensko, tedy s velkou chybou. Zde jsem vycházela z říčního kilometru, který byl též poskytnut Povodím Vltavy, a umístila bod uvnitř nádrže tak, aby nebyl blízko břehů (viz. obr. 8). Dle mého názoru tento postup do jisté míry mohl ovlivnit výsledky, ovšem žádná přesnější data nebylo možné získat. V tab. 3 jsou zaznamenány body, které musely být posunuty, jejich původní souřadnice a posunuté souřadnice.

*Tab. 3 Souřadnice odběrových míst, které musely být posunuty.*

| Místo odběru               | původní souřadnice |         | posunuté souřadnice |         |
|----------------------------|--------------------|---------|---------------------|---------|
|                            | Y-JTSK             | X-JTSK  | Y-JTSK              | X-JTSK  |
| VD Orlík Otava - Štědrónín | 769209             | 1113775 | 769109              | 1113775 |
| VD Orlík - Zvíkovský most  | 766999             | 1113844 | 766916              | 1113844 |
| VD Orlík - Podolský most   | 764644             | 1122093 | 764581              | 1122083 |
| VD Orlík - Hladná          | 758985             | 1136060 | 761113              | 1133624 |



Obr. 7 Úprava bodů míst odběru vzorků na příkladu místa Otava-Štědronín. Podkladová mapa je DMÚ 25. Zdroj: <http://www.geoportal.cenia.cz>



Obr. 8 Úprava umístění odběrového místa Orlík-Hladná. Podkladová mapa je DMÚ 25. Zdroj: <http://www.geoportal.cenia.cz>

## 3.2 DRUŽICOVÁ DATA

V práci jsou použita data získaná z družicových senzorů. Jak píše Kolář et al. (1997, str.77): “Družice představuje sama o sobě ideální nosič pro přístrojové aparatury používané pro dálkový průzkum Země.“ Specifikou družic je výběr dráhy, ve které bude družice okolo Země obíhat. Družice na polární dráze obíhají Zemi ve směru sever-jih za dobu zhruba 90-100 minut. Nad obzorem daného území jsou vždy jen několik minut, ale daný bod je možno pozorovat několikrát za měsíc. Výška dráhy se pohybuje v rozmezí 600 – 1200 km, prostorové rozlišení je proto výrazně lepší než u geostacionárních družic (Halounová & Pavelka, 2005). Mezi družice pohybující se po polární dráze patří například SPOT, Landsat nebo družice IRS. Jiným případem je dráha geostacionární, pomocí níž družice snímá stále stejné území na zemském povrchu. Díky velké výšce (36 000 km) může družice snímat velké území. Taková družice se pohybuje v rovině zemského rovníku. Příkladem je meteorologická družice Meteosat nebo GOES.

U senzorů rozlišujeme tato rozlišení: prostorové, spektrální, termínové a radiometrické. Prostorové rozlišení souvisí s velikostí jednoho obrazového elementu (pixelu), spektrální udává počet pásem, ve kterých je měření prováděno, termínové rozlišení specifikuje, za jak dlouho bude snímáno stejné území a radiometrické rozlišení udává citlivost detektorů k malým rozdílům v elektromagnetické energii.

Pro zhodnocení eutrofizace na vodních nádržích byla použita data z multispektrálního skeneru Landsat 5 TM a Landsat 7 ETM+. Výhodou těchto dat je jejich dobrá dostupnost. Nevýhodou je menší prostorová rozlišovací schopnost a relativně malý počet spektrálních pásem, než u jiných systémů.

### 3.2.1 Program Landsat

V této práci jsou využita data z družice Landsat skeneru ETM+ a TM. Aby bylo možné sledovat míru eutrofizace, bylo zvoleno období léta, kdy nejvíce narůstá koncentrace chl-a. Byly tedy vybrány snímky z 25.6.2007 (skener TM), 19.8.2004 (skener TM) a 26.8.2001 (skener ETM+).

Družice Landsat se řadí mezi polární družice, obíhá Zemi ve směru sever-jih zhruba za 90-100 minut. Přelet nad rovníkem uskutečňuje pod úhlem 98,2°. Program běží od roku 1972, kdy byla vypuštěna první družice s názvem Landsat 1. Dále následovaly další družice Landsat 2 až Landsat 7. V současné době jsou aktivní družice Landsat 5 s mechanickým skenerem Thematic Mapper (TM) a Landsat 7 se skenerem Enhanced

Thematic Mapper Plus (ETM+). Na skeneru ETM+ došlo v roce 2003 k poruše skenovacího zrcátka, takže na scénách chybí přibližně 25% dat. Od roku 2003 je proto lepší pro další zpracování použití dat ze skeneru Landsat TM. Mechanický skener Landsat TM provádí měření v sedmi spektrálních kanálech viditelného a infračerveného záření, prostorová rozlišovací schopnost je 30m, výjimku tvoří kanál 6, kde je prostorová rozlišovací schopnost 120 metrů. Na skeneru ETM+ je navíc měření prováděno ještě v jednom, panchromatickém pásmu s rozlišením 15 metrů, kanál 6 je termální a má prostorové rozlišení 60 m. Oba skenery snímají území o velikosti 185 x 185 km (viz. tab. 4).

V práci byly využity kanály viditelného záření 1, 2, 3 a kanál v infračerveném oboru 4. Kanály 1-4 jsou ve spektrálním rozsahu, kde světlo proniká vodou do dostatečné hloubky a lze tak získat informace o kvalitě vody. Bylo zjištěno, že tyto kanály korelují s ukazateli kvality vody (např. Fuller & Aichele & Minnerick, 2004).

*Tab.4 Charakteristiky senzorů družice Landsat 5 TM a Landsat 7 ETM+. Zdroj: Dobrovolný & Herebe & Hynek (2001), <http://old.arcddata.cz/data/druzicova/landsat>*

| Skener  | Spektrální rozsah (μm) | Prost. rozlišovací schopnost (m) | Rozloha snímaného území (km) | Pracuje od roku |
|---------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------|
| TM1     | 0,45 - 0,52            | 30                               | 185 x 185                    | 1982            |
| TM2     | 0,52 - 0,60            | 30                               |                              |                 |
| TM3     | 0,63 - 0,69            | 30                               |                              |                 |
| TM4     | 0,76 - 0,90            | 30                               |                              |                 |
| TM5     | 1,55 - 1,75            | 30                               |                              |                 |
| TM6     | 10,4 - 12,5            | 120                              |                              |                 |
| TM7     | 2,08 - 2,35            | 30                               |                              |                 |
| ETM+1   | 0,45 - 0,515           | 30                               | 185 x 185                    | 1999            |
| ETM+2   | 0,525 - 0,605          | 30                               |                              |                 |
| ETM+3   | 0,63 - 0,69            | 30                               |                              |                 |
| ETM+4   | 0,75 - 0,90            | 30                               |                              |                 |
| ETM+5   | 1,55 - 1,75            | 30                               |                              |                 |
| ETM+6   | 10,40 - 12,5           | 60                               |                              |                 |
| ETM+7   | 2,09 - 2,35            | 30                               |                              |                 |
| PANCHRO | 0,52 - 0,90            | 15                               |                              |                 |

## 4. METODIKA

V metodických postupech jsem vycházela z literatury, využila jsem převzaté rovnice, které jsem aplikovala na získaná data. Z literatury jsem se inspirovala pro vytvoření vlastní regresní rovnice. Nejprve bylo nutné zpracovat družicové snímky, poté získat hodnoty pro závisle a nezávisle proměnné, které vstoupily do regresních rovnic, pomocí nichž byly zjištěny koeficienty regrese. Tyto koeficienty pak pomohly vymodelovat plošnou koncentraci chl-a v nádržích, a z těchto hodnot byly poté vytvořeny výsledné mapy.

### 4.1 POUŽITÝ SOFTWARE

V diplomové práci byly použity tyto programy:

- PCI Geomatica V9.1 a V10 – Tento program slouží především pro zpracování družicových snímků. Byly zde prováděny práce při předzpracování snímků v modulu GCPWorks a OrthoEngine a práce s jednotlivými kanály v modulu Focus.
- ArcGIS 9.2 – V tomto programu byly provedeny operace pro extrahování hodnot radiance (záře, viz. kap. 3.2) do tabulkové podoby a pro konečnou úpravu výsledných map.
- SPSS 10.1 – V tomto statistickém programu byl proveden výpočet regresního modelu pro získání modelově změřené koncentrace chlorofylu-a.
- Statistica- Statistický program byl použit při opravách regresních analýz pro výpočet nových koeficientů vstupujících do regrese.

### 4.2 OBECNÉ METODY PRO ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ

Podle Dobrovolného (1998) lze digitální zpracování obrazové informace získané metodami dálkového průzkumu rozdělit do těchto částí: předzpracování obrazů, zvýraznění obrazů, extrahování informace, studium dynamiky jevů, modelování s obrazovými daty a integrace obrazových dat a jejich vstup do GIS.

Předzpracování slouží ke korekci radiometrických, atmosférických a geometrických zkreslení a šumu, které vznikají v průběhu vytváření obrazu. Zvýraznění obrazu je

aplikováno na data pro efektivnější znázornění obrazu pro další vizuální či automatické zpracování. Cílem zvýraznění je vytvoření nového obrazu, který poskytuje více informace a ta může být interpretována. Řadíme sem manipulaci s kontrastem snímku, filtraci, zvýraznění hran a pod. Extrahování informace zahrnuje především klasifikaci a to automatizovaným postupem s cílem identifikace jednotlivých povrchů či objektů. Klasifikátory, neboli rozhodovací pravidla, jsou většinou založeny na studiu spektrálního chování objektů, či na geometrických a prostorových vlastnostech objektů. Dynamiku jevů lze díky poměrně časté frekvenci snímání úspěšně studovat pomocí DPZ. Povaha změn v čase může být velice různorodá, od malých k velkým měřítkům. Cílem modelování s obrazovými daty je odvodit kvantitativní vztahy mezi daty získanými dálkovým průzkumem a například pozemním měřením či pozorováním. Spolu s technikami GIS je data DPZ možno využít k modelování životního prostředí, nebo k predikcím jeho chování. Konečným krokem zpracování obrazových dat je jejich integrace a vstup do GIS.

#### **4.2.1 Předzpracování**

Cílem předzpracování dat je odstranění systematických a náhodných chyb. Mezi systematické chyby patří například chyby v poloze objektů vznikající v důsledku zakřivení Země či její rotace. Tyto chyby jsou opakovatelné a jejich velikost lze předvídat. Obrazové záznamy obsahují také řadu nepřesností náhodné povahy vznikajících například kolísáním parametrů dráhy nosiče, výpadky v činnosti detektorů snímacího zařízení, vlivy atmosféry a pod. Náhodné chyby představují v obraze tzv. šum. Aby bylo možné s daty dálkového průzkumu dále pracovat, je nutné odstranit nebo alespoň potlačit výše uvedené chyby a nepřesnosti. K tomu slouží geometrické a radiometrické korekce. Geometrické korekce transformují souřadnou soustavu obrazového záznamu nebo velikost obrazového prvku, zatímco radiometrické korekce upravují DN hodnoty jednotlivých pixelů.

Hodnoty naměřené distančním snímacím zařízením neodpovídají skutečným radiometrickým charakteristikám objektů, proto je nutné je při radiometrické korekci opravit. Naměřené hodnoty závisí především na přesné kalibraci měřícího zařízení a tato kalibrace se většinou provádí automaticky. Mezi radiometrické korekce řadíme také atmosférické korekce. Ty představují složitý problém, ale naštěstí lze ve většině aplikací efekty atmosféry zanedbat (Dobrovolný, 1998). V současné době jsou také např. data z družice Landsat TM nabízena s již provedenými atmosférickými korekcemi jako standardní postup.

