

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA EKOLOGIE



**Analýza teplotních změn vodní hladiny na vybraných
nádržích s využitím metod DPZ**
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Václava Mařašovská

Bakalant: Lada Bahnová

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lada Bahnová

Aplikovaná ekologie

Název práce

Analýza teplotních změn vodní hladiny na vybraných nádržích s využitím metod DPZ

Název anglicky

Analysis of remotely sensed water surface temperature dynamics

Cíle práce

Cílem práce je zhodnocení změny teploty vodní hladiny na 2 vybraných lokalitách. Jedná se o vodní nádrž Jesenice u Chebu a o rekultivační jezero Medard u města Sokolov. Analýza teplotních změn proběhne za období 2020 až 2021 – v měsících červen až září. Dalším cílem je vyhodnocení výkonnosti modelu, pomocí kterého budou teploty zjišťovány ze snímků družic Sentinel-2.

Metodika

-Studentka nastuduje odbornou tuzemskou i zahraniční literaturu a zpracuje rešerši dané problematiky (popis zájmového území, teplota vody a její další využití, mise Sentinel-2, výpočet spektrálních indexů...).

-Dále si studentka obstará vhodné snímky k analýze. Bude se jednat o snímky z družic Sentinel (2A a/nebo 2B) za roky 2020 a 2021 a to vždy v hlavním koupacím období (červen – září).

-Použité snímky budou předzpracovány před samotnou analýzou v programu R pomocí balíčku „sen2r“. Bude provedena atmosférická korekce, maskování oblačnosti, ořez na vybrané vodní plochy a výpočet spektrálních indexů, které vstoupí jako proměnné do vlastního modelu.

-V programu R bude dále pomocí modelovací techniky Random Forests vypočítána povrchová teplota hladiny vody za daná období. Výsledky modelu a referenčních dat budou mezi sebou porovnány a analyzovány z hlediska prostorové heterogenity a časového vývoje sledovaného jevu. Studentka zhodnotí funkčnost modelu pomocí statistik popisujících výkonnost zkonstruovaného modelu.

Doporučený rozsah práce

30-40 stran

Klíčová slova

dálkový průzkum země, Sentinel-2, teplota vody, vodní nádrž Jesenice, jezero Medard, spektrální indexy

Doporučené zdroje informací

- Campbell J.B., Wynne R. H., 2011: Introduction to remote sensing, 5th ed. The Guilford Press, USA, 667 s.
Dobrovolný P., 1998: Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu. Masarykova univerzita, Brno.
ESA: Sentinel-2 operations (online) [cit. 2021.04.12], dostupné z http://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations
HALOUNOVÁ, L. – PAVELKA, K. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. KATEDRA VYUŽITÍ STROJŮ. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1.
Handcock R. N., Torgersen Ch. E., Cherkauer K. A., Gillespie A. R., Tockner K., Faux R. N., Tan J., 2012: Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. In: Carbonneau P. E., Piégay H. (eds.): *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. John Wiley & Sons, Ltd, UK: 85-113.
MacCallum S. N., Merchant Ch. J., 2021: Surface water temperature observation of large lakes by optimal estimation. *Canadian Journal of Remote Sensing* Volume 38, Issue 1. P. 25-45.
Maťašovská V., Kothan F., Ledvinka O., Pumann P., Fojtík T., Makovcová M., Bendakovská L., 2021: Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu koupacích míst. *VTEI* 2021/1: 37-45.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Bc. Václava Maťašovská

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 03. 2022

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Analýza teplotních změn vodní hladiny na vybraných nádržích s využitím metod DPZ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Kraslicích, dne 31. 3. 2022

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat všem, kteří mi jakýmkoli způsobem pomohli při psaní této práce. V první řadě děkuji paní Ing. Václavě Maťašovské, která mě k tomuto tématu přivedla. Děkuji za vedení práce, za trpělivost a za pomoc při aplikaci predikčního modelu. Dále bych chtěla poděkovat správcům vodních ploch Jesenice a Medard za poskytnutí terénních dat o teplotě vody. Díky patří také mé kamarádce Mgr. Evě Černínové za rozumné připomínky a rady. A nakonec bych ráda poděkovala svému příteli za jeho nekonečnou podporu a trpělivost.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá využitím metod dálkového průzkumu Země a predikčního modelování. Hlavním cílem této studie je za pomoci ukázky jedné z technik predikčního modelování s využitím strojového učení prokázat využitelnost satelitních snímků pro hodnocení teploty hladiny vody dvou větších vodních ploch. Konkrétně byla vybrána mise *Sentinel-2* z Programu *Copernicus*, která se zaměřuje zejména na sledování složek životního prostředí, přičemž jednou takovou složkou je právě i voda a její vlastnosti a parametry. Jako zájmové území byly vybrány dvě lokality v Karlovarském kraji. Jedná se o rekultivační jezero Medard v Sokolovské hnědouhelné pánvi a vodní nádrž Jesenice na řece Odravě. Z mise *Sentinel-2* bylo získáno 8 družicových snímků z června až září let 2020 a 2021. Vybrané snímky byly nejprve předzpracovány a následně z nich byly vypočítány spektrální indexy. Ty vstupovaly jako proměnné do vlastního modelování. Pomocí modelovací techniky *Random Forests* byly spočítány hodnoty teplot na hladině vodních ploch. Zpracování satelitních snímků i příprava vstupů do modelu probíhaly v software R, a to především pomocí balíčku *sen2r*, který je zaměřený na práci se satelitními daty. Výsledky modelování byly poté porovnány s teplotami naměřenými in-situ, které byly poskytnuty správci obou vodních ploch. V závěru jsou popsány rozdíly mezi získanými údaji a jejich možné příčiny.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, Sentinel-2, teplota vody, vodní nádrž Jesenice, jezero Medard, spektrální indexy

ABSTRACT

This thesis deals with the use of remote sensing and predictive modelling. The main goal of this study is to use one of the methods of machine learning-based predictive modelling to demonstrate the potential of satellite images in measuring the surface temperature of two large bodies of water. The method of choice was the *Copernicus Sentinel-2* mission, designed to monitor the environment and its components, one of which is water, and its properties and parameters. The study area is two localities in the Karlovy Vary region in the Czech Republic. The first is the reclaimed lake Medard in the Sokolov brown coal basin and the other the Jesenice Reservoir on the Odrava River. Eight satellite images were retrieved from *Sentinel-2* between June and September 2020 and 2021. The images were pre-processed and spectral indices were calculated, serving as variables in the modelling. Water surface temperatures were calculated using the *Random Forests* modelling technique. R, and particularly the *sen2r* package designed for satellite data, was used to analyse the satellite images and prepare the model inputs. The modelling results were subsequently compared with in-situ temperatures provided by entities in charge of the two water bodies. The thesis concludes with a description of the differences between the data and suggests explanation.

Keywords: remote sensing, Sentinel-2, water temperature, Jesenice Reservoir, Medard Lake, spectral indices

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. CÍLE PRÁCE.....	2
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	3
3.1 Teplota vody	3
3.1.1 Teplotní stratifikace vody a její vliv na pohyby vody.....	3
3.1.2 Využití povrchové teploty vody pro další výpočty	5
3.2 Dálkový průzkum Země	6
3.2.1 Satelitní data.....	8
3.2.2 Program <i>Copernicus</i>	9
3.2.3 <i>Sentinel-2</i>	10
3.2.4 Produkty <i>Sentinelu-2</i>	14
4. METODIKA	18
4.1 Výběr a charakteristika zájmového území	18
4.1.1 Vodní nádrž Jesenice	19
4.1.2 Jezero Medard.....	20
4.2 Použitý software.....	21
4.3 Použitá data.....	22
4.3.1 Získání satelitních snímků	22
4.3.2 In-situ data	25
4.4 Postup práce	28
4.4.1 Předzpracování snímků	28
4.4.2 Výpočet spektrálních indexů.....	30
4.4.3 Predikce teplot pomocí strojového učení	32
5. VÝSLEDKY PRÁCE	33
6. DISKUZE	45
7. ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE	48
8. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	49
8.1 Odborné publikace.....	49
8.2 Legislativní zdroje	51
8.3 Internetové zdroje	51
8.4 Ostatní zdroje.....	52
8.5 Použitý software.....	53
Seznam obrázků a tabulek	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ArcČR	Digitální vektorová databáze České republiky
BOA	Bottom of Atmosphere
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
ČZU	Česká zemědělská univerzita
DPZ	Dálkový průzkum Země
ERTS-1	Earth Resources Technology Sattelite
ESA	European Space Agency
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EU	Evropská unie
GIS	Geografický informační systém
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GNU GPL	General Public Licence
IDB	Index DataBase
JSON	JavaScript Object Notation
L1C	Level 1C
L2A	Level 2A
LIDAR	Light Detection and Ranging
LTA	Long Term Archive
MSI	MultiSpectral Instrument
MVE	Malá vodní elektrárna
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PLSR	Partial Least Square Regression
RF	Random Forests
SAFE	the Standard Archive Format for Europe
SCL	Scene Classification
Sen2Cor	Sentinel-2 Correction
SWIR	Short Wave InfraRed
TIR	Thermal InfraRed

TOA	Top of Atmosphere
TROPOMI	Tropospheric Monitoring Instrument
UTM	Universal Transverse Mercator
VNIR	Visible and Near InfraRed
WGS	World Geodetic System
WMS	Web Map Service
ZABAGED	Základní báze geografických dat
ZIP	Zone Improvement Plan

1. ÚVOD

Dálkový průzkum Země (DPZ) se v posledních letech dostává čím dál více do povědomí lidí jako velmi užitečná metoda pro monitoring naší planety. Sice jsou jeho počátky datovány až do 18. století, největší rozkvět však zažívá díky družicím od 70. let až dodnes (Halounová, Pavelka 2005). Družicové systémy nabízejí velmi široké spektrum využití pořízených dat, zejména v oblasti vojenské, meteorologické a environmentální (tedy týkající se životního prostředí).

Jednou z důležitých složek životního prostředí je voda a její vlastnosti. Jak se vyučuje již na základní škole, voda je základem pro existenci života. Má nespočet funkcí ve všech organismech na Zemi a ovlivňuje chod celé planety. Proto je třeba zásoby (především sladké) vody na světě monitorovat a pečovat o ně. Významným parametrem vod tekoucích i stojatých je pak teplota. Ta má nejen lokální vliv na organismy a procesy v samotném vodním prostředí, ale v globálním měřítku působí přes výpar na celou atmosféru. Z těchto důvodů je třeba i teplotu vody, jako jeden z významných činitelů vodního cyklu a změny klimatu, pravidelně monitorovat (MacCallum, Merchant 2012).

Je třeba zmínit, že se poměrně málo vnitrozemských vodních ploch může pyšnit vlastním monitoringem parametrů vody včetně teploty. Pokud již takovéto zkoumání probíhá a měření jsou dostupná, bývají většinou omezena na konkrétní bod na vodní ploše, kde je teplota měřena tzv. in-situ (tedy přímo na daném místě, může se jednat např. o konkrétní bóji nebo jedno místo z mola atd.) (MacCallum, Merchant 2012). Právě v tomto okamžiku poznání přichází s velkou slávou na scénu dálkový průzkum Země v podobě satelitních snímků.

Satelitní snímání Země má mimo jiné veliký potenciál pro souhrnný monitoring parametrů vodních ploch. Kromě sledování vývoje řas, sinic, mikrobiálního znečištění a dalších ukazatelů kvality vody (Maťašovská a kol. 2021a), je možné díky satelitním datům poskytovat kompletní obraz teplotního rozdělení na hladině celé vodní plochy. Nejen že tyto informace nemusejí být omezeny jen na jeden určitý bod, navíc mohou být poskytovány pravidelně a konstantně. Může tak být sledována časová i prostorová dynamika daných ukazatelů a jevů. Samozřejmě představa není dokonale růžová, je třeba brát ohledy na potenciální oblačnost nad vybranou lokalitou. I přesto zatím výhody převažují nad měřením in-situ (MacCallum, Merchant 2012).

Většina parametrů vody, jako je průhlednost, obsah řas a sinic, přítomnost sedimentů aj., lze pomocí družicových senzorů snímat v pásmech viditelné části elektromagnetického spektra a do určité míry i v oblasti infračervené. K získání informací o teplotě se však nabízí použít tepelné infračervené záření (TIR – *Thermal InfraRed*) o vlnových délkách 7-13 μm (Dörnhöfer, Oppelt 2016). Snímáním termálních pásem se může chlubit například družice *Landsat-7*. Ta nese senzor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), který s prostorovým rozlišením 60 m snímá právě i pásma v TIR oblasti (Handcock a kol. 2012). A zde přichází krátká úvaha. Proč použít *Landsat-7*, když se *Sentinel-2* může být dosaženo rozlišení až 10 m na pixel? Někteří by jistě řekli: „Protože *Sentinel-2* v termálních pásmech nesnímá.“ Pravda. A právě proto vznikla kombinace *Sentinel-2* + strojové učení v podobě prediktivního modelování teplot. Pomocí modelovací techniky *Random Forests* a predikce by tak mohla být vypočítána teplota hladiny na jakékoli vnitrozemské vodní ploše na Zemi, a to v úctyhodném prostorovém rozlišení 10 m.

2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je předvést možnost využití satelitních dat pro predikční modelování, konkrétně jde o výpočty teploty hladiny vody pomocí modelovací techniky *Random Forests*. Z vesmírných misí byla vybrána *Sentinel-2* a jako vhodné lokality byly vybrány jezero Medard a vodní nádrž Jesenice. Smyslem je podrobné sestavení jakéhosi návodu pro uživatele. Ten by měl zahrnovat samotné získání satelitních i terénních dat, zpracování jednotlivých družicových snímků a samozřejmě konečné výpočty a grafická zobrazení. Součástí práce je validace vybrané modelovací techniky pomocí získaných teplot naměřených in-situ. Dalším cílem je sestavit mapové výstupy s podrobným rozložením teplot na hladině vody. Predikce teplot proběhla za roky 2020 a 2021 a to vždy v hlavním koupacím období od června do září.

Literární rešerše se zabývá významem teploty vody, definicí dálkového průzkumu Země a popisem misí *Sentinel* včetně jejich možného využití. Dále je kladen důraz na předzpracování satelitních snímků, které je nezbytné pro jakékoli další výpočty a analýzy.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Teplota vody

Teplota vody je jedním ze základních parametrů vodních ploch i vodních toků. Je ovlivněna vodou podzemní, antropogenními vlivy (např. využitím půdy v okolí), ale především slunečním zářením, které je svrchními vrstvami vod absorbováno (Wetzel 2001; Handcock a kol. 2012). Teplota ovlivňuje veškeré chemické i biologické procesy ve vodě a život přítomných rostlinných i živočišných organismů. Avšak kromě vlivu na samotné vodní prostředí působí i na výměnu tepla a vlhkosti mezi vodou a vzduchem. Podílí se tak například na vodním cyklu a globálně i na změnách klimatu (MacCallum, Merchant 2012). Než však bude vysvětleno teplotní rozvrstvení typické vodní nádrže, je nutné zmínit pojmy teplotní anomálie a měrná tepelná kapacita vody.

Teplotní anomálie je jev, který popisuje, že voda má nejvyšší hustotu při 3,94 °C. Zároveň má v tu chvíli i nejmenší možný objem. Voda se může také pyšnit velkou měrnou tepelnou kapacitou, což je množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. V praxi to znamená, že je třeba dodat velké množství energie, aby se voda ohřála, a naopak se i velké množství energie vydá, než se opět ochladí. Zjednodušeně řečeno, voda má tendenci si držet svoji teplotu (více než například vzduch) a teplotní změny ve vodním prostředí jsou tedy pomalejší (tlumí tak denní a sezónní výkyvy teplot okolní atmosféry). Výsledkem je, že vodní tělesa působí jako akumulátory tepla. Jak rozdílná hustota jednotlivých vrstev vody, tak velká měrná tepelná kapacita přispívají k udržení stability teplotního rozvrstvení vodních biotopů (Lellák, Kubíček 1991).

