

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie - kartografie



Tereza ŠMEJKALOVÁ

**VYUŽITÍ DRUŽICOVÝCH DAT VYSOKÉHO ČASOVÉHO
ROZLIŠENÍ V MONITORINGU KVALITY VODY**

**THE USE OF HIGH TEMPORAL RESOLUTION SATELLITE DATA
FOR MONITORING OF WATER QUALITY**

Bakalářská práce

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

Praha 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 22. 8. 2011

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu RNDr. Přemyslu Štychovi, Ph.D. za vedení práce, cenné náměty, připomínky a rady. Dále chci poděkovat své tetě Pavle Fraňkové za velkou trpělivost a pomoc při psaní a opravách práce a v neposlední řadě také svým rodičům za psychickou podporu.

Využití družicových dat vysokého časového rozlišení v monitoringu kvality vody

Abstrakt

Práce se zabývá možnostmi sledování kvality mořské vody (přesněji koncentrace chl-a) pomocí družicových dat vysokého časového rozlišení. V teoretické části jsou popsány základní principy DPZ, spektrální charakteristiky vody a jejich změny způsobené vlivem látek ve vodě přítomných. Jsou zde popsány metody, jak z družicových dat ze skeneru MERIS družice Envisat s pomocí analytického modelování získat hodnoty chlorofylu-a. V praktické části jsou použity tři nástroje ze softwaru BEAM a to standardní MERIS procesor Case 2 Regional, FUB/Wew Water procesor a FLH/MCI procesor. Celkem je zpracováno 10 snímků, pět pro každou ze dvou zájmových oblastí, kterými jsou Golfe du Lion (Francie) a průlivy Skagerrak a Kattegat. Jelikož je k dispozici jen velmi malé množství terestrických dat ke kontrole vymodelovaných hodnot, nelze posoudit, který z nástrojů je nejvhodnější. Je však zřejmé, že tyto procesory vyvinuté pro globální použití nemohou dosahovat přesnosti algoritmů vytvořených pro danou oblast a dané atmosférické podmínky.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, MERIS, kvalita vody, chlorofyl-a

The use of high temporal resolution satellite data for monitoring of water quality

Abstract

Present study compares possibilities of sea water quality monitoring using high temporal resolution satellite data. The theoretical part describes basic principles of remote sensing, the spectral characteristics of water and their change caused by substances present in the water. The analytical modeling methods of chlorophyll-a concentration retrieval from MERIS data are described. In the study three processors are used, standard MERIS processor Case 2 Regional, FUB/Wew Water processor and FLH/MCI processor. In total 10 satellite images are processed, five for each of the two studied areas, the Golfe du Lion in France and Skagerrak and Kattegat straights in Northern Europe. As there is only limited dataset of *in situ* measurements available to validate the results, it is impossible to decide which of the processors is the most suitable one. It is however clear that none of the globally applicable algorithms can be as accurate as algorithms developed for the exact location and atmospheric actual conditions.

Key words: remote sensing, MERIS, water quality, chlorophyl-a

OBSAH

Seznam tabulek a obrázků	6
Seznam zkratk	7
1. Úvod	9
2. Literární rešerše a úvod do problematiky	10
2.1. Základní principy dálkového průzkumu Země	10
2.2. Radiometrické veličiny	10
2.3. Optické vlastnosti vody	13
2.4. Složení vody a její spektrální chování.....	14
2.5. Obrácené (inverzní) úlohy v dálkovém průzkumu Země.....	18
2.6. Hodnocená území.....	19
2.7. Vybrané výzkumy kvality vody v pobřežních oblastech	20
3. Data	23
3.1. Družicová data.....	23
3.2. Pozemní data	25
4. Metodika.....	27
4.1. Použitý software.....	27
4.2. Obecné metody pro zpracování družicových snímků	27
4.3. Předzpracování	28
4.4. Modelování s obrazovými daty	33
4.4.1. Algoritmy použité pro výpočet hodnot chl-a z dat MERIS.....	34
4.5. Vytvoření výsledné mapy.....	38
4.6. Srovnání s in-situ daty.....	39
4.7. Vytvoření časové řady.....	39
5. Výsledky.....	40
5.1. Výsledné mapy	40
5.1.1. Golfe du Lion	40
5.1.2. Skagerrak a Kattegat	41

5.2.	Srovnání s daty <i>in situ</i>	41
5.3.	Proměnlivost v čase.....	42
6.	Diskuze	43
6.1.	Zhodnocení použitých dat	43
6.2.	Zhodnocení použitých metod	44
7.	Závěr.....	45
8.	Použité zdroje	46
	Seznam příloh.....	49

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulka 2.2.1: Typické zastoupení jednotlivých komponentů signálu přijímaného senzorem

Tabulka 3.1.1: Přístroje na Envisatu a jejich využití

Tabulka 3.1.2: Přehled pásem vlnových délek senzoru MERIS

Tabulka 3.1.3: Použité snímky MERIS

Tabulka 3.2.1: Odběrová místa a hodnoty chl-a

Obr. 2.2.1: Komponenty záře L_d měřené radiometrem

Obr. 2.4.1: Absorpční koeficient (plná čára) a koeficient odrazu (tečkovaná čára) pro čistou mořskou vodu

Obr. 2.4.2: Závislost absorpčního koeficientu na obsahu chl-a a na vlnové délce

Obr. 2.4.3: Procento slunečního záření odražené zpět vzhůru povrchovou vrstvou oceánu v závislosti na vlnové délce.

Obr. 3.2.1: Mapa pozemních měření – Golfe du Lion (Lví záliv), Francie

Obr. 3.2.2: Mapa pozemních měření – Oblast Skagerraku a Kattegatu

Obr. 4.3.1: Blokové schéma procesoru ICOL

Obr. 4.3.2: Příklad výstupu on-line aplikace GIOVANI – AOD (550 nm) pro 17. 4. 2003 pro oblast Golfe du Lion

Obr. 4.3.2: Princip ortorektifikace v SW BEAM

Obr. 4.3.2: Global Earth And Sea Surface Elevation s rozlišením 30 obloukových sekund

Obr. 4.4.1: schéma atmosférické korekce nástroje Case 2 Regional procesor

Obr. 4.4.3: Spektrum odrazivosti chlorofylu pro $1,4 \text{ mg/m}^3$ a $15,3 \text{ mg/m}^3$. Pozice a šířka jednotlivých kanálů MERIS je naznačena červeně.

SEZNAM ZKRATEK

AE	adjacency effect
AISA	Airborne Imaging Spectrometer for Applications
AOD	Aerosol Optical Depth
AOP	aerosol optical thickness
AOT	apparent optical properties
BOA	bottom of atmosphere
C2R	Coastal Case 2 Regional Processor
C2R	Case 2 Regional processor
CCD	Charge coupled device
CDOM	Colored Dissolved organic matter
CZCS	Coastal Zone Color Scanner
DPZ	dálkový průzkum Země
DU	Dobson Unit
ECMWF	European Center for Medium-range Weather Forecasting
EOLi-SA	Earth Observation Link - Stand Alone
ESA	European Space Agency
FLH	Fluorescence Line Height
FR	Full resolution
FUB	FUB/Wew Water processor
fwNN	forward neural network
GETASSE30	Global Earth Topography And Sea Surface Elevation at 30 arc second resolution
chl-a	chlorofyl-a
ICOL+	Improved Contrast between Land and Ocean
IOP	inherent optical properties
LUT	look up table
MCI	Maximum Chlorophyll Index
MEGS	MERIS Ground Segment data processing prototype
MEP	MERIS Regional CHL-Products Processor
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSL	mean sea level
NN	neural network
NODC	National Oceanographic Data Center
OVS	opticky významné substance
REVAMP	Regional Validation of MERIS chlorophyll-a Products
RR	reduced resolution
RT	radiative transfer code
SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SD	standard deviation

SMAC	Simplified Method for Atmospheric Correction
TOA	top of atmosphere
TOSA	top of standard atmosphere
TSM	total suspended matter
TSS	total suspended solids

1. ÚVOD

Voda je základem všeho živého na Zemi a zabírá 74% jejího povrchu. Kvalita vody je závislá na množství rozpuštěných a suspendovaných látek, které se v ní vyskytují. Obecně lze říci, že čím větší množství takových látek ve vodě je, tím nižší je její kvalita. Některé látky pocházejí z přírodních zdrojů, avšak značné množství látek se do vody dostává jako důsledek činnosti člověka. Velkým problémem je obrovské množství živin (hlavně fosforu a dusíku) majících původ v zemědělství, průmyslu, osídlení či např. v chovu ryb a dalších lidských aktivitách. Jejich vlivem dochází k porušení křehké rovnováhy vodních ekosystémů. S rostoucím znečišťováním roste zároveň i snaha o jeho monitorování, eliminaci a o lepší porozumění jeho efektům.

Sledování kvality vody je základní podmínkou pro řešení této problematiky. Využití pozorovacích satelitů v posledních letech výrazně stoupá a poskytuje informace o kvalitě vody v měřítku přesahujícím možnosti jakékoli jiné metody. Existuje množství senzorů zaměřujících se zvláště na tzv. „barvu oceánu“ jako například Coastal Zone Color Scanner (CZCS), Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) či v této práci použitý senzor MERIS na palubě družice ENVISAT. Data z těchto senzorů jsou s úspěchem využívána pro získání informací o různých vlastnostech vody, jako např. obsah suspendovaných látek, primární produkce vody, dynamika vodních těles či detekce toxických vodních květů. Tyto informace jsou z družicových dat extrahovány pomocí řady metod. Jednou z nich je využití již vyvinutých algoritmů, jejich přesnost je ale vždy nutné ověřit s pozemními daty.

Klasické algoritmy vyvinuté pro zpracování snímků ze senzoru MERIS jsou spolehlivé pouze ve vodách otevřeného oceánu avšak v opticky komplexních pobřežních a sladkých vodách jsou nepoužitelné. Z toho důvodu byly vyvinuty nové sofistikovanější algoritmy. V této práci byly použity tři nástroje implementované v softwaru BEAM:

- a. Coastal Case 2 Regional Processor (C2R)
- b. FUB/Wew Water Processor
- c. FLH/MCI Processor

V této práci jsou studovány možnosti využití dat ze senzoru MERIS pro monitorování a obsahu chl-a ve vodě a rozdíly a vlastnosti výše jmenovaných nástrojů určených k extrakci této informace.

Cíle této práce lze shrnout do několika bodů:

- Nastudování problematiky spojené se sledováním kvality vody pomocí dálkového průzkumu Země s využitím družicových dat vysokého časového rozlišení.
- Nastudování optických vlastností a spektrálního chování vody s obsahem chlorofylu.
- Posouzení možností využití dat MERIS pro hodnocení kvality vody (speciálně koncentrace chl-a).
- Porovnání nástrojů implementovaných v SW BEAM sloužících pro odvození koncentrace chl-a.
- Porovnání vymodelovaných hodnot s daty naměřenými *in situ*
- Zpracování dat a vytvoření map prostorového rozložení koncentrace chl-a pro dvě modelové oblasti

2. LITERÁRNÍ REŠERŠE A ÚVOD DO PROBLEMATIKY

2.1. Základní principy dálkového průzkumu Země

Hlavní technikou použitou v této práci je dálkový průzkum Země (DPZ), jedná se o moderní metodu získávání informací o objektech a jevech na zemském povrchu bez nutnosti fyzického kontaktu. (Murdoch, 1985) Je také jednou ze dvou metod, pomocí které lze provádět monitoring kvality vody. Druhou a starší metodou je měření tzv. in-situ neboli v terénu, které je časově náročnější a nákladnější. Na rozdíl od dálkového průzkumu poskytuje údaje pouze pro určitý bod v určitém čase, ale neumožňuje hodnotit kvalitu vody např. v celém jezeře spojitě. Principem dálkového průzkumu Země je záznam intenzity elektromagnetického záření emitovaného nebo odraženého sledovanými objekty.

Snímací zařízení může být umístěno na různých typech nosičů, nejčastěji však na letadle nebo družici. Podle původu snímaného záření dělíme systémy DPZ na aktivní, tj. s vlastním zdrojem záření (např. radar) nebo pasivní, využívající přirozené zdroje záření (Slunce). Existují dva základní postupy umožňující měření intenzity záření. První a historicky starší je založen na registraci změn způsobených chemickou reakcí, tento způsob je využíván převážně ve fotografických kamerách. Druhý postup spočívá ve změně elektrických vlastností detektoru a odečtu elektrických veličin, využívá se u radiometrů.

Získaná data mohou být ve tvaru analogovém nebo digitálním. Analogová data jsou data spojitá s nekonečným množstvím možných hodnot. K získání digitálních dat je potřeba provést digitalizaci tzn. „nahrazení nekonečného počtu možných hodnot jak funkčních, tak proměnných, jejich konečným počtem.“ (Kolář, 2008) Funkce pro převod naměřené radiometrické veličiny na diskretní číslo se nazývá obrazová funkce. Jedna její hodnota vždy odpovídá jednomu základnímu obrazovému prvku neboli pixelu. Pixely jsou uspořádány do mřížky vytvářející digitální obraz. Takto uspořádaná data nazýváme data rastrová. (Verbyla, 1995)

Cílem dálkového průzkumu Země je získání informace, to se děje procesem interpretace, analýzy a klasifikace. Klasifikaci můžeme zjednodušeně definovat jako zařazení jednotlivých obrazových prvků do předem definovaných tříd. Třídy, do kterých jsou jednotlivé hodnoty zařazovány, představují rozlišení různých typů povrchů či jevů na Zemi. Typy tříd jsou voleny podle toho k jakému účelu má výsledná informace sloužit. Příkladem je základní dělení povrchu na plochy zastavěné, plochy bez vegetace, plochy s vegetací a vodní plochy, jiné druhy tříd budou použity pro např. analýzu zdraví a stáří vegetace. Přiřazení k určité třídě je založeno na použití určitých klasifikačních pravidel (klasifikátorů). Dobrovolný (1998) uvádí, že klasifikátory mohou být založeny na různých vlastnostech, objektů a jevů v obraze, tedy ne pouze na spektrálním chování, ale na příklad i na prostorovém a časovém rozložení.

2.2. Radiometrické veličiny

Principem metody DPZ je interakce elektromagnetického záření s látkovým objektem. Energie přijatá detektorem na určité vlnové délce udává informaci o průběhu této interakce. Tzv.

zářivé (radiometrické) veličiny vyjadřují údaj o naměřené energii kvantitativně. Velikost naměřené zářivé energie vždy závisí na vlnové délce a geometrických podmínkách měření.

Základní radiometrickou veličinou je zářivá energie Q nesená vlnou, jejíž velikost je závislá na vlnové délce, a její základní jednotkou je J. Energie dopadající nebo vyzařovaná z jednotkové plochy je nazývána intenzitou ozařování E [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] respektive intenzitou vyzařování M . Zářivý tok Φ [W] je veličina udávající rychlost přírůstku nebo úbytku zářivé energie v daném místě. Je definován jako zářivá energie, kterou zdroj vyzáří za jednotku času. Jako zářivý tok vyzářený bodovým zdrojem do jednotkového prostorového úhlu se definuje zářivost zdroje I [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Prostorový úhel Ω je udáván ve steradiánech [sr] a lze ho vyjádřit jako poměr plochy A , kterou na sférické ploše o poloměru r vymezuje kužel s vrcholem v jejím středu, a druhé mocniny poloměru.

$$\Omega = A/r^2 \quad (\text{rovnice 2.2.1})$$

Pokud se zářivý tok nemění jen v závislosti na velikosti prostorového úhlu, ale také na jeho směru, pak používáme veličinu záře L [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Záře je v DPZ nejčastěji využívaná radiometrická veličina, s její pomocí lze také vyjádřit ostatní zářivé veličiny. Pro záření z plochy A do prostorového úhlu Ω v zenitním úhlu θ platí:

$$L = \frac{d^2\Phi}{(dA \cos \theta)d\Omega} = \frac{dI}{dA \cos \theta} \quad (\text{rovnice 2.2.2})$$

Velichina $dA_\theta = dA \cos \theta$ se nazývá *efektivní plocha zářiče* a vyjadřuje kolmý průmět zářivé plochy do směru pozorování (Kolář & Halounová & Pavelka, 1997). Takto definované radiometrické veličiny vyjadřují hodnoty pro celou šíři spektra, Spektrální podstatu jim lze dodat omezením na určitý uzavřený interval vlnových délek.

Pro sledování kvality vody se využívá převážně viditelná část spektra, proto mluvíme o pozorování tzv. „ocean color“ (barva oceánu). Při pozorování vodních těles pomocí družice se předpokládá, že se vodní hladina chová jako lambertovský neboli dokonale difúzní plošný zdroj záření, uvažujeme-li záření z vodního sloupce odražené zpět k hladině. To znamená, že na vodní hladinu je nahlíženo jako na zdroj izotropního záření a hodnota záře L je ve všech směrech stejná. (Robinson, 1985) Pro hodnoty ostatních radiometrických veličin měřených ve směru $\theta \neq 0$ a ve směru normály n , pak platí Lambertův kosinový zákon (Kolář & Halounová & Pavelka, 1997):

$$\frac{\Phi_\theta}{\Phi_n} = \frac{E_\theta}{E_n} = \frac{I_\theta}{I_n} = \cos \theta \quad (\text{rovnice 2.2.3})$$

Celkovou intenzitu vyzařování z jednotkové plochy zářiče určíme vynásobením naměřené záře koeficientem π .

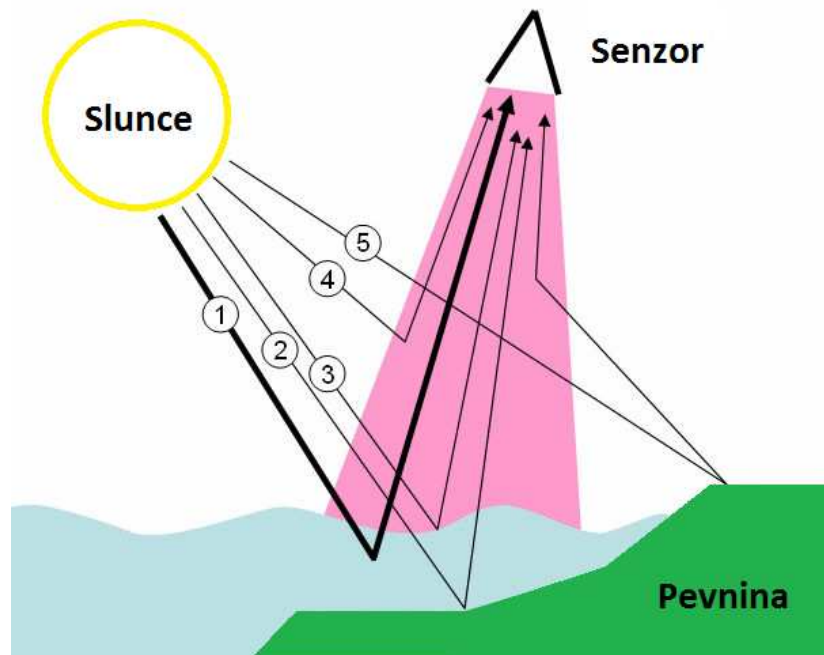
$$M = \pi L \quad (\text{rovnice 2.2.4})$$

Při monitorování vodních ploch se nejčastěji uplatňují pasivní senzory, využívající jako zdroj elektromagnetického záření Slunce. Záře L_d dopadající na senzor nad vodní plochou se podle Koponena (2006) skládá celkem z pěti komponentů (Obr. 2.2.1.):

- záře procházející atmosférou i rozhraním vzduch-voda do vodního tělesa
 - Ve vodním tělese je rozptylována a absorbována molekulami vody a ostatních látek rozpštěných nebo suspendovaných ve vodě. Část radiace je molekulami odražena

vzhůru k povrchu a skrz atmosféru k senzoru. Tato tzv. záře z vodního tělesa L_w nese potřebnou informaci o vodním sloupci.