Nezpracovaná obrazová data obvykle obsahují tak významné geometrické nepřesnosti, že je nelze použít k vytvoření mapy. Zdroje nepřesností plynou většinou ze způsobu vytváření obrazového záznamu a jsou specifická jak pro leteckou fotogrammetrii, tak pro data pořízená družicovým měřením. Účelem geometrických oprav je získat obraz v požadovaném souřadném systému či kartografickém zobrazení. Geometrické chyby je možné rozdělit na nepřesnosti systematické, které lze jednoduchým způsobem modelovat a odstranit, a chyby náhodné povahy. Provádí se tzv. rektifikace, kdy je poloha všech obrazových prvků z jednoho souřadného systému transformována do jiného souřadného systému. Původní digitální obraz využívá jako souřadný systém počet sloupců a řádků a jejich průsečík definuje obrazový prvek. Při rektifikaci dochází také k převzorkování, kdy je DN hodnota každého obrazového prvku transformována do nové souřadné soustavy (Dobrovolný, 1998).

Na družicových datech byly provedeny geometrické korekce v modulu GCPwork a OrthoEngine programu Geomatica. Nejprve byl zvolen referenční družicový snímek, podle kterého byla data georeferencována. V tomto případě to byl snímek z družice Landsat 5 zobrazující jižní část ČR, který byl získán od RNDr. Martina Haise, PhD. z Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity. Tento snímek byl georeferencován v systému S-JTSK. V modulu GCPwork byl poté vybrán dostatečný počet přesně zaměřených vlíčovacích bodů jak na podkladovém družicovém snímku, tak na snímku georeferencovaném. Pro snímek z roku 2001 bylo zvoleno celkem 14 vlíčovacích bodů, RMSE chyba ve směru x činila 0,63 pixelu, ve směru y 0,47 pixelu pro polynom 1. stupně. Snímek z roku 2004 byl georeferencován s použitím 14 vlíčovacích bodů, chyba RMSE činila ve směru x 0,56 pixelu a ve směru y 0,40 pixelu pro polynom 1. stupně. Rozmístění vlíčovacích bodů, jejich souřadnice na referenčním i georeferencovaném snímku a chyby RMSE jsou uvedeny v Příloze C. Snímek z roku 2007 již georeferencován byl. Dále byl použit modul OrthoEngine pro provedení geometrické korekce, kde byly vstupem vlíčovací body a družicový snímek, který měl být georeferencován. Byla použita polynomická transformace. Jako metoda převzorkování byla zvolena metoda nejbližšího souseda (nearest neighbour), z důvodu zachování původní hodnoty pixelů, a vzorkovací interval 4 metry.

### 4.3 MODELOVÁNÍ S OBRAZOVÝMI DATY

Obrazové materiály získané distančními metodami obsahují velké množství informací o různých jevech a procesech. Tyto informace je nutné z původních nezpracovaných dat vhodnými postupy zvýraznit či vymežit postupy klasifikace. Existuje velké množství algoritmů používaných ke zvýraznění specifických jevů v obraze, jako například v tomto případě množství chl-a ve vodě. Cílem modelování je sestavit model, který data získaná metodou dálkového průzkumu dává do kvalitativního či kvantitativního vztahu s biologickými nebo fyzikálními vlastnostmi objektů a jevů na zemském povrchu (Dobrovolný, 1998).

Podle Lillesanda & Kiefera (1994) lze vztah mezi daty získanými metodami DPZ a daty o jevech a objektech na zemském povrchu vyjádřit pomocí tří přístupů:

- Fyzikální modelování je založeno na matematických postupech, kterými se kvantifikují všechny parametry ovlivňující měřenou radiometrickou charakteristiku (vzdálenost Země-Slunce, atmosférické efekty, geometrie pohledu) s cílem získat absolutní hodnoty odrazivosti objektů neovlivněné zmiňovanými parametry.
- Empirické modelování, kdy je kvantitativní vztah mezi daty DPZ a biofyzikálními parametry objektů formulován na základě regresní závislosti sestavené mezi daty získanými měřeními na zemském povrchu a daty z dálkového průzkumu.
- Kombinovaný přístup, zde může jít například o přepočtení hodnot pixelů na absolutní hodnoty a poté jejich korelační a regresní analýzu s pozemními daty.

V této práci bylo využito empirické modelování pomocí regresních analýz. Bylo vyzkoušeno použití 3 regresních rovnic, jak je popsáno v kapitole 4.3.3. Protože vstupem do regresních analýz byly hodnoty radiance jednotlivých kanálů družice Landsat, bylo nejprve nutné spočítat tyto hodnoty.

#### 4.3.1 Získání hodnot radiance

V digitálním obraze pracujeme s hodnotami „digital number“ (DN). Tyto hodnoty jsou platné pro jednotlivé kanály obrazu a pohybují se v hodnotách šedi (při 8 bitovém

kódování 0-255). V mnohonásobných regresích se operuje s absolutními hodnotami radiance vyjádřené v jednotkách  $Wm^{-2}sr^{-1}$  (viz. kap. 3.2), případně s reflektancí (odrazivostí) vyjádřenou v procentech. Proto je nutné konvertovat hodnoty DN do hodnot radiance. Základní vzorec je následující ([http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/landsat\\_FAQ](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_FAQ)):

$$L = „gain“ * DN + „offset“ \text{ (rovnice 20),}$$

kde  $L$  je spektrálně kalibrovaná radiance ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ ),

$DN$  je „digital numer“ (0,255),

$$Gain = \frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \text{ (} Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1} \text{) (rovnice 21),}$$

$$Offset = L_{min} \text{ (} Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1} \text{),}$$

$L_{max}, L_{min}$  představují horní a spodní hranici radiance v jednotkách  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ,

$Q_{max}, Q_{min}$  představují horní a spodní hodnoty DN (0,255).

Hodnoty spodní a horní hranice radiance jsou tabelovány pro jednotlivé kanály Landsat TM i ETM+ a následně i hodnoty „gain“ a „offset“ (viz. tab. 5 a 6).

Tab.5 Hodnoty horní a spodní radiance a „gain“ a „offset“ pro Landsat TM.

Zdroj: [http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/landsat\\_FAQ](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_FAQ)

| Kanál                                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $L_{min} (Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$  | -1.50  | -2.80  | -1.20  | -1.50  | -3.70  | 1.238  | -0.15  |
| $L_{max} (Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$  | 152.10 | 296.80 | 204.30 | 206.20 | 27.19  | 15.60  | 14.38  |
| offset ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) | -1.50  | -2.80  | -1.20  | -1.50  | -3.70  | 1.238  | -0.15  |
| gain ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | 0.6024 | 1.1749 | 0.8059 | 0.8145 | 0.1081 | 0.0563 | 0.0570 |

Senzor ETM+ operuje ve dvou režimech, v nízkém (L) a vysokém(H) „gain“ režimu. „Gain“ stav závisí na výšce, sluneční elevaci a na typu krytu. Obvykle změna nastává na konci a na začátku scény a rozštěpí obrazový kanál do dvou oblastí s různým jasem. Nízký „gain“ režim zabrání saturaci senzorů, ale zároveň redukuje dynamický histogram. Celkově lze říci, že H „gain“ se používá, když je plošná jasnost nízká a L „gain“ se používá, když je plošná jasnost vysoká ([http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/landsat\\_product\\_anomalies\\_GAEL-P157-SLP-001-04-01.pdf](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_product_anomalies_GAEL-P157-SLP-001-04-01.pdf)). Tyto dva režimy se liší faktorem 1.5 pro sedm odrazových kanálů a 2.0 pro zářivý kanál 6. Hodnoty H a L „gain“ pro senzor ETM+ jsou znázorněny v tab. 6.

Hodnoty radiance byly získány v programu Geomatica za použití skript EASI Modeling. Vstupem pro výpočet nových 32 bitových rastrových vrstev byly 8 bitové rastrové vrstvy za jednotlivé kanály družice Landsat. Výpočet byl proveden dosazením do rovnice 18. Pro usnadnění dalšího zpracování byly tyto nové vrstvy přeformátovány do formátu TIFF a byly tak připraveny na vstup do prostředí programu ArcGIS.

Tab. 6 Hodnoty horní a spodní radiance a „gain“ a „offset“ pro Landsat ETM+.

Zdroj: [http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/landsat\\_product\\_anomalies\\_GAEL-P157-SLP-001-04-01.pdf](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_product_anomalies_GAEL-P157-SLP-001-04-01.pdf)

| Kanál                                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| nízký "gain" režim                    |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Lmin ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | -6.20  | -6.40  | -5.00  | -5.10  | -1.00  | 0.00   | -0.35  | -4.70  |
| Lmax ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | 293.70 | 300.90 | 234.40 | 241.10 | 47.57  | 17.04  | 16.54  | 243.1  |
| offset ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) | -6.20  | -6.40  | -5.00  | -5.10  | -1.00  | 0.00   | -0.35  | -4.7   |
| gain ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | 1.1761 | 1.2051 | 0.9388 | 0.9655 | 0.1905 | 0.0668 | 0.0662 | 0.9718 |
| vysoký "gain" režim                   |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Lmin ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | -6.20  | -6.40  | -5.00  | -5.10  | -1.00  | 3.20   | -0.35  | -4.70  |
| Lmax ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | 191.60 | 196.50 | 152.90 | 157.40 | 31.06  | 12.65  | 10.80  | 158.3  |
| offset ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) | -6.20  | -6.40  | -5.00  | -5.10  | -1.00  | 3.20   | -0.35  | -4.70  |
| gain ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )   | 0.7757 | 0.7957 | 0.6192 | 0.6373 | 0.1257 | 0.0371 | 0.0437 | 0.6392 |

#### 4.3.2 Úpravy dat v prostředí ArcGIS

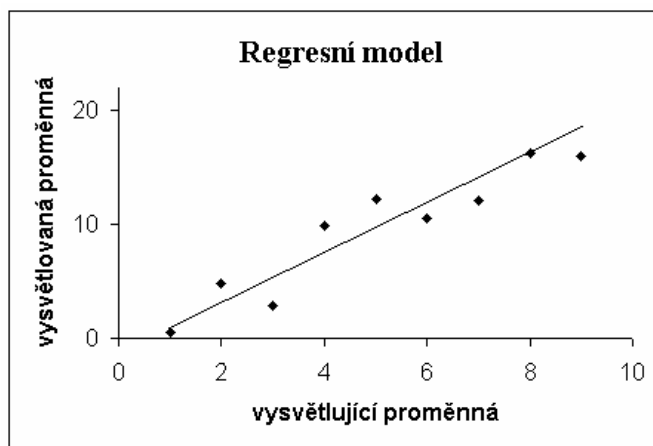
V programu ArcGIS bylo nutné zpracovat získané hodnoty radiance pro jednotlivá odběrová místa. Do programu byly načteny rastry s hodnotami radiance ve formátu TIFF a body míst odběru vzorků ve vektorové bodové vrstvě. Pro zjištění hodnot radiance za jednotlivá odběrová místa bylo využito zonálních statistik extenze Spatial Analyst. U zonálních statistik se bere v úvahu nejen jednotlivý pixel, ve kterém se bod nachází, ale je zohledněno i okolí pixelu. Nové hodnoty se vypočítávají z hodnot analyzované vrstvy, která patří do zóny definované v jiné informační vrstvě. Statistické zonální funkce počítají statistické charakteristiky zkoumaných dat (aritmetický průměr, suma, směrodatná odchylka, maximum, minimum atd.), v tomto případě byl využit průměr hodnot pixelů v okolí jednoho bodu. Nejprve bylo určeno okolí bodu (zóna) pomocí funkce buffer. Pro všechna odběrová místa nebyla velikost bufferu stejná, v úvahu byla vzata šířka nádrže či řeky v místě odběru a buffer byl konstruován tak, aby nezasahoval do břehů, nesmí obsahovat okraje a mělčiny (diskutováno v Olmanson & Bauer & Brezonik, 2002). Velikost bufferů se pohybovala od 30 m do 100 m v průměru, nejmenší buffer zahrnoval 4 pixely, největší asi 40 pixelů. Velikost bufferů v metrech pro jednotlivá odběrová místa je znázorněna v tabulce 7.