3.1.1 Teplotní stratifikace vody a její vliv na pohyby vody

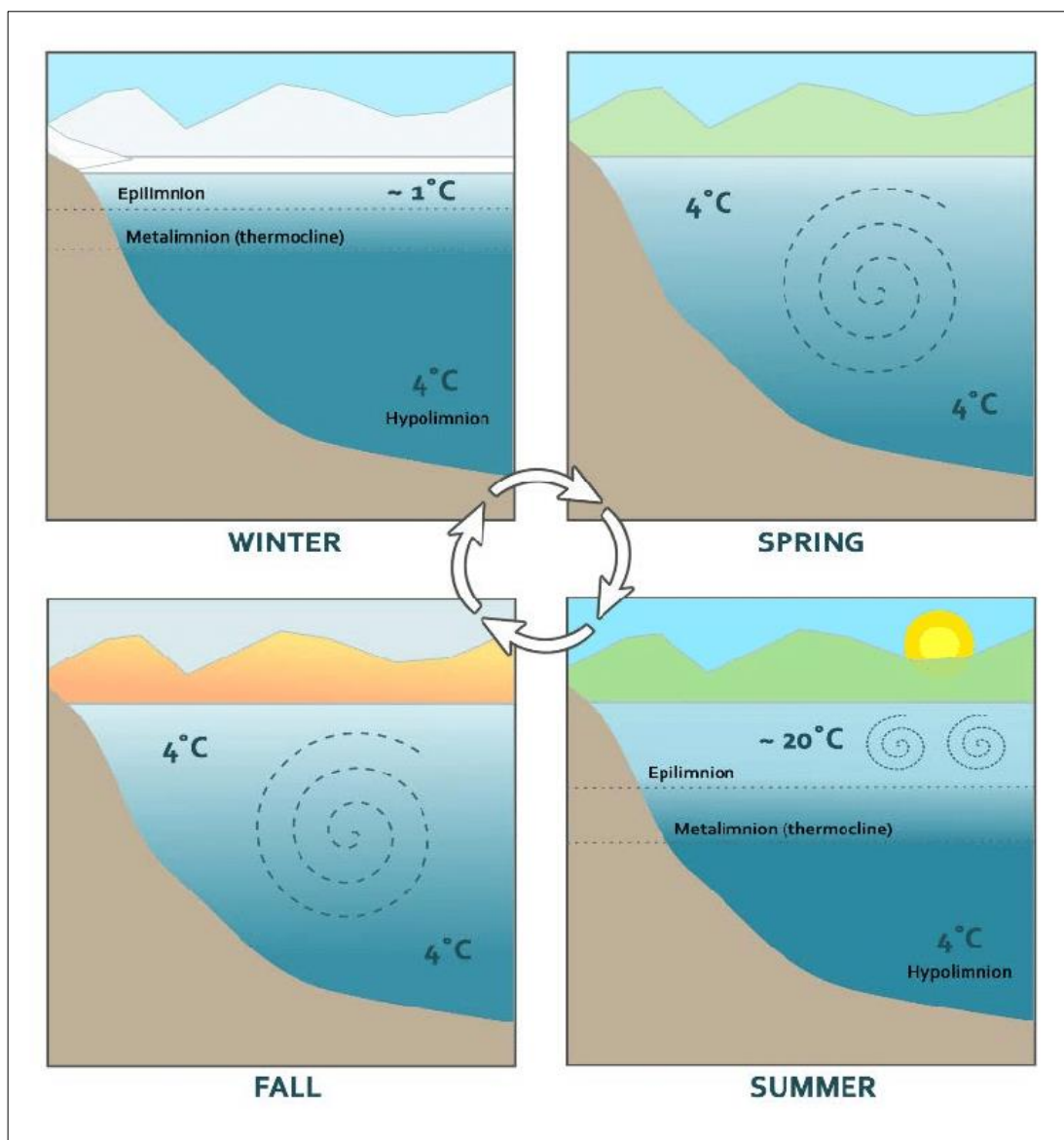
Jak se dále zmiňují Lellák a Kubíček (1991), teplotní stratifikace (zonace) ve stojaté vodní nádrži je výsledkem výše zmiňovaných dvou jevů. Jak bylo také již řečeno, nejvýznamnějším zdrojem ohřevu vody je sluneční záření. To je hladinou rychle absorbováno, s postupující hloubkou ovšem teplota vody klesá, přičemž u dna se drží voda nejhustší, ta čtyřstupňová. Na jaře a na podzim bývá voda promíchávána v celém svém objemu a tento jev se nazývá jarní/podzimní cirkulace. Přes den se hladina vody ohřívá, večer a v noci však dochází ke ztrátě tepla z hladiny. Chladnější voda na hladině zvětšuje svou hustotu a zanořuje se tím pádem do hlubších vrstev. Vytlačuje tak na povrch teplejší vodu z hloubky, která se opět může postupně ochlazovat.

Protože v tomto období často klesne teplota vody až na 4 °C, může se právě promíchat voda i s těmi nejhlubšími vrstvami.

V létě a v zimě naopak dochází k tzv. stagnaci, protože voda na hladině většinou nedosáhne 4 °C, aby mohlo dojít k promíchání. Vzniká tak horní vrstva epilimnion a spodní vrstva hypolimnion. V epilimniu je v létě voda v neustálém pohybu a díky větru (vlnám) a slunečnímu záření se stále ohřívá a ochlazuje (den/noc). V zimě často bývá epilimnion zamrzlé. Hypolimnion si po většinu sezóny drží svou teplotu 4 °C. Někdy se mezi nimi vymezuje ještě skočná vrstva metalimnion, kde dochází k nejprudší změně teploty (Lellák, Kubíček 1991). Sezónní střídání cirkulací a stagnací je patrné z obr. 1.

Cirkulace vody je velmi významná pro cykly živin. Během léta či zimy se usazují na dně a díky jarnímu/podzimnímu promíchávání se dostanou do celé nádrže, kde jsou přístupné i pro jiné než bentické (obývající břeh a dno) organismy.

Teplotní stratifikace a pohyby vody jsou uplatňovány zejména v hlubších nádržích. V těch mělčích není voda dostatečně hluboká, aby se mohlo vytvořit hypolimnion. Specifické postavení mají ovšem přehradní nádrže, které se mohou pyšnit i permanentním průtokem. Ten má vliv nejen na transport látek, ale právě i na teplotní režim vody. Sice v přehradě také funguje vrstvení a míchání vody, teplota ovšem určuje, jak budou pohyby vody vypadat. Pokud je přitékající voda teplejší než ta v epilimniu nádrže, ihned se smíchává s epilimniem a průtok nádrží se odehrává pouze v této horní vrstvě. Pokud ale přitéká voda chladnější (je tedy i hustší), klesá ke dnu a míchá se s hypolimniem. Průtok vody se pak odehrává pouze ve vrstvách hlubších (Wetzel 2001).



Obr. 1: Střídání jarních a podzimních cirkulací a letních a zimních stagnací vody v typické vodní nádrži. V zimě a v létě je nádrž rozdělena na svrchní vrstvu epilimnion a spodní vrstvu hypolimnion (Skoglund, 2019).

3.1.2 Využití povrchové teploty vody pro další výpočty

Co se dalších výpočtů týče, nalézá teplota vody uplatnění především ve zjišťování hydrologické bilance vodního útvaru nebo celého povodí. Bilance porovnává přírůstky a úbytky vody za časovou jednotku a tím pádem i celkové změny objemu vody. Za přírůstky (vstupy) může být označen přítok nebo srážky, za úbytky (výstupy) pak odtok či výpar. Právě výpar (tedy množství vody vypařené z plochy 1 m^3 za jednotku času) je složitý proces ovlivněn řadou činitelů, mezi něž patří i teplota vody (Povodí Ohře ©2019a).

3.2 Dálkový průzkum Země

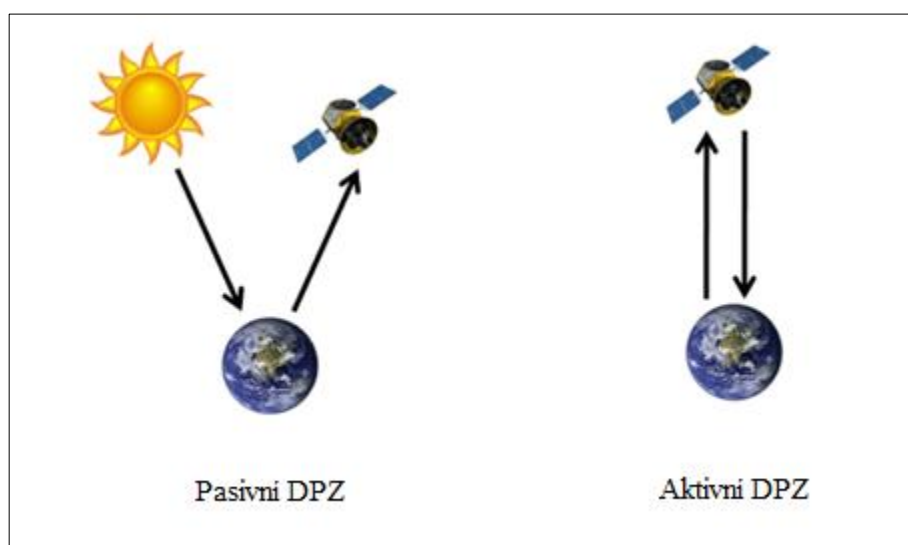
Definice dálkového průzkumu Země je mnoho a mohou být rozděleny na konvenční a nekonvenční. Ty konvenční mají podstatu společnou: sběr informací z povzdálí. Je to pozorování povrchu Země pomocí odražené nebo emitované elektromagnetické energie (Campbell, Wynne 2011). Z nekonvenčních definic může být uvedena například jedna úsměvná od Andrewa Bashfielda: Dálkový průzkum je nejdražší způsob, jak vytvořit obrázek (Halounová, Pavelka 2005).

Začátky DPZ mohou být datovány již do 18. století, kdy byla vynalezena fotografie. Krajina se nedříve fotila z balónů, s příchodem 19. století a vývojem techniky se postupně přešlo na letadla. Letecké snímání zaznamenalo největší rozmach při první a druhé světové válce. Samozřejmě bylo používáno zejména pro vojenské účely, ale začínalo už i mapování lesů a zemědělských ploch. Od druhé poloviny 19. století pak probíhal intenzivní vesmírný výzkum a do kosmu bylo vypuštěno velké množství družic. Veliký zlom přišel v roce 1972, kdy byl vyslán na oběžnou dráhu první satelit přímo zaměřený na monitoring Země. Původně se jmenoval ERTS-1 (*Earth Resources Technology Sattelite*), později byl přejmenován na *Landsat 1*. Poprvé tak byla produkována konstantní data o povrchu Země (Dobrovolný 1998; Halounová, Pavelka 2005).

Metody DPZ se nejčastěji rozdělují podle dvou kritérií. Podle způsobu, jak zaznamenat obraz, rozlišujeme metody konvenční a nekonvenční. Zatímco konvenčními metodami jsou pořizovány snímky fotografické a výsledkem je tedy analogový obraz, při nekonvenčních metodách vzniká obraz digitální pomocí sensorů (skenerů) umístěných zejména na družicích. Další rozdíly mezi těmito metodami zobrazuje tab. 1. Druhým kritériem je zdroj energie. Podle něj můžeme dělit metody DPZ na aktivní a pasivní. Při aktivních metodách měří přístroj odražené záření od povrchu Země z vlastního umělého zdroje. Jedná se o radarové nebo laserové snímání (např. metoda LIDAR - *Light Detection and Ranging*). Pasivní metody jsou oproti tomu založeny na měření odraženého slunečního záření (viz obr. 2). (Halounová, Pavelka 2005; Mařašovská a kol. 2021b). V obou případech je měřena intenzita elektromagnetické energie a druh záření vyjádřený vlnovými délkami. Samozřejmě lze DPZ dělit ještě z dalších, avšak spíše minoritních hledisek, jako je druh nosiče (družice, letadla, drony...), šířka záběru, možné využití, snímaná spektrální pásma atd.

Konvenční metody	Nekonvenční metody
- analogový obraz	- digitální obraz
- velmi vysoké prostorové rozlišení (řádově v cm)	- nižší prostorové rozlišení (řádově v m)
- využita úzká část spektra	- využita větší část spektra
- nosičem zejména letadla a drony, příp. balóny a družice	- nosičem zejména družice a drony, příp. letadla

Tab. 1: Rozdíly mezi konvenčními a nekonvenčními metodami DPZ (Mařašovská, 2018).



Obr. 2: Zjednodušený princip pasivního (vlevo) a aktivního (vpravo) snímání Země (Shaik, 2022, vlastní úprava).

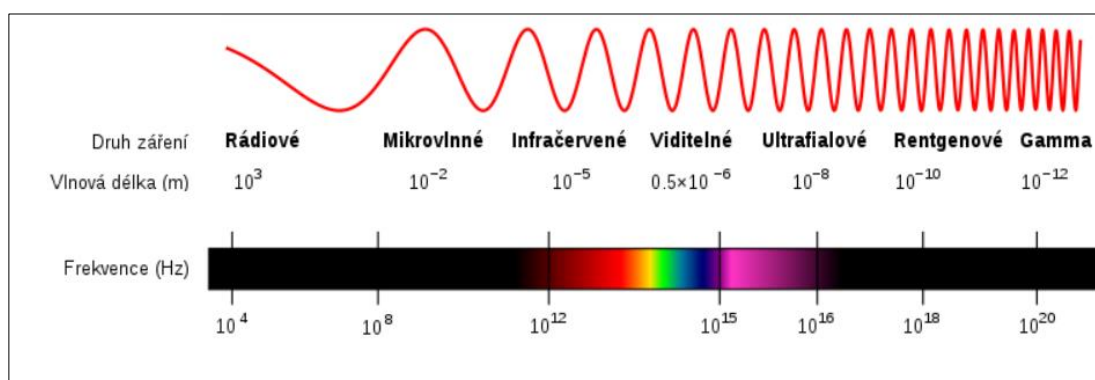
Monitoring povrchu Země pomocí DPZ je využíváno v mnoha odvětví díky početným výhodám a silným stránkám. Mezi ty nejsilnější patří jistě aktuálnost snímků, vysoká periodicita snímání a vysoké prostorové rozlišení pořizovaných dat (u *Sentinelu-2* se dostáváme na rozlišení 10 m, tzn. jeden pixel na snímku zobrazuje území o rozloze 10 x 10 m). Díky tomu lze bez obtíží sledovat časovou i prostorovou dynamiku daného území. Dalším pozitivem je velký záběr jednoho snímku a tím pádem i rozsáhlost sledovaného území (Mařašovská a kol. 2021a). DPZ také umožňuje sledování ze země špatně dostupných oblastí. Nelze opomenout ani fakt, že senzory zaznamenávají i informace lidským okem nepozorovatelné. Snímají totiž i v jiných vlnových délkách, než jaké má viditelné světlo (viz kap. 3.2.1 Satelitní data).

Díky všem těmto výhodám poskytují data z DPZ důležité a nepostradatelné informace především z oblasti životního prostředí. Ať už se jedná o mapování lesů a další

vegetace, informace o atmosféře, průzkum vodních zdrojů i oceánů či využití půdy a její změny, nalézají tyto informace využití v mnoha oborech. Příkladem může být zemědělství (odhady výnosů plodin, zefektivnění pěstování), ekologie (mapování biotopů), geografie (mapování pokryvu země), archeologie, lesnictví či ochrana vody. Pro člověka může být další důležitou oblastí mapování urbanizace a dopravy, podpora veřejné bezpečnosti a obrany států nebo monitorování katastrof včetně jejich zmírňování a prevence. V neposlední řadě pomáhá DPZ inovovat odvětví jako výpočetní techniku či umělou inteligence a napomáhá integrovat tyto obory do jiných (Pei a kol. 2021).

3.2.1 Satelitní data

Satelitní data a mise, ze kterých pocházejí, lze také členit dle nejrůznějších kritérií. Prvním z nich je využití. Takto můžeme mise rozdělit na vojenské (např. GOLEM), meteorologické (např. MetOp, METEOSAT, NOAA) a mise pro tematický monitoring Země (např. *Landsat*, *Sentinel*). Dalším důležitým kritériem pro dělení dat je jejich prostorové rozlišení. Nasnímaná data tak mohou být členěna na data s nízkým, středním, vysokým a velmi vysokým prostorovým rozlišením. Dále se podle vlnových délek snímání rozdělují na optická a radarová. Zatímco optické systémy snímají povrch Země ve viditelné a infračervené části spektra, radarové systémy využívají pásma mikrovlnná (Maťašovská a kol. 2021a; Maťašovská a kol. 2021b). Obr. 3 by měl čtenáři připomenout rozvržení elektromagnetického spektra.