- záře odražená ode dna L_b (nese informaci o dně)
- záře z rozhraní vzduch-voda L_s
- radiace odražená z pevniny L_l rozptýlená atmosférou k senzoru
- radiace L_a rozptýlená atmosférou mezi hladinou vody a senzorem zpět k senzoru



Obr. 2.2.1: Komponenty záře L_d měřené radiometrem (fialově znázorněn zorný úhel radiometru). (1) L_w záře z vodního objemu (2) záře odražená ode dna L_b (3) záře odražená z rozhraní vzduch-voda L_s (4) záře rozptýlená atmosférou k senzoru L_a a (5) záře odražená od pevniny a atmosférou rozptýlená do zorného pole senzoru L_l Zdroj: Koponen, 2006

Celkovou září dopadající na senzor pak Koponen (2006) definuje takto:

$$L_d = T_{am}(L_w + L_s + L_b) + L_a + L_l \quad (\text{rovnice 2.2.5})$$

První zmíněná složka je jediná, která je využitelná pro získávání informací o kvalitě vody, ostatní složky tvoří již pouze tzv. šum měření.

Robinson (1985) jmenuje pouze tři komponenty záření dopadajícího na senzor:

- část záře z vodního objemu L_w prošlá atmosférou k senzoru
- část záře L_r , která je tvořena paprsky odraženými od rozhraní vzduch-voda a paprsky odraženými těsně nad rozhraním
- záře z atmosféry (atmospheric path radiance) L_p .

Září L_s změřenou senzorem lze pak popsat takto:

$$L_s = L_p + TL_w + TL_r \quad (\text{rovnice 2.2.6})$$

Zde T představuje tzv. přímou propustnost atmosféry, kterou lze definovat jako část záření z povrchu, které není atmosférou rozptýleno pryč ze zorného pole radiometru. (viz kap. 2.3)

Tabulka 2.2.1 ukazuje příklady typických relativních hodnot procentuálního zastoupení komponentů na výsledném signálu přijímaném senzorem na různých vlnových délkách pro čistou vodu a vodu zakalenou.

Vlnová délka nm	Zastoupení v přijímaném signálu v %					
	čistá voda			kalná voda		
	TL_w	L_p	TL_r	TL_w	L_p	TL_r
440	14.4	84.4	1.2	18.1	80.8	1.1
520	17.5	81.2	1.3	32.3	66.6	1.1
550	14.5	84.2	1.3	34.9	64.1	1.0
670	2.2	96.3	1.5	16.4	82.4	1.2
750	1.1	97.0	1.9	1.1	97.4	1.5

Tabulka 2.2.1: Typické zastoupení jednotlivých komponentů signálu přijímaného senzorem Zdroj: Sturm, 1981 (in Robinson, 1985)

Zastoupení záření odraženého od rozhraní voda-vzduch je v tomto případě malé, protože výška Slunce v době měření byla pouze 36° . Je zřejmé, že i v případě kalné vody je procento signálu nesoucího informaci o vodním tělese maximálně 35% (550 nm, žluté světlo) a snižuje se postupně směrem k modré i červené části spektra. (Robinson, 1985)

2.3. Optické vlastnosti vody

Elektromagnetická vlna se šíří nezměněná pouze v dokonale homogenním prostředí, přičemž nehomogenitou je každý hmotný objekt počínaje atomem a konče velkými zemskými nebo atmosférickými útvary. Zásadní jsou změny vln, ke kterým dochází na rozhraní mezi dvěma prostředími, přičemž povaha změny vždy záleží na fyzikálních vlastnostech nehomogenity. Na rozhraní dochází k odrazu vlny nebo k jejímu průchodu skrz rozhraní, kde je část záření pohlcena a zvyšuje kinetickou energii molekul tělesa. (Kolář, 1990)

Při průchodu záření skrz rozhraní voda-vzduch do vodního tělesa dochází k jeho rozptylu a absorpci na molekulách vody a látek rozpuštěných a suspendovaných v ní. Postupně je všechno záření absorbováno kromě té jeho části, která byla rozptýlena zpět směrem k vodnímu povrchu. (Strömbeck, 2001) Spektrální vlastnosti a intenzita záření rozptýleného ven z vodního tělesa jsou závislé na optických vlastnostech vody a okolních radiačních podmínkách. (Koponen, 2006) Elektromagnetické záření se při interakci s různými látkami mění v závislosti na spektrálních absorpčních a rozptylových charakteristikách látky nebo tělesa jako celku, takzvaných základních optických vlastnostech vodního tělesa (IOP – Inherent optical properties).

Koponen (2006) uvádí celkem tři IOP. První z nich je tzv. absorpční koeficient $a(\lambda)$, který vyjadřuje míru atenuace (zeslabení) záření v důsledku absorpce energie. Pro jeho vyjádření je nutné nejdříve zavést pojem pohltivost A . Pohltivost, stejně jako všechny základní optické vlastnosti, je závislá na vlnové délce λ .

$$A(\lambda) = M_A(\lambda) / E_0(\lambda) \quad (\text{rovnice 2.3.1})$$

M_A představuje intenzitu záření pohlceného v nekonečně tenké vrstvě vody a E_0 intenzitu ozáření. Absorpční koeficient získáme jako podíl změny pohltivosti $\Delta A(\lambda)$ a tloušťky vodního tělesa Δr .

$$a(\lambda) = \Delta A(\lambda) / \Delta r \quad (\text{rovnice 2.3.2})$$

Koeficient odrazu $b(\lambda)$ je definován analogicky k absorpčnímu koeficientu, pomocí tzv. odrazivosti $B(\lambda)$ a vyjadřuje pokles intenzity záření v důsledku odrazu. Oba koeficienty se udávají v m^{-1} .

Třetím IOP je tzv. koeficient zpětného odrazu $b_b(\lambda)$ vyjadřující zlomek dopadajícího záření, který je odražen pod úhlem větším než 90° . Na základě výzkumu Petzolda (1972) však zpětně odražené záření tvoří pouze 1.9% - 4.4% z celkového odraženého záření v závislosti na vlastnostech vody. Strömbeck (2001) jmenuje ještě další dvě základní optické vlastnosti a to tzv. atenuační koeficient $c(\lambda)$, který je definován jako součet $a(\lambda)$ a $b(\lambda)$ a představuje zeslabení intenzity záření při průchodu tělesem v závislosti na vzdálenosti, kterou v tělese urazí. Jako poslední pátou IOP udává funkci objemové odrazivosti $\beta(\Phi)$, která charakterizuje intenzitu odrazivosti jako funkci úhlu odrazu. Základní optické vlastnosti vodního tělesa jsou závislé pouze na vlastnostech a složení vodního tělesa a ne na vlastnostech dopadajícího záření.

Pro dálkový průzkum je nejdůležitějším procesem odraz záření. Odrazivost neboli reflektance $R(\lambda, z)$ je jedním ze základních pojmů optiky vody. Hodnota odrazivosti je vždy závislá na vlnové délce λ dopadajícího záření a na hloubce z pod rozhraním vzduch-voda. Tato odrazivost je nazývána také odrazivostí ozáření (irradiance reflektance), kterou lze těsně pod hladinou vodního tělesa definovat takto (Koponen, 2006):

$$R(\lambda, 0^-) = \frac{E_u(\lambda, 0^-)}{E_d(\lambda, 0^-)} = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (\text{rovnice 2.3.3})$$

E_u je intenzita záření směřujícího vzhůru, E_d intenzita záření směřujícího dolů a f je konstanta zahrnující všechny parametry prostředí. Závislost na zenitové vzdálenosti Slunce μ_0 vyjádřil Kirk (1984) takto:

$$f = 0,975 - 0,629\mu_0 \quad (\text{rovnice 2.3.4})$$

Odrazivost ozáření není senzorem dálkového průzkumu měřitelná, a proto se nevyužívá. Místo ní se uplatňuje tzv. odrazivost záření $R_{RS}(\lambda, z)$, kterou lze pro $z = 0+$ (těsně nad hladinou) definovat takto (Kirk, 1984):

$$R_{RS} = \frac{L_u(\lambda, 0+)}{E_d(\lambda, 0+)} = 0,083 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (\text{rovnice 2.3.5})$$

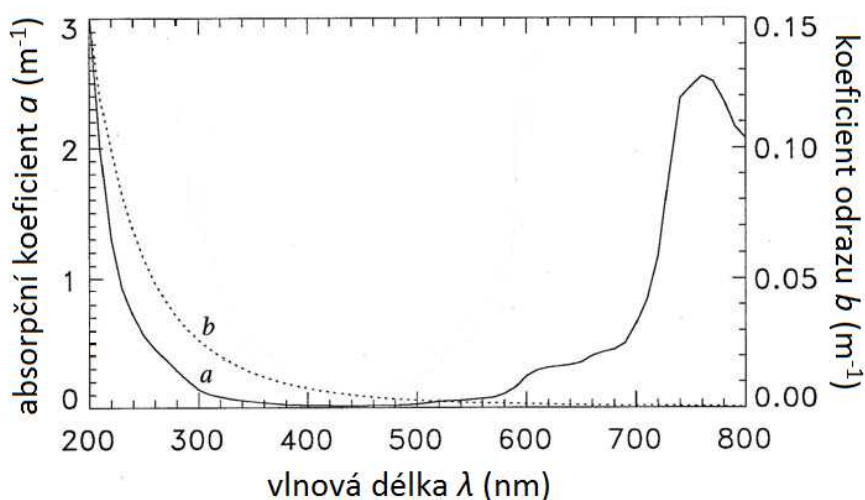
2.4. Složení vody a její spektrální chování

Voda, která se vyskytuje v přírodě, je směsí čisté vody a mnoha dalších látek organického i anorganického původu. Každá z těchto složek má specifické absorpční a odrazivé vlastnosti závislé na vlnové délce dopadajícího záření. Při interakci s těmito látkami se specificky mění intenzita a vlnové délky dopadajícího elektromagnetického záření. Při dálkovém průzkumu vodních ploch se využívá odrazivosti, která je závislá na typu a množství těchto opticky významných substancí (OVS) ve vodě. Pokud známe optické vlastnosti látek přítomných ve vodě lze pomocí dálkového

průzkumu zpětně určit koncentrace těchto látek. (Koponen, 2006) V přírodních mořských vodách lze rozlišit celkem čtyři základní typy OVS:

a. Čistá mořská voda

Čistá voda obsahuje pouze molekuly vody a její absorpční a odrazové vlastnosti jsou dobře známy. (Obr. 2.4.1) Vytváří základ, na kterém jsou definovány ostatní typy vod podle přidávaných opticky významných látek. Sůl rozpuštěná v mořské vodě nemá významný vliv na její optické vlastnosti ve viditelné části spektra, proto lze její efekt pominout (Koponen, 2006). Čistá voda odráží ve viditelné části spektra dominantně na vlnových délkách nižších než 500 nm, to zn. ve fialové a modré části spektra a proto se nám jeví modrá.



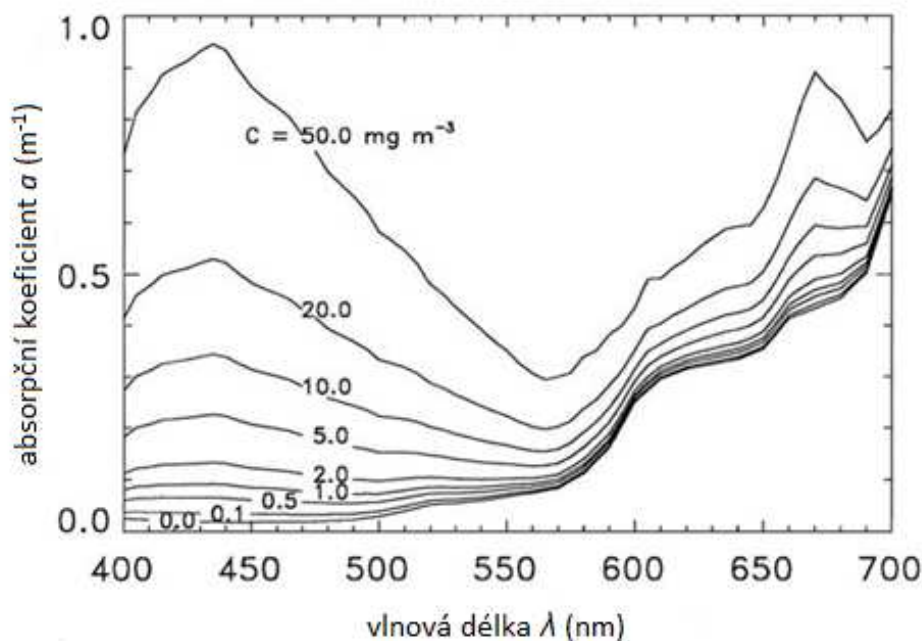
Obr. 2.4.1: Absorpční koeficient (plná čára) a koeficient odrazu (tečkovaná čára) pro čistou mořskou vodu. Zdroj: Mobley, 1994

b. Fytoplankton

Fytoplankton je pravděpodobně nejdůležitější optickou složkou vody, nazýváme jím společenstvo jednobuněčných fotosyntetizujících organismů vznášejících se ve vodním sloupci. Hlavními složkami fytoplanktonu jsou sinice a řasy. Koncentrace fytoplanktonu udává primární produkci vody. Buňky fytoplanktonu obsahují fotosyntetické pigmenty, z nichž nejdůležitější a v DPZ nejčastěji využívaný je chlorofyl-a (chl-a). Pomocí hodnot koncentrace chl-a získaných z dat DPZ, lze následně aproximovat koncentrace fytoplanktonu. Protože při fotosyntéze je využívána energie ze slunečního záření, je zřejmé, že absorpce záření chlorofylem je v určitých částech spektra vysoká. (Robinson, 1985) Obecně platí, že chlorofyl vykazuje dva absorpční vrcholy. Vyšší z nich se nachází v modré části spektra kolem 440 nm a druhý nižší v červené části spektra kolem 675 nm. Nejméně je absorbováno záření v zelené části spektra. (Mobley, 1994)

Koncentrace chlorofylu v mořské vodě se pohybuje od $0,1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ v oblastech otevřeného oceánu až po $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ v silně eutrofizovaných zálivech a deltách. Průběh absorpční křivky je závislý převážně na koncentraci fytoplanktonu (Obr. 2.4.2), záleží však také na zastoupení jednotlivých druhů.

Koeficient odrazivosti je u fytoplanktonu velice nízký, proto se předpokládá, že přidružené viry a malé organismy přispívají ke zpětnému odrazu záření pozorovanému u přírodních vod. (Koponen, 2006)



Obr. 2.4.2: Závislost absorpčního koeficientu na obsahu chl-a a na vlnové délce. Zdroj: Mobley, 1994

c. Suspendovaný anorganický materiál

Do této kategorie můžeme zahrnout písek, jílové částice a další sediment ze dna, anorganický materiál z pevniny přinášený řekami a v neposlední řadě také prach z atmosféry. Ve většině případů se jeho koncentrace snižuje se vzdáleností od pevniny. Optické vlastnosti suspendovaného anorganického materiálu jsou závislé na geologických charakteristikách dané oblasti a oblastí, ze kterých je materiál transportován řekami nebo atmosférou. Obecně lze říci, že přítomnost suspendovaného materiálu ve vodě zvyšuje její odrazivost a posouvá její maximum k vyšším vlnovým délkám. (Halounová & Pavelka, 2005) Protože jednotlivé oblasti se geologicky liší, nelze použít optické vlastnosti zjištěné v jedné lokalitě pro jinou, což výrazně omezuje možnosti aplikace algoritmů pro sledování kvality, které nebyly vyvinuty přímo pro danou lokalitu. (Koponen, 2006)

d. Rozpuštěné organické látky (Colored Dissolved Organic Matter, CDOM)

CDOM (yellow matter, gelbstoff) jsou tvořeny směsí různých fulvokyselin a huminových kyselin, jejichž zdrojem je rozklad fytoplanktonu a vodní toky, do kterých se dostávají z půdy. Vyšší koncentrace barví vodu do žluta díky zvýšené absorpci převážně v modré části spektra (Kirk, 1994) Ve viditelné části spektra má absorpční křivka CDOM průběh exponenciální funkce (absorpce je vysoká pro krátkovlnné záření a postupně se snižuje, záření o vlnové délce vyšší než 700 nm je absorbováno jen nepatrně. (Bricaud et al., 1981)

Specifické absorpční a odrazové koeficienty jednotlivých optických složek závislé na jejich koncentraci po sečtení udávají tzv. celkový absorpční $a_{tot.}(\lambda)$ respektive odrazový $b_{tot.}(\lambda)$ koeficient (Koponen, 2006):

$$a_{tot.}(\lambda) = a_w(\lambda) + a_y(\lambda) + C_{ph}.a_{ph}(\lambda) + C_s.a_s(\lambda) \quad (\text{Rovnice 2.4.1})$$

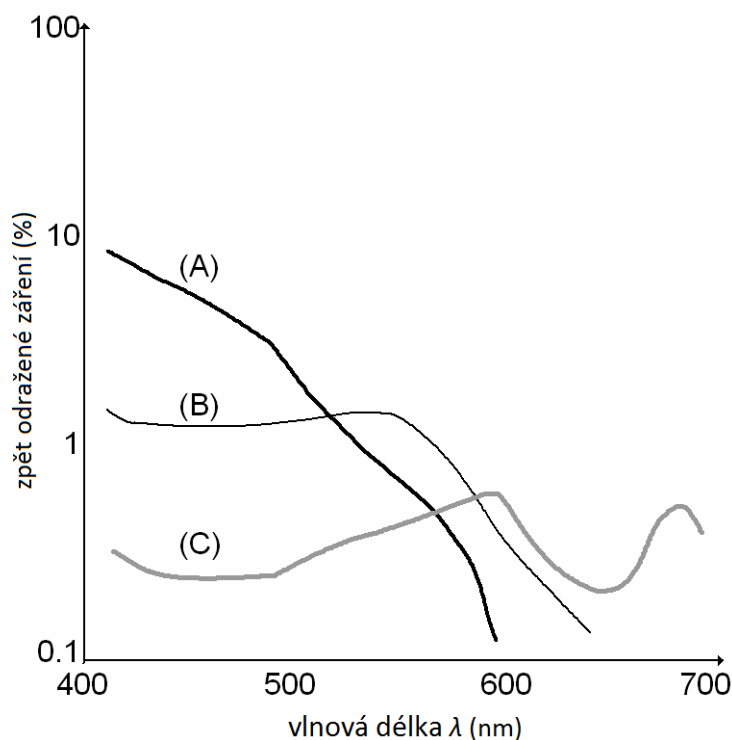
$$b_{tot.}(\lambda) = b_w(\lambda) + C_{ph}.b_{ph}(\lambda) + C_s.b_s(\lambda) \quad (\text{Rovnice 2.4.2})$$

kde C_{ph} a C_s jsou koncentrace fytoplanktonu a suspendovaných anorganických látek a indexy w , y , ph a s vyjadřují čistou vodu, CDOM, fytoplankton a suspendované anorganické látky. CDOM zahrnuje pouze rozpuštěné látky a proto mohou být odrazivé vlastnosti CDOM v dálkovém průzkumu ignorovány. (Koponen, 2006) Rovnice 2.4.1 a 2.4.2 mohou být použity pro sestavení tzv. bio-optických modelů.