Tab. 7 Velikost bufferů u odběrových míst.

| Odběrové místo             | Velikost bufferu (m) | Odběrové místo            | Velikost bufferu (m) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| VN Lipno II hráz           | 30                   | VD Orlík - Zvíkovský most | 30                   |
| VN Lipno hráz              | 100                  | VD Orlík - Podolský most  | 50                   |
| VN Lipno Frymburk          | 70                   | VD Orlík - Hladná         | 40                   |
| VN Lipno Dolní Vltavice    | 100                  | Otava Topělec             | 30                   |
| VN Lipno Horní Planá       | 100                  | VN Hněvkovice hráz        | 30                   |
| VD Orlík - hráz            | 30                   | VN Kořensko pod           | 30                   |
| VD Orlík - Žďákovský most  | 50                   | VN Kořensko hráz          | 30                   |
| VD Orlík Otava - Štědrónín | 30                   | Vltava Hluboká n.Vltavou  | 30                   |

### 4.3.3 Regresní analýzy

Pomocí regresní analýzy konstruujeme vztahy mezi závisle proměnnou (vysvětlovanou veličinou) a jednou nebo více nezávisle proměnnými (vysvětlujícími veličinami). Na základě grafického zobrazení závislosti (viz. obr. 9) určíme nebo odhadneme její typ (lineární, exponenciální, mocninná ...), čímž vznikne empirický model, a poté hledáme příslušné koeficienty v navržené rovnici (<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Predmety/HEMM/skripta.DATA.DOC>).



Obr.9 Empirický model- grafické zobrazení závislosti.  
Zdroj: Synek (2004)

Pro statistické sledování vztahu musíme mít k dispozici výběr s hodnotami jedné proměnné a zároveň odpovídající hodnoty druhé proměnné a pracujeme tak s dvourozměrnými, či vícerozměrnými daty (vektory) (Synek, 2004).

Mezi proměnnými může nastat (Synek, 2004):

1. Funkční, neboli pevná závislost, kdy určité hodnotě vysvětlující proměnné odpovídá jen určitá hodnota vysvětlované proměnné. Vztah mezi proměnnými lze vyjádřit tímto způsobem:  $y=f(x)$ .
2. Volná, neboli stochastická závislost, kdy vysvětlovaná proměnná, případně i vysvětlující proměnná jsou náhodné veličiny. Tento případ nastane v praxi nejčastěji. Platí vztah  $E(y)=f(x)$ , tedy střední hodnota náhodné veličiny  $y$  je funkcí střední hodnoty veličiny  $x$ .
3. Nezávislost.

Nejčastěji užívanou empirickou metodou v dálkovém průzkumu kvality vody je lineární regrese. V regresním algoritmu se jako vhodné ukázalo použití poměru kanálů a mohly tak být získány různé parametry kvality vody (Koponen, 2006).

Pro zjištění koncentrace chl-a z družicových dat v místech odběru bylo využito empirické modelování pomocí regresních rovnic. Jako inspirace byly vybrány následující regresní rovnice s ohledem na zdroje dat (družicové snímky Landsat).

1. Regresní rovnice podle Kloiber & Brezonik & Bauer (2002)

Autoři zjišťují koncentraci SDT na velkých jezerech (>10 ha) v Minneapolis a St. Paul v Minnesotě v USA. Vstupem pro regresní rovnici (rovnice 22) jsou hodnoty radiance pro kanál TM1 a TM3 družice Landsat, přičemž je využito poměru těchto dvou kanálů.

$$\ln (SDT) = a \cdot (TM1/TM3) + b \cdot TM1 + c \text{ (rovnice 22),}$$

kde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  jsou koeficienty regresní rovnice. Regresní rovnice produkuje obecně silnou závislost mezi Landsat daty a změřenými pozemními hodnotami SDT,  $R^2$  se pohybuje v rozmezí 0.53 až 0.92.

2. Regresní rovnice podle Fuller & Aichele & Minnerick (2004)

Postupná regrese vedla ke zjištění nejvhodnější rovnice (rovnice 23), která přesně předpovídá koncentraci chl-a z družicových dat Landsat 7. Tato rovnice využívá taktéž hodnoty radiance.

$$\ln(\text{chl-a}) = a \cdot \text{ETM}+2 + b \cdot \text{ETM}+3 + c \cdot \text{ETM}+7 + d \quad (\text{rovnice 23}),$$

kde koeficienty  $a$ ,  $b$ ,  $c$  a  $d$  představují empiricky zjištěné koeficienty z regresní rovnice. Tato metoda byla použita na jezerech (>25 ha) v Michiganu. Byl vypočten koeficient determinace  $R^2$  0,81.

### 3. Regresní rovnice podle Brezonik & Menken & Bauer (2005)

Autor zkoušel různé kombinace kanálů pro zjištění nejlepšího vztahu mezi změřenými hodnotami koncentrace chl-a a empiricky zjištěnými hodnotami chl-a na jezerech v Minnesotě (rovnice 24).

$$\ln(\text{chl-a}) = A_0 + A_1 \cdot \text{VAR}_1 + A_2 \cdot \text{VAR}_2 \quad (\text{rovnice 24}),$$

kde  $A_0$  až  $A_2$  představují koeficienty mnohonásobné regrese a  $\text{VAR}_1$  a  $\text{VAR}_2$  jsou hodnoty radiance pro jednotlivé kanály či poměry kanálů Landsat 5. Kombinace kanálů a regresní koeficienty jsou znázorněny v tabulce 8. Nejlepší výsledek vykázala rovnice, kde byl využit kanál TM3 jako  $\text{VAR}_1$  a poměr kanálů TM1/TM3 jako  $\text{VAR}_2$ .

*Tab. 8 Koeficienty vícenásobné lineární regrese  $\ln(\text{chl-a})$  s různými poměry pásem a jejich koeficienty determinace. Zdroj: Brezonik & Menken & Bauer (2005)*

| $\text{Var}_1$ | $\text{Var}_2$ | $A_0$ | $A_1$   | $A_2$  | $R^2$ |
|----------------|----------------|-------|---------|--------|-------|
| TM1            | TM1:TM2        | 21.79 | -0.1675 | -3.855 | 0.86  |
| TM1            | TM1:TM3        | 6.71  | 0.0537  | -1.559 | 0.88  |
| TM2            | TM1:TM2        | 17.31 | -0.1485 | -4.017 | 0.85  |
| TM2            | TM2:TM3        | 7.86  | 0.0572  | -1.481 | 0.88  |
| TM3            | TM1:TM2        | 10.60 | 0.0289  | -2.633 | 0.85* |
| TM3            | TM1:TM3        | 12.55 | -0.0959 | -2.179 | 0.89* |
| TM4            | TM1:TM2        | 10.78 | 0.0284  | -2.648 | 0.85  |
| TM4            | TM1:TM3        | 9.46  | 0.0078  | -1.680 | 0.88  |

Ve všech výše uvedených rovnicích vystupuje jako závisle proměnná  $\ln(\text{chl-a})$ , nezávisle proměnnou jsou hodnoty radiance pro kanály Landsat TM, nebo poměr těchto kanálů. I v této diplomové práci byl za závisle proměnnou zvolen  $\ln(\text{chl-a})$  a za nezávisle proměnnou různé kombinace kanálů podle výše uvedených příkladů. Regresní rovnici podle & Aichele & Minnerick (2004) nebyla ve výzkumu využita, ale touto rovnicí jsem se inspirovala pro vytvoření vlastní rovnice.

Při konstruování vlastní rovnice jsem vycházela z výzkumu Fuller & Aichele & Minnerick (2004), ale místo kanálu 7 jsem použila kanál 4. K tomuto kroku jsem dospěla po nastudování literatury týkající se vztahu obsahu chl-a ve vodě a odrazivosti elektromagnetického záření (viz. kap. 2.5). Proto jsem využila kanály viditelného záření TM2 a TM3 a dále jsem zařadila kanál TM4 operující v infračerveném spektru podle závěrů výzkumu Ekstrand (1998), který zjistil, že kanál 4 družice Landsat silně koreluje s obsahem chl-a. Použité regresní rovnice tedy byly tyto (při použití snímků z družice Landsat 5, u Landsat 7 byla použita odpovídající pásma ETM+):

$$R1: \ln(chl-a) = a.(TM1/TM3) + b.TM1 + c$$

$$R2: \ln(chl-a) = a.TM2 + b.TM3 + c.TM4 + d$$

$$R3: \ln(chl-a) = a.TM3 + b.(TM1/TM3) + c$$

#### 4.3.3.1 Provedení mnohonásobné regrese

Regresní analýza byla prováděna v programu SPSS (případně v programu Statistica). Vstupem byl soubor ve formátu DBF, který obsahoval tabulku s hodnotami radiance za území vymezené bufferem pro jednotlivé kanály (nebo jejich poměr), které vstupovaly do regrese a také hodnoty pozemně změřeného chl-a zlogaritmovaného přirozeným logaritmem. Poté byla zvolena analýza lineární regrese a zadány závislé a nezávislé proměnné. Program provedl výpočet koeficientů rovnice a zároveň koeficientu determinace  $R^2$ . Tento ukazatel vyjadřuje spolehlivost provedené regrese, její vypovídací hodnotu. Koeficient determinace udává relativní velikost variability závislé proměnné, kterou se uvažovanou závislostí podařilo vysvětlit, udává se v procentech (Zvára, 2001). Vyjadřuje z kolika procent nezávislé proměnné vysvětlují variabilitu závislé proměnné. Nízké hodnoty indikují, že se model nehodí k datům.

#### 4.3.4 Vymodelování charakteristik kvality vody

Vypočítané koeficienty byly dále použity pro vymodelování obsahu chl-a v družicových snímcích. Tato práce byla provedena v programu Geomatica. Pomocí nástroje Raster Calculator byla vytvořena nová 32 bitová vrstva, která vznikla výpočtem regresních rovnic s dosazením vypočítaných koeficientů. Vstupními daty pro tuto novou vrstvu byly 32 bitové vrstvy s hodnotami radiance pro jednotlivé kanály a vypočítané

koeficienty regresních rovnic. Nový rastrový obraz zobrazuje prostorové rozložení chl-a na snímku. Pro posouzení zpětně vymodelovaných hodnot s hodnotami z pozemního měření byly z nově vytvořené vrstvy získány hodnoty za jednotlivá odběrová místa, tedy za vymezené buffery. K tomu byl použit algoritmus VIMAGE, který vygeneruje různé charakteristiky za zadané vrstvy ve formátu SHP. Byla zvolena funkce MEAN, která spočítala průměr hodnot za buffer. Vrstva s prostorovým rozložením chl-a byla ještě oříznuta podle bitmapy, aby hodnoty koncentrace chl-a byly vizualizované pouze za oblasti zájmu, tedy za vodní nádrže. Posledním krokem před tvorbou mapy bylo vyfiltrování rastrového obrazu s vymodelovanými hodnotami chl-a. Filtr byl aplikován kvůli lepšímu zobrazení plošného rozložení hodnot chl-a v mapě, bez použití filtru by byly mapy zrnité a zanikly by situace zjevné po použití filtru. Byl použit mediánový filtr, který pracuje na principu pohybujícího se okénka (3x3, 5x5 nebo 7x7 pixelů), ve kterém je pro každý pixel vypočítaná střední hodnota z vybrané oblasti. Tento filtr je vhodný na vyhlazení zrnitého obrazu, přičemž zachovává okraje.

#### **4.4 VYTVORENÍ VÝSLEDNÉ MAPY**

Pro vytvoření mapy prostorového rozložení koncentrace chl-a ve vodních nádržích byl použit program ArcGIS, kam byly naimportovány rastrové vrstvy vymodelované koncentrace chl-a ve formátu TIFF. Aby bylo možné posoudit koncentraci za všechny roky, byla mapa vytvořena pro zájmovou oblast vodní nádrže Lipno, protože tato nádrž se jako jediná objevuje ve všech použitých snímcích a také je prostorově nejvýraznější. Pro rok 2001 byly mapy vytvořeny i pro část vodní nádrže Orlický. Pro vytvoření legendy byla použita klasifikační metoda „Jenks Natural Breaks“. Nejlepšího uspořádání hodnot do tříd je v tomto klasifikačním schématu docíleno opakovaným srovnáváním sum z čtvercového rozdílu mezi sledovanými hodnotami uvnitř každé třídy ([http://www.terraser.com/help/stis/interface/map/classify/About\\_natural\\_breaks.htm](http://www.terraser.com/help/stis/interface/map/classify/About_natural_breaks.htm)).