Obr. 3: Spektrum elektromagnetického záření včetně vlnových délek a frekvencí (Domestomas, 2021, vlastní úprava).

Významné dělení především pro koncové uživatele je pak z hlediska dostupnosti na data placená a volně dostupná. Placená data poskytují komerční společnosti jako *Digital Globe* nebo *Planet*. Specializují se na vysoké prostorové rozlišení (satelity dokáží rozpoznat i objekty veliké jen 30 x 30 cm), ale vysoká je pak i jejich cena. Volně dostupná data vznikají díky vesmírným programům a jsou sbírána především Evropskou kosmickou agenturou (ESA, *European Space Agency*) a Národním úřadem pro letectví a vesmír (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*) (JICmagazín ©2019). Jako příklad zdroje veřejně přístupných dat je uveden program *Copernicus*.

3.2.2 Program *Copernicus*

Program *Copernicus* je evropský program dálkového průzkumu Země, který byl zahájen v roce 2014 nařízením Evropské unie č. 377/2014. Nahradil tak původní projekt GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) z května roku 1998. *Copernicus* byl řízen Evropskou Unií reprezentovanou Evropskou komisí ve spolupráci s členskými státy, ESA a dalšími agenturami a složkami (Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 377/2014). V roce 2021 byl dle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2021/696 pro správu veškeré podobné aktivity zaveden Kosmický program Unie a zřízena Agentura Evropské unie pro Kosmický program.

Hlavním cílem programu je poskytování co nejdetailejších a nejpřesnějších dat z oblasti životního prostředí a bezpečnosti. Konkrétně jsou poskytovány informace z těchto šesti oblastí: oceán, pevnina, atmosféra, klimatická změna, bezpečnost a řešení nouzových událostí. Za těmito účely program obsahuje složku vesmírnou a složku pozemskou (in-situ) (Jutz, Milagro-Pérez 2020).

Jak Jutz a Milagro-Pérez (2020) dále uvádějí, kosmická složka programu je v současnosti reprezentována zejména zvláštními misemi jménem *Sentinel*. Jedná se o několik řad družic vypuštěných na oběžnou dráhu Země. Mise *Sentinel-1* je založena na kontinuálním radarovém snímání Země nezávisle na počasí. Podporuje tak sledování zalednění oceánu, ropných skvrn, lodí, ale i pevniny kvůli riziku zemětřesení či povodní. *Sentinel-3* je dvojice satelitů určená pro měření parametrů jako je teplota zemského povrchu (včetně oceánů), topografie mořské hladiny, kvalita vody

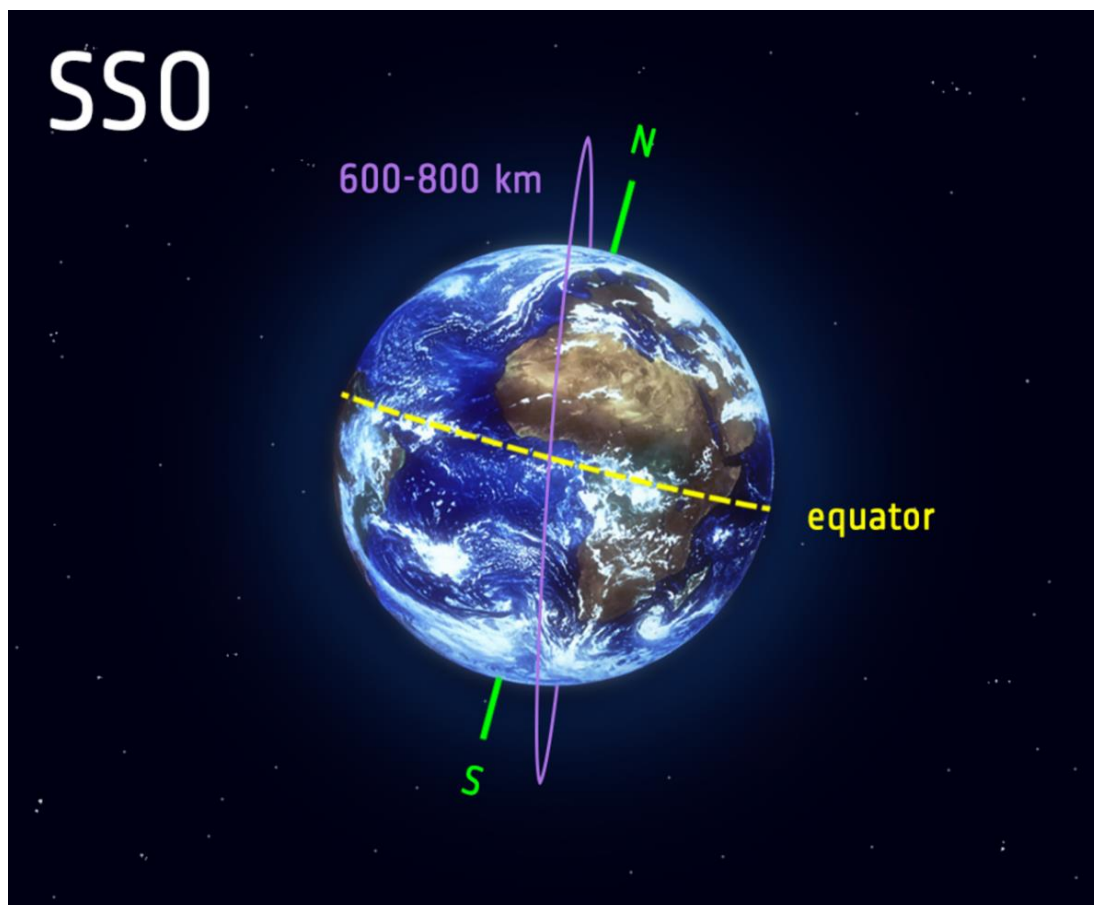
v oceánech či její průhlednost. Svou roli hraje i při mapování zalesnění, využití země (land use) nebo při detekci požárů (Aguirre a kol. 2007).

Sentinel-5P (Precursor) je první mise programu *Copernicus* poskytující informace o naší atmosféře, a to konkrétně o kvalitě ovzduší. Díky spektrometru TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*) je schopna měřit koncentraci některých plynů v troposféře, které mohou ovlivňovat lidské zdraví. Jedná se např. o ozón, oxid siřičitý, oxid uhelnatý či oxid dusičitý. (ESA ©2000; Veeffkind a kol. 2012). Družice byla vypuštěna v roce 2017 a podle plánů má fungovat do doby, než budou zahájeny projekty *Sentinel-4* a *Sentinel-5*. Obě tyto mise se budou také podílet na měření znečištění ovzduší a kvality vzduchu (Jutz, Milagro-Pérez 2020).

Doposud nejmladší družice *Sentinel-6a* obíhá Zemi od roku 2020. Přesně monitoruje hladinu moří a oceánů. Podílí se tak nejen na predikci změn hladiny, ale i změny klimatické. Vypuštění sesterské družice (*Sentinel-6b*) je plánováno na rok 2025 (Donlon a kol. 2021).

3.2.3 Sentinel-2

V poslední době je v oborech týkajících se životního prostředí nejčastěji využívána mise *Sentinel-2*. Jedná se o dvojici sesterských družic (2A a 2B), které byly vypuštěny z Francouzské Guyany do vesmíru v červnu 2015 (2A) a v březnu 2017 (2B). Pravidelnost snímání je zajištěna oběhem družic kolem Země po oběžné dráze zobrazené na obrázku 4. Patří mezi polární oběžné dráhy, satelity tedy obíhají Zemi od severu k jihu. Sklon dráhy je 98,62 stupňů a družice letí ve výšce 786 km (ESA ©2015; ESA ©2022c).



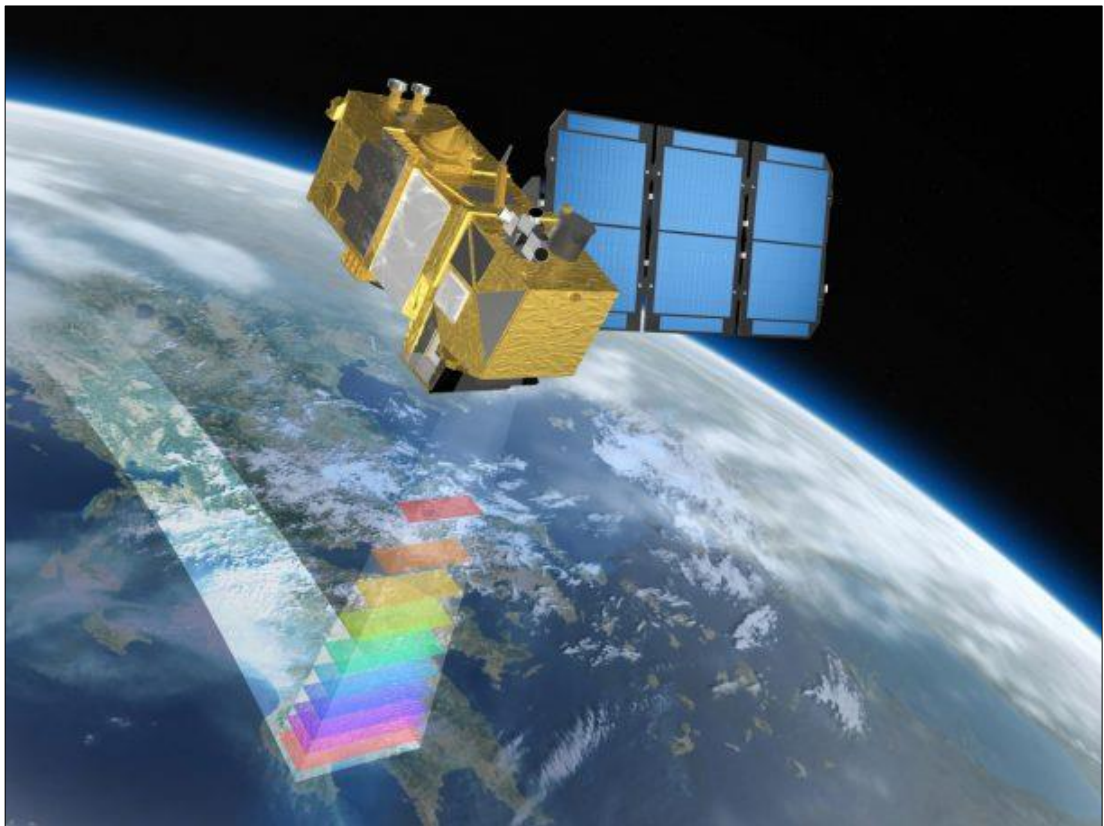
Obr. 4: Schéma oběžné dráhy synchronizované se Sluncem (fialově). Žlutě je vyznačen rovník, zeleně zemská osa, která udává směr rotace (Boldt-Christmas, 2020).

Oběžná dráha je synchronizovaná se Sluncem, a družice jsou tak vůči němu stále ve stejné pozici. Tím je zabezpečen nepřetržitý přísun energie a také procházení družic nad konkrétním místem na Zemi stále ve stejný čas (s odchylkou několika málo minut) (Boldt-Christmas 2020). Právě (ale nejen) díky možnosti porovnávat nějaké území v pravidelnou hodinu je oběh po této dráze pro monitoring Země velice vhodný.

Jedna družice nasnímá téměř celý povrch Země (konkrétně od 56° jižní šířky až po 84° severní šířky) za 10 dní. Mezi družicemi 2A a 2B je však fázový posun 180 stupňů, a díky tomu lze sledovat stejné území až dvojnásobně častěji, tedy jednou za 5 dní (Mařašovská a kol. 2021a). Mise byla navržena tak, aby snímala veškerou pevninu a pobřežní oblasti, ostrovy větší než 100 km², ostrovy EU a ostatní ostrovy do 20 km od břehu. Dále je monitorováno Středozemního moře, všechny vnitrozemské vodní plochy a uzavřená moře (např. Kaspické moře) (ESA ©2015).

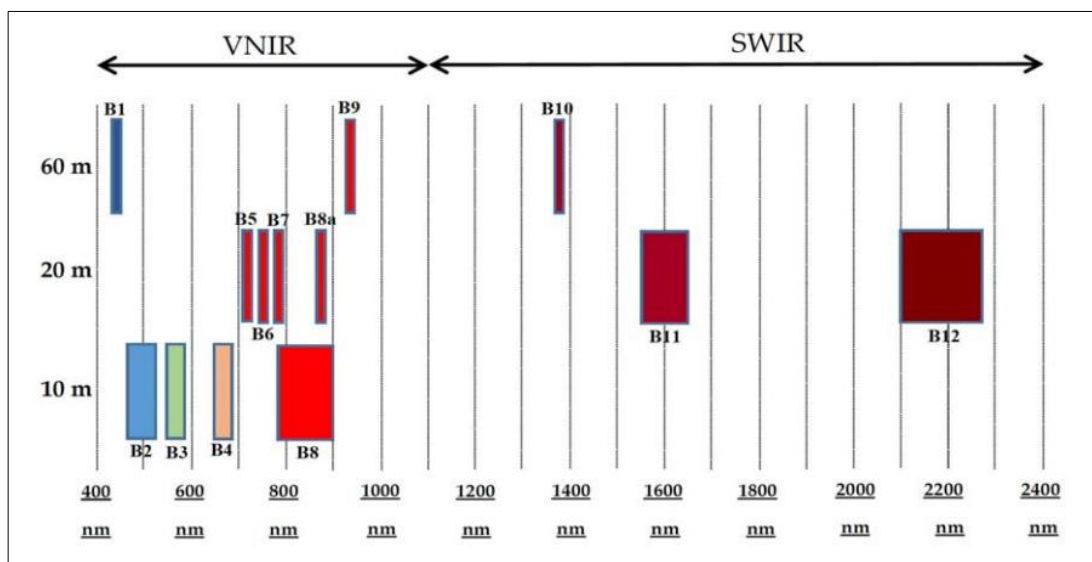
Díky vysoké kvalitě optických dat poskytuje *Sentinel-2* informace v mnoha odvětvích. Hlavním cílem je monitoring složek životního prostředí. Satelity například poskytují geografické informace o pokrytí Země se zaměřením na vegetaci. V rámci toho lze studovat zdravotní stav lesů a vegetace, obsah chlorofylu v listech, či vodní stres rostlin. Data mohou být také využita pro detekci vodních ploch, sněhu, mokřadů nebo pro zefektivnění zemědělství (klasifikace plodin, monitoring vegetačního stadia). V rámci řízení krizových situací lze monitorovat přírodní i antropogenní katastrofy jako např. ropné skvrny, povodně, lesní požáry, sesuvy půdy, zemětřesení nebo sopečné výbuchy. Informace o místě, čase a rozsahu těchto událostí jsou poskytovány rychle a efektivně. Dalším velikým cílem mise je bezpečnost. Díky satelitům může být kontrolován dohled na státních hranicích i dozor na otevřeném moři (ESA ©2015; Main-Knorn a kol. 2017).

Družice 2A i 2B jsou vybaveny optickým multispektrálním senzorem (MSI, *MultiSpectral Instrument*), který pasivně snímá od Země odražené sluneční záření celkem ve 13 spektrálních pásmech (Gascon a kol. 2017). Situaci si můžeme zjednodušeně představit tak, jak ukazuje obr. 5.



Obr. 5: Připodobnění, jakým způsobem snímá MSI senzor odražené sluneční světlo od Země (ESA, 2012).

Pásma, ve kterých senzor MSI snímá, se nacházejí v několika částech elektromagnetického spektra (viz obr. 6 a tab. 2). Jedná se o viditelnou a blízkou infračervenou část (VNIR – *Visible and Near InfraRed*) s rozmezím vlnových délek 400 - 1100 nm. Do této kategorie patří pásma č. 1 – 9. Zbylá tři pásma jsou v krátkovlnné infračervené části spektra (SWIR – *Short Wave InfraRed*) s rozsahem vlnových délek 1400 - 3000 nm (Main-Knorn a kol. 2017; Maťašovská a kol. 2021b).