Výraz bio-optický stav oceánských vod vyjadřuje skutečnost, že optické vlastnosti většiny těchto vod jsou determinovány biologickou aktivitou. Bio-optické modely představují nástroj pro analýzu a následně předpověď optických vlastností vodního tělesa jako funkce úrovně biologické aktivity, respektive obsahu chl-a. Modely jsou ve většině případů empirické a odvozené od pozemních měření. Pokud jsou rozeznány statisticky významné empirické vztahy mezi optickými vlastnostmi a obsahem chl-a lze model obrátit a použít pro předpověď chl-a hodnot na základě optických vlastností získaných pomocí DPZ. Pro opticky komplexní pobřežní vody, které nejsou dominovány pouze fytoplanktonem, jsou někdy vyvíjeny tzv. bio-geo-optické modely, které zohledňují i obsah suspendovaných sedimentů- Tyto modely jsou však aplikovatelné pouze na oblasti, pro které byly vytvořeny. (Morel & Maritorena, 2001)

V roce 1977 Morel a Prieur rozdělili oceánské vody na vody první kategorie (Case 1) a vody druhé kategorie (Case 2) a jakousi přechodnou kategorií mezi nimi. Dnes se užívá dělení, které se vyvinulo z definic, které tito autoři vytvořili, avšak upustilo se od přechodné kategorie a zůstalo pouze základní dělení. (Mobley et al., 2003) Case 1 vody představují vody, jejichž optické vlastnosti jsou determinovány převážně obsahem fytoplanktonu a na něm závislých rozpuštěných organických látek (CDOM). Case 1 vody mohou být jak velmi čiré (oligotrofní) tak značně kalné (eutrofické), v závislosti na obsahu fytoplanktonu. (Mobley, 1994) Do druhé kategorie (Case 2) řadíme všechny ostatní vody, jejichž optické vlastnosti jsou výrazně ovlivněny jinými složkami, jako např. obsahem minerálních částic, CDOM nebo mikrobublin, které nesouvisí s obsahem fytoplanktonu. (Mobley et al., 2003) Optická složitost Case 2 vod značně ztěžuje možnosti dálkového průzkumu těchto vod a získání přesných hodnot koncentrace jednotlivých složek. Byly vyvinuty metody pro získání koncentrací chl-a z pobřežních a pevninských vod z multispektrálních družicových dat. (Van Der Woerd & Pasterkamp, 2008) Tyto metody zahrnují např. použití podílu odrazivosti v blízkém infračerveném a červeném pásmu nebo inverzních bio-geo-optických modelů (Morel & Maritorena, 2001)

Graf (Obr. 2.4.3) představuje procento zpětně odraženého záření v závislosti na obsahu různých optických složek vody.



Obr. 2.4.3: Procento slunečního záření odražené zpět vzhůru povrchovou vrstvou oceánu v závislosti na vlnové délce. (A) čistá voda v otevřeném oceánu, nízká koncentrace chl-*a* (Case 1), (B) střední koncentrace fytoplanktonu, otevřený oceán (Case 1), (C) kalné pobřežní vody s vysokým obsahem suspendovaných a rozpuštěných látek a fytoplanktonu (Case 2) (Koponen, 2006)

2.5. Obrácené (inverzní) úlohy v dálkovém průzkumu Země

Hlavní úlohou DPZ je nalezení správného vztahu mezi naměřenými radiometrickými hodnotami a parametry krajiny, které pro nás představují hledanou informaci. Soubor vlastností sledovaného objektu představuje tzv. vnitřními parametry měření. Jako vnější parametry měření se označují vlastnosti přístroje, atmosférické vlivy, intenzita dopadajícího záření a geometrické uspořádání experimentu. Pokud jsou v každém místě měření známy všechny vnější a vnitřní parametry a všechny charakteristiky dopadajícího záření lze v daném místě určit hodnoty radiometrických veličin odraženého nebo emitovaného záření. (Kolář, 2008) V dálkovém průzkumu se však používá úloha obrácená, kdy jsou na základě známých hodnot radiačních veličin a charakteristik dopadajícího záření určovány vnitřní parametry sledovaných objektů.

Při sledování kvality vody je obrácenou úlohou určení bio-fyzikálních vlastností vody z naměřených hodnot záře dopadající na senzor. Tento proces lze rozdělit do dvou částí:

- a. určení základních optických vlastností (IOP) z naměřených hodnot záře

Pro určování hodnot základních optických vlastností jsou využívány modely přenosu záření (radiative transfer models), které modelují interakce při průniku záření látkovým prostředím (vodou a atmosférou). Nejvyužívanějšími a nejobecnějšími z těchto modelů je Monte Carlo Radiative Transfer Code, HYDROLIGHT radiative transfer model, či Matrix Operator Method (Pedrero, 2009)

b. určení koncentrací optických složek vody z hodnot IOP

K tomuto účelu jsou využívány tzv. bio-optické modely. Výraz bio-optický stav oceánských vod vyjadřuje skutečnost, že optické vlastnosti většiny těchto vod jsou determinovány biologickou aktivitou. Bio-optické modely představují nástroj pro analýzu a následně předpověď optických vlastností vodního tělesa jako funkce úrovně biologické aktivity, respektive obsahu chl-a. Modely jsou ve většině případů empirické a odvozené od pozemních měření. Pokud jsou rozeznány statisticky významné empirické vztahy mezi optickými vlastnostmi a obsahem chl-a lze model obrátit a použít pro předpověď chl-a hodnot na základě základních optických vlastností. Pro opticky komplexní pobřežní vody, které nejsou dominovány pouze fytoplanktonem, jsou někdy vyvíjeny tzv. bio-geo-optické modely, které zohledňují i obsah suspendovaných sedimentů. Tyto modely jsou, však aplikovatelné pouze na oblasti, pro které byly vytvořeny. (Morel & Maritorena, 2001)

Pro implementaci obou částí procesu se v dnešní době stále častěji používají umělé neuronové sítě (NN – Neural Networks). Jedná se o algoritmy snažící se napodobit procesy probíhající v nervové soustavě. Jsou složeny z mnoha jednoduchých jednotek (neuronů) vzájemně propojených do sítě, které napodobují funkci biologických neuronů. Proces zpracování dat pomocí NN se podobá způsobu učení člověka. NN mají zpravidla vysoký počet vstupů, výstup je pak nelineární funkcí váženého součtu těchto vstupů. Váhy přiřazené každému ze vstupů jsou určovány na základě procesu učení, kdy jsou generované výstupy srovnávány s tzv. cílovými výstupy (známými hodnotami). Získané odchylky mezi známými hodnotami a získanými výstupy slouží jako zpětná vazba pro úpravu vah. Učení probíhá na souboru cvičných dat, když je proces dostatečně dobře natrénován pak stejný vstup dává stejný výsledek i bez jejich použití. (Dobrovolný, 1998) K výhodám NN patří, že lze kombinovat vstupní data různé povahy, k nevýhodám pak potřeba velkého množství cvičných dat.

2.6. Hodnocená území

Výzkum byl prováděn na dvou odlišných oblastech, jejichž výběr byl podmíněn převážně dostupností dat z pozemního měření a bezmračných družicových snímků. Vybrány nakonec byly oblast průlivů Skagerrak a Kattegat a jejich blízkého okolí a oblast Golfe du Lion (Lví záliv) při středomořském pobřeží Francie.

Průlivy Skagerrak a Kattegat se rozkládají mezi Skandinávským a Jutským poloostrovem, na jejich březích se nacházejí tři země Norsko, Švédsko a Dánsko. Skagerrak je 300 km dlouhý a 110 až 130 km široký, rozkládá se na ploše 32 000 km² a jeho průměrná hloubka je 210 m. Kattegat se s délkou 270 km a šířkou 60 – 160 km rozkládá na ploše o něco menší (22 000 km²) a jeho průměrná hloubka je pouze 23 m. Dohromady tvoří vnitřní zakončení Norského žlebu, který se táhne podél břehů Skandinávského poloostrova, místy dosahuje hloubky až 809 m a má charakter hlubokého fjordu spojujícího Norské a Baltské moře. (SMHI, 2007) Povrchový proud brakické vody z Baltského moře přináší velké množství živin podél švédského (Baltský proud) a norského pobřeží (Norský pobřežní proud). Silně slaná (35.0 ‰ a více) voda ze střední a severní části Severního moře proudí ve větších hloubkách do oblasti Skagerraku, kde cirkuluje. Voda z jižní části Severního moře bohatá na živiny proudí podél dánského pobřeží jako Jutský proud,

hodnoty salinity se pohybují kolem 31.0‰. (Sørensen & Aas & Høkedal, 2007) U švédských břehů se část vody přidává k severnímu proudění pod povrchovým Baltským proudem a část proudí skrz Kattegat a Dánské úžiny do Baltského moře. (Leppäranta & Myrberg, 2009)

Do průlivů ústí několik větších řek, z nichž nejvýznamnější jsou norská Glomma ústící do Skagerraku a švédská Göta Älv vlévající se do Kattegatu, v jejím ústí se nachází největší skandinávský přístav Göteborg. Sladká voda z řek Skandinávského poloostrova se mísí s povrchovým Baltským a Norským pobřežním proudem a dále snižuje jejich salinitu. Řeky přinášejí velké množství dusíku a fosforu z antropogenních zdrojů. Podle zprávy Švédského meteorologického a hydrologického ústavu byl v letech 2001-2002 celkový přísun dusíku z pevniny, atmosféry a z Baltského moře do oblasti průlivů 355 kt/rok. Celá oblast kromě nepobřežní části Skagerraku byla klasifikována jako problémová oblast postižená eutrofizací v důsledku nadměrného přísunu živin. (SHMI, 2007)

Druhou oblastí zkoumanou v této práci je Golfe du Lion (Lví záliv) rozkládající se pod jihem Francie ve Středozezemním moři. Tento otevřený záliv leží mezi městy Marseille, Montpellier a Perpignan, na většině francouzského regionu Languedoc-Roussillon. Má přibližně půlkruhový tvar s rádiusem cca 100 km. Je to největrnější část Středozezemního moře, silné severozápadní větry se zde vyskytují celoročně a výrazně ovlivňují promíchávání vodních mas v oblasti šelfu. (Millot, 1990) Záliv je charakteristický výstupnými proudy přinášejícími chladnou hlubinnou vodu k povrchu. Často zde dochází k rychlým změnám teploty nebo vzniku front oddělujících teplejší vodu Ligurského proudu od chladných vod zálivu.

Do zálivu ústí několik větších řek, a to Tech, Têt, Aude, Orb, Hérault, Vidourle, a nejvýznamnější Rhône. Středozezemní moře je považováno za jednu z nejvíce oligotrofních oblastí na světě. Avšak v pobřežních zónách ovlivněných splachem živin ze zemědělských ploch a jiných antropogenních zdrojů dochází k eutrofizaci. Lví záliv se řadí mezi oblasti s největší biologickou produktivitou ve Středozezemním moři. (Qiu & Doglioli & Carlotti, 2010) Pobřeží zálivu je velmi hustě osídleno a v letní sezóně sem dorazí velké množství turistů, řeky ústící do zálivu přinášejí velké množství živin převážně dusičnanů a fosforu, to vše přispívá ke zhoršování situace v oblasti.

V roce 2008 byla Evropským parlamentem přijata rámcová směrnice o strategii pro mořské prostředí (Marine Strategy Framework Directive). Každý dotčený členský stát musí do roku 2012 vypracovat strategii pro své mořské oblasti, ta zahrnuje vymezení charakteristických rysů, podle nichž se bude definovat ideální stav prostředí dále posouzení současného stavu a vytyčení cílů programu. Do roku 2015 musí členské státy vytvořit program pro dosažení těchto cílů do roku 2020. Členské státy musí provádět hodnocení dopadu jimi zavedených opatření, včetně analýzy nákladů a přínosů. Rovněž musí předložit k posouzení klíčové kroky podniknuté v rámci plnění svých strategií.

2.7. Vybrané výzkumy kvality vody v pobřežních oblastech

Cílem této části práce je analýza současného stavu a možností využití družicových dat v monitoringu kvality vody v pobřežních oblastech. Jsou zde zmíněny vybrané studie provedené od roku 2000, využívající data ze senzoru MERIS a empirické modelování s *in situ* daty analyzovanými v laboratoři. Také jsou zde zmíněny některé studie kladoucí si za cíl vývoj, optimalizaci a validaci algoritmů a metod pro sledování optických složek Case 2 vod.

Koponen (2006) se zabývá vývojem a testováním empirického modelování pro hodnocení kvality vody ve finských jezerech a pobřežních oblastech. Využívá data pořízená třemi senzory a to Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA), Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) na družici Envisat a Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) na družici TERRA. Data MERIS full resolution (300 m) jsou zde použita pro určení obsahu chl-a, celkových suspendovaných pevných látek (TSS) a hodnoty absorpčního koeficientu rozpuštěných organických látek (CDOM). K získání informace Koponen používá algoritmy založené na jednotlivých kanálech nebo jejich poměrech, které jsou kalibrovány a testovány s pozemními daty.

Skupina autorů Härmä et al. (2001) se zabývá možnostmi kombinace kanálů vlnových délek senzoru Envisat MERIS pro monitorování parametrů kvality vody ve finských jezerech a pobřežních oblastech. Semi-empirické algoritmy se simulovanými družicovými daty byly testovány proti měřením *in situ* pomocí regresních analýz. Pro získání hodnot koncentrace chlorofylu se jako nejvhodnější se ukázal poměr kanálů 9 (705 nm) a 7 (665 nm). Kombinace (L705-L775)/(L665-L775) tzn. kanálů 7, 9 a 12 vysvětluje 90% rozptylu v naměřených datech při použití *in situ* dat jak z jezer, tak z pobřeží. Pro množinu dat pouze z pobřežních oblastí je koeficient determinace R^2 o něco nižší (0,79). Na data nebyla aplikována žádná atmosférická korekce, přesto bylo možné na data z různých kampaní použít stejný model, to bylo pravděpodobně umožněno použitím kanálů 7 a 9 se středem na 665 nm a 705 nm. Rozptyl vlivem atmosféry je na obou vlnových délkách velmi podobný a proto se eliminuje použitím poměru kanálů.

Ve studii Kratzer & Brockmann & Moore (2008) se autoři pokouší zhodnotit, jsou-li MERIS full resolution (FR) data vhodná pro monitoring optických konstituentů vody v norském fjordu Himmerfjärden. Autoři se dále zaměřili na porovnání procesoru FUB Case 2 Plug-in a standardního procesoru (MEGS-4). Pro porovnání byla využita data se sníženým rozlišením (RR) z otevřeného moře. Výsledky jsou v obou případech srovnány s daty naměřenými *in situ*. Pro zpracování byl použit software ESA BEAM, aplikace VISAT vyvinutá pro vizualizaci, zpracování a analýzu produktů MERIS a dalších senzorů na družici Envisat. Výsledky ukázaly, že přesnost procesoru FUB je relativně vysoká pro otevřené Baltské moře (SD 6-17%), ale přesnost MEGS 7.4 se ukázala jako nízká (43-73%). Závěrem je tvrzení, že se přesnost družicových dat zvyšuje s použitím FUB Case-2 procesoru a správnost výstupů se zlepšuje s vyšším prostorovým rozlišením.

Cui et al. (2010) se zaměřuje na validaci level 2 „MERIS ocean-color products“ se sníženým rozlišením (RR) v Bohaiském moři. Jedná se o případovou studii pro turbidní pobřežní vody. Byl shromážděn obsáhlý soubor *in situ* dat, obsahující hodnoty spektrálně normalizované záře těsně nad vodní hladinou L_{wn} , koncentrace suspendovaných pevných látek a chl-a. Následně byla tato data za přísných podmínek časově a prostorově spárována s družicovými daty. Nejpresnější se ukázaly hodnoty MERIS L_{wn} , naopak přesnost MERIS Chl-a dat byla výrazně nižší.

Van Der Woerd & Pasterkamp (2008) představují HYDROPT algoritmus pro Case-2 vody, sloužící pro získání hodnot chl-a a z multispektrálních měření opticky komplexních pobřežních vod. HYDROPT algoritmus získává koncentrace chl-a minimalizováním rozdílu mezi modelovanými a pozorovanými spektry odrazivosti. Autoři kombinují práci Garvera a Siegela

(1997) s výstupem z modelu HYDROLIGHT numerical radiative transfer model. Algoritmus byl testován s daty MERIS RR L2 naměřenými nad Severním mořem s přijatelnými výsledky.

Hlavním cílem studie Yang et al. (2011) bylo navrhnout novou metodu extrakce hodnot optických konstituentů vody spojením a optimalizací několika semi-analytických algoritmů a vyhledávací tabulky (LUT) obsahující regresní koeficienty pro každý konstituent (Chl-a, CDOM, tripton). Metoda byla ověřena pomocí tří souborů dat (simulovaná bez šumů, *in situ* data, MERIS data).

Projekt Regionální validace MERIS chlorofyl-a produktů v Severním moři (REVAMP, spuštěn 1. února 2002 a ukončen 31. ledna 2005) je zaměřen monitoring stupně trofie a na důsledky úbytku živin Severním moři pomocí měření a validace klíčového bio-optického parametru (koncentrace chl-a) s využitím družicových dat ze senzoru MERIS. Dalším cílem projektu je vyvinutí algoritmu REVAMP chl-a, který je součástí REVAMP MERIS Regional CHL-Products Processor (MEP) software, pro získání hodnot koncentrace chl-a z dat MERIS na regionální úrovni. Hlavním výstupem projektu je atlas koncentrací chl-a v Severním moři v roce 2003.

3. DATA

Tato část studie se zabývá rozбором dat použitých pro analýzu, Jejich výsledky byly pak srovnávány s pozemními daty, která jsou popsána níže. Při výběru vhodných dat bylo nutné dbát především na minimalizaci časové odchylky mezi družicovými a pozemními daty, protože obsah chl-a je faktorem značně proměnlivým v čase. Dostupnost dat *in situ* obsahujících dostatečný počet měření v krátkém časovém intervalu je velmi omezená.

3.1. Družicová data

Družicová data použitá v této studii pocházejí ze senzoru MERIS, který je jedním z deseti přístrojů nesených družicí Envisat (Tab. 3.2.1), ta byla vynesena na oběžnou dráhu 1. března 2002 raketou Ariane 5 a je největší postavenou družicí pro dálkový průzkum Země.

- Obíhá Zemi po helio-synchronní polární dráze ve výšce 800 km.
- Zemi nasnímá za 35 dní.
- Doba jednoho oběhu je 100,59 min.
- Jeden cyklus (mezi snímáním stejného místa) se skládá z 501 oběhů.

ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar	Oceán a pobřeží (oceánské proudy a topografie), pevnina (topografie), sníh a led
MERIS	Medium Resolution, Imaging Spectrometer	Oceán (ocean colour/biologie), pevnina (vegetace), atmosféra (oblačnost/srážky)
AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer	Atmosféra (oblačnost/srážky), pevnina (vegetace), oceán a pobřeží (povrchová teplota)
RA-2	Radar Altimeter 2	Sníh a led (mořský led), Atmosféra (proudění), pevnina (topografie), oceán a pobřeží (vlnění, proudy, topografie)
MWR	microwave radiometer	Atmosféra (teplota)
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars	Atmosféra (chemie, ozón)
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding	Atmosféra (ozón, změna klimatu/Kyoto, chemie, radiace/teplota)
SCIAMACHY		Zemědělství (úroda), atmosféra (ozón), oceán a pobřeží (ocean Colour/biologie a rybářství)
DORIS	The Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by	Tektonika/seismická aktivita, přírodní katastrofy (sesuvy)
LRR	Laser Retro-Reflector	

Tabulka 3.1.1: Přístroje na Envisatu a jejich využití (MERIS Produkt Handbook, 2006)

Optické a radarové přístroje umístěné na Envisatu poskytují kontinuální měření atmosféry, oceánu, země a ledu. (Tab. 3.1.1)

Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) je pasivní senzor využívající sluneční záření jako zdroj energie. Šířka záběru tohoto radiometru je 68,5°, tzn. 1150 km, což umožňuje pokrytí Země za tři dny. (European Space Agency, 2006) MERIS využívá princip stíracího skeneru (push-broom), kdy je snímání řádku kolmo na směr pohybu zajišťováno pomocí řádkového nebo maticového uspořádání detektorů umístěných v ohniskové rovině objektivu. Každý detektor

registruje záření z plochy jednoho pixelu. U tohoto typu skeneru je zajištěna návaznost pixelů ve směru řádky a eliminována chyba vznikající pohybem nosiče v průběhu skenování řádky, protože v zorném poli skeneru se nachází neustále celá skenovaná řádka. Skenování ve směru pohybu je zajištěno pohybem satelitu. (Kolář, 2008)

Produkty MERIS jsou nabízeny v plném prostorovém rozlišení 290 m x 260 m (Full resolution) nebo ve sníženém prostorovém rozlišení s velikostí pixelu 1200 m x 1040 m (Reduced resolution). Hodnoty pixelů při sníženém rozlišení jsou získávány zprůměrováním 16 pixelů plného rozlišení.

Senzor snímá celkem v 15 pásmech vlnových délek ve viditelné a blízké infračervené části spektra (390 nm až 1040 nm). Každé pásmo má programovatelnou pozici a šířku (od 1,25 nm do 30 nm). (Tab 3.1.2)

číslo pásma	střed pásma (nm)	šířka pásma (nm)	využití
1	412,5	10	CDOM a pigmenty odumřelé organické hmoty
2	442,5	10	absorpční maximum chlorofylu
3	490	10	chlorofyl a ostatní pigmenty
4	510	10	suspendovaný sediment, red tides
5	560	10	absorpční minimum chlorofylu
6	620	10	suspendovaný sediment
7	665	10	absorpce chlorofylu a fluorescence
8	681,25	7,5	maximum fluorescence chlorofylu
9	708,75	10	fluorescence, atmosférické korekce
10	753,75	7,5	vegetace, oblačnost, absorpce O ₂
11	760,625	3,75	O ₂ R-branch absorption band
12	778,75	15	atmosférické korekce
13	865	20	atmosférické korekce
14	885	10	vegetace, vodní pára
15	900	10	vodní pára

Tabulka 3.1.2: Přehled pásem vlnových délek senzor (MERIS Produkt Handbook, 2006)

MERIS nabízí tři úrovně zpracování dat. Produkty první úrovně (Level 1b) snímky v 15 pásmech vlnových délek s hodnotami pixelů kalibrovanými na zář dopadající na svrchní hranici atmosféry (TOA – Top Of Atmosphere). Produkty druhé úrovně (Level 2) jsou odvozené z Level 1b snímků s hodnotami pixelů kalibrovanými na hodnoty vybraných geofyzikálních parametrů pozorovaného povrchu. Pro tyto produkty byla provedena atmosférická korekce a reprezentují hodnoty odrazivosti. Produkty třetí úrovně (Level 3) jsou syntézou syntézou dvou a více MERIS produktů nebo externích dat s cílem získat hodnoty geofyzikálních měření pro určité časové období. (European Space Agency, 2006)

V této práci byla použita MERIS Level 1b data plného rozlišení (FR):

	datum	začátek snímání
Gulf du Lion		
1	17.4.2003	09:58
2	3.5.2003	09:57
3	10.6.2003	10:01
4	19.8.2003	10:01
5	25.10.2003	09:55
Skagerrak a Kattegat		
1	8.5.2006	09:48
2	12.6.2006	09:48
3	16.7.2006	10:19
4	5.8.2006	09:51
5	21.9.2006	10:14

Tabulka 3.1.3: Použité snímky MERIS

Data jsou poskytována Evropskou vesmírnou agenturou pro výzkumné účely.

3.2. Pozemní data

Pozemní měření byla v této práci použita pro posouzení vhodnosti nástrojů použitých pro zpracování družicových dat. Tato data byla získána z National Oceanographic Data Center (NODC). Všechna měření pocházejí ze stejného dne jako snímek dané oblasti. Celkem bylo získáno celkem 21 odběrových míst pro Lví záliv (Golfe du Lion) a 3 odběrová místa pro oblast průlivů Skagerrak a Kattegat. Avšak kvalita vody se v těchto oblastech rychle mění a proto bylo nutné vymezit maximální časový rozdíl času pořízení snímku 5 hodin. Tomuto kritériu vyhovovalo 10 měření pro oblast Lvího zálivu (Obr. 3.2.1) a všechna tři měření pro Skagerrak a Kattegat (Obr. 3.2.2). (Tab. 3.2.1)

Golfe du Lion 17. 4. 2003

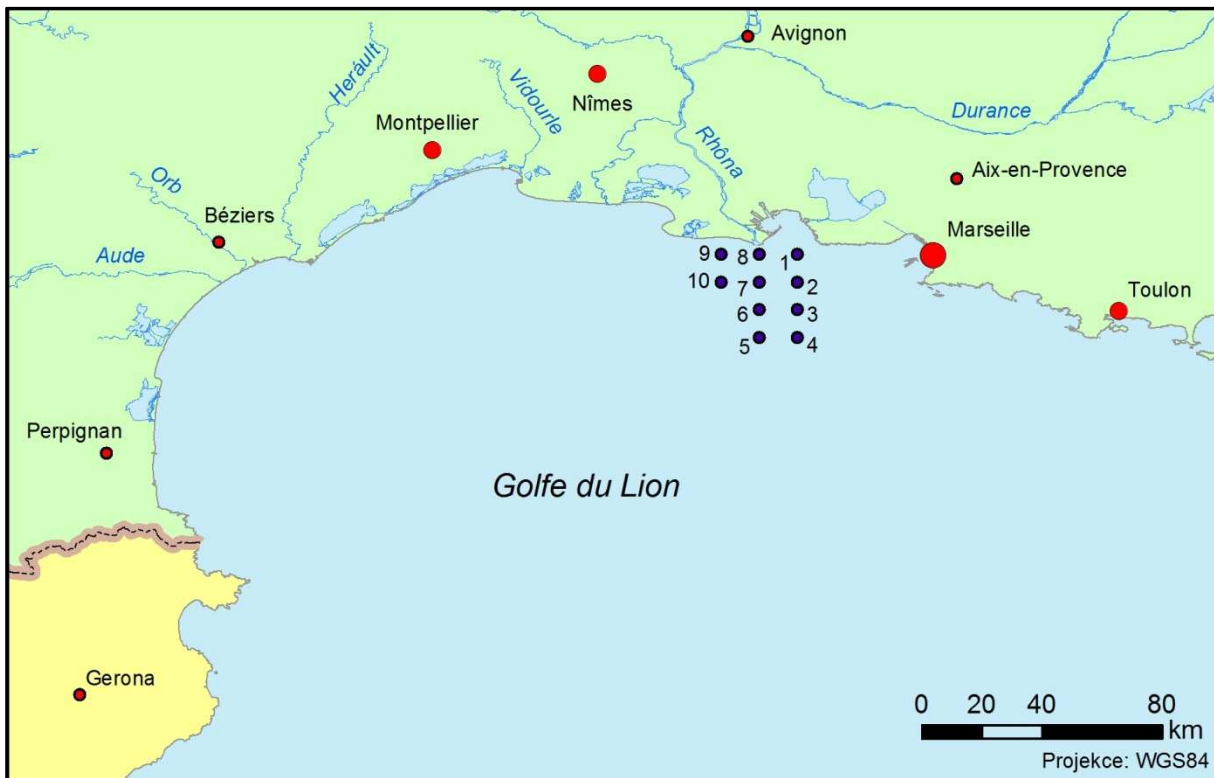
číslo	zeměpisná šířka [°]	zeměpisná délka [°]	čas	chl-a (0 m) [mg/m ³]
1	43,298	4,965	7:09	0,55
2	43,215	4,965	8:05	0,34
3	43,132	4,966	8:52	0,30
4	43,048	4,965	9:45	0,25
5	43,048	4,851	10:40	0,37
6	43,132	4,851	11:31	0,65
7	43,215	4,851	12:20	0,49
8	43,298	4,851	13:10	2,26
9	43,298	4,738	14:10	1,09
10	43,215	4,738	14:57	0,84

Skagerrak a Kattegat 21. 9. 2006

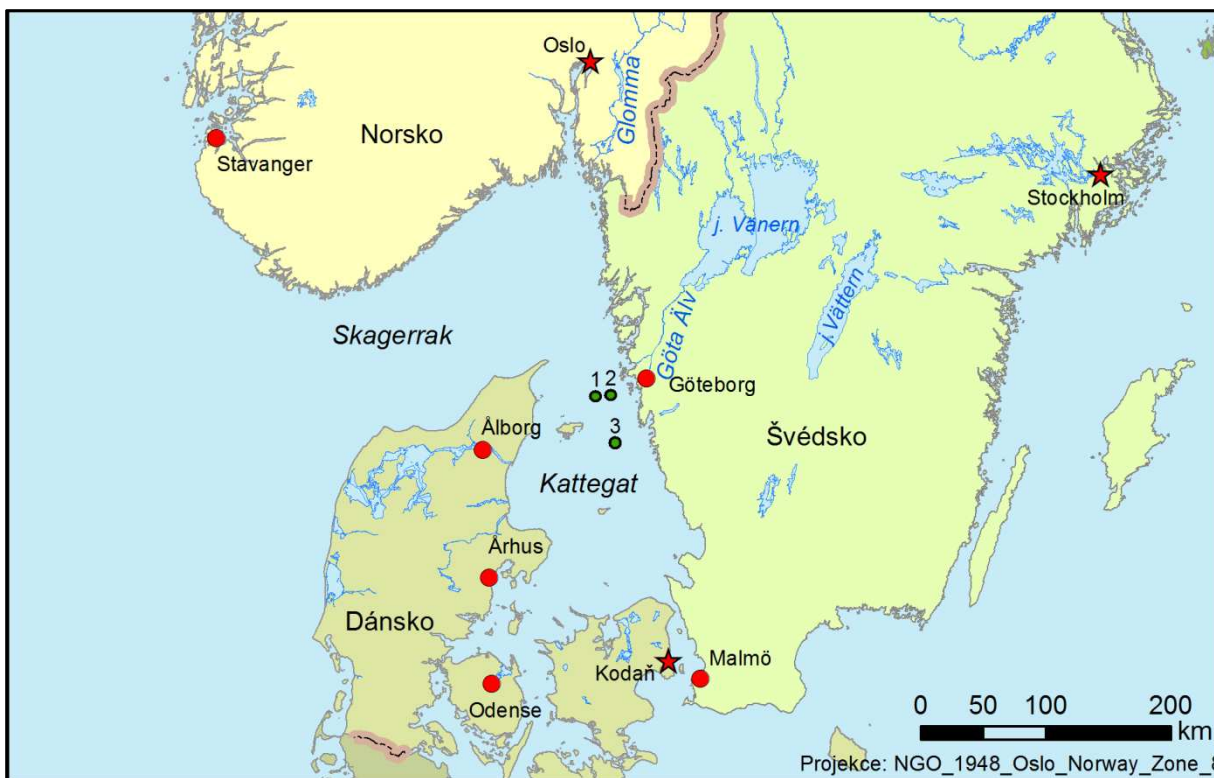
1	57,53	11,325	5:32	8,80
2	57,55	11,525	6:49	11,9
3	57,205	11,647	9:11	13,9

Tabulka 3.2.1: Odběrová místa a hodnoty chl-a

Hodnoty koncentrace chlorofylu jsou získávány laboratorně ze vzorků odebraných v terénu. Koncentrace je udávána v mg/m^3 . Obsah chl-a je základním ukazatelem množství biomasy řas a je prakticky jedinou analytickou metodou, kterou lze použít pro aproximaci koncentrace fytoplanktonu.



Obr. 3.2.1: Mapa pozemních měření – Golfe du Lion (Lví záliv), Francie



Obr. 3.2.2: Mapa pozemních měření – Oblast Skagerraku a Kattegatu

4. METODIKA

Metodické postupy použité v této práci byly převzaty z literatury a v některých případech pozměněny aby lépe vyhovovaly cílům a podmínkám této studie. Byly použity celkem 3 algoritmy, z nichž dva slouží pro získání absolutních hodnot koncentrace chl-a z opticky složitějších vod a třetí k vyjádření pouze relativních hodnot zvýšené koncentrace chl-a.

4.1. Použitý software

V této práci byly použity programy:

- SW BEAM (VISAT) – zde bylo provedeno předzpracování a analýza snímku pomocí plugin nástrojů
- ESRI ArcGIS 10 – zde byly provedeny operace pro porovnání hodnot s pozemními měřeními a export výsledků do tabulkové podoby, byly zde také provedeny operace vizualizace dat
- EOLi-SA (Earth Observation Link - Stand Alone) - aplikace vytvořená ESA, která nabízí nahlížení do množství katalogů družicových dat a po registraci i jejich objednávání, zde byl proveden výběr snímků vhodných pro tuto práci

4.2. Obecné metody pro zpracování družicových snímků

Zpracování obrazové informace získané pomocí DPZ lze rozdělit do několika fází. Dobrovolný (1998) jmenuje celkem šest částí: předzpracování obrazu, zvýraznění obrazu, extrahování informace, studium dynamiky jevů, modelování s obrazovými daty a integrace obrazových dat a jejich vstup do GIS.

Předzpracování zahrnuje aplikaci geometrických, radiometrických a atmosférických korekcí k eliminaci chyb vzniklých v průběhu vytváření obrazu. Operace zvýraznění mají za cíl zjednodušení interpretace obrazu a zvýraznění vybraných důležitých vlastností objektů a jevů. Patří sem zvýraznění kontrastu, zvýraznění okrajů a čar a barevné zvýraznění. Do fáze extrahování informace je zahrnuta na prvním místě klasifikace obrazu. Proces digitální klasifikace nahrazuje vizuální interpretaci automatizovaným procesem s cílem rozlišení a identifikace jednotlivých povrchů a objektů. (Dobrovolný, 1998) Klasifikace se provádí na základě tzv. klasifikačních pravidel, která vyjadřují vztah mezi určitou třídou či hodnotou a velikostí naměřené radiační veličiny. Klasifikační pravidla jsou tvořena pomocí příznaků, neboli takových hodnot měřených veličin, kterým lze s dostatečnou věrohodností přiřadit konkrétní hodnoty vnitřních parametrů. Příznaky mohou být spektrální, polarizační, prostorové nebo časové, příznakem pak může být i velikost pixelu atd. Studium dynamiky jevů lze dnes provádět pomocí DPZ díky krátké periodě mezi snímáním určitého místa. Data pak lze použít ke studiu změn objektů a jevů v čase. Cílem modelování s obrazovými daty je odvození kvantitativních vztahů mezi daty DPZ a např. určitými bio-fyzikálními parametry sledovaných objektů, získanými pomocí pozemního měření či pozorování. Data dálkového průzkumu lze použít ke kvantitativnímu vyjádření takových parametrů jako je koncentrace chl-a ve vodě, radiační teplota a další. Poslední fáze integrace obrazových dat a

jejich vstup do GIS zahrnuje propojení s jinými geografickými daty či kombinaci s jinými rastrovými daty.

4.3. Předzpracování

Ve fázi předzpracování jsou na obrazová data aplikovány korekční úpravy odstraňující geometrická a radiometrická zkreslení obrazu. Některé chyby, jako například chyba ze zakřivení Země, jsou opakované a lze je snadno modelovat. Takové chyby nazýváme systematické a k jejich korekci často dochází již na přijímací stanici. Na pořizovaná data však působí mnoho náhodných faktorů, jako například poruchy detektorů či vlivy atmosféry, tyto chyby se označují jako náhodné a tvoří tzv. šum.

Nezpracovaná data DPZ obvykle obsahují významné geometrické nepřesnosti a nelze je proto použít pro tvorbu map. Vzájemná poloha objektů v obraze neodpovídá skutečnosti a obraz nemá jednotné měřítko, nelze proto měřit vzdálenosti ani plochy. Příčin geometrického zkreslení je mnoho, patří sem chyby spojené s funkcí měřicí aparatury např. aberační chyby optického systému, nelineárnost skenovacího pohybu, atd. Dále sem patří chyby způsobené otáčením Země (u nosičů na polární dráze se projevuje posunem začátku následné řádky k západu), chyby ze zakřivení zemského povrchu a poziční chyby způsobené lokální topografií (výrazné hlavně u letadlových měřičů). Při měření pod velkými úhly dochází k protahování pixelu podél řádky a zhoršuje se prostorové rozlišení, při skenování pod úhly většími než 45° je pak nutné počítat i s chybou která vzniká zobrazením dat na rovinnou plochu. Poslední skupinou jsou chyby typické pro mechanické skenery.

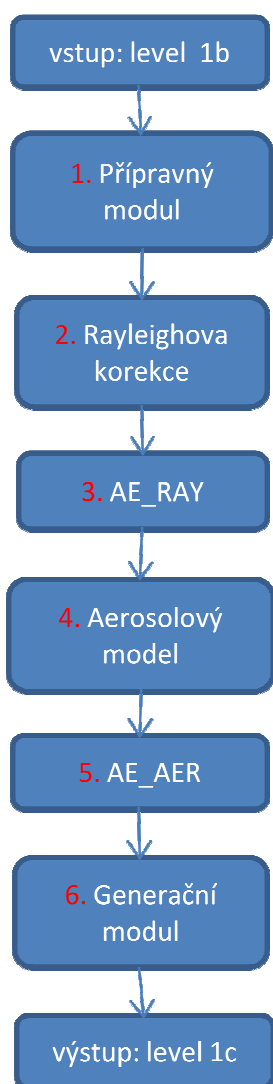
V důsledku řady vlivů neodpovídají naměřené DN hodnoty pixelů skutečným radiometrickým charakteristikám objektů či povrchů. Ke zkreslení dochází vlivem atmosféry, při vzniku obrazu v optickém systému, při určování velikosti naměřené veličiny a při jejím záznamu a v neposlední řadě sem patří i zkreslení způsobená různou intenzitou dopadajícího záření či rozdílnými směry pozorování odraženého nebo emitovaného záření případně i odlišnou topografií terénu. (Kolář, 2008) Pro eliminaci těchto chyb slouží radiometrické a atmosférické korekce, jejichž cílem je upravit DN hodnoty obrazu tak aby co nejvíce odpovídaly skutečným optickým charakteristikám sledovaných objektů.