Konečné úpravy mapy, tedy vložení názvu, legendy, měřítka a směrovky mapy, byly provedeny také v programu ArcGIS. Mapy byly poté vyexportovány ve formátu TIFF.

#### 4.5 VÝSLEDNÉ ANALÝZY

Posledním krokem ve výzkumu bylo provedení korelační analýzy mezi vymodelovanými hodnotami chl-a a pozemně změřenými hodnotami chl-a. Tato práce byla provedena v programu MS Excel, kde byly také vytvořeny grafy korelace. Byl použit výběrový korelační koeficient (Pearsonův korelační koeficient), protože byla předpokládána lineární závislost. Vstupem do korelační analýzy byla pozemní data a vymodelovaná data za odběrová místa (buffery) podle jednotlivých roků. Tyto korelační koeficienty ukazují závislost vymodelovaných hodnot chl-a s hodnotami z pozemního měření. Koeficient korelace může nabývat podle těsnosti závislosti hodnot od -1 do +1. Je-li jeho hodnota 1, jde o funkční závislost, body leží na přímce. Pokud je hodnota rovna 0, jedná se o absolutní nezávislost (<http://fzp.ujep.cz/~synek/statistika/skripta/KoReg2.doc>)

## 5. VÝSLEDKY

### 5.1 VÝSLEDKY REGRESNÍCH ANALÝZ

Jak je popsáno v metodických postupech, byly použity celkem 3 regresní rovnice, pomocí kterých došlo k výpočtu koeficientů regrese a následnému vymodelování charakteristiky kvality vody.

První výsledky (VYSL1) jsou z jednotlivých roků 2001, 2004, 2007. Byla použita odběrová místa jen za jednotlivé roky, jak je naznačeno v tab. 9. Výběr odběrových míst byl limitován získanými vzorky z Povodí Vltavy a. s. Za rok 2001 byla použita odběrová místa na VN Lipno a na VN Orlík, celkem 9 odběrových míst. Nebylo použito odběrové místo Zvíkovský most z důvodu nepřesného umístění, vlivem kterého mohlo dojít k zahrnutí pixelů břehu do vzorku vody. U roku 2004 bylo použito pouze 5 odběrových míst a to z VN Lipno a Lipno II. V roce 2007 byla použita odběrová místa z VN Lipno, Hněvkovice, Kořensko a odběrová místa z řeky Vltavy a Otavy, celkem 10 odběrových míst. Vzorek z VN Lipno II nemohl být použit z důvodu umístění bodu odběru velmi blízko hráze.

Tab. 9 Odběrová místa, která vstupovala do regresních analýz.

| Místo                      | Rok pořízení odběrů |      |      |
|----------------------------|---------------------|------|------|
|                            | 2001                | 2004 | 2007 |
| VN Lipno II hráz           |                     | *    |      |
| VN Lipno hráz              | *                   | *    | *    |
| VN Lipno Frymburk          | *                   | *    | *    |
| VN Lipno Dolní Vltavice    | *                   | *    | *    |
| VN Lipno Horní Planá       | *                   | *    | *    |
| VD Orlík - hráz            | *                   |      | *    |
| VD Orlík - Žďákovský most  | *                   |      |      |
| VD Orlík Otava - Štědrónín | *                   |      |      |
| VD Orlík - Zvíkovský most  |                     |      |      |
| VD Orlík - Podolský most   | *                   |      |      |
| VD Orlík - Hladná          | *                   |      |      |
| Otava Topělec              |                     |      | *    |
| Vltava VN Hněvkovice hráz  |                     |      | *    |
| Vltava VN Kořensko pod     |                     |      | *    |
| Vltava VN Kořensko hráz    |                     |      | *    |
| Vltava Hluboká n. Vltavou  |                     |      | *    |

\* tento odběrový vzorek byl v práci použit

Výsledné koeficienty vypočítané ve statistickém programu byly použitelné pouze pro rok 2001 a 2007. V případě roku 2001 vyšel koeficient determinace velice nízký

v rozmezí 0,14 až 0,30 (viz. tab. 10), v roce 2007 byly koeficienty determinace o něco vyšší, ale přesto dost nízké (viz. tab. 12). U roku 2004 vyšly koeficienty determinace vysoké, v rozmezí 0,71 – 0,99, ovšem koeficienty vstupující do regrese byly nesmyslné, pohybující se v hodnotách -248,6 – 17,8 (viz. tab. 11), proto tento rok pro další práci využit nebyl.

*Tab. 10 Vypočítané koeficienty regrese a jejich koeficient determinace pro rok 2001.*

|            | Koeficienty | Hodnoty koef. | R <sup>2</sup> |
|------------|-------------|---------------|----------------|
| regrese R1 | a           | 0,428         | 0,148          |
|            | b           | 0,027         |                |
|            | c           | 0,876         |                |
| regrese R2 | a           | 0,043         | 0,304          |
|            | b           | -0,058        |                |
|            | c           | 0,037         |                |
|            | d           | 2,752         |                |
| regrese R3 | a           | 0,053         | 0,149          |
|            | b           | 1,636         |                |
|            | c           | -1,526        |                |

*Tab. 11 Vypočítané koeficienty regrese a jejich koeficient determinace pro rok 2004.*

|            | Koeficienty | Hodnoty koef. | R <sup>2</sup> |
|------------|-------------|---------------|----------------|
| regrese R1 | a           | -12,991       | 0,712          |
|            | b           | 0,797         |                |
|            | c           | 7,776         |                |
| regrese R2 | a           | -3,740        | 0,991          |
|            | b           | 17,833        |                |
|            | c           | 10,220        |                |
|            | d           | -248,552      |                |
| regrese R3 | a           | 1,778         | 0,712          |
|            | b           | -2,099        |                |
|            | c           | -16,518       |                |

*Tab. 12 Vypočítané koeficienty regrese a jejich koeficient determinace pro rok 2007.*

|            | Koeficienty | Hodnoty koef. | R <sup>2</sup> |
|------------|-------------|---------------|----------------|
| regrese R1 | a           | 1,237         | 0,299          |
|            | b           | 0,121         |                |
|            | c           | -3,743        |                |
| regrese R2 | a           | 0,074         | 0,245          |
|            | b           | -0,039        |                |
|            | c           | 0,009         |                |
|            | d           | 1,508         |                |
| regrese R3 | a           | 0,173         | 0,245          |
|            | b           | 2,421         |                |
|            | c           | -4,924        |                |

Jelikož koeficient determinace u výše popsaných výsledků byl velmi nízký a tedy dosti neprůkazný, vypočítala jsem ještě druhé výsledky (VYSL2). Do regresní analýzy vstupovaly odběrové vzorky za všechny roky dohromady, tedy celkem 23 hodnot. V tomto případě byl koeficient determinace vyšší, pohybující se okolo hodnoty 0,40 (viz. tab. 13).

*Tab. 13 Vypočítané koeficienty regresí a jejich koeficient determinace za všechny roky dohromady.*

|            | Koeficienty | Hodnoty koef. | R <sup>2</sup> |
|------------|-------------|---------------|----------------|
| regrese R1 | a           | 0,143         | 0,393          |
|            | b           | 0,016         |                |
|            | c           | 2,396         |                |
| regrese R2 | a           | 0,048         | 0,422          |
|            | b           | -0,044        |                |
|            | c           | 0,003         |                |
|            | d           | 2,599         |                |
| regrese R3 | a           | 0,033         | 0,393          |
|            | b           | 0,469         |                |
|            | c           | 1,709         |                |

## 5.2 ZPĚTNĚ VYMODELOVANÉ HODNOTY CHL-A

Ze získaných koeficientů byly zpětně vymodelovány hodnoty chl-a pro celé oblasti vodních nádrží. Nejvyšší vymodelované hodnoty koncentrace chl-a vycházejí v roce 2001 a to jak u VYSL1, tak u VYSL2. U tohoto roku je také největší rozsah hodnot, zvláště u regresní rovnice R2. Nejnižší hodnoty koncentrace chl-a byly vymodelované v roce 2007 u VYSL1, VYSL2 v tomto roce vykazuje vyšší hodnoty. Podobný rozsah hodnot jako v roce 2007 (VYSL2) vychází i v roce 2004. Výjimkou je regresní rovnice R1 u roku 2007 (VYSL1), kdy výsledné hodnoty koncentrace chl-a vycházejí v nesmyslném rozmezí s průměrnou hodnotou 31074,3. S tímto výsledkem jsem proto dále nepracovala. Rozsah hodnot chl-a v jednotkách µg/l, jejich průměr a medián jsou uvedeny v tab. 14.

Vymodelované hodnoty byly srovnány s hodnotami chl-a z pozemního měření. Do regrese vstupovaly hodnoty z pozemního měření a jim odpovídající hodnoty vymodelované, tedy průměrné hodnoty za buffery. Tabulka s vymodelovanými hodnotami chl-a a s hodnotami z pozemního měření jsou uvedeny v příloze D. Byly vytvořeny grafy korelace a vypočteny výběrové korelační koeficienty (Pearsonovy korel. koef.) (r) (viz tab. 15). Pro rok 2001 (VYSL1) vyšla nejvyšší míra závislosti u regrese R2  $r = 0,73$ . U roku

2007 nejsilnější korelace dosáhla také regresní rovnice R3, ale tato závislost se dá označit jako slabá. Pro VYSL2 u roku 2001 nejvyššího korelačního koeficientu dosáhla regresní rovnice R2, u roku 2004 to byla regresní rovnice R2 a u roku 2007 regresní rovnice R1. Záporné koeficienty u roku 2004 pro R1 a R3 naznačují, že s rostoucí hodnotou vymodelovaného chl-a naopak klesá hodnota pozemně změřeného chl-a. Celkově nejvyššího koeficientu korelace dosáhla regresní rovnice R2 v roce 2004 u VYSL2.

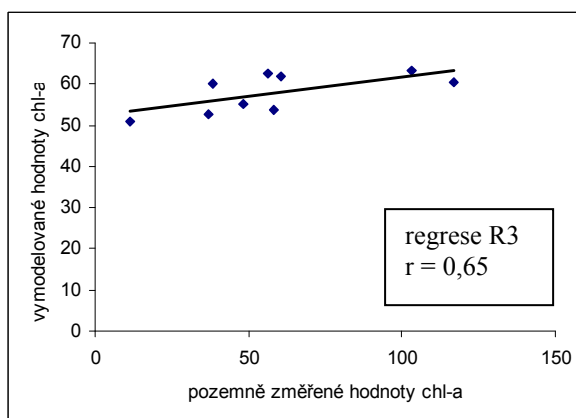
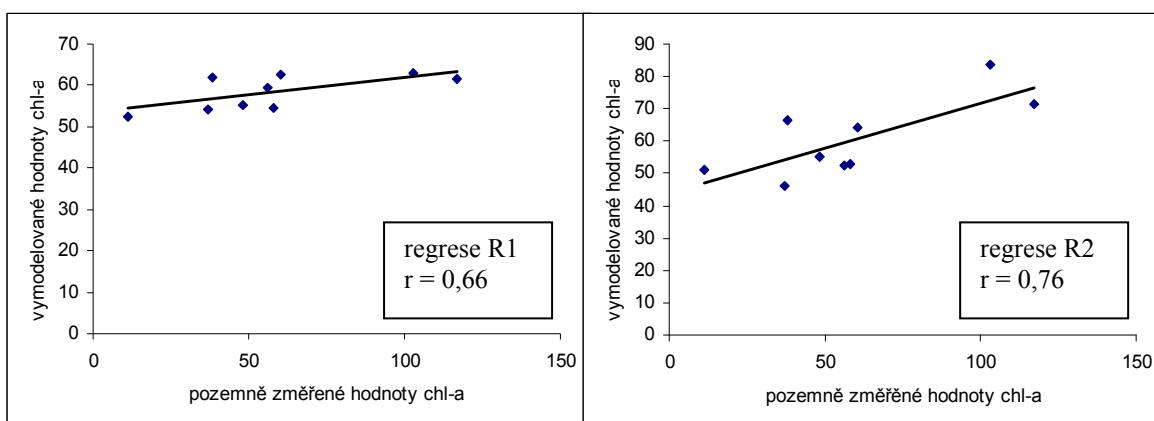
*Tab. 14 Přehled vymodelovaných hodnot chl-a v  $\mu\text{g/l}$  za jednotlivé roky, jejich rozsah, průměr a medián. Hodnoty jsou sebrané z modelového území vodní nádrže Lipno.*