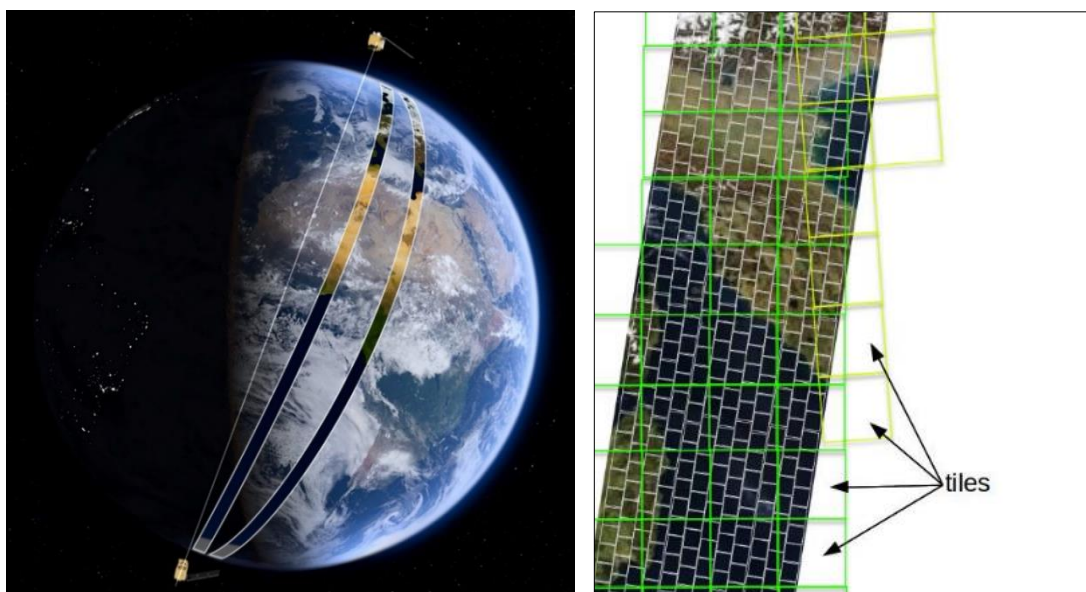


Obr. 6: 13 spektrálních pásem, ve kterých senzor MSI snímá povrch Země (Gascon a kol. 2017).

Číslo pásma	Střední vlnová délka [nm]	Prostorové rozlišení [m]
1	443	60
2	490	10
3	560	10
4	665	10
5	705	20
6	740	20
7	783	20
8	842	10
8a	865	20
9	945	60
10	1380	60
11	1610	20
12	2190	20

Tab. 2: Seznam spektrálních pásem *Sentinelu-2* včetně jejich středních vlnových délek. Dále lze vypočítat prostorová rozlišení pro jednotlivá pásma (ESA, 2015, vlastní úprava).

Šířka zorného pole multispektrálního senzoru činí 290 km, což je úctyhodný záběr (např. satelit *Landsat 7* snímá v šíři 185 km). Znamená to tedy, že družice snímá povrch Země v páslech širokých právě 290 km. Tyto pásy, zobrazené na obr. 7, jsou pak uměle rozděleny na menší části o fixních rozměrech zvané „dlaždice“ (v angličtině *tiles*). Ty jsou vidět na obr. 8. Jsou velké 100 x 100 km a v takovéto podobě jsou snímky poskytovány koncovým uživatelům (produkty úrovně L1C a L2A, více v kap. 3.2.4). Pro každé spektrální pásmo existuje právě jedna dlaždice (ESA ©2015; Mařašovská 2018).



Obr. 7 (vlevo): Schématické zobrazení paralelního snímání obou družic (2A a 2B). Družice pořizují scénérie v pásmech o šířce 290 km (ESA, 2017).

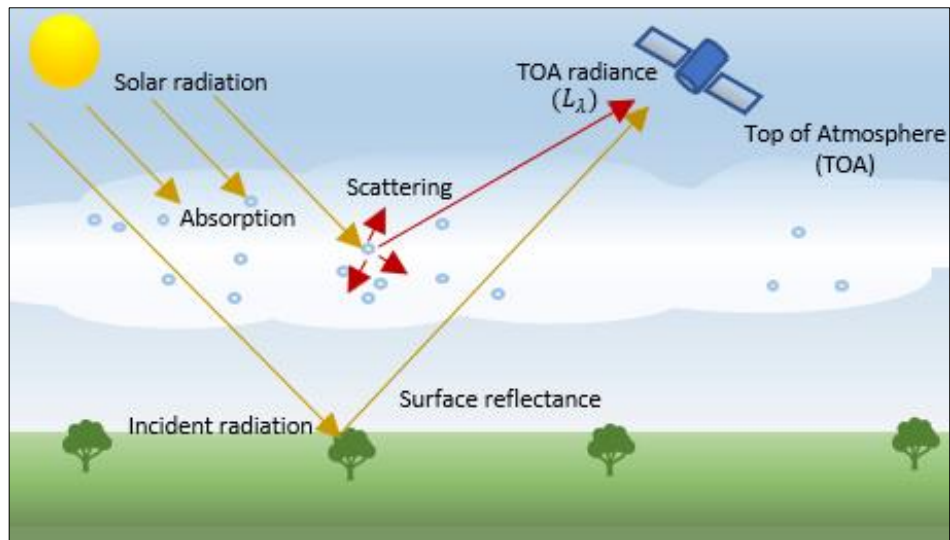
Obr. 8 (vpravo): Umělé rozdělení nasnímaných pásů do dlaždic. Dlaždice jsou zeleně a žlutě ohraničené čtverce, jejichž rozměry jsou 100 x 100 km. Do šířky jednoho pásu se tak vejdou téměř 3 dlaždice (Schiller, 2015).

3.2.4 Produkty *Sentinelu-2*

Produkty *Sentinelu-2* vznikají v pěti různých formách: *Level-0*, *Level-1A*, *Level-1B*, *Level-1C* a *Level-2A*, přičemž uživatelům jsou poskytovány pouze úrovně L1C a L2A. Předchozí úrovně obsahují surová a neupravená data, která nejsou vhodná pro další analýzy a ze kterých se teprve tvoří úrovně následující. Rozdíl mezi snímky L1C a L2A spočívá v úrovni zpracování. Zatímco produkty L1C nesou informace rastru o odrazivosti z horní části atmosféry (TOA - *Top of Atmosphere*), produkty L2A reflektují hodnoty ze dna atmosféry (BOA - *Bottom of Atmosphere*) (ESA ©2015).

Situaci si lze představit takto (viz obr. 9): Družice, která letí nad zemskou atmosférou, měří senzorem hodnoty odrazivosti slunečního záření z horní části atmosféry (nelze říct z vrcholu atmosféry, ten totiž nelze přesně definovat a najít). V ideálním případě by se tato odrazivost rovnala povrchové odrazivosti od Země. V reálných podmínkách je ale dopadající a odražené záření ovlivněno atmosférickými jevy, jako je rozptyl a absorpce. Ve výsledku je tedy odrazivost TOA součtem odrazu záření od povrchu Země a od mraků a rozptylu záření molekulami vzduchu, dalších plynů a aerosolovými částicemi v atmosféře (Knudby 2021; MathWorks ©2022). Hodnoty odrazivosti ze dna atmosféry (též povrchová odrazivost) pak udávají odrazivost přímo od povrchu Země. Ta by měla záviset jen na charakteru povrchu, např. na vlhkosti, barvě nebo materiálu.

V praxi to tedy znamená, že na snímcích úrovně L2A jsou již aplikovány atmosférické korekce. To je proces, při kterém jsou odstraněny atmosférické vlivy působící na sluneční záření a je zachována pouze ta část záření odražená od Země. Zjednodušeně řečeno, informace rastru hodnot TOA jsou převedeny na hodnoty BOA. Takto zkorigované snímky jsou vhodné k dalším analýzám (Main-Knorn a kol. 2017; Szantoi, Strobl 2019). Je ale ještě důležité zmínit, že vypočítané hodnoty BOA jsou pouze odhadem hodnot povrchové odrazivosti. Výsledek je sice velice blízký tomu, jak by byla odrazivost naměřena in-situ spektrometrem (tedy na daném místě na Zemi), přesto radiometrická přesnost nikdy nedosáhne stejné úrovně. Vždy záleží na uplatněných atmosférických korekcích, na přesnosti vstupních dat i na přesnosti družicového senzoru.

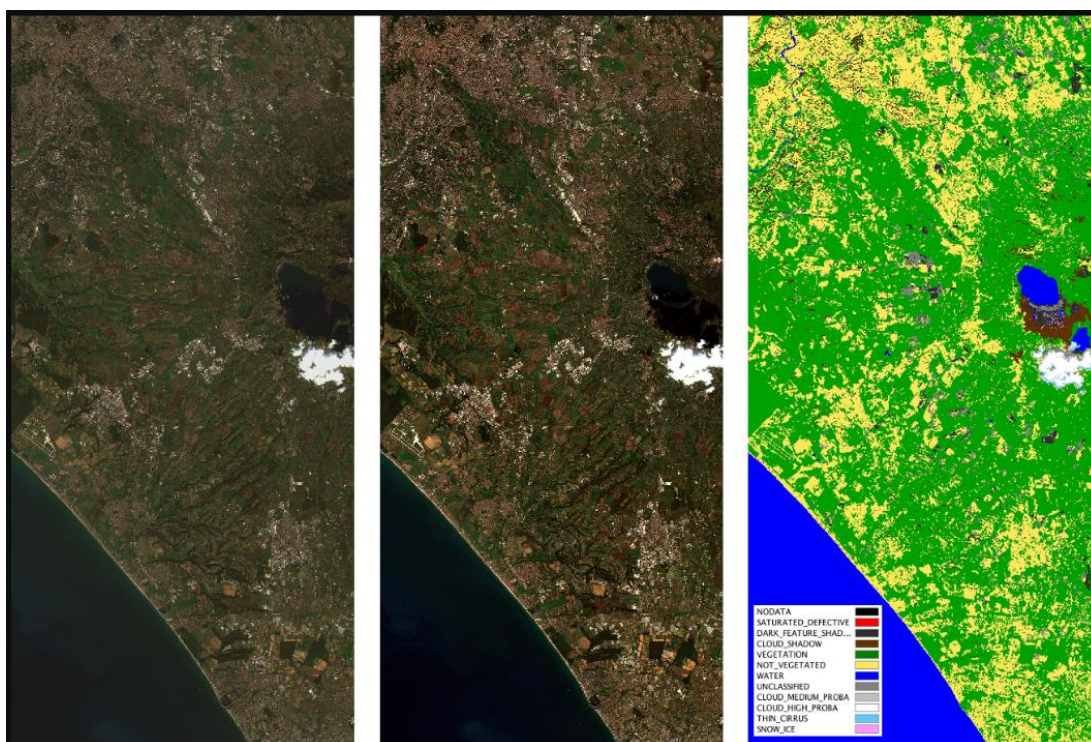


Obr. 9: Rozdíl v principu snímání odrazivosti TOA a BOA. Odrazivost z horní části atmosféry (TOA) je ovlivněna rozptylem a absorpcí slunečního záření, zatímco odrazivost ze spodní části atmosféry (BOA, také povrchová odrazivost) je odrazivost pouze od povrchu Země (MathWorks, 2022).

Ne vždy je ovšem dostupná scénérie úrovně L2A. Tyto snímky jsou systematicky produkovány společností ESA teprve od března roku 2018 (pro Evropu, produkce byla globalizována v prosinci téhož roku) (ESA ©2022b). Pokud uživatel potřebuje sehnat snímky staršího data, jsou k dispozici pouze ve formátu L1C. Aby však bylo využití potenciálu dat ze *Sentinelu-2* co nejlepší, je nutné aplikovat přesné atmosférické korekce a převést tak vlastnoručně takováto data na úroveň L2A. K těmto účelům byl pro ESA vyvinut volně dostupný algoritmus *Sen2Cor* (*Sentinel-2 Correction*) (Ranghetti a kol. 2020). Při aplikaci korekcí vznikají vedlejší produkty (další rastrové vrstvy), z nichž nejdůležitější je tzv. klasifikační mapa (SCL - *Scene Classification Map*) s informacemi o pravděpodobnosti výskytu oblačnosti a sněhu (Louis a kol. 2016). Ranghetti a kol. (2020) dále uvádějí, že SCL mapa rozděluje rastrové pixely do 12 tříd (někdy se uvádí 11 tříd a „no data“ se bere jako třída nultá) podle povrchu, kvality a oné pravděpodobnosti výskytu mraků. V tabulce 3 jsou vypsány jednotlivé třídy včetně barevného rozlišení, které pak vytváří SCL mapu. Obr. 10 pak srovnává produkty L1C, L2A a klasifikační mapu.

Třída	Klasifikace
0	žádná data
1	defektní pixely
2	tmavé oblasti
3	stíny mraků
4	vegetace
5	bez vegetace
6	voda
7	neklasifikováno
8	střední pravděpodobnost mraků
9	vysoká pravděpodobnost mraků
10	slabý cirrus (forma oblaku)
11	sníh

Tab. 3: Jednotlivé třídy, do kterých jsou pixely barevně rozdělené v SCL mapě (ESA, 2022b, vlastní úprava).



Obr. 10: Porovnání úrovní snímků L1C – TOA (vlevo) a L2A – BOA (uprostřed), na kterém již byly aplikované atmosférické korekce. Vpravo je pak SCL mapa vycházející z úrovně zpracování L1C (ESA, 2022a).

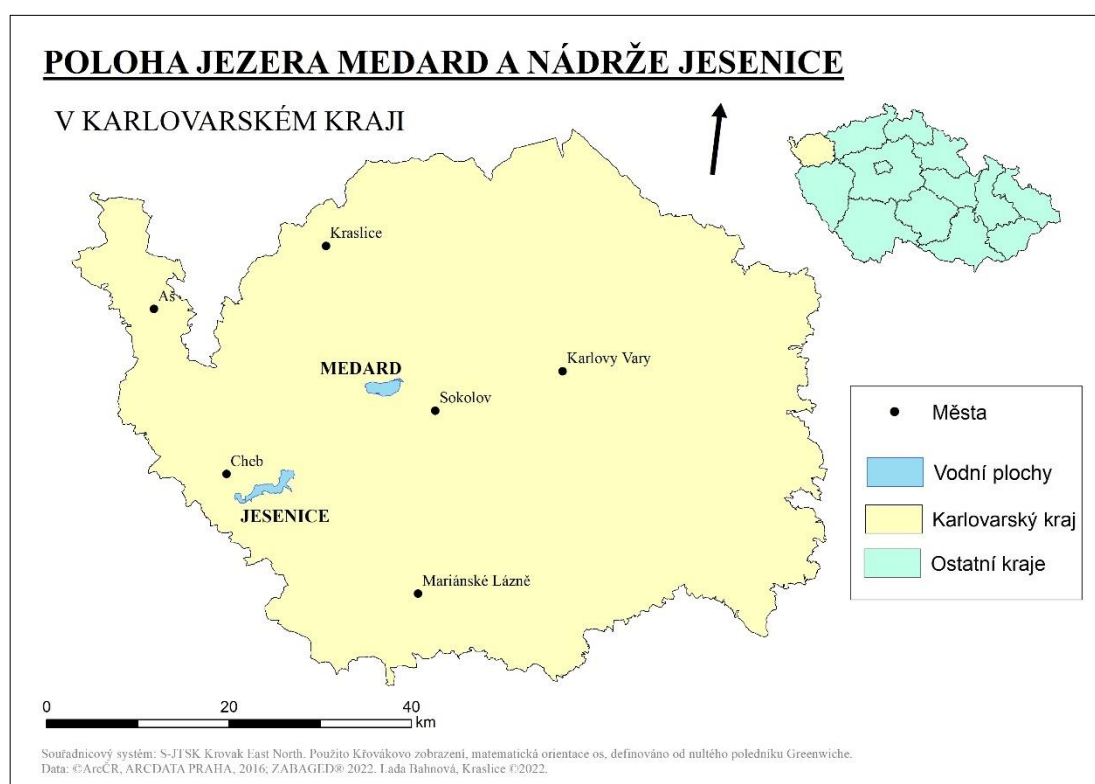
Sen2Cor není jediným algoritmem, který je využíván pro atmosférické korekce. Je ale používán hojně, protože je součástí R balíčku sen2r, jenž je volně dostupný a poskytuje

velmi široké možnosti zpracování satelitních dat (Ranghetti a kol. 2020). Z dalších algoritmů lze jmenovat Acolite, C2RCC, iCOR nebo Polymer (Warren a kol. 2019; Sent a kol. 2021).