Atmosférické korekce jsou složitý problém a vyžadují značně podrobné informace o parametrech atmosféry, které většinou nejsou k dispozici. Korekce vlivu atmosféry se tak většinou omezuje na odečtení společného aditivního vlivu rozptylu a záře atmosféry. Při monitoringu Case 1 vod se pro atmosférické korekce využívá předpokladu, že v blízké infračervené části spektra je pohlceno 100% dopadajícího záření. To znamená, že veškerá záře dopadající na senzor je odražena nebo emitována atmosférou. (Kratzer & Brockmann & Moore, 2007) Toto však neplatí pro opticky složitější Case 2 vody, protože látky rozpuštěné a suspendované ve vodě způsobují růst odrazivosti, která proto není rovna nule pro žádnou vlnovou délku.

Ke korekci geometrických zkreslení se využívají příslušné geometrické transformace, které lze vyjádřit analytickou rovnicí, pokud jsou známy příčiny zkreslení. U náhodných chyb však ve většině případů analytické vyjádření nelze použít. V takovém případě se používá metoda vlčovací bodů, jejímž cílem je, aby obraz geometricky co nejlépe odpovídal určitému vzoru. Vzorem může být například mapa daného území či jiný snímek stejného území.

Data MERIS 1b použitá v této práci obsahují hodnoty záře kalibrované na svrchní hranici atmosféry (TOA). Protože budou porovnávány koncentrace chl-a za určité časové období, je nutné na nich provést dodatečné radiometrické, atmosférické a geometrické korekce, aby byla data srovnatelná. Korekce byly provedeny pomocí softwaru BEAM 4.8.1 v aplikaci VISAT. Při předzpracování snímků byl nejprve aplikován ICOL Processor pro minimalizaci efektu blízkosti pevniny, následně provedena korekce „smile“ efektu pomocí Smile Correction Processor, pak atmosférická korekce pro MERIS data a nakonec ortorektifikace snímků. Postup nebyl pro všechna data stejný, protože při následovném modelování s obrazovými daty byly použity tři algoritmy s různými parametry a odlišnými požadavky na předzpracování vstupních dat. (viz. Příloha D)

ICOL+ Processor (Improved Contrast between Land and Ocean) je nástroj pro minimalizaci efektu blízkosti (AE – adjacency effect). Tento efekt je zapříčiněn odrazem a rozptylem záření směrem k senzoru v místech kde existuje výrazný rozdíl mezi sledovaným objektem a jeho okolím (např. vodní hladina a pevnina) se může projevit i do vzdálenosti větší než 30 km od pobřeží. Data pořízená spektrometry jako je MERIS často vykazují zvýšené hodnoty záře nad vodními plochami v blízkosti pevniny, zvláště v blízké infračervené a červené části spektra. Pokud není provedena korekce tohoto efektu, jsou pak zvýšené hodnoty spojovány s jinými jevy a odvozené koncentrace optických složek vody vykazují značné chyby. (ICOL+ ATBD, 2010)



Procesor ICOL využívá pro simulaci signálu dopadajícího na senzor model přenosu záření 5S code (Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum). Algoritmus je blíže popsán v dokumentaci ICOL+ ATBD (2010). Zde je pouze stručně popsána korekce efektu pro účely sledování vodních ploch druhého typu (Case 2), která je prováděna v následujících krocích (Obr. 4.3.1) :

1. Vstupem jsou data MERIS 1b (kanály 11 a 15 zůstávají nezměněny) Přípravný modul provádí transformaci TOA záře na TOA odrazivost a následnou korekci absorpce atmosférických plynů. Ta je prováděna ve třech krocích O₃, O₂ a H₂O s využitím polynomických funkcí a LUT. (blíže popsáno v MERIS Level 2 Detailed Processing Model, 2006)
2. Rayleigh modul provádí korekci Rayleighova rozptylu pro všechny pixely v obraze.
3. AE_RAY modul provádí korekci pixelů do vzdálenosti 25 MERIS RR pixelů (30 km) od pevniny pro AE (adjacency effect) + LFM* Rayleigh (Land-Fresnel Mask).
4. Je určen aerosolový model nad těmito pixely. Jedná se o Jungův model implementovaný v *Meris Ground Segment data processing prototype (MEGS)*. Typ aerosolů je určován na základě spektrální závislosti odrazivosti mezi kanály 12(775 nm) a 13(865 nm).
5. AE_AER modul provádí korekci AE + LFM* aerosol
6. Generační modul transformuje 13 kanálů MERIS odrazivosti na záři. Pro kanály 11 a 15 korekce provedena není.

+ ATBD, 2010)

* *Land-Fresnel mask* – v blízkosti pevniny a pokud se Slunce nachází nad pevninou je vazba mezi Fresnelovou odrazivostí a rozptylem na molekulách (Rayleigh) nebo na aerosolech zeslabována přítomností pevniny. Tento jev se nazývá *Land-Fresnel mask*. Korekce jsou založeny na maximální výšce dosažené odraženým přímým paprskem Z_{max} pomocí modelu přenosu záření. (ICOL+ ATBD, 2010)

Před spuštěním nástroje je nutné nastavit parametry korekce. Nejprve je nutné zvolit, pro jaký účel se korekce provádí, v tomto případě sledování oceánu v blízkosti pevniny. Následně je zaškrtnuta možnost použití AE algoritmu pro výpočet typu aerosolů v atmosféře se zvážením Case 2 vod. Dále je nutné nastavit masku oblačnosti. Jako zdroj masky byla zadána opět vstupní data a jako maskované pixely byly vybrány ty označené jako `l1_flags.BRIGHT`, tedy příliš jasné pixely korespondující s oblačností.

Atmosférické korekce jsou součástí dvou prvních z použitých nástrojů pro extrakci hodnot chl-a a jsou popsány u jednotlivých procesorů. Pro poslední nástroj byla atmosférická korekce provedena samostatně. První procesor v sobě obsahuje také radiometrickou korekci pro odstranění tzv. “smile” efektu. Při použití dvou dalších nástrojů byla nejprve tato korekce aplikována samostatně.

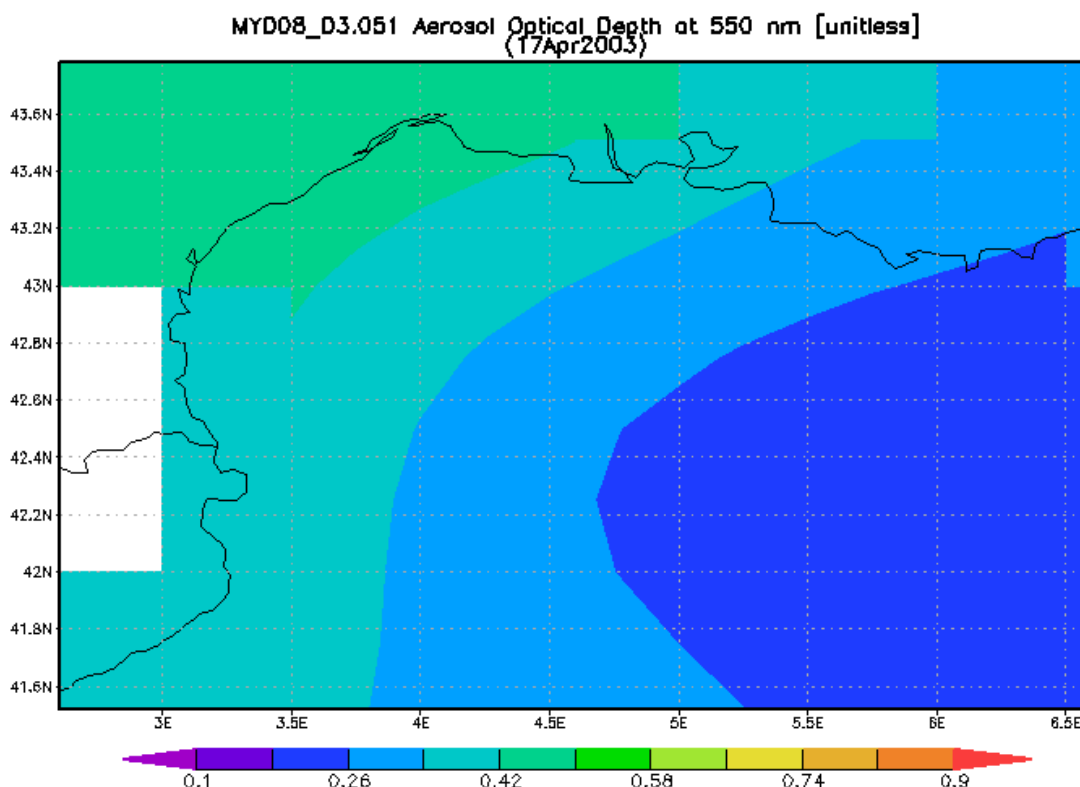
SMAC (Simplified Method for Atmospheric Correction) je zjednodušená metoda atmosférické korekce pracuje na principu semi-empirické aproximace přenosu záření v atmosféře. Vliv atmosféry na záření dopadající na senzor je v korekci definován jako součet následujících složek, které jsou pak vyjádřeny jednoduchými analytickými vztahy:

- Dvousměrná propustnost plynů v atmosféře
- Atmosférické sférické albedo
- Celková propustnost atmosféry
- Rayleighova rozptyl
- Rozptyl na aerosolech

Algoritmus pro výpočet korekce je popsán autory Rahman & Dedieu (1994). Hlavní výhodou autoři vidí v rychlosti výpočtu, která je až tisíckrát vyšší než jiné detailnější modely přenosu záření, např. 5S a 6S radiative transfer code, ze kterých autoři vychází. Zároveň tato metoda nevyžaduje předem definovanou look-up tabulku a je vhodná pro zpracování velkých objemů dat. Nevýhodou je nižší přesnost při měření s vysokými zenitovými úhly Slunce nebo v případech kdy je horizontální dohlednost nižší než 5 km.

Do výpočtu je nutné pouze doplnit hodnoty atmosférických aerosolů (AOD – Aerosol Optical Depth) na vlnové délce 550 nm pro daný den a vybrat typ oblasti (kontinentální, pouštní). Ostatní proměnné (atm. tlak při povrchu, obsah vodní páry, množství ozonu) jsou doplněny z dat ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasting), obsažených v produktech MERIS L1. Výstupem jsou hodnoty odrazivosti na povrchu.

Pro doplnění hodnot atmosférických aerosolů byla použita data z portálu GIOVANI (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>) naměřená senzorem MODIS. Data pocházejí z on-line databáze MODIS/Aqua Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Daily L3 Global 1Deg CMG (Collection 004 and 005) a jedná se o produkty MODIS 3 kategorie. Lze definovat zájmové území i způsob vizualizace. Příkladem výstupu je Obr. 4.3.2.



Obr. 4.3.2: Příklad výstupu on-line aplikace GIOVANI – AOD (550 nm) pro 17. 4. 2003 pro oblast Golfe du Lion (NASA GIOVANI)

Smile Correction Processor odstraňuje zkreslení vznikající uvnitř kamer stíracích (push-broom) skenerů. Skener MERIS je složen z pěti kamer, z nichž každá je vybavena CCD (Charge Coupled Device – nábojově vázané zařízení). Spektrální měření každého pixelu v řádku je pořizováno vlastní sadou detektorů. Jejich citlivost není vždy stoprocentně stejná, což způsobuje drobné posuny ve spektrálních hodnotách jednotlivých pixelů. Mezi jednotlivými kamerami se posun pohybuje kolem 1 nm. V poměru k šířce jednotlivých kanálů vlnových délek (obvyčně 10 nm) je posun v obraze těžko rozeznatelný, ale i tak může způsobovat nepřesnosti při aplikaci algoritmů vyžadujících velmi přesné měření, jako např. algoritmy pro měření „barvy oceánu“.

MERIS L1 data obsahují měření pro jednotlivé vlnové délky v každém pásmu vlnových délek. Smile korektor normalizuje naměřené hodnoty k referenční vlnové délce (střed kanálu). Korekce má dvě části, první z nich odstraňuje vliv rozdílné expozice slunce mezi jednotlivými vlnovými délkami a referenční vlnovou délkou podle vztahu:

$$L_{corr,irr}(\lambda_0) = L_{meas,pixel}(\lambda_0) \frac{F_{0,ref}(\lambda_0)}{F_{0,pixel}(\lambda_0)} \quad (\text{rovnice 4.3.1})$$

Druhou částí je korekce odrazivosti řešící rozdíly v úhlu odrazu záření interpolací mezi sousedními pixely do referenční vlnové délky.

$$L_{corr,refl}(\lambda_0) = \left[L_{meas,pixel}(\lambda_2) \times \frac{F_{0,ref}(\lambda_0)}{F_{0,ref}(\lambda_2)} - L_{meas,pixel}(\lambda_1) \times \frac{F_{0,ref}(\lambda_0)}{F_{0,ref}(\lambda_1)} \right] \times \frac{(\lambda_{ref} - \lambda_1)}{(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

(rovnice 4.3.2)

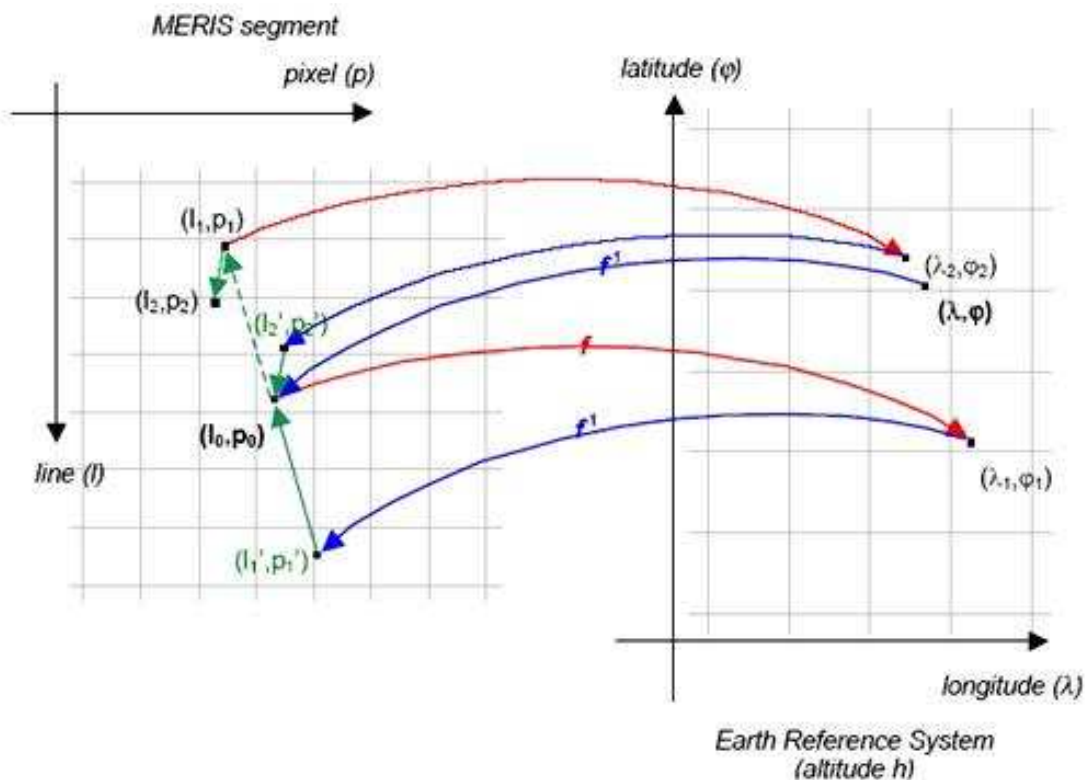
$L_{meas,pixel}$ je naměřená hodnota radiace pro vlnové délky $\lambda_{0,1}$, $F_{0,ref}$ je sluneční iradiace pro referenční vlnové délky a $F_{0,pixel}$ je sluneční iradiace na pitelových vlnových délkách. (BEAM HELP)

Geometrické korekce pro data použitá v této práci byly provedeny v programu VISAT (SW BEAM) metodou ortorektifikace. Data MERIS jsou dodávána již georeferencovaná, avšak georeference je určována jako místo protnutí pozorovacího úhlu a povrchu elipsoidu WGS84 v bodě P_0 .

Ortorektifikace se pokouší nalézt skutečnou polohu bodu pomocí přímého lokalizačního modelu.

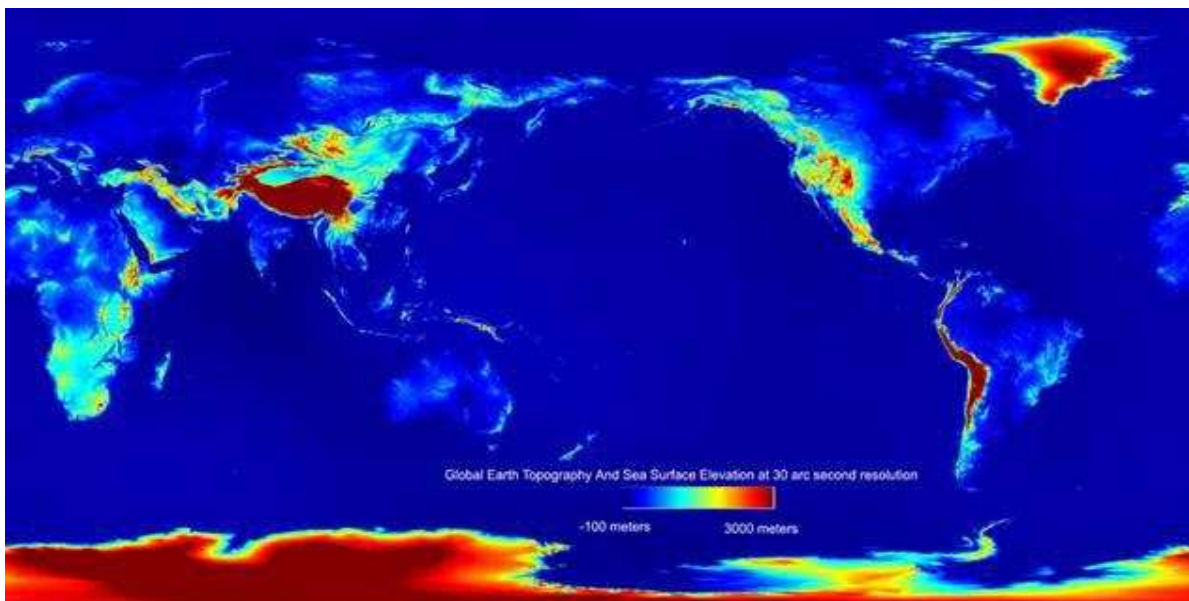
$$f(l, p) = (\lambda, \varphi) \quad (\text{rovnice 4.3.3})$$

Principem je principem vyhodnocení série korekčních vektorů, které jsou určovány opakovaným detekováním identických bodů v segmentu dat MERIS a geokódovaném obrazu (viz Obr. 4.3.2). Proces je ukončen, když jsou souřadnice segmentu MERIS (l_i, p_i) dostatečně blízko souřadnicím prvního bodu (l_0, p_0).