|                     | Rozsah hodnot | Průměr  | Medián  |
|---------------------|---------------|---------|---------|
| <b>2001 (VYSL1)</b> |               |         |         |
| R1                  | 34,4 - 77,3   | 50,8    | 50,6    |
| R2                  | 25,6 - 116,7  | 51,1    | 50,4    |
| R3                  | 33,1 - 88,5   | 50,6    | 50,2    |
| <b>2007 (VYSL1)</b> |               |         |         |
| R1                  | 1 – 75572,3   | 31775,9 | 31074,3 |
| R2                  | 12,2 – 33,7   | 18      | 17,8    |
| R3                  | 9,1 – 54,5    | 19,9    | 19      |
| <b>2001 (VYSL2)</b> |               |         |         |
| R1                  | 44,3 – 66,2   | 53,7    | 53,7    |
| R2                  | 27,8 - 91,4   | 50,8    | 50,5    |
| R3                  | 44,3 - 69,2   | 52,9    | 52,9    |
| <b>2004 (VYSL2)</b> |               |         |         |
| R1                  | 22,8 – 28,4   | 25,2    | 25,1    |
| R2                  | 19,7 - 30,3   | 24,2    | 24,2    |
| R3                  | 22,1 - 31     | 25,4    | 25,1    |
| <b>2007 (VYSL2)</b> |               |         |         |
| R1                  | 22,5 – 27,9   | 25,1    | 25,1    |
| R2                  | 19,4 – 31,1   | 24,6    | 24,8    |
| R3                  | 21,8 – 30,9   | 25,3    | 25,2    |

Grafy korelace vycházejí z vypočítaných Pearsonových korelačních koeficientů. Pro ukázkou jsou zobrazeny grafy korelace pro rok 2001 (VYSL2) (obr. 10), ostatní grafy korelace jsou vyobrazeny v Příloze E. Kladná směrnice korelace je vidět u roku 2001 ve všech regresních rovnicích a to jak u VYSL1, tak u VYSL2 a taktéž u korelace z roku 2007 (VYSL1 i VYSL2). V roce 2004 je pro regresní rovnice R1 a R3 směrnice záporná, ale u R2 je směrnice kladná a tato regresní rovnice vykazuje nejsilnější závislost mezi vymodelovanými hodnotami chl-a a pozemně získanými hodnotami chl-a.

Tab. 15 Výběrové korelační koeficienty ukazující míru závislosti vymodelovaných hodnot chl-a a hodnot chl-a pozemně změřených pro jednotlivé regresní rovnice a roky.

| Rok          | Regr. rovnice | Korelační koef. |
|--------------|---------------|-----------------|
| 2001 (VYSL1) | R1            | 0.65            |
|              | R2            | 0.73            |
|              | R3            | 0.65            |
| 2007 (VYSL1) | R1            | není výsledek   |
|              | R2            | 0.03            |
|              | R3            | 0.26            |
| 2001 (VYSL2) | R1            | 0,66            |
|              | R2            | 0,76            |
|              | R3            | 0,65            |
| 2004 (VYSL2) | R1            | -0.57           |
|              | R2            | 0.86            |
|              | R3            | -0.58           |
| 2007 (VYSL2) | R1            | 0.48            |
|              | R2            | 0.09            |
|              | R3            | 0.45            |



Obr. 10 Srovnání korelace mezi pozemně změřenými hodnotami chl-a a vymodelovanými hodnotami chl-a v jednotkách  $\mu\text{g/l}$  u regresí s jejich korelačními koeficienty pro rok 2001(VYSL2).

### 5.3 VÝSLEDNÉ MAPY

Celkem bylo vytvořeno 20 map (Příloha F) znázorňujících prostorové rozložení koncentrace chl-a ve vodních nádržích. Pro rok 2001 byly mapy vytvořeny pro vodní nádrž Lipno a část vodní nádrže Orlík. Pro roky 2004 a 2007 byly mapy vytvořeny pouze pro vodní nádrž Lipno, a to z důvodu, že u roku 2004 byl zdrojem pro vstup do analýzy družicový snímek ořízlý pouze kolem nádrže Lipno, u roku 2007 se na družicovém snímku v oblasti vodní nádrže Orlík vyskytovala oblačnost, která Orlík téměř překryla. Pro stejné roky jsem použila stejnou legendu (ne však pro VYSL1 a VYSL2), aby bylo možné výsledky srovnat. Ovšem nemohla jsem použít stejnou legendu pro obě vodní nádrže Lipno i Orlík, protože by zanikly rozdíly v plošném rozložení koncentrace chl-a.

Mapa 1 a Mapa 5 zobrazující vodní nádrž Lipno vykazují jen nepatrné rozdíly, zatímco Mapa 3 se od těchto dvou odlišuje. Je na ní patrná zvýšená koncentrace chl-a v severní zátocce a naopak nízká koncentrace chl-a v severozápadním cípu Lipna. Podobná situace nastala i u vodní nádrže Orlík, kde Mapa 2 a Mapa 6 prezentují zvýšenou koncentraci chl-a směrem na sever, u Mapy 4 je situace opačná, směrem na sever se koncentrace chl-a zmenšuje. Za rok 2007 (VYSL1) jsou jen 2 mapy vycházející z regresní rovnice R2 a R3. I zde nastává podobná situace, kdy u Mapy 7 je patrná zvýšená koncentrace chl-a v severní zátocce VN Lipno a dále jsou vidět bodová zvýšení směrem k východní hrázi nádrže, zatímco u Mapy 8 je zvýšená koncentrace chl-a nejvyšší v severozápadním cípu a snížená koncentrace v severní zátocce.

V roce 2001 u VYSL2 nastává jiná situace, mapy vycházející z regresní rovnice R1 (Mapa 9 a 10) jsou na první pohled odlišné od ostatních map z roku 2001 (VYSL2). Na mapách 9 a 10 je v celé oblasti nádrže vysoká koncentrace chl-a. Mapy 11 a 13, které zobrazují nádrž Lipno, ukazují podobné rozložení koncentrace chl-a jako u VYSL1, tedy zvýšenou koncentraci v severní zátocce a naopak nízkou koncentraci v severozápadním cípu. I u nádrže Orlík je situace srovnatelná s VYSL1, směrem na sever se koncentrace chl-a zmenšuje (mapy 12 a 14). Také u map z roku 2004 je možné pozorovat podobnost u map vycházejících z regresních rovnic R1 a R3 (Mapy 15 a 17), zvýšená koncentrace chl-a je v severozápadním cípu, naopak v severní zátocce je koncentrace menší. Naproti tomu Mapa 16 prezentuje opačné výsledky. Mapy z roku 2007 (VYSL2) jsou taktéž srovnatelné s VYSL1, Mapy 18 a 20 vyobrazují zvýšenou koncentraci chl-a po celé oblasti Lipna, a zmenšenou koncentraci v severní zátocce, Mapu 19 je možné popsat zvýšenou koncentrací

chl-a v severní zátocě a směrem k východní hrázi a naopak malá koncentrace je pozorovatelná v severozápadním cípu VN. Celkově lze u výsledných map pozorovat podobné rozložení koncentrace chl-a při využití regresní rovnice R1 a R3, při využití R2 vykazují mapy odlišný výsledek.

## 6. DISKUZE

### 6.1 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH DAT

V práci byla využita data z pozemního měření ve formě hodnot koncentrace chl-a za jednotlivá odběrová místa, a data družicová ve formě družicových snímků.

Pozemní data poskytl státní podnik Povodí Vltavy, a. s. Poskytnutá data byla sbírána jednou za měsíc, ovšem ne vždy ve stejný den za všechny nádrže. V roce 2007 byla použita data sice z deseti odběrových míst, ale datum pořízení pozemního odběru se lišilo až o 9 dní, v roce 2001 vznikl časový posun sběru pozemních dat dokonce 23 dní. V tomto výzkumu to není nezanedbatelný časový rozdíl, protože podmínky nárůstu koncentrace chl-a se velice mění v čase. Jak píše autoři Frantál & Frantálová & Hejzlar (2008), velikost sezónního maxima fytoplanktonu závisí především na meteorologických podmínkách, a ty se velice rychle mění. Povodí Labe na svých stránkách uvádí: „Ze zkušeností lze konstatovat, že pokud nenastanou mimořádné okolnosti (zvýšený přítok, výrazná změna teplot nebo slunečního svitu) distribuce chlorofylu se nemění po dobu 15 až 20 dní“ ([http://www.pla.cz/portal/jvn/cz/popis\\_cz.htm](http://www.pla.cz/portal/jvn/cz/popis_cz.htm), kap. 4.F). Dle mého názoru časový posun ovlivnil výsledky, zvláště absolutní vymodelované hodnoty chl-a. Velice limitující bylo též skloubení pozemních dat s daty družicovými, vznikl zde časový rozdíl až 20 dní u roku 2001 a až 14 dní u roku 2007, v roce 2004 to byl jen jeden den. Z tohoto důvodu byly vybrány jen tři roky, i když dostupných družicových snímků bylo celkem sedm. Problémem bylo také velice málo odběrových míst a tím pádem málo hodnot, které vstupovaly do regrese. Např. v roce 2004 byla použita pozemní data pouze z pěti odběrových míst (viz. tab. 2). Dle mého názoru malý počet hodnot vstupujících do regrese způsobil, že vypočítané koeficienty regrese za rok 2004 vyšly nesmyslné. Dalším limitem v práci bylo nepřesné zaměření odběrových míst. U odběrových míst, která musela být posunuta (viz. kap. 3.1) mohlo dojít k chybě, která mohla být příčinou špatných výsledků. Ovšem na druhou stranu při kontrole dat vstupujících do výzkumu jsem nezaznamenala, že by se u těchto míst odběru vyskytly nějaké podezřelé hodnoty.

Celkově bych řekla, že malý počet vstupních pozemních dat, které navíc nebyly pořízeny ve stejný den byl největším problémem této práce a pravděpodobně vedl k nepřiliš dobrým výsledkům.

Použití multispektrálních družicových dat pro mapování kvality vody v Česku bych hodnotila jako dosti omezené. Tato data lze využít spíše na plošně rozsáhlejší vodní nádrže, kterých v Česku moc není. To potvrzuje mou první hypotézu. Na VN Lipno jsou družicová data z Landsatu použitelná dobře, ovšem na nádrže Orlík, Hněvkovice a Kořensko už jejich použití tolik výhodné není. Jak je vidět na výsledných mapách Orlíku, jižní část nádrže po soutok Vltavy a Otavy již není dobře vymezena, nádrž je v těchto místech úzká, a při klasifikaci vody vznikají prázdná místa tam, kde nádrž ve skutečnosti ještě je. Proto také svou druhou hypotézu mohu na základě těchto zjištění potvrdit.