4. METODIKA

4.1 Výběr a charakteristika zájmového území

Jako zájmové území byly vybrány dvě největší vodní plochy v Karlovarském kraji. Jedná se o vodní nádrž Jesenice v okrese Cheb a jezero Medard v okrese Sokolov (viz obr. 11). Při výběru lokalit byl kladen důraz na rozdílnou ekologii stanovišť. Sice se v obou případech jedná o vody stojaté, přesto je v Jesenici, jako v přehradě, udržován permanentní průtok vody, což má vliv i na měřenou teplotu na hladině. Naproti tomu v Medardu o průtoku vody hovořit nelze.



Obr. 11: Přehledová mapa Karlovarského kraje s vyznačenou polohou jezera Medard a vodní nádrže Jesenice (zdroj dat: ©ArcČR, ARCDATA PRAHA, 2016; ZABAGED® 2022, vlastní tvorba).

4.1.1 Vodní nádrž Jesenice

Vodní nádrž Jesenice se nachází na řece Odřavě, která pramení u Hraničního vrchu v sousedním Bavorsku a následně se v obci Odřava vlévá do řeky Ohře. Nedaleko, asi 5 km směrem na severozápad, se nachází město Cheb, do jehož okresu nádrž spadá. Výstavba nádrže probíhala v letech 1957 – 1961 a trvala celkem 52 měsíců. S objemem 60,15 mil. m³ vody a zatopenou plochou 760 ha dnes tvoří druhou největší nádrž na české straně povodí Ohře (tou největší je vodní dílo Nechranice s rozlohou 1338 ha). Maximální hloubka vody je 18 m (Povodí Ohře Chomutov ©2019).

Jesenice je využívána k mnoha účelům. Zejména jde v součinnosti s vodní nádrží Skalka o zlepšování průtokových poměrů v Ohři pro průmyslové závody a tepelné elektrárny. Dalším důležitým účelem je zajištění minimálního průtoku řeky Odřavy pod nádrží, snižování stoletých vod na Ohři a částečná ochrana okolního území před případnými povodněmi. Díky svému retenčnímu účinku totiž Jesenice snižuje v Odřavě kulminační průtok stoleté vody v letním (srážkovém) období z hodnoty 138 m³/s na 83,2 m³/s a v zimním (sněhovém) období ze 120 m³/s na 88,1 m³/s (Povodí Ohře ©2019b).

Vedlejší využití přehrady je pak sportovně-rekreační, kromě samotného koupání je zde možnost provozovat windsurfing, sportovní rybolov a každý rok se na Jesenici pořádá několik tradičních jachtařských závodů, např.: Švestková regata či Modrá stuha Jesenice. Kvalita vody je dlouhodobě vhodná ke koupání, v letním období je mírně zvýšen výskyt sinic a řas (Povodí Ohře ©2019b). V neposlední řadě je díky průtoku Odřavy vyráběna elektrická energie v MVE (malé vodní elektrárně), která má pod hrází 5 vrtulových turbín s celkovým výkonem 315 kW (Povodí Ohře Chomutov ©2019).

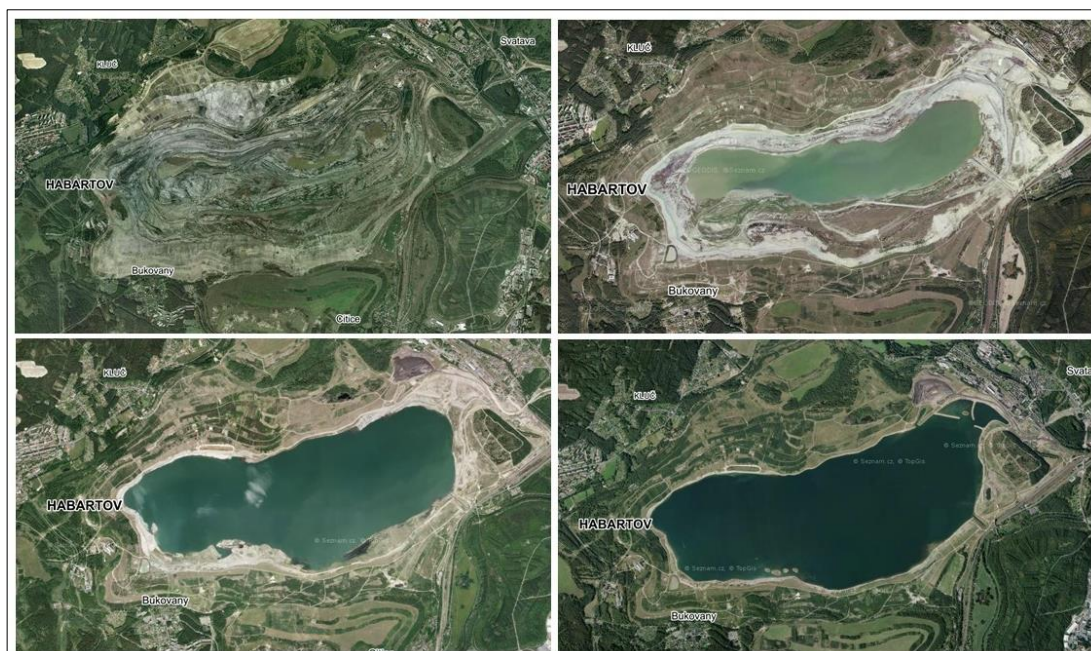
Vodní dílo je pod správou Povodí Ohře, s. p. Tento podnik vznikl v roce 2001 a správa povodí je rozdělena na 3 závody sídlící v Chomutově, Karlových Varech a Terezíně. Kromě velkých vodních nádrží, kterých je v povodí Ohře celkem 22, má na starosti malé vodní nádrže a rybníky, vodní toky, uměle vybudované kanály, přivaděče, jezy a malé vodní elektrárny (Povodí Ohře ©2019b).

4.1.2 Jezero Medard

Jezero Medard se nalézá v Sokolovské hnědouhelné pánvi, severozápadně od okresního města Sokolov. Rozprostírá se mezi obcemi Habartov, Svatava, Citice a Bukovany. Jedná se o rekultivační a revitalizační projekt na území bývalých samostatných lomů Medard a Libík, které byly později spojeny v jednu těžební lokalitu Medard – Libík. Těžilo se zde hnědé uhlí, a to již od roku 1869. Právě kvůli hnědouhelné těžbě byly značně změněny původní přírodní poměry zájmového území. Například vodní toky, které pramení v nedalekých Krušných horách, byly svedeny mimo těžební plochu pomocí umělých koryt. Dále byly významně ovlivněny podzemní vody a charakter krajiny. V březnu roku 2000 byla velkolomová část těžby předčasně ukončena (Poláčková 2005). Zbytková těžba však uhlí probíhala dále v severovýchodní části lomu kvůli zajištění stability svahů. Prodloužila se nakonec až do června roku 2021 (SUAS ©2021).

V červnu roku 2008 začalo postupné napouštění jezera (viz obr. 12), a to nejdříve vodou srážkovou, prosakující vodou podzemní a také vodou důlní. O dva roky později bylo zahájeno dopouštění z řeky Ohře. Původně se předpokládalo, že napouštění jezera potrvá pouhých 25 měsíců. V roce 2010 však situaci zkomplikovaly povodně na řece Ohři a špatná kvalita vody. Napouštěcí práce tedy byly ukončeny až v roce 2016 (Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s. ©2021). S rozlohou 493,5 ha se tak stal Medard druhou největší vodní plochou v Karlovarském kraji a v současné době i největším rekultivačním jezerem v České republice (Ekolist ©2020). Maximální hloubka vody činí 50 m. Celý projekt a správu jezera zajišťuje Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s.

Poláčková (2005) ve své studii zmiňuje i budoucí možné využití Medardu, které je zejména rekreační a sportovní. V úvaze jsou například golfové hřiště, rekreační bungalovy, přístav, restaurace, pláže, hotely, tábořiště, jízdárna a další sportoviště. Zatím jezero není ani zpřístupněno ke koupání, nicméně slouží jako velmi významný estetický prvek v krajině. Jezero není dotováno vodou z žádného vodního toku, ústí do něj pouze odvodňovací kanály z okolních svahů. Tím je zamezeno kolísání hladiny vody, které by nepříznivě ovlivňovalo stabilitu svahů, život živočichů a rostlin a budoucí rekreační zařízení.



Obr. 12: Postupné napouštění jezera Medard. Letecké snímky z let 2003 (vlevo nahoře, dále po řádcích), 2012, 2015 a 2018. Snímek z roku 2018 je shodný s dnešním pohledem na jezero (mapy.cz, 2022, vlastní úprava).

4.2 Použitý software

Uživatelské prostředí, ve kterém proběhlo zpracování satelitních dat i tvorba predikčních modelů a jejich aplikace, je software R (vývojář: *R Core Team*). Konkrétně bylo využito jeho grafické prostředí RStudio, které je pro uživatele přívětivější. R je program poskytovaný pod licenci GNU GPL (*General Public Licence*) (R Core Team, R Version 4.1.1). Je využíván nejen pro statistické výpočty, ale i pro analýzu prostorových dat a tvorbu grafických výstupů (R Project ©2022). Mezi největší výhody tohoto software patří jeho dostupnost bez poplatků a poměrně jednoduchý programovací jazyk (jazyk R). Proto je komunita uživatelů, která s R pracuje, obrovská a díky těmto uživatelům vzniká veliký počet dodatkových balíčků se stále novými nástroji a funkcemi (Verzani 2011). Byl použit především balíček *sen2r*, jehož funkce jsou zaměřené na získávání a předzpracovávání satelitních dat (Ranghetti a kol. 2020).

Pro tvorbu výsledných mapových výstupů byl použit software ArcGIS (vývojář: ESRI - *Environmental Systems Research Institute*), a to konkrétně *Desktop Student Trial*, což je jednorocní licence poskytovaná zdarma pro studenty (ESRI, ArcGIS for Desktop 10.7.1). Licenci tedy poskytla ČZU v Praze. Pro přístup je nutné založit si

ESRI účet a přes něj ArcGIS autorizovat (Booth, Mitchell 2001). Veškeré tabulky a grafy byly vytvořeny a upraveny v tabulkovém editoru *Excel*, který je součástí kancelářského balíčku *Microsoft Office* od společnosti *Microsoft* (Microsoft, 2019).

Veškeré aktivity související se zpracováním bakalářské práce probíhaly na hardware DESKTOP-T311530 s procesorem Intel® Core™ i3-4010U CPU @ 1.70GHz a RAM pamětí 4.00 GB.

4.3 Použitá data

Pro teplotní analýzu pomocí metod strojového učení (predikce) byly použity satelitní snímky z družic mise Sentinel-2. Aby bylo možné predikční modely vyhodnotit, byly vypočítané teploty porovnány s teplotami naměřenými přímo na daných lokalitách (in-situ data).

4.3.1 Získání satelitních snímků

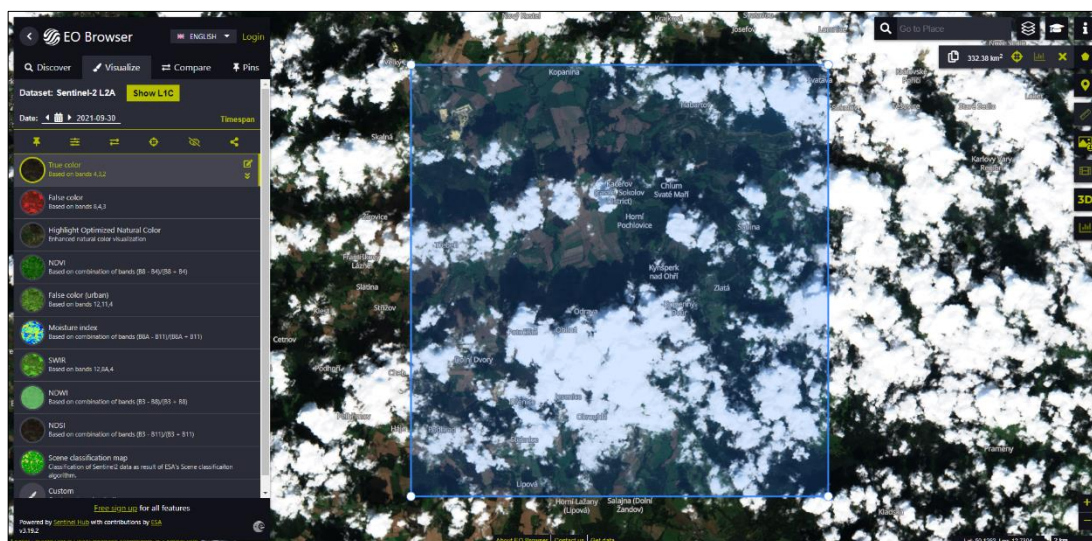
Jak již bylo zmíněno výše, primární zdroj dat tvoří produkty ze satelitů *Sentinel-2A* a *Sentinel-2B*. Snímky lze volně vyhledávat, prohlížet a stahovat na webové stránce *Copernicus Open Access Hub* (Copernicus Open Access Hub ©2014). Jedná se o oficiální stránky programu *Copernicus* pro získávání dat běžnými uživateli. Pro stahování je pouze nutné se nejdříve zaregistrovat přes emailovou adresu.

Snímky jsou přístupné přes interaktivní mapu světa, a to v požadovaném období (od začátku snímání družicemi) a vyžadované kvalitě (úroveň zpracování). Uživatel si velice jednoduše může označit sledovanou oblast a navolit vlastnosti snímků (družice, která snímek pořídila, období snímání, kvalita a typ produktu). Novější data jsou dostupná online, starší snímky (typicky více než 18 měsíců) bývají uloženy offline v tzv. archivu LTA (*Long Term Archive*). Pro stahování takovýchto dat je třeba požádat o jejich uvolnění zpět do online prostředí (Ranghetti a kol. 2020). Tento proces trvá několik minut a následně je možné tyto snímky stáhnout. Také je nutné dbát na cílovou složku pro ukládání dat kvůli jejich velikému objemu (jeden snímek dosahuje velikosti až 1 GB).

Snímky jsou staženy v komprimovaném formátu souboru ZIP (*Zone Improvement Plan*), jenž díky redukci velikosti dat umožňuje snížení nároků na úložný prostor na

disku. Po rozbalení jsou data dostupná ve formátu SAFE (*the Standard Archive Format for Europe*), který zahrnuje vlastní snímek, indikátory kvality (např. masku vadných pixelů), příslušná metadata a pomocná a doplňková data. Tento formát je doporučený používat pro data ze všech družic programu *Copernicus*. Docílí se tak harmonizace a zjednocení pro další zpracovávání (ESA ©2015).