Obr.4.3.2: Princip ortorektifikace v SW BEAM (BEAM HELP)

V SW BEAM využívá ortorektifikace vlastních vlčovacíh bodů (tie points), které jsou obsaženy v produktech MERIS 1P a digitálního modelu terénu GETASSE30 (Global Earth Topography And Sea Surface Elevation at 30 arc sekund resolution). GETASSE30 je složen ze čtyř digitálních modelů terénu (SRTM30, ACE, MSS - Mean Sea Surface a EGM96 elipsoid) a je zpracovaný na elipsoidu WGS84. Dataset pokrývá kompletně celou Zemi, ale v arktických oblastech některé hodnoty vykazují velké chyby jako pozůstatek ACE datasetu.



Obr. 4.3.2: Global Earth And Sea Surface Elevation s rozlišením 30 obloukových sekund (BEAM HELP)

Při ortorektifikaci je provedeno převzorkování obrazu metodou nejbližšího souseda (nearest neighbour) na pixel o velikosti 300x300 m. Na rozdíl od lineární interpolace a kubické konvoluce nevypočítává nové hodnoty pixelů, ale přiřazuje jim nezměněnou hodnotu v nejbližším bodě výchozího obrazu.

Pro snímky z oblasti Golfe du Lion byl zvolen referenční systém WGS 84. Pro oblast Skagerraku a Kattegatu vykazuje WGS 84 již příliš velké zkreslení, proto byl použit souřadnicový systém WGS 84 UTM Zone 32N.

4.4. Modelování s obrazovými daty

Obrazová data obsahují velké množství informací, pro jejich interpretaci je však nutné nejdříve požadovanou informaci vhodnými postupy zvýraznit či extrahovat pomocí klasifikačního procesu. Cílem modelování je sestavení modelu, který data získaná metodou dálkového průzkumu dává do kvantitativního vztahu s biologickými nebo fyzikálními vlastnostmi objektů a jevů na zemském povrchu (Dobrovolný, 1998). Metody pro odvození vztahů mezi daty DPZ a parametry kvality vody mohou být rozděleny do tří skupin (Koponen, 2006):

- Empirické modelování – vztah mezi radiometrickými hodnotami a hodnotami bio-fyzikálních parametrů je odvozen na základě regresní závislosti mezi daty DPZ a daty naměřenými *in situ*. Výsledný algoritmus je aplikovatelný pouze pro daný snímek.
- Analytické modelování – využívá inverzní bio-optické modely, které jsou odvozeny od základních interakcí (odrazu a absorpce) mezi vodním tělesem a dopadajícím zářením a modely přenosu záření (radiative transfer models). Takto vzniklé algoritmy jsou často použitelné pro více snímků i oblastí. Pokud jsou však hodnoty parametru daného modelu špatné, takto získané hodnoty např. koncentrace chl-a budou vykazovat značné chyby

- Semi-analytické modelování (kombinovaný přístup) – zahrnuje například přepočítání hodnot pixelů na absolutní hodnoty pomocí analytických modelů a jejich následnou korelační a regresi analýzu s daty naměřenými *in situ*.

V této studii bylo použito analytické modelování. Hodnoty koncentrace chl-a byly určeny pomocí dvou analytických algoritmů počítajících absolutní hodnoty koncentrace v mg/m³. Třetím nástrojem, jehož výstupem jsou hodnoty relativní, byl index Fluorescence Line Height (FLH). Pro jeden snímek z každého území byly získány také data z pozemního měření, se kterými byly výsledky prvních dvou algoritmů následně srovnávány.

4.4.1. Algoritmy použité pro výpočet hodnot chl-a z dat MERIS

V této práci byly použity celkem tři nástroje pro získání hodnot koncentrace chl-a ve vodě ze snímků MERIS.

- a. Coastal Case 2 Regional Processor (C2R)
- b. FUB/Wew Water Processor
- c. FLH/MCI Processor

První dva v sobě zahrnují jak atmosférickou korekci tak tzv. „vodní algoritmus“. Na datech, na kterých byl aplikován poslední nástroj, byly nejprve v průběhu procesu předzpracování provedeny atmosférické korekce samostatně (korekce SMAC).

a. Coastal Case 2 Regional Processor (C2R)

Tento nástroj byl vyvinut společně několika výzkumnými ústavami, *GKSS Research Centre, Institute for Coastal Research a Brockmann Consult*. Algoritmus je složen ze tří oddělených kroků. Prvním krokem je aplikace výše popsané korekce smíle efektu. Následně jsou pomocí atmosférické korekce vypočteny hodnoty odrazivosti na spodní hranici atmosféry a jsou z nich v dalším kroku odvozeny hodnoty koncentrace jednotlivých optických složek vody.

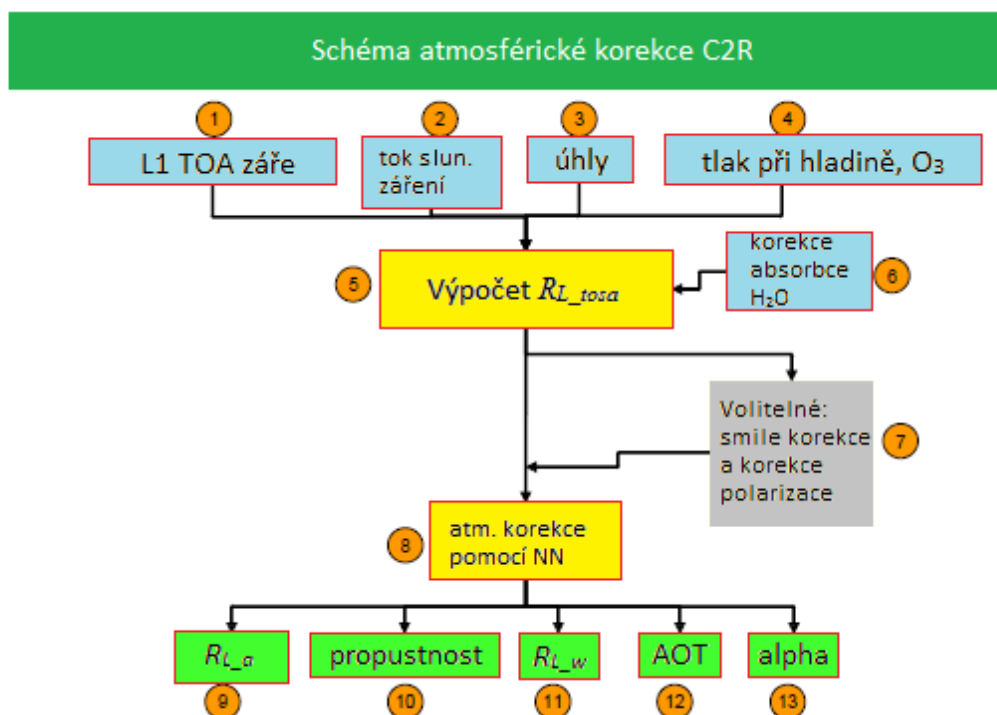
Atmosférická korekce

Jádro atmosférické korekce je založeno na simulacích přenosu záření atmosférou podle modelu Monte Carlo photon tracing model vyvinutého GKSS. Simulovaná odrazivost je použita k „učení“ neuronové sítě, která dále slouží k parametrizaci vztahu mezi odrazivostí na svrchní hranici atmosféry R_{L_toa} a odrazivostí při vodní hladině R_{L_w} (Doerffer & Schiller, 2008). Výpočty jsou prováděny na modelové atmosféře skládající se ze tří částí:

- (1) standardní atmosféra, zahrnující 50 vrstev s proměnnými koncentracemi různých typů aerosolů, částic z řasovité oblačnosti a hrubé, na větru závislé mořské hladiny, avšak s konstantním atmosférickým tlakem a ozonovým profilem
- (2) vrstva nad standardní atmosférou obsahující pouze rozdíly mezi standardní a reálnou atmosférou
- (3) modul počítající odrazivost na úrovni vodní hladiny

Jsou definovány tři hraniční vrstvy, svrchní hranice skutečné atmosféry (TOA), svrchní hranice standardní atmosféry (TOSA) a spodní hranice atmosféry (BOA).

Jednotlivé kroky a moduly algoritmu jsou naznačeny v Obr 4.4.1. a blíže popsány v Doerffer & Schiller (2008)



Obr. 4.4.1: schéma atmosférické korekce nástroje Case 2 Regional procesor (překresleno podle Doerffer & Schiller, 2008)

- (1) – (4) Vstupní hodnoty získané z dat MERIS L1 pro každý pixel, kromě toku slunečního záření, úhly jsou konvertovány do kartézské souřadné soustavy.
- (5) Modul pro výpočet odrazivosti záření na svrchní hranici standardní atmosféry $R_{L_{TOSA}}$ s použitím odchylky atmosférického tlaku a koncentrace ozonu od standardních hodnot (1013,25 hPa a 350 DU)
- (6) Modul pro korekci vlivu absorpce H_2O na kanál 9 (708,75 nm)
- (7) Volitelné korekce smile efektu (viz kap. 4.3) a korekce vlivu polarizace v atmosféře
- (8) Atmosférická korekce na bázi přímé neuronové sítě (fwNN – forward Neural Network), zahrnuje vliv aerosolů, řasovité oblačnosti, sunglint (zrcadlový odraz) a odrazivost záře z vodního tělesa. Vstupem jsou TOSA odrazivosti z 12 kanálů MERIS (1 – 10 a 12,13) výstupy jsou také pro 12 kanálů. FwNN je trénována na datech simulovaných pomocí modelu přenosu záření Hydrolight.
- (9) – (12) Výstup z fwNN: (9) odrazivost záře z atmosféry (záře dopadající na senzor ze všech zdrojů nad vodní hladinou), (10) propustnost atmosféry, (11) odrazivost záře z vodního tělesa, (12) optická tloušťka aerosolů (AOP – aerosol optical thickness) pro 4 vlnové délky
- (13) Angstromův aerosolový koeficient α vypočtený z AOP na vlnových délkách 443 nm a 865 nm

Vodní algoritmus

Algoritmus pro výpočet koncentrací optických konstituentů vody použitý v nástroji Case 2 Regional Processor (C2R) je založen na inverzním bio-optickém modelu implementovaném

pomocí dvou neuronových sítí (NN). Vstupem je 8 (2-7 a 9) kanálů odrazivostí záření z vodního objemu R_{L_w} , které jsou produktem výše popsané atmosférické korekce popsané výše. Z těchto dat jsou odvozeny čtyři základní optické vlastnosti (IOP):

- 1) Absorpční koeficient pigmentů fytoplanktonu a_{pig}
- 2) Absorpční koeficient rozpuštěných organických látek (yellow substance) a_y
- 3) Absorpční koeficient celkových suspendovaných látek (TSM – total suspended matter) a_{tsm}
- 4) Koeficient rozptylu TSM b_{tsm}

Z hodnot IOP jsou určeny absolutní hodnoty koncentrace chlorofylu-a (mg/m^3) a celkových suspendovaných látek (mg/m^3 – váha v suchém stavu). Algoritmus využívá dvě neuronové sítě. První je inverzní (invNN), která slouží k výpočtu hodnot koncentrací z vstupních hodnot odrazivost a geometrických parametrů měření. Druhá přímá neuronová síť (fwNN) počítá hodnoty odrazivostí z koncentrací vypočtených invNN a z geometrických parametrů. Tato smyčka umožňuje minimalizovat chybu mezi modelovanými a skutečnými hodnotami odrazivostí a tím i chybu vypočtených koncentrací optických složek vody. Pro učení NN je použit rozsáhlý soubor (>80 000 údajů) dat simulovaných pomocí speciální verze modelu Hydrolight radiative transfer code s použitím dat IOP měřených in situ v Severním, Baltském a Středozemním moři a v severním Atlantiku.

Výstupem NN jsou:

- Koncentrace chl_a (v rozpětí 1 - 120 mg/m^3) a TSM (v rozpětí 0.42 – 50,9 mg/m^3)
- Absorpční koeficient složky tvořené fulvickými kyselinami
- Absorpční koeficient složky tvořené humickými kyselinami
- a_{pig} – koeficient absorpce pigmentů ($chl_a (mg/m^3) = 0,0318a_{pig}$)
- b_{tsm} – koeficient rozptylu TSM ($TSM (mg/m^3) = 1,7b_{tsm}$)
- a_{tot} – koeficient absorpce celkový absorpční koeficient
- z_{90_max} – 90% záření odraženého molekulami vody pochází z vrstvy nad touto maximální hloubkou (m)
- k_{max} – atenuační koeficient na vlnové délce s max. průsvitností (m^{-1})

Přírodní podmínky předpokládané pro výpočet jsou definovány jako nekonečně hluboká voda (není bráno v úvahu záření odražené dnem), vertikálně homogenní distribuce všech optických konstituentů vody, hrubost vodní hladiny odpovídající větru 3 m/s a atmosféra obsahující 50 vrstev pro 17 zenitních úhlů Slunce. (Doerffer & Schiller, 2008)

Při aplikaci nástroje na data byly pro jednodušší manipulaci upraveny parametry zpracování tak aby jediným výstupem byla koncentrace chl-a. Vstupem jsou data zpracovaná pomocí nástroje ICOL.

b. FUB/Wew Water Processor

Druhým nástrojem, který byl využit v této práci je FUB/Wew Water Processor vyvinutý Institut für Weltraumwissenschaften, Freie Universität Berlin. Na rozdíl C2R neprovádí atmosférickou korekci a odvození hodnot koncentrací odděleně, ale provádí je společně v jednom kroku. Algoritmus je založený celkem na čtyřech oddělených neuronových sítích založených na

dvou obsáhlých databázích vytvořených pomocí modelu přenosu záření MOMO code. Neuronové sítě jsou trénovány pomocí rozsáhlého souboru simulovaných dat (100000 záznamů). Algoritmus blíže popisuje Schröder (2004). První NN slouží pro výpočet atmosférické korekce a lze ji rozdělit do dvou částí:

1) Korekce Rayleighova rozptylu a absorpce ozonu. Neuronová síť je učena pomocí náhodně vybraných dat z databáze simulované pro čistě Rayleigh-Ozone atmosféru (rozptyl na molekulách vzduchu a absorpce ozonu, bez přítomnosti aerosolů). Výstupem jsou odrazivosti záření z atmosféry (kanály MERIS 4,9,10,12,13, a 14) pro TOA a pro skutečný atmosférický tlak a konstantní množství ozonu (344 DU)

2) Atmosférická korekce. NN je trénována pomocí simulací provedených na US Standard Atmosphere (viz. Obr. 4.4.2), použitý model oceánu je charakterizován různými koncentracemi optických složek typických pro evropské pobřežní vody.

Každá z dalších tří nezávislých neuronových sítí počítá koncentraci jedné optické složky. IOP, které byly vstupem do modelu přenosu záření (RT – Radiative Transfer code), byly převzaty z publikovaných studií. Celková absorpce a rozptyl mořské vody byly pak modelovány jako součet jednotlivých absorpčních koeficientů (koeficientů odrazu) pro čistou vodu a_w (b_w), částic organické hmoty a_{p1} jako funkce chl-a a a_{p2} (b_p) jako funkce TSM, a absorpce CDOM a_y .

$$a_{wat} = a_w(\lambda) + a_{p1}(\lambda, chl-a) + a_{p2}(\lambda, TSM) + a_y(\lambda, CDOM) \quad (\text{rovnice 4.4.1})$$

$$b_{wat} = b_w(\lambda) + b_p(\lambda, TSM) \quad (\text{rovnice 4.4.2})$$

Vstupem jsou hodnoty odrazivosti na svrchní vrstvě atmosféry TOA (kanály MERIS 1-7, 9, 10 a 12-14). V úvahu jsou brány také geometrické podmínky měření, rychlost větru a atmosférický tlak při hladině. Výstupem jsou hodnoty chl-a ($\log[\text{mg}/\text{m}^3]$), TSM ($\log[\text{g}/\text{m}^3]$), CDOM ($\log[1/\text{m}]$), odrazivosti záření při střední hladině oceánu (MSL) pro kanály 1-7 a 9 a optické množství aerosolů (AOT) pro 440, 550, 670 a 870 nm.

Na vstupní data byl nejprve aplikován nástroj ICOL a následně samostatná korekce směle efektu pomocí Smile Correction Processor.

c. FLH/MCI Processor

Posledním použitým nástrojem je FLH/MCI Processor, jehož výstupem je jeden z indexů Fluorescence Line Height (FLH) nebo Maximum Chlorophyll index (MCI). Pro potřeby této práce byl využit pouze první index FLH popsáný níže. Druhý index MCI je vhodný spíše pro vyšší koncentrace chl-a (nad $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ až po stovky mg/m^3), takto vysoké koncentrace jsou ve sledovaných oblastech očekávány spíše výjimečně a proto nebyl tento index použit.

Fluorescence chlorofylu je jev vyvolaný absorpcí energie dopadajícího záření molekulami chlorofylu-a a následnou vyzářením části této energie zpět do okolí v podobě záření o vyšší vlnové délce, ale stále ve viditelné části spektra. Fluorescence chlorofylu je měřitelná v různých oblastech spektra, avšak nejvíce využíván je lokální maximum na vlnové délce 685 nm.