Jak vyplývá i z ostatních studií, monitoring eutrofizace je vhodný též použitím hyperspektrálních dat, která umožňují pracovat s větším množstvím úzkých spektrálních kanálů. Jak píše Bukata et al. (1991) limitovaný počet relativně širokopásmových kanálů družice Landsat komplikuje optimalizační proces. Budoucí environmentální družice by měly mít zlepšené spektrální rozlišení, jestliže má být mapování chlorofylu vnitrozemských vod vyhovující. Navíc se dá předpokládat, že hyperspektrální systémy budou zlepšovat i prostorové rozlišení a pro výzkum kvality vody by tak byly ideálním zdrojem dat. Bukata et al. (1991) též prezentuje model, jak využít průřez spektrem k získání současných koncentrací indikátorů vodní kvality za pomoci souboru dat zahrnující podpovrchové množství odrazivosti spektra. V tomto modelu je počítáno s hyperspektrálními družicovými systémy. Hyperspektrální data využil ve svém výzkumu též např. Kneubühler et al. (2007), Koponen (2006), Ouillon & Petrenko (2005). Nevýhodou hyperspektrálních dat jsou jejich vysoké pořizovací náklady. Mezi hyperspektrální data je možné zařadit též skener MERIS družice Envisat. Envisat pracuje od roku 2002 na heliosynchronní dráze ve výšce 800 km, spektrometr MERIS měří odražené sluneční záření s rozlišením 260m (v nadíru) v 15 spektrálních pásmech viditelného a blízkého infračerveného spektra. Kneubühler et al. (2007) využívá pro zjištění koncentrace chl-a pásma 7 a 9, Koponen (2006) uvádí více autorů využívajících ke zjištění různých charakteristik kvality vody senzor MERIS a kombinaci jeho pásem 6 a 9, 3 a 5 a samostatné pásmo 9. Data ze skeneru MERIS je nyní možné získat z internetu. Evropská kosmická agentura spustila začátkem roku 2007 projekt s názvem MIRA VI. Tento portál umožňuje online přístup k aktuálním datům senzoru MERIS, k aktualizaci snímků na portálu MIRA VI dochází přibližně každé dvě hodiny. Přesto snímky zde produkované nelze použít jako náhradu standardních MERIS produktů, jedná se totiž pouze o RGB kombinaci v přirozených barvách, ne o všech 15 spektrálních pásmech. Také

geometrická přesnost je nižší než u standardních datových produktů MERIS (<http://www.gisat.cz/content/cz/novinky/zpravy-ze-sveta/meris-online>). Pro můj výzkum by tedy tato data použitelná nebyla, zejména z důvodu jen 3 dostupných pásem, ale také menšího prostorového rozlišení, které by pro vodní nádrže v Česku nebylo dostačující.

## 6.2 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH METOD

V této práci byly použity metody lineární regrese za použití radiance jednotlivých kanálů nebo poměru kanálů družice Landsat. Jak je patrné z výsledků, nejlepšího koeficientu determinace dosáhly VYSL2, tedy využití odběrových vzorků za všechny roky dohromady. Koeficient determinace byl v tomto případě v rozmezí 0,39 – 0,42. V porovnání s literaturou je o všem i toto horší výsledek. Ve studiích zaměřených na sledování chl-a v pozemních vodách pomocí dat z družice Landsat dosahují regresní analýzy koeficientu determinace až 0,89 (Brezonik & Menken & Bauer, 2005), 0,92 (Kloiber & Brezonik & Bauer, 2002), ale např. Han & Jordan (2005) vykázal nejlepší výsledek  $R^2 = 0,67$ . Všichni tito autoři užívají v regresních rovnicích poměru pásem 1/3. Spojením všech hodnot vzorků z pozemního měření vstupovalo do regrese více hodnot a tím pádem i regresní analýza je více věrohodnější. Co se týká rozdílů mezi regresními rovnicemi, nejlepšími výsledky dosahuje regresní rovnice R2, která zahrnuje do výpočtů zelené a červené viditelné pásmo a blízké infračervené pásmo. Tento vztah využívá dva významné vrcholy odrazivosti chl-a na 550 nm (odpovídá zelené části spektra) a 700 nm (odpovídá blízkému infračervenému spektru) a zároveň sníženinu odrazivosti na 675 nm (odpovídá červené části spektra) (Jensen, 2006). Překvapivě rovnice R2 dosahuje lepších výsledků než rovnice R1 a R3, které využívají poměr kanálů TM1/TM3, mou třetí hypotézu tedy musím zamítnout. K podobnému závěru dospěl i Ekstrand (1998), který při zkoumání pobřežních vod Baltického moře našel, že kanály TM3 a TM4 silně korelují s chl-a, zatímco kanály TM1 a TM2 a poměr TM1/TM3 a TM1/TM2 nebyly statisticky významné ve vztahu k chl-a. Autor navrhuje, že samotný kanál TM4 by mohl být použit k mapování koncentrace chl-a ve vyšších vrstvách vodního tělesa. Také Duan et al. (2006) našel silnou korelaci mezi TM4 a chl-a. Výzkum byl prováděn na vnitrozemském jezeře v Číně. Jiní autoři naopak uvádějí nejlepší výsledky mapování koncentrace chl-a při využití poměru pásem, zvláště TM1/TM3, jak je popsáno výše. Na velkých jezerech v Minnesotě prováděli výzkum Brezonik & Menken & Bauer (2005) a Kloiber & Brezonik & Bauer (2002). Oba autoři vykazují nejlepší výsledky využitím jednoho viditelného

pásma a poměru pásem 1/3 družice Landsat 5. Dle mého názoru se použití poměru pásem 1/3 družice Landsat hodí spíše pro mapování celkového znečištění vody, tedy i průhlednosti vody, kanály viditelného pásma v sobě nesou informaci i o znečištění vody rozpuštěnými organickými hmotami. Kdežto kanál 4 družice Landsat více koreluje pouze s obsahem chl-a ve vodě.

### 6.3 VYMODELOVANÉ HODNOTY CHL-A

Jak vyplývá z výsledků, nejvyšší koncentrace chl-a byla vymodelována v roce 2001 (VYSL1 i VYSL2). Klasifikace úživnosti podle OECD (1992) odpovídá eutrofii jak u nádrže Lipno, tak u nádrže Orlik v celé délce. Výjimkou jsou místa Kořensko hráz (R1 a R3 u VYSL1 i VYSL2), Zvíkovský most (R2 u VYSL1 i VYSL2), Podolský most (R2 u VYSL1) a Otava Topělec (R2 u VYSL1), kde vyšla hypereutrofie. Ostatní roky vykazují mezotrofii až eutrofii. Tyto výsledky vcelku odpovídají výsledkům Hydrobiologického ústavu Biologického centra AVČR v Českých Budějovicích, které mi poskytl pan Doc. RNDr. Josef Hejzlar, CSc. Průzkum byl prováděn v profilu Frymburk a chl-a byl měřen acetonovou extrakcí. V roce 2001 byl vzorek odebrán ve stejný den jako je datum pořízení družicového snímku, tedy 26.8.2001 a byl naměřen chl-a 37,15 µg/l. Tomuto výsledku je nejbližší můj výsledek u R3 (VYSL1), kdy byla vymodelovaná hodnota chl-a 52,38 µg/l. Oba výsledky odpovídají eutrofii. V roce 2004 Hydrobiologický ústav naměřil hodnotu 26,8 µg/l, vzorek byl odebrán 4 dny před snímkováním družice Landsat. Mé výsledky vykazovaly v tomto roce nejbližší hodnotu 25,01 µg/l u R1 (VYSL2). V roce 2007 Hydrobiologický ústav prováděl měření 6 dní po přeletu družice Landsat a naměřil hodnotu 32 µg/l. Této hodnotě je nejbližší můj výsledek za R2 (VYSL2) 25,66 µg/l. Rok 2004 i 2007 odpovídá eutrofii.

Důležitým ukazatelem je korelace vymodelovaných hodnot s pozemně změřenými hodnotami. Nejvyšší korelaci vykazala regresní rovnice R2 v roce 2004, stejně jako v roce 2001 u VYSL1 i VYSL2. Naopak u roku 2007 (VYSL1 i VYSL2) je u R2 korelace nejnižší. Hlavní příčinu v takovémto nesouladu spatřuji již ve vstupních datech, nesouladu datumu pořízení pozemních a družicových dat a v malém počtu vstupujících dat vstupujících do regresních rovnic. Pro detailnější posouzení použitých metod by byl zapotřebí větší objem vstupních dat lepších parametrů. V tomto ohledu se ukazují velmi

vhodná hyperspektrální data pro rozlohově menší vodní plochy či data družice ENVISAT pro rozlohově větší.

#### 6.4 VYSVĚTLENÍ VÝSLEDNÝCH MAP

Jak zhodnotit a vysvětlit plošné rozložení koncentrace chl-a v nádržích?

Zvýšená koncentrace chl-a ve vodní nádrži Lipno v severní zátocě by se dala vysvětlit znečištěným přítokem potoku Olšina. Tento výsledek vykazují mapy vycházející z regresní rovnice R2. Patrné zvýšené koncentrace na levém břehu je možné odůvodnit bodovým znečištěním z rekreačních oblastí, kdy je do vodní nádrže vypouštěna odpadní voda z ČOV, která obsahuje velké množství fosforu a tím dochází k nárůstu eutrofizace hlavně v letních měsících (Bartáček & Soukupová, 2008). Největší čističky jsou umístěny v obcích Lipno, Horní Planá, Černá v Pošumaví a Frymburk. Jak píše Frantál & Frantálová & Hejzlar (2008), vliv vypouštění fosforu z těchto ČOV je velmi významný, ba klíčový. Tento jev je dobře demonstrován na Mapě 7 a Mapě 19, kde jsou data prezentována za rok 2007. Zde jsou patrná místa se zvýšenou koncentrací chl-a tam, kde jsou chatové a rekreační oblasti (Hruštice, Lojzovy paseky, Frymburk) a v oblastech velkých ČOV. Nízká koncentrace v severozápadním cípu může být vysvětlena přítokem neznečištěné Vltavy z oblasti NP Šumava.

U nádrže Orlík jsem výsledky porovnávala se šetřením VÚV TGM Brno (Žáková, 2005), které mělo za cíl zhodnotit rozvoj fytoplanktonu v nádrži Orlík v letech 2003 - 2005. V sedmi profilech od hráze nádrže Kořensko po hráz nádrže Orlík byly zjišťovány různé charakteristiky, mimo jiné také koncentrace chl-a. Z šetření VÚV TGM Brno vyplynulo, že trvale vysoký obsah fytoplanktonu je zaznamenán v profilu Kořensko u hráze vlivem přítoku znečištěné Lužnice. Koncentrace chl-a se pod Kořenskem snižovala, v profilu Hladná docházelo k mírnému zvýšení, výrazné pomnožení fytoplanktonu bylo nalezeno u profilu Podolský most. V dalším úseku nádrže Orlík se koncentrace postupně snižovala až k hrázi, kde byla koncentrace chl-a nejnižší. Dá se předpokládat, že tyto trendy jsou platné i v roce 2001, mé výsledky tomu odpovídají. U odběrového místa Kořensko hráz je větší koncentrace chl-a než u Kořensko pod, na profilu Hladná docházelo spíše ke snížení, ale u profilu Podolský most je vidět výrazný nárůst koncentrace chl-a. Dále na sever se koncentrace snižuje (Příloha D, Příloha F – Mapa 4 a Mapa 12).

Na internetu je možné nalézt data o koncentraci chl-a. I tato data jsem srovnala s mým výzkumem. Bartáček & Soukupová (2008) uvádějí ve Zprávě o hodnocení jakosti povrchových vod v oblasti horní Vltavy za období 2006 – 2007, že na stránkách <<http://www.voda.gov.cz>> v nabídce „Evidence ISVS“ v záložce „Množství a jakost vody“ jsou k dispozici údaje o jakosti povrchové vody ve vložených profilech správce povodí. Tyto údaje lze prohlížet pomocí mapové aplikace, nebo si je stáhnout. Z dat umístěných na této internetové adrese lze zjistit i ukazatel chlorofyl etanolem v stupnicích I. – V., tedy od neznečištěné vody až po velmi silně znečištěnou vodu. Bohužel zde není uvedeno v jakých absolutních hodnotách se koncentrace pohybují, proto není srovnání stoprocentní. S tímto zdrojem jsem srovnávala své měření za rok 2007, kdy je v evidenci prezentováno, že ve většině profilů je stupeň znečištění roven II., k výraznému zhoršení dochází až pod soutokem s Lužnicí (stupeň IV.). Mé výsledky ukazují podobný stav v tomto roce, kdy jsem nevyšší hodnotu chl-a vymodelovala v místě Kořensko pod hrází (viz. Příloha D).