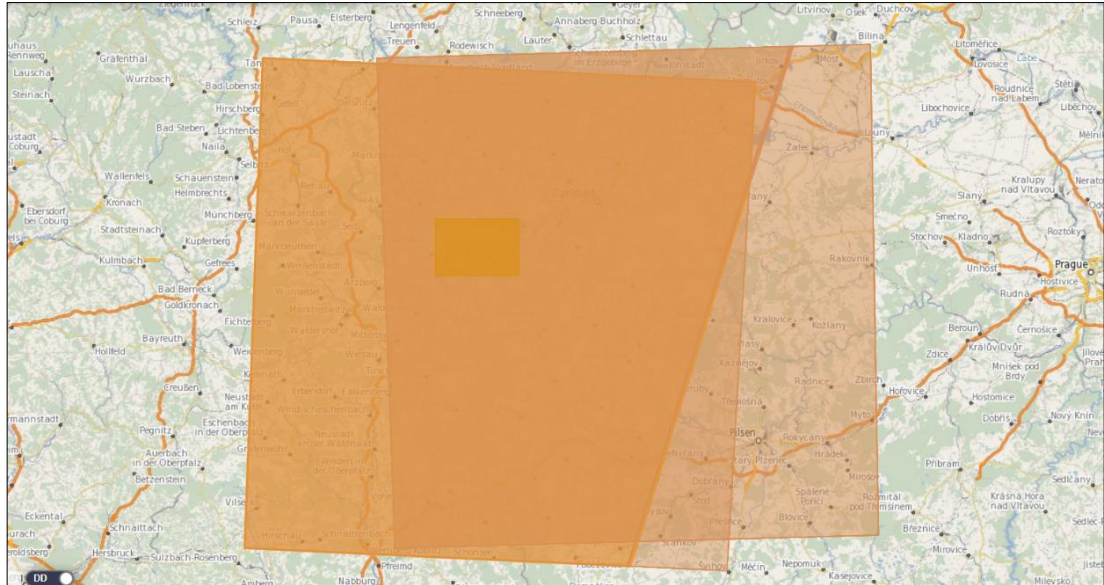
Webový portál *Copernicus Open Access Hub* má jednu nevýhodu. Ze snímku částečně pokrytého oblačností nelze oblačnost přesně prostorově detekovat. Jinak řečeno není možné určit, zda je vodní plocha zakrytá mraky či nikoli (dlaždice má stále 100 x 100 km). Proto byl nejprve využit tzv. *EO Browser* (Sentinel Hub ©2018), což je vyhledávač vhodný pro prohlížení a porovnávání archivů dat z různých satelitů (nejen *Sentinel-2*, ale i jiné *Sentinely*, *Landsat*, *MODIS* a další). Princip vyhledávání je podobný, jednoduše si lze označit vybrané lokality, jak je vidět na obrázku 13. Dále lze vyselektovat časové rozhraní požadovaných snímků a poté už se jedná čistě o poctivou ruční práci. Uživatel postupně prohlíží jednotlivé snímky a zaznamenává si, zda je lze použít nebo ne. Takto vybraná data byla poté stažena z portálu *Copernicus Open Access Hub*.



Obr. 13: Ukázka vyhledávání vhodných snímků pomocí *EO Browser*. Modře orámovaná je žádaná lokalita a uživatel může pozorovat, zda je zakrytá oblačností. Tento snímek například pro další analýzu nelze použít, neboť ani jedna z vybraných vodních ploch není přes mračna vidět (Sentinel Hub, 2018).

Zde je ještě vhodné zmínit, že v oblasti Jesenice a Medardu se překrývají vždy dvě nasnímané dlaždice, jak ukazuje obr. 14, a tudíž je periodičita snímání daného území

ještě vyšší. Snímky jsou tak k dispozici každé 2 – 3 dny, což ještě zvyšuje pravděpodobnost nalezení vhodných snímků bez oblačnosti.



Obr. 14: Překryv dvou dlaždic ze *Sentinelu-2*. Žlutě vyznačená je požadovaná lokalita (ohraničení Medardu a Jesenice) (Copernicus Open Access Hub, 2014).

Pro účely této práce bylo ze všech vhodných dat vyhodnoceno celkem osm snímků v období červen až září v letech 2020 a 2021. V každém měsíci byl vybrán jeden snímek, a to tak, aby časové intervaly mezi snímky byly co nejpravidelnější (viz tab. 4). Dále byl kladen důraz na viditelnost obou vybraných lokalit. Právě kvůli viditelnosti a časté oblačnosti nejsou ostatní měsíce v roce příliš vhodné na analýzu teplot ze snímků. Dat nebylo mnoho, proto byla stažena manuálně bez pomoci automatického stahování. Pokud by však množství dat bylo veliké, mohl by být použit např. nástroj *aria2*, který umožňuje stahování mnoha archivů dat najednou (Ranghetti a kol. 2020).

Datum a čas	Název snímku
27.06.2020, 10:10:31	S2A_MSIL2A_20200627T101031_N0214_R022_T33UUR_20200627T120035. SAFE
22.07.2020, 10:05:59	S2B_MSIL2A_20200722T100559_N0214_R022_T33UUR_20200722T141538. SAFE
09.08.2020, 10:20:31	S2A_MSIL2A_20200809T102031_N0214_R065_T33UUR_20200809T130506. SAFE
18.09.2020, 10:20:31	S2A_MSIL2A_20200918T102031_N0214_R065_T33UUR_20200918T120844. SAFE
17.06.2021, 10:05:59	S2B_MSIL2A_20210617T100559_N0300_R022_T33UUR_20210617T131219. SAFE
10.07.2021, 10:15:59	S2B_MSIL2A_20210710T101559_N0301_R065_T33UUR_20210710T132321. SAFE
14.08.2021, 10:20:31	S2A_MSIL2A_20210814T102031_N0301_R065_T33UUR_20210814T132326. SAFE
13.09.2021, 10:20:21	S2A_MSIL2A_20210913T102021_N0301_R065_T33UUR_20210913T114540. SAFE

Tab. 4: Vhodné snímky pro analýzu z let 2020 a 2021 (Copernicus Open Access Hub, 2014, vlastní úprava).

Z názvu snímků lze vyčíst hned několik jejich vlastností. Obecný formát pojmenování vypadá takto:

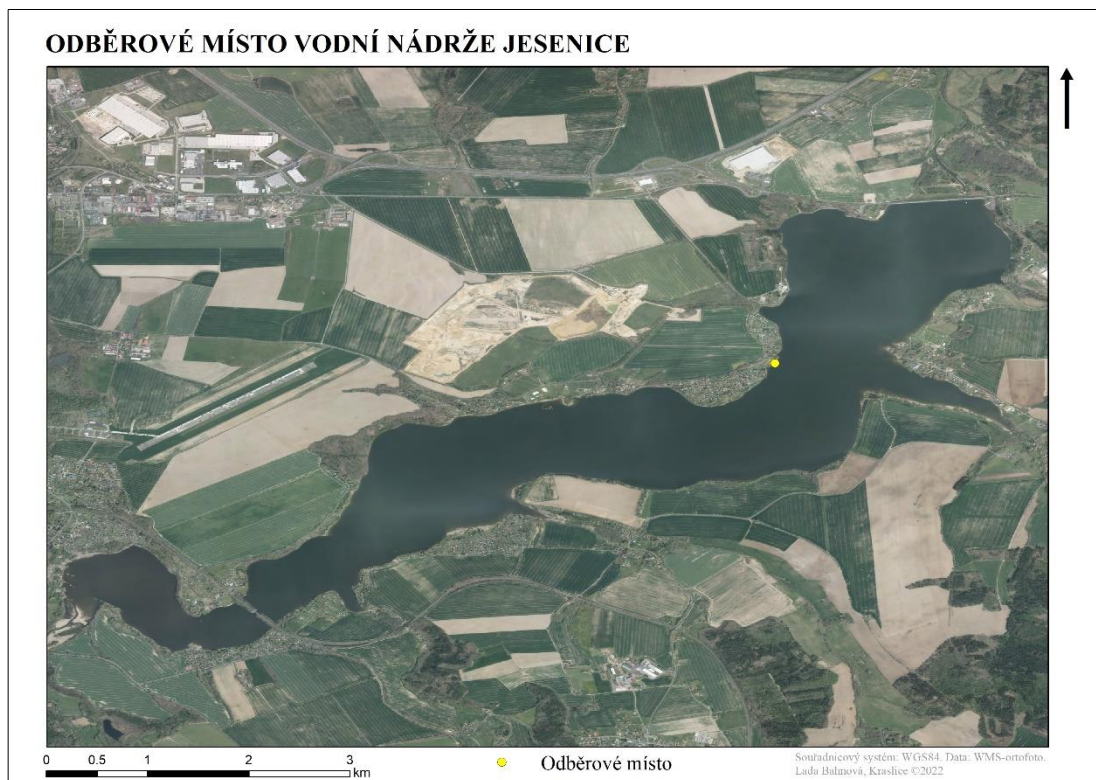
MMM_MSIXXX_YYYYMMDDHHMMSS_Nxxyy_ROOO_Txxxxx<Product Discriminator>.SAFE (Sentinel Online ©2022). Vysvětlení je následující:

- MMM: název mise (S2A nebo S2B)
- MSIXXX: typ produktu, úroveň zpracování (zde L2A)
- YYYYMMDDHHMMSS: datum a čas snímání
- Nxxyy: označení základního zpracování snímku
- ROOO: relativní číslo oběžné dráhy (R001 – R143)
- Txxxxx: označení dlaždice
- Product Discriminator: datum a čas úpravy snímku, bývá pozdější než doba snímání
- SAFE: formát produktu (viz kapitola 4.3.1 Získání satelitních snímků)

4.3.2 In-situ data

Naměřené teploty vodní nádrže Jesenice nejsou na internetu volně dostupné. Správce vodní plochy Povodí Ohře, s. p., konkrétně odbor vodohospodářského dispečinku, poskytl výhradně pro účely této bakalářské práce (po zaslání podepsaného potvrzení o využití dat k BP) naměřené teploty z let 2020 a 2021. Jedná se o průměrné denní

teploty vody, byly zaslány mailem dne 19.10.2021. Měření probíhá v městské části Chebu Dřenice, a to z mola Jachtklubu Cheb (viz obr. 15). Z komplexní tabulky průměrných teplot za oba roky byly použity pouze hodnoty pro vybrané dny. Zobrazuje je tabulka 5.

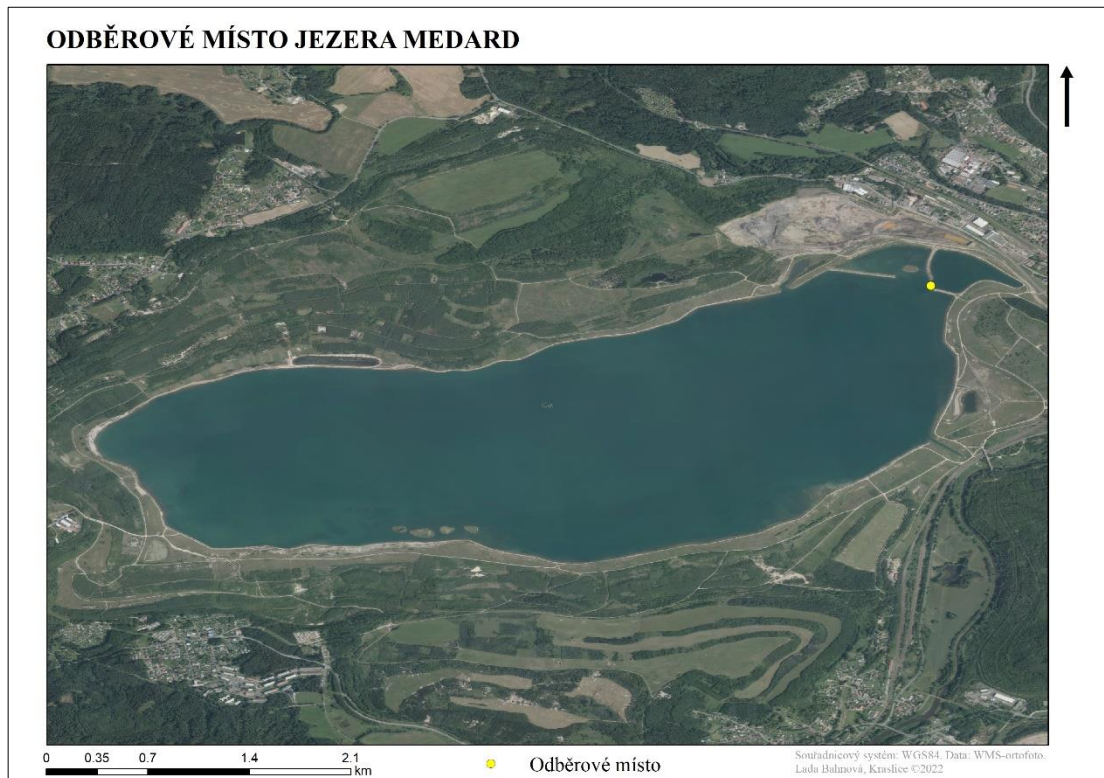


Obr. 15: Mapa zobrazující místo, kde dochází k pravidelnému odběru vody z důvodu měření teploty v nádrži Jesenice (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, vlastní tvorba).

Jesenice	
Datum	Teplota °C
27.06.2020	21.3
22.07.2020	20.5
09.08.2020	23.5
18.09.2020	17.2
17.06.2021	19.0
10.07.2021	21.3
14.08.2021	23.6
13.09.2021	20.3

Tab. 5: Průměrné denní teploty vody v nádrži Jesenice ve vybraných dnech, naměřeno in-situ (vlastní úprava).

Ani v případě Medardu nelze teplotní statistiky volně dohledat a stáhnout. Jezero je pod správou Sokolovské uhelné, právní nástupce, a.s. a těžební úsek ochotně poskytl data z roků 2020 a 2021. Opět se jedná pouze o průměrné denní teploty vody a je třeba vzít tento fakt v potaz při validaci predikčních modelů. Měření teploty probíhá na jednom ze tří sypaných mol na východní straně jezera. Místo je přístupné z obce Svatava (viz obr. 16). Tab. 6 ukazuje vybrané hodnoty teplot.



Obr. 16: Mapa zobrazující místo, kde dochází k pravidelnému odběru vody z důvodu měření teploty v rekultivačním jezeře Medard (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, vlastní tvorba).

Medard	
Datum	Teplota °C
27.06.2020	20.1
22.07.2020	17.3
09.08.2020	22.9
18.09.2020	12.1
17.06.2021	24.4
10.07.2021	17.3
14.08.2021	19.7
13.09.2021	14.4

Tab. 6: Průměrné denní teploty vody v jezeře Medard ve vybraných dnech, naměřeno in-situ (vlastní úprava).

4.4 Postup práce

Tato kapitola podrobně popisuje, jak byly satelitní snímky nejprve předzpracovány pro další analýzu. Dále byly ze snímků vypočteny spektrální indexy a pomocí nich proběhla predikce teplot hladiny vody.

Samotné predikční modelování teplotních hodnot bylo provedeno pomocí modelovací techniky *Random Forests* (RF, v překladu „náhodné lesy“). Byl využit již existující model poskytnutý vedoucí bakalářské práce, paní Ing. Václavou Maťašovskou. Tento model byl vytvořen při projektu Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu a kvality koupacích míst v České republice (projekt Zéta II TJ02000091). Projekt probíhal v letech 2019 – 2021 a byl zaměřen na objevení ideálních metod pro hodnocení parametrů kvality vody (např. zákal, množství sinic a řas, teplota vody) ze satelitních snímků (Maťašovská 2021a). Model nebyl použit celý, protože v původním projektu bylo zkoumáno mnohem větší množství parametrů, než je jen teplota vody. Proto byl pro účely této bakalářské práce značně zjednodušen.

4.4.1 Předzpracování snímků

Před samotnou analýzou teplot vody a před vstupem satelitních dat do predikčních modelů je třeba tato data vhodně upravit. To zahrnuje hned několik procesů: atmosférické korekce, geometrické transformace a maskování pixelů s oblačností. Dále je nutné vypočítat spektrální indexy, které vstupují jako proměnné do modelů.

Úpravy i výpočty probíhaly v programu R pomocí balíčku `sen2r` a jeho algoritmu `Sen2Cor`. Popisující text je obohacen o příslušné části skriptu.