Fluorescence Line Height algoritmus měří výšku maxima fluorescence chlorofylu na vlnové délce 681,25 nm (kanál 8) nad lineární základní čarou vytvořenou lineární interpolací mezi kanály 7 (665 nm) a 9 (708,75 nm). (Obr. 4.4.3)

$$FHL = L_2 - L_1 - (L_3 - L_1) \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{(\lambda_3 - \lambda_1)} \quad (\text{rovnice 4.4.3})$$

L_i vyjadřuje záři z vodního tělesa pro MERIS kanál i s centrem na vlnové délce λ_i . Kanál $i = 2$ (681,25 nm) určuje výši fluorescence, zatímco kanály $i = 1$ (665 nm), 3 (708,75 nm) definují základní čáru. (Gower & Doerffer & Borstad, 1999)

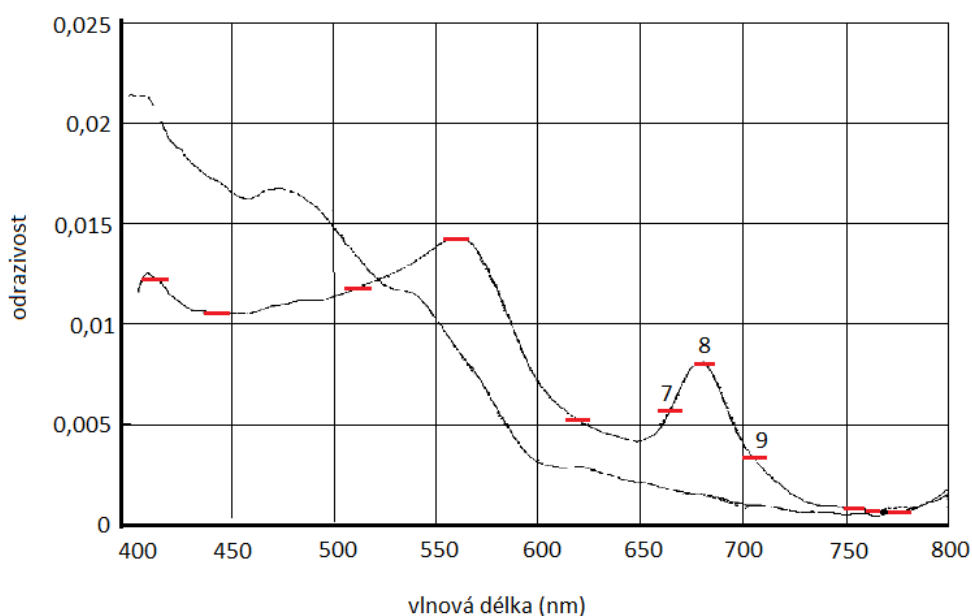
Algoritmus implementovaný v FLH/MCI procesoru obsahuje doplňkovou korekci slabé oblačnosti, ve formě koeficientu k :

$$FHL = L_2 - k \left[L_1 + (L_3 - L_1) \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{(\lambda_3 - \lambda_1)} \right] \quad (\text{rovnice 4.4.4})$$

Pokud $k = 1$ pak se hodnota FLH zvyšuje v přítomnosti slabé oblačnosti, protože se zvyšuje i záře přijatá senzorem. Korekce spočívá v nastavení hodnoty $k = 1,005$. (BEAM HELP)

FLH je vhodný pro koncentrace chlorofylu pod 30 mg/m^3 , při vyšších koncentracích dochází ke kombinaci absorpce vody a chlorofylových pigmentů a nelze dále použít lineární základní čáru. (Gower et al., 2008)

Předzpracování vstupních dat zahrnuje korekci efektu blízkosti pomocí nástroje ICOL, dále aplikaci radiometrické korekce Smile Correction a atmosférické korekce SMAC.



Obr. 4.4.3: Spektrum odrazivosti chlorofylu pro $1,4 \text{ mg/m}^3$ a $15,3 \text{ mg/m}^3$. Pozice a šířka jednotlivých kanálů MERIS je naznačena červeně. (Gower & Doerffer & Borstad, 1999)

4.5. Vytvoření výsledné mapy

Vytvoření výsledných map bylo provedeno v SW ArcGIS kam byly importovány rastry obsahující výsledné koncentrace chl-a ve formátu GeoTIFF. Pro každý snímek byly vytvořeny tři mapy obsahující hodnoty zpracované jedním nástrojem. Celkem bylo tedy vytvořeno 33 map, 18 pro oblast Golfe du Lion a 15 pro oblast průlivů Skagerrak a Kattegat.

Legendy byly vytvořeny na základě metody Jenkins Natural Breaks pro absolutní hodnoty koncentrace ve všech mapách. Následně byla ručně vytvořena legenda vhodná pro všechny mapy

absolutních hodnot, aby bylo možné mezi sebou porovnat jak jednotlivé mapy časové řady, tak rozdílnost map vytvořených ze stejného snímku zpracovaného rozdílnými nástroji. Legenda pro mapy relativních hodnot byla vytvořena na základě uvážení intervalu obsahujícího 95% hodnot (-0,002 až 0,002) a rozložení hodnot v tomto intervalu.

Následně byly provedeny konečné úpravy jako vložení názvu, legendy a měřítka mapy. Mapy byly nakonec vyexportovány ve formátu PDF.

4.6. Srovnání s *in-situ* daty

Posledním krokem bylo srovnání vymodelovaných hodnot chl-a s *in situ* daty. Pozemní data byla získána pouze pro dva snímky. Pro oblast Golfe du Lion byla *in situ* data získána pro snímek ze dne 17. 4. 2003 a pro oblast Skagerraku a Kattegatu pro snímek ze dne 21. 9. 2006. Srovnání bylo provedeno v programu MS Excel. Pro spárování dat byla použita metoda navržená autory Cui et al. (2010). Spárování bylo provedeno celkem v 5 krocích:

- a. výběr družicových dat ze stejného dne jako měření *in situ*
- b. výběr oblasti o velikosti 3x3 pixelů se středem na místě *in situ* měření a časový rozdíl je menší než 5h (původně byl tolerovaný časový rozdíl pouze 3 h avšak kvůli nedostatku pozemních dat byla tolerovaná odchylka zvýšena)
- c. výpočet mediánu a směrodatné odchylky a eliminace pixelů s hodnotou lišící se od mediánu o více než 1,5x SD
- d. výpočet poměru SD a mediánu pro každý pixel každé oblasti a zjištění koeficientu prostorové heterogenity a vyřazení oblastí s koeficientem překračujícím 0,15
- e. kontrola procenta zbylých pixelů, pokud v oblasti zbylo více než 50% vyhovujících pixelů je jejich medián porovnán s *in situ* měřením.

Vstupem do analýzy byly hodnoty pixelů získané pomocí nástroje Pixel Inspector (SW ArcGIS) a hodnoty mediánu a SD získané ze SW BEAM. Následně byly vytvořeny grafy korelace mezi průměrem hodnot pixelů kolem odběrového místa a hodnotou získanou odběrem a vypočteny korelační koeficienty. Korelační koeficient může nabývat hodnot od -1 do +1. Je-li jeho hodnota ± 1 , jde o funkční závislost a body leží na přímce. Pokud je hodnota rovna 0, jedná se o absolutní nezávislost.

4.7. Vytvoření časové řady

Pro oblast Golfe du Lion i pro oblast Skagerraku a Kattegatu byly vytvořeny časové řady. Pro každou oblast bylo vybráno 6 bodů tak, aby byly co nejrovnoměrněji rozmístěny. Pro každý nástroj pak byly vytvořeny časové řady z hodnot získaných pro jednotlivé snímky. Průběh časové řady byl pak znázorněn pomocí grafů. Celkem bylo vytvořeno 6 grafů, z nichž každý obsahuje 6 časových řad.

5. VÝSLEDKY

Jak je popsáno v metodických postupech, byly použity celkem tři nástroje SW BEAM pro výpočet koncentrace chlorofylu-a ve vodě. Pro každý snímek byly hodnoty chl-a vypočteny pomocí každého z těchto nástrojů. Celkem bylo takto zpracováno deset snímků, pět pro oblast Golfe du Lion pro měsíce duben, květen, červen, srpen a říjen a pět pro oblast Skagerraku a Kattegatu pro měsíce květen, červen, červenec, srpen a září.

5.1. Výsledné mapy

Z hodnot získaných, pomocí nástrojů Case 2 Regional processor, FUB/Wew Water processor a FLH/MCI processor bylo vytvořeno celkem 30 map (viz Přílohy E až J). Pro mapy vytvořené z hodnot vypočtených prvním a druhým jmenovaným nástrojem byla použita shodná legenda, aby bylo možné mapy mezi sebou porovnat. Hodnoty vymodelované těmito nástroji se nacházejí v rozmezí 0 až cca 30 mg/m³, avšak hodnoty přesahující 15 mg/m³ se vyskytují na velice malých plochách. Pro data zpracovaná posledním nástrojem byla použita jiná legenda, protože výstupem jsou, na rozdíl od prvních dvou nástrojů, pouze relativní hodnoty v rozmezí -7 až +7. Avšak 95% hodnot se nachází mezi -0,002 a 0,002.

Při porovnání průměrů hodnot z obou oblastí vykazuje oblast průlivů Skagerrak a Kattegat vyšší hodnoty koncentrace chl-a než oblast Golfe du Lion. Pro data zpracovaná nástrojem C2R jsou hodnoty v průměru zhruba 3,5x vyšší, při použití procesoru FUB/Wew je koncentrace chl-a v průměru až 4,5x vyšší a hodnoty indexu FLH jsou pak řádově tisíckrát vyšší.

5.1.1. Golfe du Lion

Mapy, vytvořené pro oblast Golfe du Lion (Přílohy E, F a G), znázorňují prostorové rozložení a výši koncentrace chl-a pro měsíce duben, květen, červen, srpen a říjen v průběhu roku 2003. Pokud mezi sebou porovnáme jednotlivé nástroje, zjistíme, že procesor C2R udává hodnoty 1,3x až 8x vyšší než procesor FUB/Wew. (Přílohy E a F)

Největší rozdíl (8x) vzniká při zpracování dat z měsíce dubna (Mapa E1 a F1). Lze také pozorovat, že právě v dubnu je podle všech tří nástrojů koncentrace chl-a nejvyšší. Nejnižší rozdíl lze naopak pozorovat u následujícího měsíce června, kdy byla koncentrace vypočtená C2R (Mapa E2) v průměru jen 1,3x vyšší než hodnoty vypočtené pomocí FUB/Wew (Mapa F2). Jen o málo větší rozdíl vykazuje měsíc říjen (Mapa E5 a F5). V ostatních měsících je rozdíl hodnot zhruba tří- až čtyřnásobný. Hodnoty indexu FLH dobře korespondují s koncentrací chl-a získanou pomocí C2R procesoru.

Prostorové rozložení hodnot je při použití jednotlivých nástrojů velmi podobné. Na všech mapách je zřejmá oblast vyšší koncentrace chl-a při severním a severovýchodním pobřeží zálivu při ústí řeky Rhône. Koncentrace chl-a zde dosahuje nejvyšších hodnot přesahujících 12 mg/m³. Oblastí vyšší koncentrace chl-a je zde méně taková oblast, kde míra koncentrace výrazněji převyšuje koncentraci chl-a v okolních vodách. V dubnu, červnu a říjnu, lze pak na všech mapách pozorovat zvýšené koncentrace i při ústí ostatních velkých řek (Mapa 1E, 2E, 5E, 1F, 2F, 5F a 1G,

2G, 5G). V měsíci dubnu výraznou oblast zvýšené koncentrace při okraji pevninského šelfu s koncentracemi chl-a nad 6 mg/m^3 (C2R) či 1 mg/m^3 (FUB/Wew). Tento jev je zapříčiněn složitou cirkulací vzdušných i vodních mas v zimním období. Jeho náznak lze pozorovat ještě na mapách pro měsíc květen (Mapa E2 a G2). Na mapě F2 koncentrací vypočtených pomocí procesoru FUB/Wew není oblast viditelná vinou použité legendy. V ostatních měsících již tento jev nebyl pozorován. Oblastí s nejnižší koncentrací ($< 0,5 \text{ mg/m}^3$) na všech mapách je záliv u města Marseille a pobřežní oblasti dále na východ od tohoto města.

5.1.2. Skagerrak a Kattegat

Mapy, vytvořené pro oblast průlivů (Přílohy H, I a J), znázorňují prostorové rozložení a výši koncentrace chl-a pro měsíce květen, červen, červenec, srpen a září v průběhu roku 2006. Stejně, jako v případě Golfe du Lion, udává procesor C2R vyšší hodnoty než procesor FUB/Wew a to 2x až 5,5x. (Přílohy H a I)

Nejvyšší rozdíl lze pozorovat v hodnotách vypočtených pro září (5,5x). Také v tomto případě je měsíc s největším rozdílem zároveň měsícem s nejvyšší koncentrací chl-a s průměrnými hodnotami 5 mg/m^3 (C2R), 1 mg/m^3 (FUB/Wew). (Mapa H5, I5 a J5) Nejmenší rozdíl (2x) vykazují data pro měsíc červen. V ostatních měsících je rozdíl zhruba třináásobný. Celkově jsou rozdíly mezi hodnotami vypočtenými C2R a FUB/Wew menší než v případě Golfe du Lion a zároveň je menší i jejich rozptyl. Hodnoty indexu FLH v tomto případě zdánlivě lépe korespondují s hodnotami vypočtenými pomocí FUB/Wew procesoru.

Prostorové rozložení hodnot, je při použití jednotlivých nástrojů, podobné. Vyšší hodnoty lze pozorovat v pobřežích oblastech, zvláště pak při pobřeží Dánska a v oblasti Oslofjordu ($> 12 \text{ mg/m}^3$). Charakteristické jsou také vyšší koncentrace v průlivu Kattegat, kde hodnoty ještě více narůstají směrem k Dánským průlivům. To je způsobeno přínosem na živiny bohatých vod z Baltského moře (Baltský proud). Nejnižší hodnoty korespondují s vodní masou, pronikající do oblasti Skagerraku ze severní a střední části Severního moře a následně cirkulující ve střední části Skagerraku. Podle nástroje C2R (Mapa H5) se zdá, že v měsíci září oblast nízkých hodnot ve středu Skagerraku mizí, podle ostatních nástrojů se spíše zdá, že dochází k výraznému zvýšení hodnot podél dánských břehů (Mapa I5 a J5).

5.2. Srovnání s daty *in situ*

Srovnání vymodelovaných hodnot s *in situ* daty bylo provedeno pouze pro dva snímky a to pro snímek z dubna 2003 pro Golfe du Lion a snímek ze září 2006 pro Skagerrak a Kattegat (viz Přílohy A a B) Záměrem bylo použít pro srovnání pouze hodnoty v bodech, které odpovídají podmínkám popsaným v kap 4.6. Pro data z oblasti Golfe du Lion zpracovaná procesory C2R a FUB/Wew byly všechny podmínky splněny pro 6 z 10 bodů (viz Příloha A). Pro oblast Skagerraku a Kattegatu vyhovovaly všechny tři body při zpracování dat nástrojem C2R, ale pouze jediný bod při zpracování pomocí FUB/Wew. Data zpracovaná FLH/MCI procesorem nevyhovovala podmínkám ani pro jeden bod v obou oblastech. Pokud bylo jedinou porušenou podmínkou přesažení hranice koeficientu variability (0,15), byly pro korelační analýzu s *in situ* daty tyto body použity.

Hodnoty, vymodelované nástrojem Case 2 Regional procesor pro Golfe du Lion, převyšovaly hodnoty naměřené *in situ* o 0,5% - 116%, přičemž nejvyšší odchylku vykazoval bod s nejnižší pozemně naměřenou hodnotou a téměř nulovou odchylku bod s nejvyšší naměřenou hodnotou. Míra korelace je v tomto případě relativně nízká (0,652). Naopak pro oblast Skagerraku a Kattegatu byly vymodelované hodnoty nižší než ty naměřené a to o cca 50%-63% a míra korelace je relativně vysoká (0,879).

Při použití nástroje FUB/Wew Water byly vymodelované hodnoty nižší než ty naměřené a to jak pro Golfe du Lion (nižší o 45% - 76% se směrodatnou odchylkou 12,7%), tak pro oblast průlivů (nižší o 93% - 95%, SD 0,9%) Míra korelace byla nízká pro obě oblasti (0,408 a 0,361)

Výstupem indexu FLH jsou pouze relativní hodnoty a nelze je proto porovnat s pozemně naměřenými hodnotami přímo. Byla pro ně však provedena korelační analýza. Pro oblast zálivu byl koeficient korelace 0,730 a pro oblast průlivů pouze 0,154.

Protože bylo k dispozici jen velmi málo dat z pozemního měření nelze z výsledků tohoto srovnání udělat platný závěr, týkající se vhodnosti použití jednotlivých nástrojů. Srovnání lze tedy použít pouze jako náznak možného chování procesorů při různých koncentracích chl-a. Zdá se, že přesnějším pro obě oblasti je FUB/Wew Water procesor se zdá vhodnější pro vody s nižší koncentrací chl-a a rozdíly od *in situ* dat vykazují menší odchylky, než v případě C2R.

5.3. Proměnlivost v čase

Grafy časových řad ukazují, že průběh hodnot je pro body co rovnoměrně rozmístěné ve sledovaných oblastech podobný (Příloha C3). Avšak liší se při použití různých nástrojů.

V oblasti Golfe du Lion se nejvyšší hodnoty podle procesoru C2R za zkoumané období objevují v dubnu, následně strmě klesají až do srpna a v říjnu dochází opět k mírnému nárůstu. Při použití procesoru FUB/Wew je průběh pro jednotlivé body pro období duben až květen různý. Minimum nastává v červnu a pak hodnoty mírně rostou až do října. Hodnoty indexu FLH mají značně rozdílný průběh, u většiny bodů se vyskytují dvě maxima a to v květnu a v srpnu. Minimum naopak nastává v červnu nebo v říjnu. (Grafy v Příloze C3.a).

V oblasti průlivů nastávají podle nástroje C2R minima v červnu a v srpnu. Stejný průběh vykazují i hodnoty vypočtené FUB/Wew procesorem avšak opět se mírně liší průběh v jednotlivých bodech. Hodnoty indexu FLH mají stejný průběh jako v případě oblasti zálivu a je tak opačný k průběhu hodnot vypočtených ostatními nástroji. Lze jen těžko posoudit příčinu tohoto jevu. (Grafy v příloze C3.b)

6. DISKUZE

6.1. Zhodnocení použitých dat

V této práci byla využita družicová data ze senzoru MERIS na palubě družice ENVISAT patřící European Space Agency (ESA). Původně měla být využita i data ze senzoru AATSR, který snímá Zemi v sedmi kanálech vlnových délek od viditelné (0,55 μ m) až po tepelnou část (12 μ m) spektra. Tato data však nebyla použita kvůli jejich nízkému rozlišení (1x1 km).

Data ze senzoru MERIS byla poskytnuta ESA. Původním záměrem bylo získat pro zkoumané oblasti co nejvíce bezoblačných snímků v rozestupu přibližně jednoho měsíce. Pro oblast Golfe du Lion bylo takových snímků nalezeno 7, avšak snímek pro měsíc červenec nebyl ESA z blíže nevysvětlených důvodů poskytnut. Snímek pro měsíc září obsahoval velké množství oblačnosti, které výrazně ovlivňovalo výpočet chl-a a proto byl po úvaze z analýzy vyřazen. Pro oblast Skagerraku a Kattegatu bylo nalezeno 5 vyhovujících snímků od května do září.

Jak vyplývá z četných studií data MERIS jsou pro monitoring kvality vody poměrně často využívána, viz například práce autorů Koponen (2006), Cui et al. (2010), Vilas et al. (2011) či Kratzer & Brockmann & Moore (2008). Hlavními výhodami jsou relativně dobré prostorové rozlišení (300 m) a 15 spektrálních kanálů v oblasti viditelného a blízkého infračerveného spektra s programovatelnou pozicí i šířkou, které jsou speciálně kalibrovány, aby co nejlépe odpovídaly potřebám sledování kvality vody. Právě díky zlepšenému prostorovému rozlišení je prvním senzorem pro měření „barvy oceánu“ vhodným pro pobřežní oblasti. Avšak podle Härra et al. (2001) prostorové rozlišení není ideální pro snímání výrazně členitého pobřeží či snímání povrchových vod, protože se v takových případech více projevuje efekt blízkosti pevniny, který může mít značný vliv na přesnost informací odvozených z těchto dat. Na rozdíl od dat z ostatních podobně zaměřených senzorů, je dostupnost těchto dat velmi dobrá. Data s plným rozlišením jsou bezplatně poskytována po vyplnění žádosti a schválení projektu.