Dalším internetovým zdrojem ukazatelů kvality vody je stránka <<http://voda.chmi.cz/ojv2/>>. Zde je možné zvolit ukazatel chlorofyl etanolem a vybrat roky 1996 – 2006. V roce 2001 je na těchto stránkách prezentováno, že ve vodní nádrži Lipno byl v severozápadním cípu nádrže určen stupeň znečištění I., na hrázi Lipna stupeň II. Tento stupeň se udržel až po soutok s řekou Lužnicí. Zde se zvýšil stupeň znečištění na IV., tento stav pokračoval až ke Zvíkovskému mostu a stejný stupeň byl zaznamenán i v místech Otava Topělec a Štedronín. U hráze nádrže Orlik už je ovšem znovu stupeň I. Tato situace odpovídá některým mým výsledkům, jak je patrné na mapách 3, 4 a 11, 12 (Příloha F). U nádrže Lipno srovnání není dost dobře možné, protože hodnoty koncentrace chl-a jsou pouze u dvou profilů, na začátku a na konci nádrže. Rok 2004 tudíž lze srovnat jen s těmito dvěma profily. Z výsledných map z roku 2004 tomuto stavu nejvíce odpovídá Mapa 17.

Tyto dosažené výsledky svědčí o tom, že použité metody jsou vypovídající v určování relativního znečištění zkoumaných vod (prostorové diferenciaci koncentrace chl-a). Takovéto výsledky nebyly v ČR ještě prezentovány a v tom spatřuji největší přínos této práce. Ačkoli vhodnost k určování přesné koncentrace chl-a je diskutabilní, jak bylo výše zmíněno, v určení relativního prostorového znečištění bylo dosaženo dobrých výsledků, které potvrdilo srovnání s jinými studiemi.

## 6.5 NÁVRH MOŽNÉHO ZLEPŠENÍ PRÁCE

Jak vyplynulo z výsledků, metody použité v práci se nedají použít v praxi ke zjišťování přesné koncentrace chl-a v českých vodních nádržích. V tomto ohledu nejsou spolehlivé. Navrhuji ovšem postup, jak získat lepší výsledky, s větší mírou spolehlivosti. V prvním kroku je třeba získat co nejvíce míst odběru vzorků a to tak, aby datum získání vzorku bylo co nejbližší datu snímkování družice. V tomto případě navrhuji vybrat si pouze jednu nádrž, např. VN Lipno, a v této nádrži odebrat více vzorků v den, kdy přelétá družice nad zájmovým územím. Jak jsem zjistila při výzkumu, využití dat z Povodí Vltavy nestačí k dosažení použitelných výsledků. Pro výběr družicových dat bych zvolila stejně jako v této práci družici Landsat, zejména z důvodu nejlepší dostupnosti dat. Dalším krokem by byl výpočet hodnot radiance za jednotlivé kanály. V třetím kroku by byla z hodnot radiance a z pozemních hodnot vypočítána regresní rovnice. Zvolila bych více regresních rovnic, ve kterých bych využila pásma viditelného spektra, ale i blízké infračervené pásmo. Využila bych i poměru pásem, zvláště  $4/3$ , tedy blízké infračervené pásmo ku červenému viditelnému pásmu, nebo  $4/2$ , tedy blízké infračervené pásmo ku zelenému viditelnému pásmu (tyto poměry ve své studii využívá také Duan et al., 2006). Čtvrtým krokem by bylo zpětné vymodelování koncentrace chl-a na základě vypočítaných koeficientů regresní rovnice. V posledním důležitém kroku bych zhodnotila míru korelace mezi pozemně změřenými hodnotami a vymodelovanými hodnotami koncentrace chl-a. Statistický ukazatel závislosti mezi daty by také rozhodl, zda jsou výsledky použitelné pro další výzkum.

## 7. ZÁVĚR

V diplomové práci zaměřené na mapování eutrofizace vody pomocí DPZ jsem si vytyčila několik cílů. První z nich jsem se snažila splnit plnou měrou, studovala jsem literaturu zabývající se touto problematikou, použila jsem hodně zahraničních zdrojů, ale i domácí literaturu. Díky nastudované literatuře jsem potom mohla popsat spektrální chování vody, odraz i absorpci slunečního záření ve vodním tělese i spektrální chování vody se složkou chl-a, která je ukazatelem míry eutrofizace. Tím byl splněn druhý cíl mé práce.

Z dat, která se mi podařilo sehnat, vycházel i výběr metod, které mohly být v práci využity, tedy splnění třetího cíle. Základní kritérium pro výběr metod byla družicová data ze skeneru TM a ETM+ družice Landsat a využití radiance jednotlivých kanálů těchto skenerů na aplikaci lineární regresní rovnice, pomocí níž mohly být vymodelovány hodnoty chl-a. Neméně důležitým vstupem do regrese byla též data z pozemního měření koncentrace chl-a získaná z Povodí Vltavy. Celkem byly vybrány dvě regresní rovnice inspirované zahraničními studiemi podobného charakteru a jedna vlastní regresní rovnice, která byla inspirována též jinou zahraniční studií. Na těchto rovnicích měla být ukázána vhodnost metody aplikované na vybrané vodní nádrže Česka; těmi byly VN Lipno, Orlík, Hněvkovice a Kořensko. Průzkum byl prováděn na třech družicových snímcích z roků 2001, 2004 a 2007. Vypočítané koeficienty regresních rovnic pomohly zpětně vymodelovat koncentraci chl-a v podobě rastrového obrazu. Při zhodnocení přesnosti metody pomohly statistické ukazatele. Ty ukázaly, že výsledky nedosáhly v mnoha ohledech dobrých statistických ukazatelů a je na místě tuto problematiku rozvíjet za pomoci většího objemu dat, zkoumat i jiné datové zdroje a použít odlišné metodické postupy.

Míra eutrofizace, čtvrtý cíl diplomové práce, byla vymodelována pro VN Lipno a část VN Orlík. VN Hněvkovice a Kořensko nemohly být vizualizovány z důvodu malé plošné velikosti. Úpravami v prostředí GIS byly vytvořeny výsledné mapy znázorňující prostorové rozložení koncentrace chl-a v jednotkách  $\mu\text{g/l}$ . Nejlepších výsledků dosáhla regresní rovnice, která využívala dvě viditelná pásma a jedno blízké infračervené pásmo.

Výsledky prostorového rozložení hodnot koncentrace chl-a v mnoha případech korelovaly s dosaženými výsledky jiných studií, opřených převážně o pozemní data.

Posledním cílem bylo zhodnocení přínosu studované metody z hlediska použitelnosti v praxi. Největším přínosem této práce je demonstrace jiné metody zjišťování míry eutrofizace než je pozemní měření, které se v současnosti v České republice využívá jako jediná metoda. I když výsledky prozatím nedosáhly takové úrovně, jaká by byla žádaná v praxi, byly v práci naznačeny postupy, jak dosáhnout kvalitnějších výsledků.

Na tuto diplomovou práci by bylo jistě vhodné navázat. Přínosné by bylo do výzkumu zahrnout větší objem dat, data dálkového průzkumu lepších parametrů (např. hyperspektrální data) či též data teploty vody, která má vliv na vznik eutrofizace.

Metoda zjišťování kvality vody pomocí DPZ je vhodnou alternativou k pozemnímu měření charakteristik kvality vody v ČR. Výhodou této metody jsou zejména nižší požadavky na náklady i na čas, než u pozemního měření. Výhodou je též zobrazení míry eutrofizace na celé ploše vodní nádrže, což pouhým pozemním měřením nelze nikdy dosáhnout.. Díky plošnému rozložení koncentrace chl-a je možné rozhodnout, která místa vodní nádrže jsou nejvíce postižena, a kde je tedy nejdůležitější předcházet vzniku eutrofizace, kde jsou nutná předběžná opatření, která zabrání úniku látek způsobujících eutrofizaci do vody. Ukazatele kvality vody vymodelované pomocí DPZ by se v ČR daly využít také jako doplnění chybějících dat z pozemního měření.

## 8. POUŽITÉ ZDROJE

### 8.1 LITERATURA

AHN, Y. H. ... [et al.] 1992. Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters. *Deep-Sea Research*, 1998, č. 98, s. 12417-12429.

ÁLVARES-ROBLES, J.A. ... [et al.] 2006. *Water quality monitoring based on sediment distribution using satellite imagery* [online]. Paper presented at the 9th ABILE Conference on Geographic Information Science. Visegrád. Hungary [cit. 2007-02-23]. Dostupné z: <<http://www.agile2006.hu/papers/a144.pdf>>

ARST, H. 2003. *Optical Properties and Remote Sensing of Multicomponental Water Bodies*. Praxis Publishing Ltd. Chichester. UK, 231 s. ISBN: 3-540-00629-X.

BIRADAR, CH. M. ... [et al.] 2003. *Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) Mosaic. Nominal 2000's Mosaic for the Limpopo River Basin*. International Water management Institute. Dostupné z : <[www.iwmidsp.org/.../River-basins/Limpopo/01-Landsat-ETM-30m-7band-basin-mosaic-file/ReadMe/readme-first.doc](http://www.iwmidsp.org/.../River-basins/Limpopo/01-Landsat-ETM-30m-7band-basin-mosaic-file/ReadMe/readme-first.doc)>

BREZONIK, P. - MENKEN, K. D. - BAUER, M. 2005. Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM). *Journal of Lake and Reservoir Management*, r. 21, č.4, s. 373-382.

BRICAUD, A. ... [et al.] 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parametrization. *Journal of Geophysical Research*, r. 100 (C7), č.13, s. 13321-13332.

BRIVIO P.A. - GIARDINO C. - ZILIOLI E. 2001. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of remote sensing*, 2001, r.22, č.2, s. 487-502.

BUKATA, R. P. ... [et al.] 1991. Satellite monitoring of optically-active components of inland waters: an essential input to regional climate change impact studies. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, r. 17, č. 4, s. 470 – 478.

BUKATA, R. P. ... [et al.] 1995. *Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters*. CRC Press LLC. Boca Raton. Florida. USA, 1995. 362 s. ISBN: 0849347548.

BUKATA, R. P. 2005. *Satellite monitoring of inland and coastal water quality. Retrospection, Introspection, Future Directions*. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. USA, 2005. 246 s. ISBN-13: 9780849333569

DESORTOVÁ, B. 2002. Faktory ovlivňující časově-prostorové změny fytoplanktonu v toku Labe. *Vodní hospodářství*, 2002, r. 52, č. 9, s. 251-252.

DOBROVOLNÝ, P. 1998. *Dálkový průzkum Země – digitální zpracování obrazu*. MU Press. Brno, 1998. 218 s. ISBN: 80-210-1812-7.

DUAN, H. ... [et al.] 2007. Assessment of Chlorophyll-a Concentration and Trophic State for Lake Chagan Using Landsat TM and Field Spectral Data. *Environmental Monitoring and Assessment*. Springer , 2007, r. 129, č. 1-3, s. 295-308.

EKSTRAND, S. 1998. *Determination of algal production in an industrial waste plume using Landsat TM satellite imagery* [online]. Report. IVL Swedish Environmental Research Institute Stockholm, 1998. [cit. 2007-01-03]. Dostupné z : <<http://www3.ivl.se/rapporter/pdf/B1304.pdf>>

FULLER, L. M. – AICHELE, S. S. – MINNERICK, R. J. 2004. *Predicting Water Quality by Relating Secchi-Disk Transparency and Chlorophyll a Measurements to Satellite Imagery for Michigan Inland Lakes* [online]. Scientific Investigations Report 2004-5086. US Geological Survey. Reston. Virginia. [cit. 2007-05-03]. Dostupné z: <<http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5086/pdf/sir2004-5086.pdf>>

GERIŠ, R. - VRABCOVÁ, D. 2005. *Orientační sledování fytoplanktonu rekreačních nádrží v povodí Moravy v roce 2005* [online]. Ročenka 2004/2005. Sledování fytoplanktonu v nádržích. [cit. 2007-05-10]. Dostupné z: <[http://www.pmo.cz/VHC/Kvalita2004\\_2005/fytoplankton.pdf](http://www.pmo.cz/VHC/Kvalita2004_2005/fytoplankton.pdf)>

GITELSON, A. A. ... [et al.] 2000. Optical properties of *Nannochloropsis* sp and their application to remote estimation of cell mass. *Biotechnology and bioengineering*, 2000, r. 69, č. 5, s. 516-525.

HALOUNOVÁ, L. - PAVELKA, K. 2005. *Dálkový průzkum Země*. ČVUT, Praha, 2005. 192 s. ISBN: 80-01-03124-1.