Atmosférické korekce spočívají v převodu snímků z úrovně zpracování L1C do úrovně L2A (viz kap. 3.2.4). Vzhledem k tomu, že se podařilo všech osm snímků získat v kvalitě L2A, tedy již s aplikovanými korekcemi, nebyly tyto úpravy pomocí `Sen2Cor` nutné.

```
step_atmcorr = "auto",  
sen2cor_use_dem = NA
```

Dále byly snímky (tedy rastry BOA) a SCL mapa oříznuty pouze na požadované lokality. Tento krok značně sníží objem dat (pro srovnání: jedna nasnímaná dlaždice má rozměry 100 x 100 km, zatímco velikost obou sledovaných vodních ploch dohromady je cca 12,5 km²). Ořez proběhl pomocí funkce `extent`.

```
list_prods = c("BOA", "SCL")  
clip <- read_sf(dir(paste0(rootDir, "/Lokalita/"), pattern  
= "T.shp$", full.names = T, recursive = T))  
extent = clip
```

Geometrickými transformacemi se rozumí přeprojektování (tzn. je změněn souřadnicový systém, je-li potřeba) a převzorkování (tzn. u jednotlivých spektrálních pásem dochází ke změně prostorového rozlišení tak, aby všechna měla stejnou velikost) (Ranghetti a kol. 2020). Snímky byly převedeny do souřadnicového systému WGS84/UTM33 (EPSG:32633) (*World Geodetic System, Universal Transverse Mercator*) pomocí funkce „`st-transform`“ a byly převzorkovány na rozlišení 10 m přes funkci `res_s2`.

```
res_s2 = 10  
proj = "EPSG:32633"
```

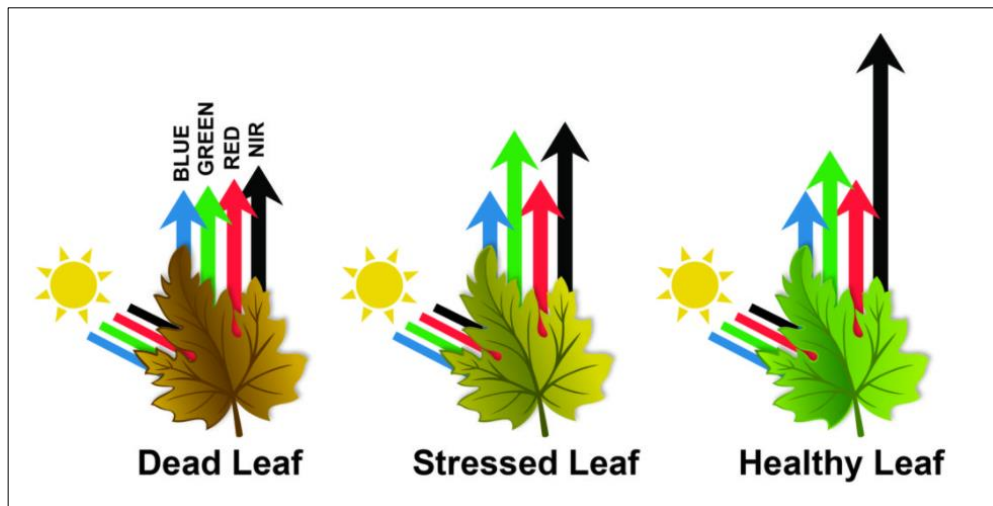
V následujícím kroku je nutné zabývat se mraky včetně jejich stínů. Pixely obsahující oblačnost nelze použít do dalších analýz, protože by výrazně ovlivnily výsledky. V optické části spektra se mraky odlišují od čistých pixelů díky jejich vysoké odrazivosti téměř ve všech vlnových délkách. To jim dává bílý vzhled. Problém nastává u tzv. cirrů, což jsou poloprůhledné táhlé mraky. Ty se ale začaly nedávno detekovat pomocí krátkovlnných infračervených pásem (Tarrío a kol. 2020).

Maskování pixelů s oblačností vychází z SCL mapy a spočívá ve vybrání nevhodných pixelů, se kterými se nebude dále pracovat. Jedná se např. o pixely s mraky a jejich stíny, neklasifikované a defektní pixely a pixely bez dat. Tyto vybrané hodnoty vytvoří nový rastr, tzv. masku, která je pak aplikována na rastry odrazivosti BOA. Tím jsou nežádoucí pixely zakryty, ostatních (čistých) pixelů se žádná změna netýká (Candra a kol. 2020; Ranghetti a kol. 2020). Maskování zajišťuje funkce *mask_type*.

```
mask_type = "cloud_and_shadow",  
extent_as_mask = T
```

4.4.2 Výpočet spektrálních indexů

Z upravených, oříznutých a očištěných snímků je možné vypočítat tzv. spektrální indexy. Spektrální indexy se odvozují z hodnot odrazivosti slunečního záření ve viditelné a blízké infračervené oblasti elektromagnetického spektra od různých povrchů Země. Počítají se aritmetickými operacemi, při kterých jsou kombinována vždy minimálně dvě spektrální pásma. Těmto operacím se říká rastrová algebra. S pomocí indexů tak lze z multispektrálního obrazu získat číselné informace, které jsou porovnatelné v globálním měřítku. Nejčastěji se používají k určování přítomnosti a stavu vegetace (podmnožinou spektrálních indexů jsou tzv. vegetační indexy k tomu určené). Odrazivost UV záření je totiž mimo jiné ovlivňována obsahem vody a chlorofylu v listech (viz obr. 17). Lze tak monitorovat množství biomasy na jednotku plochy, zdravotní stav rostlin včetně např. jejich fyziologického stresu nebo napadení škůdci. Tento princip je využíván zejména v zemědělství. Kromě vegetace je však možné monitorovat i vodní plochy a jejich vlastnosti, vlastnosti půdy, spálené oblasti, přítomnost sněhu a ledu nebo zastavěné oblasti (Jones, Vaughan 2010; Kaplan, Avdan 2017).



Obr. 17: Odrazivost slunečního záření od listů je dána především obsahem chlorofylu a vody. Vlevo mrtvý list, uprostřed stresovaný list, vpravo zdravý list (MIDOPT, 2022).

Spektrálních indexů je nepřehledné množství a všechny lze nalézt v Databázi indexů (IDB – *Index DataBase*) dostupné online. Kromě samotných indexů, popisu jejich využití a vzorců, pomocí nichž je lze spočítat, obsahuje databáze i seznam satelitních senzorů, pro které jsou jednotlivé indexy dostupné (ne ze všech senzorů je možné spočítat všechny indexy, záleží na spektrálních pásmech, ve kterých snímají) (IDB ©2011).

Spektrální indexy se počítají z hodnot rastru BOA. Pro výpočet je opět vhodné použít prostředí R a jeho balíček `sen2r`, který uživateli jednoduše umožňuje předem vypsát vybrané indexy a jejich parametry do textového souboru JSON (*JavaScript Object Notation*) (Ranghetti a kol. 2020). JSON představuje v současné době populární datový formát (tedy způsob zápisu dat) v programovacím jazyce *JavaScript*. V podstatě se jedná o slovník skládající se z párů klíč: hodnota (Bourhis a kol. 2020). Zde bylo po konzultaci s vedoucí bakalářské práce vybráno celkem 14 spektrálních indexů (viz tab. 7), které vstupovaly jako proměnné do predikčních modelů.

```
list_indices = c("BGI", "SIWSI", "mND680", "RDI", "CRI550",
"GVM1", "PSSRb1", "mCRIG", "MVI", "CTVI", "GRNDVI", "LCI",
"NormNIR", "Chlrededge")
```

Spektrální indexy			
Č.	Zkratka	Celý název	Vzorec pro výpočet
1	BGI	Simple Ratio 450/550 Blue green pigment index	$B1/B3$
2	SIWSI	Normalized Difference 860/1640	$(B9-B11)/(B9+B11)$
3	mND680	mND680	$(B8-B4)/(B8+B4-(2*B1))$
4	RDI	Simple Ratio MIR/NIR Ratio Drought Index	$B11/B9$
5	CRI550	CRI550	$(B2^{-1})-(B3^{-1})$
6	GVMi	Global Vegetation Moisture Index	$((B9+0.1)-(B11+0.02))/((B9+0.1)+(B11+0.02))$
7	PSSRb1	Simple Ratio 800/650 Pigment specific simple ratio B1	$B8/B4$
8	mCRIG	mCRIG	$((B2^{-1})-(B3^{-1}))*B9$
9	MVI	Mid-infrared vegetation index	$B9/B11$
10	CTVI	Corrected Transformed Vegetation Index	$((((B5-B3)/(B5+B3))+0.5)/\text{abs}(((B5-B3)/(B5+B3))+0.5)))*(\text{sqrt}(\text{abs}(((B5-B3)/(B5+B3))+0.5))))$
11	GRNDVI	Green-Red NDVI	$(B9-(B3+B5))/(B9+(B3+B5))$
12	LCI	Leaf Chlorophyll Index	$(B8-B5)/(B8+B4)$
13	NormNIR	Norm NIR	$B9/(B9+B5+B3)$
14	Chlred-edge	Chlorophyll Red-Edge	$(B7/B5)^{-1}$

Tab. 7: Použité spektrální indexy včetně vzorce pro jejich výpočet. Vlnové délky jsou nahrazeny příslušnými pásmy (B z anglického *band*) senzoru MSI (IDB, 2011, vlastní úprava).

4.4.3 Predikce teplot pomocí strojového učení

Pro predikci teplot byla vybrána metoda *Random Forests*. Je to metoda strojového učení používaná jak pro predikci (regresi), tak pro klasifikaci. Zatímco při klasifikaci jde o zařazování dat do předem připravených tříd, při predikci jsou předpovídány neznámé hodnoty z hodnot již známých. Uplatnění nachází tato technika například při snižování počtu prediktorů (měřením významnosti proměnných a výběrem pouze těch nejdůležitějších), při shlukování a nalezení odlehlých hodnot či při měření efektu proměnných na regresi (Mařašovská 2021a). Podstatou metody *Random Forests* je vytvoření velkého množství rozhodovacích stromů (tedy přímo lesa), přičemž výsledný predikční model je průměrem výsledků z jednotlivých stromů. Z toho vyplývá, že čím větší je počet rozhodovacích stromů, tím přesnější bude výsledek (Liaw, Wiener 2002).

Vstupní data jsou nejprve rozdělena na testovací a tréninkovou množinu. Zatímco z tréninkové množiny jsou tvořeny náhodné stromy, testovací vzorek (tedy data, která se do tréninkové množiny nedostala) je použit pro odhad chybovosti daného (regresního či klasifikačního) stromu. Při tvorbě stromů je uplatňován náhodný výběr s opakováním, souborem vstupních dat je tedy myšlena skupina bootstrapových výběrů (o stále stejné velikosti) vzniklá z původní množiny dat. Z každého bootstrapového výběru vznikne právě jeden strom. Díky tomu je RF metoda vhodná pro data obsahující hodně proměnných a málo vzorků. I málo obsáhlá vstupní data tedy mohou být rozdělena na velké množství testovacích a tréninkových množin (Mařašovská 2021a; Mařašovská 2021b).

Mařašovská (2021a) také uvádí základní postup při tvorbě regresních stromů technikou *Random Forests*:

1. Tvorba bootstrapového výběru o konstantní velikosti N (tréninková množina).
2. Výběr náhodné podmnožiny prediktorů o předem zvoleném počtu.
3. Tvorba stromu na bootstrapovém výběru z kroku 1 (pouze pomocí vybrané podmnožiny prediktorů z kroku 2).
4. Zařazení vzniklých hodnot vytvořených stromem, učení predikce.
5. Opakování kroků 1 – 4 až do vytvoření lesa s předem určeným počtem stromů.

5. VÝSLEDKY PRÁCE

V předkládané práci byly porovnány hodnoty teplot z celkem 8 vybraných dnů. Byly srovnány jak teploty naměřené in-situ, tak výsledné teploty vypočtené pomocí predikčního modelu ze satelitních snímků mise *Sentinel-2*. Model, který byl aplikován pro výpočet teplot, vznikl v rámci projektu Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu a kvality koupacích míst v České republice (projekt Zéta II TJ02000091). Modelování vycházelo ze 14 vypočítaných spektrálních indexů, přičemž ve výpočtech jednoznačně převažují pásma 3, 5 a 9 (viz tab. 7).

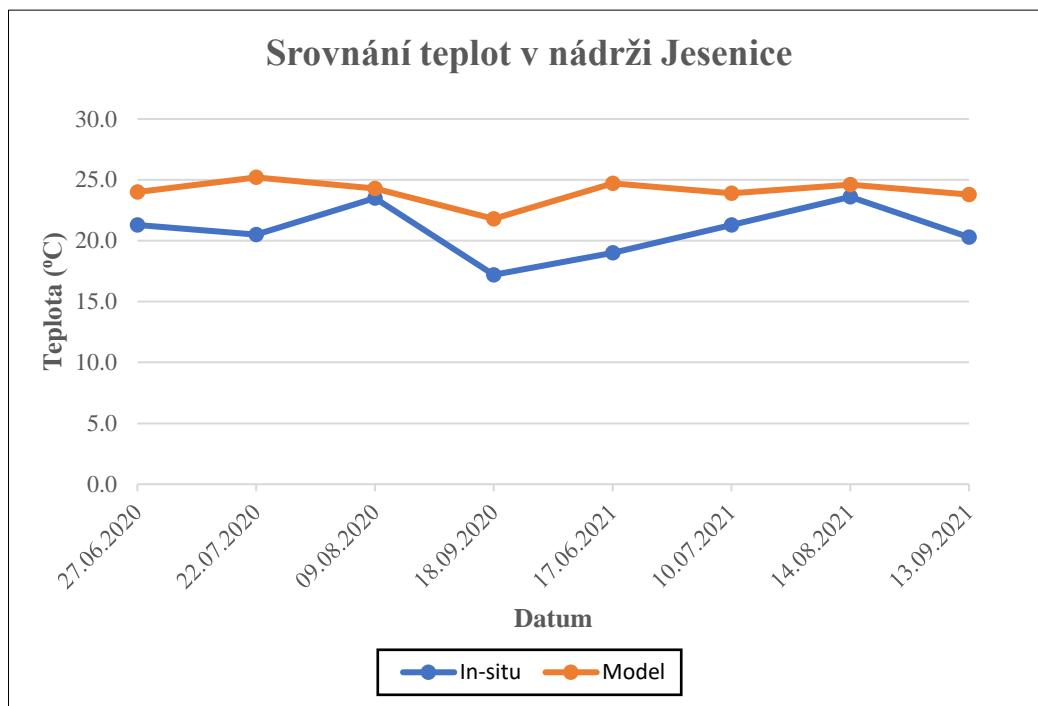
Tab. 8 přehledně zobrazuje konečné výsledky na obou vybraných lokalitách z jednotlivých dní. Sloupec Rozdíl pak udává odchylku teploty vypočítané od teploty naměřené. Tento rozdíl se pohybuje v intervalu od -0.4 °C do 13.1 °C a v průměru

dosahuje hodnoty 4.7 °C. Lze vidět, že ve většině případů vyšla predikovaná teplota z modelu vyšší než teplota naměřená (zeleně zvýrazněné hodnoty). Pouze dne 9. 8. 2020 na lokalitě Medard došlo k vypočítání teploty nižší (červeně zvýrazněná hodnota). Nejvíce se namodelované výsledky přiblížily k naměřené hodnotě dne 9. 8. 2020, a to jak na Jesenici (rozdíl pouhých 0.8 °C), tak na Medardu (rozdíl dokonce jen 0.4 °C). 14. 8. 2021 byl model také velice úspěšný na Jesenici (rozdíl 1 °C) a potom 17. 6. 2021 naopak na Medardu (rozdíl 1.2 °C). V některé dny naopak došlo k vypočítání diametrálně odlišných hodnot. Zejména dne 18. 9. 2020 na lokalitě Medard, kdy naměřená teplota in-situ byla 12.1 °C a vypočítaná teplota pomocí modelování vyšla 25.2 °C (rozdíl tedy činí 13.1 °C). Druhá největší odchylka pak nastala dne 13. 9. 2021 opět na Medardu. Predikovaná teplota 24.6 °C se totiž výrazně liší od na místě naměřené teploty 14.4 °C.