Senzorem, který je často využíván pro sledování koncentrací optických složek vody je Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) na družici AQUA využitý například autory Zdibordi et al. (2009). Tento senzor snímá zemský povrch ve 36 spektrálních pásmech, z nichž 8 (pásma 8 – 16) je speciálně kalibrováno pro monitoring „barvy oceánu“, obsahu fytoplanktonu a biochemických vlastností vody. Avšak prostorové rozlišení v těchto kanálech (1000 m) je nižší než u senzoru MERIS. Další poměrně často využívané senzory jsou například Sea-viewing Wide Field-of-view (SeaWiFS) či Coastal Zone Color Scanner (CZCS).

Použitá data z pozemního měření byla získána z portálu Národního Oceánografického Datového Centra. Bohužel dostupnost dat naměřených *in situ* s malým časovým rozdílem a v stejném dni jako byl pořízen bezoblačný satelitní snímek daného území, je velice malá. Vyhovující pozemní data byla nalezena pouze pro jeden snímek každé oblasti. Pro oblast Golfe du Lion byla nalezena data obsahující 21 odběrových bodů, z nichž však pouze 5 odpovídalo podmínce odchylky času odběru od pořízení snímku menší než 5 hodin. Následně byl počet odběrových bodů dále eliminován, když vymodelované hodnoty v okolí bodu nespĺňovaly podmínky zadané pro spárování dat. Pro oblast průlivů Skagerrak a Kattegat byly nalezeny jen 3 vyhovující *in situ* měření.

Nízký počet odběrových míst způsobil, že ze srovnání pozemních a vymodelovaných dat nelze vyvozovat konkrétní závěry, tedy ani posoudit vhodnost použitých dat a nástrojů pro danou oblast.

6.2. Zhodnocení použitých metod

Tato práce je založena na metodách analytického modelování. Byly použity tři existující algoritmy implementované v softwaru BEAM využívající data MERIS. Prvním nástrojem je standardní procesor Case 2 Regional využíváný pro odvození MERIS level 2 dat, využívá kombinovanou neuronovou síť k získání hodnot základních optických vlastností vody (absorpce pigmentů a organické hmoty a rozptyl na suspendovaných částicích). Cvičná data pro NN jsou založena na měřeních pocházejících převážně z oblasti Severního moře. Tento algoritmus byl ověřován mnoha autory pro různé oblasti. Byl například použit kolektivem autorů Vilas et al. (2011) pro oblast Galician rias (severozápadní Španělsko) s dobrou přesností ($R^2 = 0,86$). Dále byl s relativně dobrou přesností použit ve studii Cui et al. (2010) pro oblast Bohaiského moře. V této práci nelze dobře posoudit jeho přesnost v důsledku nedostatku pozemních dat pro kontrolu, avšak zdá se, že lepší výsledky poskytuje v oblasti Skagerraku a Kattegatu než v oblasti Středozemního moře.

Druhým použitým nástrojem je FUB/Wew Water procesor vyvinutý Freie Universität Berlin. Tento procesor byl s úspěchem testován například autory Kratzer & Brockmann & Moore (2008) pro záliv Himmerfjärden a Baltské moře. Algoritmus vykazoval konstantní odchylku od *in situ* dat cca 56% která je však podle autorů způsobená nepřesností implementované atmosférické korekce. Byl také porovnán se standardním procesorem MERIS, který měl výrazně nižší přesnost. Při porovnání výsledků C2R a FUB/Wew je zřejmé, že druhý jmenovaný procesor vykazuje lepší výsledky. Hodnoty jím vypočtené mají víceméně podobné odchylky od pozemně změřených dat na rozdíl od C2R jehož odchylky vykazují značný rozptyl.

Třetím použitým nástrojem je FLH/MCI procesor, jehož výstupem jsou hodnoty indexu Fluorescence Line Height. Index FLH byl vyvinut a testován autory Gower & Brown & Borstad (2004). Podle těchto autorů hodnoty indexu FLH silně korespondují s obsahem chl-a. Avšak pro ověření správnosti je třeba vymodelovat z hodnot indexu hodnoty koncentrace chl-a a ty následně ověřit s pozemně naměřenými daty, což pro nedostatek *in situ* dat nebylo v této práci možné uskutečnit.

Z této práce i z ostatních studií vyplývá, že algoritmy vyvinuté pro globální použití mají vždy značně menší přesnost než algoritmy vyvinuté pro danou oblast. To je způsobeno hlavně nepřesností atmosférické korekce, která pak značně ovlivňuje výstupní hodnoty koncentrací. Také je zřejmé, že je třeba ověřit správnost výstupu algoritmu s pozemními daty, jinak je získaná informace vhodná pouze pro odhad oblastí s vyšší a s nižší koncentrací chl-a, ale nelze ji použít pro stanovení absolutních hodnot, které mohou mít značnou odchylku od těch skutečných. To je otevřeným tématem pro další výzkum.

7. ZÁVĚR

Na začátku práce, zaměřené na monitorování kvality vody pomocí družicových dat vysokého časového rozlišení, bylo vytyčeno několik cílů. Prvním z nich bylo nastudování literatury zabývající se touto problematikou. Jelikož existuje velice málo domácí literatury zabývající se tímto tématem, byly informace čerpány převážně ze zahraničních zdrojů.

Na základě těchto informací bylo jako nevhodnější metoda zvoleno analytické modelování a použití existujících algoritmů pro extrakci hodnot koncentrace chlorofylu z dat MERIS s plným rozlišením. Výběr metody závisel také na malé dostupnosti dat naměřených *in situ*, která byla limitujícím faktorem pro použití jiných metod zpracování. Jako zkoumané oblasti byly vybrány Golfe du Lion při pobřeží jižní Francie a průlivy Skagerrak a Kattegat při pobřeží Dánska, Norska a Švédska.

Družicová data byla vybrána tak, aby z nich bylo možné vytvořit časovou řadu a hodnotit změny koncentrací chl-a. Výběr družicových dat byl limitován výskytem oblačnosti a dostupností dat, protože některé původně vybrané snímky nemohly být z blíže nevysvětlených důvodů ESA poskytnuty. Data byla zpracována pomocí softwaru BEAM, ve kterém na ně byly aplikovány radiometrické a geometrické korekce a následně byly pomocí tří různých nástrojů vypočteny hodnoty chl-a.

Vypočtené hodnoty jsou vizualizovány pomocí 30 map, na nichž lze pozorovat rozdíly mezi výstupy jednotlivých nástrojů. Tyto rozdíly jsou převážně v hodnotách koncentrace, ale ne v jejím prostorovém rozdělení. Procesor FUB/Wew udává zpravidla mnohonásobně nižší hodnoty koncentrace chl-a než procesor C2R. Třetí použitý nástroj, jehož výstupem jsou pouze relativní hodnoty nelze s předchozími dvěma z jiného než z prostorového hlediska porovnat.

Srovnání s pozemními daty a zároveň ověření správnosti vymodelovaných hodnot chl-a bylo značně limitováno malým množstvím dat z pozemního měření. Tento nedostatek byl patrně také příčinou nepřilíš dobrých výsledků. Z použitých nástrojů se však zdá přesnější FUB/Wew Water procesor, nelze to však považovat za statisticky platný závěr. Použité nástroje byly vyvinuty pro globální použití a nemohou tedy nikdy dosáhnout přesnosti algoritmů vyvinutých speciálně pro danou oblast. Pro zlepšení výstupů práce by bylo vhodné mít k dispozici mnohem větší soubor terestrických dat.

Posledním cílem bylo posouzení možností využití dat MERIS pro hodnocení kvality vody (speciálně koncentrace chl-a). Vzhledem k dostatečnému prostorovému i časovému rozlišení, kalibraci spektrálních pásem právě pro účely sledování „barvy oceánu“ a dobré dostupnosti dat se data MERIS jeví jako jedna z nevhodnějších voleb pro monitoring kvality vody.

8. POUŽITÉ ZDROJE

- BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L. 1981. Absorbtion by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and virble domains. *Limnology and Oceanography*, 1981, č. 26, s. 43-53.
- BROCKMANN CONSULT. 2010. *ICOL+ ATBD* [online]. ver. 1.0, 2010 [cit. 2011-03-07], Dostupné z: www.brockmann-consult.de/cms/web/beam, [cit. 2011-03-07], 52 s.
- BROCKMANN CONSULT. 2010. *BEAM HELP* [online]. Ver.4.8.1, 2010 [cit. 2011-17-7], Dostupné z: www.brockmann-consult.de/beam/doc/help/index.html
- CUI, T. ... [et al.] 2010. Validation of MERIS ocean-color products in the Bohai Sea: Case study for turbid coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2010, roč. 114, č. 10, s. 2326-2336.
- DOBROVOLNÝ, P. 1998. *Dálkový průzkum Země: Digitální zpracování obrazu*. Brno: MU Press, 1998, 218 s., ISBN: 80-210-1812-7.
- DOERFFER, R.; SCHILLER, H. 2008. *MERIS Regional Coastal and Lake Case II Water Project: Atmospheric Correction ATBD* [online], ver. 1.0, 2008 [cit. 2011-06-07], Dostupné z: www.brockmann-consult.de/beam-wiki/display/LAKES/ATBDs, 42 s.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. 2006. *MERIS Product Handbook*, ver. 2.6, 2006 [cit. 2011-25-06], Dostupné z: envisat.esa.int/handbooks/meris/CNTR.htm
- GARVER, S. A.; SIEGEL, D. A. 1997. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 1997, č. 102, s. 18607-18625.
- GIOVANNI. 2011. [databáze online]. NASA, 2011 [cit. 2011-27-06], Dostupné z: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>
- GOWER, J. F. R.; DOERFFER, R.; BORSTAD, G.A. 1999. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence absorption and scattering, and its observation by MERIS. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, č. 20, s. 1771-1786.
- GOWER, J. F. R. ... [et al.] 2008. The importance of a band at 709 nm for interpreting water-leaving spectral radiance. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, roč.34, č. 3, s. 287-295.
- HALOUNOVÁ, L.; PAVELKA, K. 2005. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 192 s., ISBN: 80-01-03124-1.
- HÄRMA, P. ... [et al.] 2001. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *The Science of the Total Environment*, 2001, č. 268, s. 107-121.
- KIRK, J.T.O. 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. U.K.: Cambridge University Press, 1994, 509 s., ISBN: 0-521-45966-4.
- KOLÁŘ, J.; HALOUNOVÁ, L.; PAVELKA, K. 1997. *Dálkový průzkum Země 10*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 164 s., ISBN: 80-01-01567-X.

- KOLÁŘ, J. 1990. *Dálkový průzkum Země*, Praha: SNTL – Nakladatelství Technické Literatury, 1990, 170 s., ISBN: 80-03-00517-5.
- KOLÁŘ, J. 2008. *Digitální zpracování obrazových dat*, Praha: Czech Space Office, 2008, 61 s., ISBN: 978-80-904163-0-7.
- KOPONEN, S. 2006. *Remote sensing of water quality for Finnish lakes and coastal areas*, Helsinki: Helsinki University of Technology Laboratory of Space Technology Publications, 2006, 64 s., ISBN: 10-915-22-8533-9.
- KRATZER, S.; BROCKMANN, C.; MOORE, G. 2008. Using MERIS full resolution data to monitor coastal waters: A case study from Himmerfjärden, a fjord-like bay in the northwestern Baltic Sea. *Remote sensing of Environment*, 2008, roč. 112, č. 5, s. 2284-2300.
- LEPPÄRANTA, M.; MYRBERG, K. 2009. *Physical Oceanography of the Baltic Sea*, Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2009, 336 s., ISBN: 978-3-540-79702-9
- MILLOT, C. 1990. The Gulf of Lion's hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 1990, roč. 10, č. 9–11, s. 885–894.
- MOBLEY, C. 1994. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, San Diego: Academic Press, 1994, 592 s., ISBN: 0-12-502750-8
- MOBLEY, C. ... [et al.] 2003. Optical modeling of ocean waters. *Oceanography*, 2003, roč. 17, č. 2, s. 61-65.
- MOREL, A.; MARITORENA, S. 2001. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical research*, roč. 106, č. C4, s. 7763-7780.
- MOREL, A. ... [et al.] 2006. Bio-optical properties of high chlorophyll Case 1 waters and of yellow-substance-dominated Case 2 waters. *Deep-Sea Research I*, 2006, č. 53, s. 1439-1459.
- MURDYCH, Z. 1985. *Dálkový průzkum Země*, Praha: Academia, 1985, 142 s.
- PEDRERO, J. A. 2009. *Evaluation of MERIS Case-II Water Processors in the Baltic Sea* [rukopis]. Helsinki: Helsinki University of Technology. Faculty of Electronics, Communications and Automation. Department of Radio Science and Engineering, 2009. 127 s., Supervisor Dr. Sampsa Koponen.
- QIU, Z.; DOGLIOLI, A. M.; CARLOTTI, F. 2009. Zooplankton transport and distribution in the Gulf of Lions: Estimates from a Lagrangian model and optical remote sensing data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*. 2009, roč. 5, s. II-468 – II-471, ISBN: 978-1-4244-3395-7
- RAHMAN, H.; DEDIEU, G. 1994. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *International Journal of Remote Sensing*, 1994, roč. 15, č. 1, s. 123-143.
- ROBINSON, I. S. 1985. *Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists*, Chichester: Ellis Horwood Limited, 1985, 455 s., ISBN: 0-85312-598-8.

- SCHRÖDER, T. 2004. *Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen in Küstengewässern mit MERIS unter Anwendung expliziter und impliziter Atmosphärenkorrekturverfahren* [online], Berlin: Freie Universität Berlin. Department of Earth Sciences, 2004. [cit. 2011-15-07], Dostupné z: www.diss.fu-berlin.de/diss/receive/FUDISS_thesis_000000001597, 113 s.
- SWEDISH METEOROLOGICAL AND HZDROLOGICAL INSTITUTE (SHMI). 2007. *Swedish national report on Eutrophication in the Kattegat and the Skagerrak OSPAR ASSESSMENT 2007* [online]. Norrköping: SHMI, 2007 [cit. 2011-12-06], Dostupné z: www.smhi.se/en/Publications/swedish-national-report-on-eutrophication-status-in-the-kattegat-and-the-skagerrak-ospar-assessment-2007-1.6639, 53 s.
- SØRENSEN, K.; AAS, E.; HØKEDAL, J. 2007. Validation of MERIS water products and bio-optical relationships in the Skagerrak, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, roč. 28, č. 3-4, s. 555-568.
- STRÖMBECK, N. 2001. *Water Quality and Optical Properties of Swedish Lakes and Coastal Waters in Relation to Remote Sensing*, Upsala: Upsala University, 2001, 27 s., ISBN: 91-554-5037-7.
- VAN DER WOERD, H. J.; PASTERKAMP, R. 2008. HYDROPT: A fast and flexible method to retrieve chlorophyll-a from multispectral satellite observations of opticky komplex coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 2008, roč. 112, č. 4, s. 1795-1807.
- VERBYLA, D. L. 1995. *Satellite remote sensing of natural resources*, Boca Raton: CRC Lewis, 1995, 198 s., ISBN: 1-55670-107-4.
- YANG, W. ... [et al.] 2011. Estimating constituent concentration in case II waters from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables, *Remote Sensing of Environment*, 2011, roč. 115, č. 5, s. 1247-1259.
- ZIBORDI, G. ... [et al.] 2009. Validation of satellite ocean color primary products at complex coastal sites: Northern Adriatic Sea, Northern Baltic Sea and Gulf of Finland, *Remote Sensing of Environment*, 2009, roč. 113, č. 12, s. 2574-2591.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Tabulky obsahující hodnoty chl-a získané pozemním odběrem, hodnoty chl-a vymodelované jednotlivými nástroji v bodě *in situ* odběru a mediány vymodelovaných hodnot v oblasti 3x3 pixelů kolem místa odběru (pro body použité pro srovnání).

Příloha B: Grafy korelací mezi pozemně změřenými hodnotami chl-a a vymodelovanými hodnotami chl-a v jednotkách mg/m³ a jejich korelační koeficienty

Příloha C: Mapy bodů použitých pro vytvoření časové řady (a), tabulky těchto bodů (b) a grafy časových řad (c).

Příloha D: Blokový diagram postupu zpracování snímků.

Příloha E: Výsledné mapy oblasti Golfe du Lion zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a vymodelované pomocí nástroje Case 2 Regional procesor (C2R).

Mapa E1: Golfe du Lion, C2R, 17. 4. 2003

Mapa E2: Golfe du Lion, C2R, 3. 5. 2003

Mapa E3: Golfe du Lion, C2R, 10. 6. 2003

Mapa E4: Golfe du Lion, C2R, 19. 8. 2003

Mapa E6: Golfe du Lion, C2R, 25. 10. 2003

Příloha F: Výsledné mapy oblasti Golfe du Lion zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a vymodelované pomocí nástroje FUB/Wew Water procesor (FUB/Wew).

Mapa F1: Golfe du Lion, FUB/Wew, 17. 4. 2003

Mapa F2: Golfe du Lion, FUB/Wew, 3. 5. 2003

Mapa F3: Golfe du Lion, FUB/Wew, 10. 6. 2003

Mapa F4: Golfe du Lion, FUB/Wew, 19. 8. 2003

Mapa F6: Golfe du Lion, FUB/Wew, 25. 10. 2003

Příloha G: Výsledné mapy oblasti Golfe du Lion zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a (relativní hodnoty) vymodelované pomocí nástroje FLH/MCI Processor.

Mapa G1: Golfe du Lion, FLH, 17. 4. 2003

Mapa G2: Golfe du Lion, FLH, 3. 5. 2003

Mapa G3: Golfe du Lion, FLH, 10. 6. 2003

Mapa G4: Golfe du Lion, FLH, 19. 8. 2003

Mapa G6: Golfe du Lion, FLH, 25. 10. 2003

Příloha H: Výsledné mapy oblasti Skagerrak a Kattegat zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a vymodelované pomocí nástroje Case 2 Regional procesor (C2R).

Mapa H1: Golfe du Lion, C2R, 8. 5. 2006

Mapa H2: Golfe du Lion, C2R, 12. 6. 2006

Mapa H3: Golfe du Lion, C2R, 16. 7. 2006

Mapa H4: Golfe du Lion, C2R, 5. 8. 2006

Mapa H5: Golfe du Lion, C2R, 21. 9. 2006

Příloha I: Výsledné mapy oblasti Skagerrak a Kattegat zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a vymodelované pomocí nástroje FUB/Wew Water procesor.

Mapa I1: Golfe du Lion, FUB, 8. 5. 2006

Mapa I2: Golfe du Lion, FUB, 12. 6. 2006

Mapa I3: Golfe du Lion, FUB, 16. 7. 2006

Mapa I4: Golfe du Lion, FUB, 5. 8. 2006

Mapa I5: Golfe du Lion, FUB, 21. 9. 2006

Příloha J: Výsledné mapy oblasti Skagerrak a Kattegat zobrazující plošné rozložení koncentrace chl-a (relativní hodnoty) vymodelované pomocí nástroje FLH/MCI Processor.

Mapa J1: Golfe du Lion, FLH, 8. 5. 2006

Mapa J2: Golfe du Lion, FLH, 12. 6. 2006

Mapa J3: Golfe du Lion, FLH, 16. 7. 2006

Mapa J4: Golfe du Lion, FLH, 5. 8. 2006

Mapa J5: Golfe du Lion, FLH, 21. 9. 2006