HAN, L. - JORDAN, K. J. 2005. Estimating and mapping chlorophyll-a concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, r. 26, č. 23, s. 5245-5254.

KLOIBER, S. M. – BREZONIK, P. L. – BAUER, M. E. 2002. Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*, 2002, r. 36, č. 2, s. 4330 – 4340.

KNEUBÜHLER, M. ... [et al.] 2007. *Mapping chlorophyll-a in lake Kivu with remote sensing methods* [online]. The 2007 ESA ENVISAT Symposium, Montreux. [cit. 2007-09-24]. Dostupné z: <<http://earth.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/posters/4P10/458118mk.pdf>>

KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ L., PAVELKA, K. 1997. *Dálkový průzkum země 10*. ČVUT, Praha, 1997, 164 s. ISBN: 800101567X.

KOPONEN, S. 2006. *Remote sensing of water quality for Finnish lakes and coastal areas* [rukopis]. Helsinki University, Technology Laboratory of Space Technology. Espoo, 2006, 74 s.

LILLESAND, T. M. – KIEFER, R. W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3.th edition, John Wiley & Sons Inc. Toronto, 1994, 749 s. ISBN: 0471577839.

MARŠÁLEK, B. – KERŠNER, V. – MARVAN, P. 1996. *Vodní květy sinic*. *Nadatio flos-aquae*, Brno, 1996, 144 s.

MENKEN, K. – BREZONIK, P.L. – BAUER, M. E. 2005. *Influence of Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) on Lake Reflectance Spectra: Implications for Measuring Lake Properties by Remote Sensing*. [online]. Revised version submitted to Lake and Reservoir Management, August 2005, 17 s. + 5 s. [cit. 2007-03-19]. Dostupné z: <[http://rsl.gis.umn.edu/Documents/hyperspectral\\_final-single-spacing.pdf](http://rsl.gis.umn.edu/Documents/hyperspectral_final-single-spacing.pdf)>

OLMANSON, L. G. – BAUER, M. E. – BREZONIK, P. L. 2002. *Use of Landsat imagery to develop a water quality atlas of Minnesota's 10,000 Lakes* [online]. Pecora 15. Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS Conference Proceedings, 2002. [cit. 2007-05-03]. Dostupné z: <[www.isprs.org/commission1/proceedings02/paper/00102.pdf](http://www.isprs.org/commission1/proceedings02/paper/00102.pdf)>

OUILLO, S. – PETRENKO, A. A. 2005. Above-water measurements of reflectance and chlorophyll-a algorithms in the Gulf of Lions NW Mediterranean Sea. *Optics Express*, r. 13, č. 7, s. 2531-2548.

PUNČOCHÁŘ, P. - DESORTOVÁ, B. 2002. Stav trofie našich vodních zdrojů na mapách. *Vodní hospodářství*, 2002, r. 52, č. 2, s. 35-38.

STRÖMBECK, N. 2001. *Water Quality and Optical Properties of Swedish Lakes and Coastal Waters in Relation to Remote Sensing*. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations. Department of Limnology. Evolutionary Biology Center. Uppsala University. Sweden, 2001, 27 s., ISBN: 978-9155450373.

STRÖMBECK, N., & PIERSON, E. 2001. The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish freshwater. *Science of the Total Environment*, 2001, r. 268, č. 1-3, s. 123–137.

VERBYLA, D. L. 1995. *Satellite remote sensing of natural resources*. CRC Press LLC. USA, 1995, 198 s. ISBN: 9781566701075.

ZVÁRA, K. 2001. *Biostatistika*. Nakladatelství Karolinum. Praha, 2001, 210 s. ISBN: 80-7184-773-9.

## 8.2 ELEKTRONICKÉ ZDROJE

ARCDATA. 2007. Landsat – Základní informace. [online]. Praha 2007, poslední aktualizace 7. 12. 2007. Dostupné z: <<http://old.arcdata.cz/data/druzicova/landsat>>

BARTÁČEK, J. – SOUKUPOVÁ, K. 2008. *Zpráva o hodnocení jakosti povrchových vod v oblasti horní Vltavy za období 2006 – 2007*. [online]. Útvar povrchových podzemních vod generálního ředitelství. Povodí Vltavy, Praha, 2008. [cit. 2009-06-15]. Dostupné z: <[http://www.pvl.cz/files/Zpravy\\_2007/Jakost/HV/zprava\\_jakost\\_HV\\_06-07.pdf](http://www.pvl.cz/files/Zpravy_2007/Jakost/HV/zprava_jakost_HV_06-07.pdf)>

BLÁHA, J. D. 2008. *Citace a metody citování literatury : normy, ukázky a příklady* [online]. Praha, verze 2.0 (2008), poslední aktualizace 16. 12. 2008. Dostupné z: <<http://www.natur.cuni.cz/gis>>. Výukový materiál pro předmět Seminář k bakalářské práci.

DOBROVOLNÝ, P. – HEREBE, V. – HYNEK, A. 2001. *Multimediální výuka předmětů krajinná ekologie a dálkový průzkum Země na katedře geografie Přf MU*. [online]. Brno, 2001. [cit. 2007-09-01] Dostupné z: <<http://ww.sci.muni.cz/~dobro>>

ESA. 2003a. *Earth Observation Quality Control: Landsat frequently asked questions*. [online]. Paris. France, 2003. [cit. 2008-01-07]. Dostupné z: <[http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/landsat\\_FAQ/](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_FAQ/)>

ESA. 2003b. *Anomaly occurs on LANDSAT 7 : Gain change*. [online]. Paris. France, 2003. [cit. 2008-01-07]. Dostupné z: <[http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/landsat\\_product\\_anomalies/GAEL-P157-SLP-001-04-01.pdf](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_product_anomalies/GAEL-P157-SLP-001-04-01.pdf)>

GISAT. 2007. MERIS online. [online]. [cit. 2009 - 08 - 15]. Dostupné z: <<http://www.gisat.cz/content/cz/novinky/zpravy-ze-sveta/meris-online>>

GLCF. 2006. Map search. [online]. [cit. 2006 - 11 - 05]. Dostupné z:  
<<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>> Družicové snímky Landsat TM a Landsat ETM+.

HEMM. 2000. *Nástin analýzy dat*. [online]. Stavební fakulta. ČVUT. Praha, 2000. [cit. 2008-01-28]. Dostupné z:  
<<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Predmety/HEMM/skripta.DATA.DOC>> Pracovní verze skript pro předmět Hydroekologický monitoring a modelování.

JENSEN, J. R. 2006. *Remote Sensing of Water*. [online]. University of South Carolina. Columbia. Department of Geography, 2006. [cit. 2007-01-03]. Dostupné z:  
<[http://www.cas.sc.edu/geog/rslab/551/Lectures/\\_Chapter%2012%202006.ppt](http://www.cas.sc.edu/geog/rslab/551/Lectures/_Chapter%2012%202006.ppt)>

POVODÍ VLTAVY. 2007. Hydrologické informace, Jakost vody v nádržích, Způsob monitoringu. [online]. 2007 [cit. 2007-03-20] Dostupné z :  
<<http://www.pvl.cz/portal/jvn/cz/index.htm>>

RULÍK, M. 2007. *Eutrofizace*. [online]. Přírodovědecká fakulta. Palackého univerzita. Olomouc, 2007. [cit. 2008 - 06 - 10 ]. Dostupné z:  
<<http://ekologie.upol.cz/index.php?da=ad/rulik/syll/aplhyd.htm>> Učební materiály k předmětu Aplikovaná hydrobiologie.

SINICE A ŘASY. 2007. *Sinice a řasy pro širokou veřejnost a novináře*. [online]. Mykologická laboratoř. Přírodovědecká fakulta. Jihočeská univerzita. České Budějovice, 2007. [cit. 2007-03-20]. Dostupné z: <<http://www.sinicearasy.cz/pro-vsechny>>

SYNEK, V. 2004. *Korelační a regresní analýza – Úvod*. [online]. Fakulta životního prostředí. Ústav Jana Evangelisty Purkyně. Ústí nad Labem, 2004. [cit. 2007-10-04]. Dostupné z: <<http://fzp.ujep.cz/~synek/statistika/skripta/KoReg2.doc>> Materiály k výuce předmětu Statistika.

TIMÁRI, G. 2007. Převod souřadnic mezi UTM, S-42 a S-JTSK. [online]. Eötvös Univerzity. Budapešť, 2007. [cit. 2007 - 05 - 15]. Dostupné z:  
<<http://hampl.varnsdorf.net/mk/trf.html>>

TEERRASEER. 2008. *About Jenks' natural breaks*. [online]. USA, 2008. [cit. 2009-02-04]. Dostupné z:

<[http://www.terraser.com/help/stis/interface/map/classify/About\\_natural\\_breaks.htm](http://www.terraser.com/help/stis/interface/map/classify/About_natural_breaks.htm)>

ŽÁKOVÁ, Z. 2005. *Rozvoj fytoplanktonu v nádrži Orlik v letech 2003 – 2005* [online].

VÚV TGM. Brno. [cit. 2007-10-04]. Dostupné také z:

<<http://www.natur.cuni.cz/ekologie/CLS2006/files/prednasky/ctvrtek/04-zakova.ppt>>

Prezentace závěrečné zprávy.

### **8.3 DALŠÍ ZDROJE**

Frantál, F. – Frantálová, Z. – Hejzlar, J. 2008. *Vývoj kvality vody v oblasti Frymburku 1993-2008*. 8. ročník Setkání přátel čisté vody, Frymburk, 2008. Prezentace.

## SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha A:** Pozemně změřené hodnoty chl-a za jednotlivé roky a místa odběru.

**Příloha B:** Mapy zobrazující umístění odběru vzorků pozemního měření.

**Příloha C:** Georeferencování družicových snímků z roku 2001 a 2004: Rozmístění vlíčovacích bodů, jejich souřadnice na referenčním i georeferencovaném snímku a chyby RMSE

**Příloha D:** Tabulky s vymodelovanými hodnotami chl-a za jednotlivé regresní rovnice a s pozemními hodnotami chl-a.

**Příloha E:** Grafy korelací mezi pozemně změřenými hodnotami chl-a a vymodelovanými hodnotami chl-a v jednotkách  $\mu\text{g/l}$  a jejich korelační koeficienty.

**Příloha F:** Výsledné mapy zobrazující plošné rozložení chl-a ve vodní nádrži Lipno a v části vodní nádrže Orlík:

Mapa 1: VN Lipno, rok 2001, VYSL1, regresní rovnice R1;

Mapa 2: VN Orlík, rok 2001, VYSL1, regresní rovnice R1;

Mapa 3: VN Lipno, rok 2001, VYSL1, regresní rovnice R2;

Mapa 4: VN Orlík, rok 2001, VYSL1, regresní rovnice R2;

Mapa 5: VN Lipno, rok 2001, VYSL1, regresní rovnice R3;

Mapa 6: VN Orlík, rok 2001, VYSL1, regresní rovnice R3;

Mapa 7: VN Lipno, rok 2007, VYSL1, regresní rovnice R2;

Mapa 8: VN Lipno, rok 2007, VYSL1, regresní rovnice R3;

Mapa 9: VN Lipno, rok 2001, VYSL2, regresní rovnice R1;

Mapa 10: VN Orlík, rok 2001, VYSL2, regresní rovnice R1;

Mapa 11: VN Lipno, rok 2001, VYL2, regresní rovnice R2;

Mapa 12: VN Orlík, rok 2001, VYSL2, regresní rovnice R2;

Mapa 13: VN Lipno, rok 2001, VYSL2, regresní rovnice R3;

Mapa 14: VN Orlík, rok 2001, VYSL2, regresní rovnice R3;

Mapa 15: VN Lipno, rok 2004, VYSL2, regresní rovnice R1;

Mapa 16: VN Lipno, rok 2004, VYSL2, regresní rovnice R2;

Mapa 17: VN Lipno, rok 2004, VYSL2, regresní rovnice R3;

Mapa 18: VN Lipno, rok 2007, VYSL2, regresní rovnice R1;

Mapa 19: VN Lipno, rok 2007, VYSL2, regresní rovnice R2;

Mapa 20: VN Lipno, rok 2007, VYSL2, regresní rovnice R3.