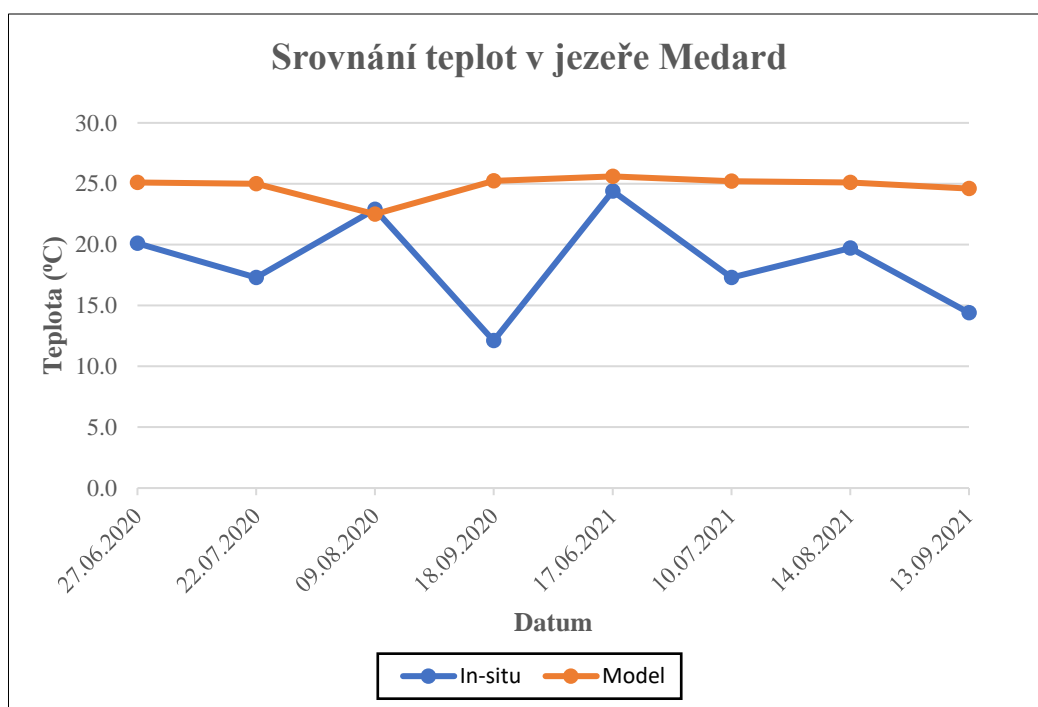
Na obr. 18 a 19 jsou zobrazeny grafy, které vizuálně srovnávají vypočítané a naměřené hodnoty teplot. První graf je vytvořen pro lokalitu Jesenice, druhý udává rozdíly pro lokalitu Medard. Při vizuálním zhodnocení prvního grafu lze pozorovat poměrně pravidelnou, větší či menší, korelaci dat. Průměrný rozdíl v predikovaných a naměřených teplotách v Jesenici činí 3.2 °C. Ovšem při hodnocení druhého grafu je vidět jakási divokost a nesynchronnost výsledků. Průměrný rozdíl v celkových hodnotách v Medardu dosahuje 6.3 °C.

Datum	Teplota vody °C					
	Jesenice			Medard		
	In-situ	Model	Rozdíl	In-situ	Model	Rozdíl
27.06.2020	21.3	24.0	2.7	20.1	25.1	5.0
22.07.2020	20.5	25.2	4.7	17.3	25.0	7.7
09.08.2020	23.5	24.3	0.8	22.9	22.5	-0.4
18.09.2020	17.2	21.8	4.6	12.1	25.2	13.1
17.06.2021	19.0	24.7	5.7	24.4	25.6	1.2
10.07.2021	21.3	23.9	2.6	17.3	25.2	7.9
14.08.2021	23.6	24.6	1.0	19.7	25.1	5.4
13.09.2021	20.3	23.8	3.5	14.4	24.6	10.2

Tab. 8: Porovnání teplot naměřených in-situ s hodnotami spočítanými modelem pomocí techniky *Random Forests*.



Obr. 18: Graf srovnávající teplotu vypočítanou modelem s teplotou naměřenou in-situ ve vodní nádrži Jesenice.

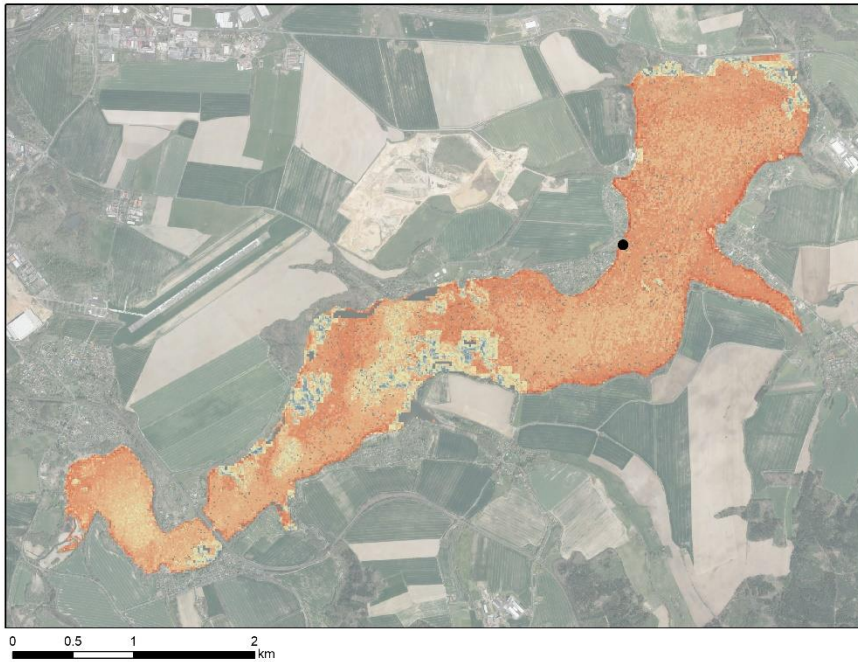


Obr. 19: Graf srovnávající teplotu vypočítanou modelem s teplotou naměřenou in-situ v jezeře Medard.

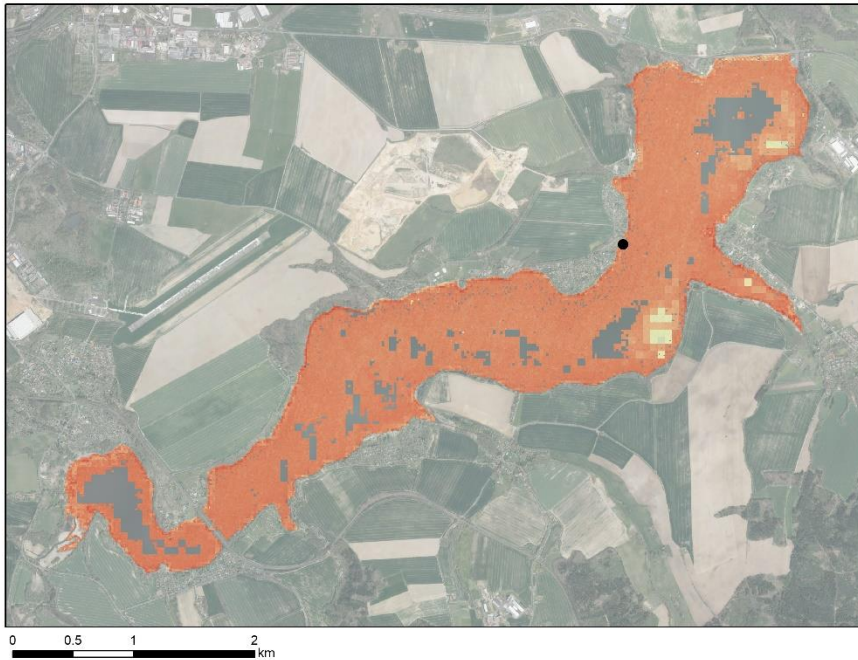
Další důležité výsledky jsou představeny na obr. 20-27. Jedná se o mapové výstupy vodní nádrže Jesenice s použitím výsledných rastrů rozložení teplot. Na první pohled jsou zarážející chybějící pixely (prázdná, nebarevná místa) v rastrech, a to především na mapách č. 21, 24, 25 a 27. Nejvíce výsledných pixelů pak bezpochyby schází na obr. 23, který zobrazuje scénu ze dne 18. 9. 2020. Model dokázal vypočítat teploty pouze při březích vodní nádrže a i tyto hodnoty se na úrovni sousedních pixelů pohybují s podezřelým rozdílem až 10 °C.

Bohužel nelze určit žádné trendy týkající se chladnějších či naopak teplejších oblastí v nádrži, které by jasně platily pro všech 8 výsledných map. Lze konstatovat, že jako nejteplejší se zdají být oblasti pobřežní (především na jižní straně), což by i z logiky věci mělo být správné. Mělčí voda při březích se rychleji ohřeje než voda uvnitř plochy jezera, byť je to voda do 10 cm od hladiny. Tento trend podporují všechny rastry kromě již zmíněného z data 18. 9. 2020. Je ale třeba pamatovat na prostorové rozlišení pixelu 10 m. Z takové plochy se jistě může do analýzy připlést i okolní vegetace. Za nejchladnější oblast by se snad dal považovat přítok řeky Odavy, který je lokalizován na severozápadním konci (respektive začátku) vodní plochy. Tuto pravidelnost ovšem podporují pouze obr. 22, 24, 25 a 26. Ostatní rozložení chladnějších nebo teplejších oblastí se zdají být spíše náhodná.

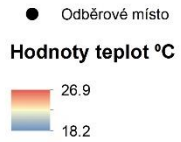
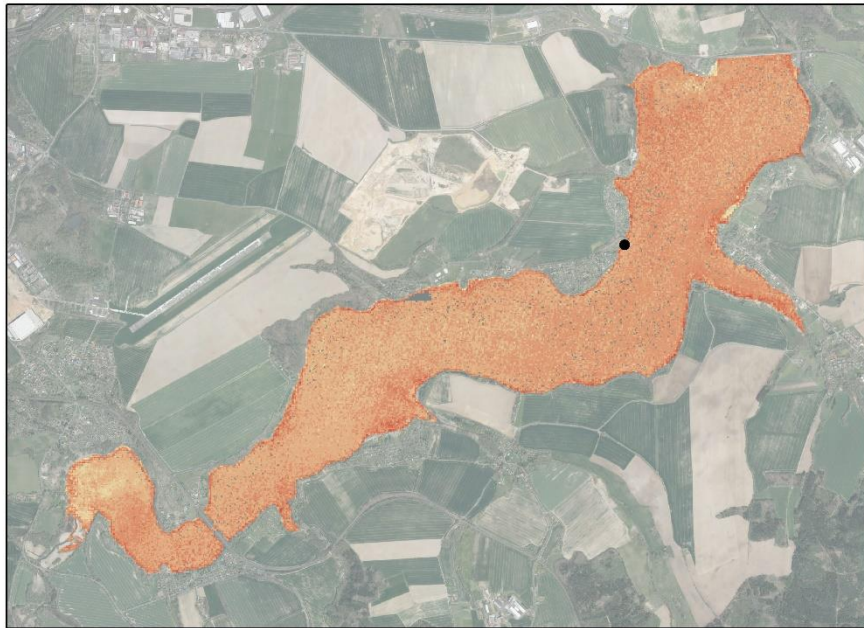
ROZLOŽENÍ TEPLŮT VE VODNÍ NÁDRŽI JESENICE
DNE 27. 6. 2020



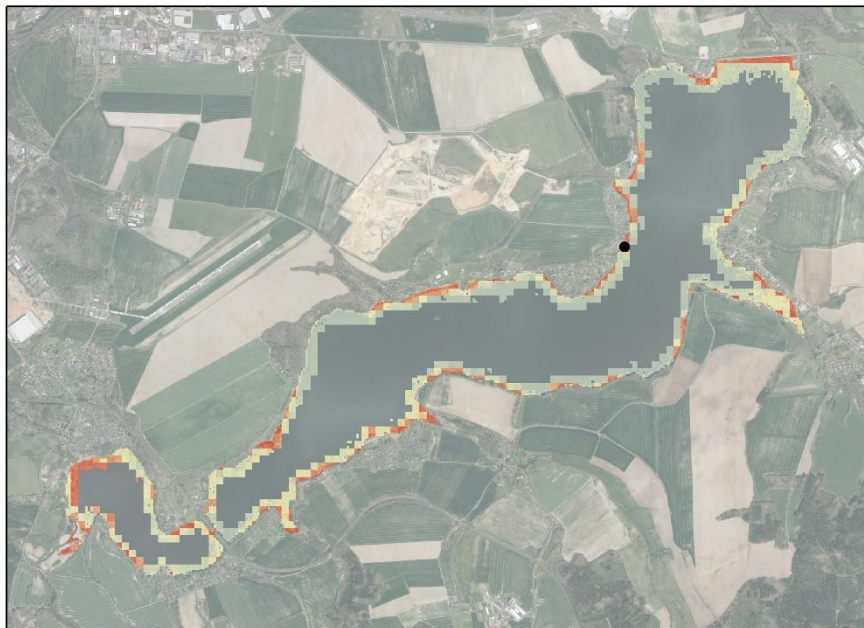
ROZLOŽENÍ TEPLŮT VE VODNÍ NÁDRŽI JESENICE
DNE 22. 7. 2020



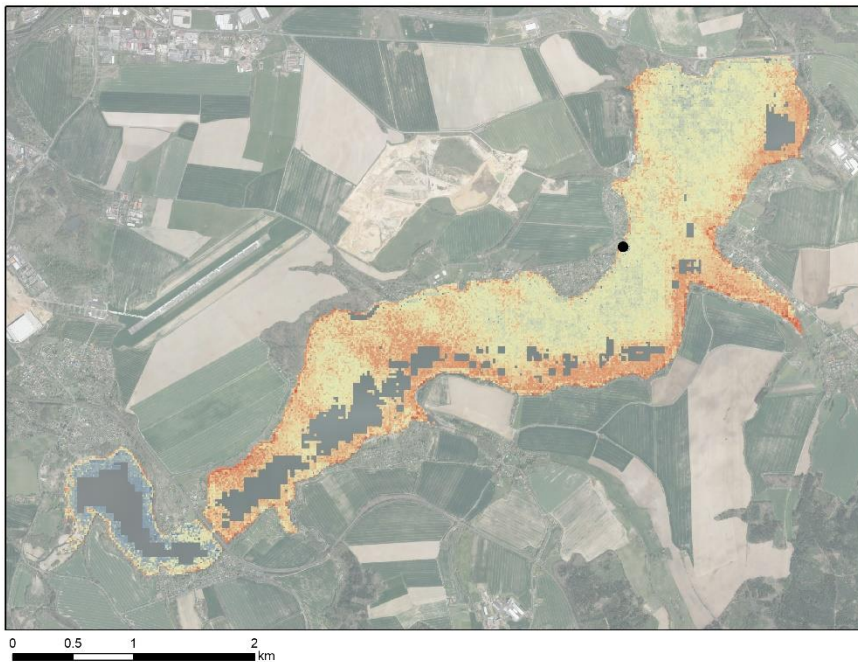
ROZLOŽENÍ TEPLŮT VE VODNÍ NÁDRŽI JESENICE
DNE 9. 8. 2020



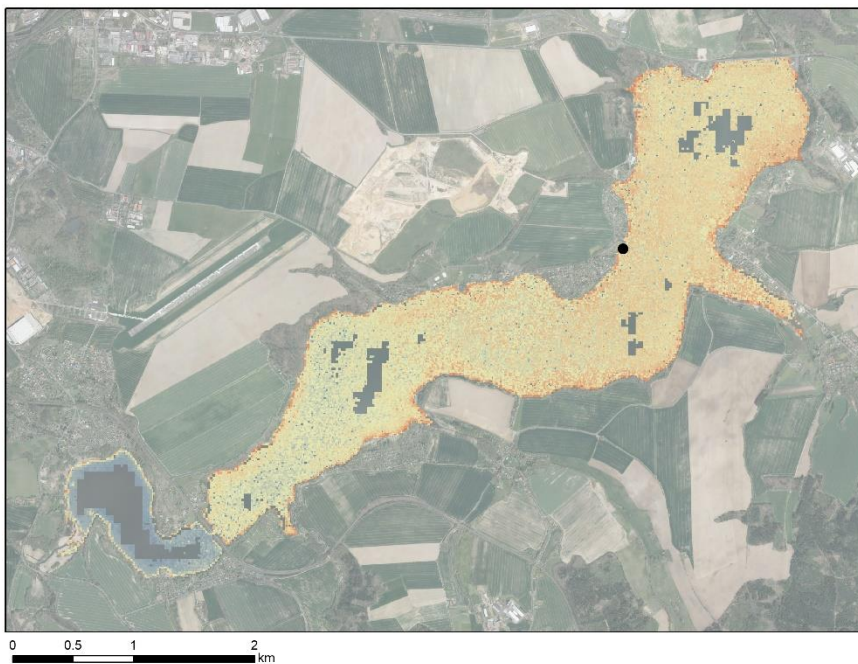
ROZLOŽENÍ TEPLŮT VE VODNÍ NÁDRŽI JESENICE
DNE 18. 9. 2020

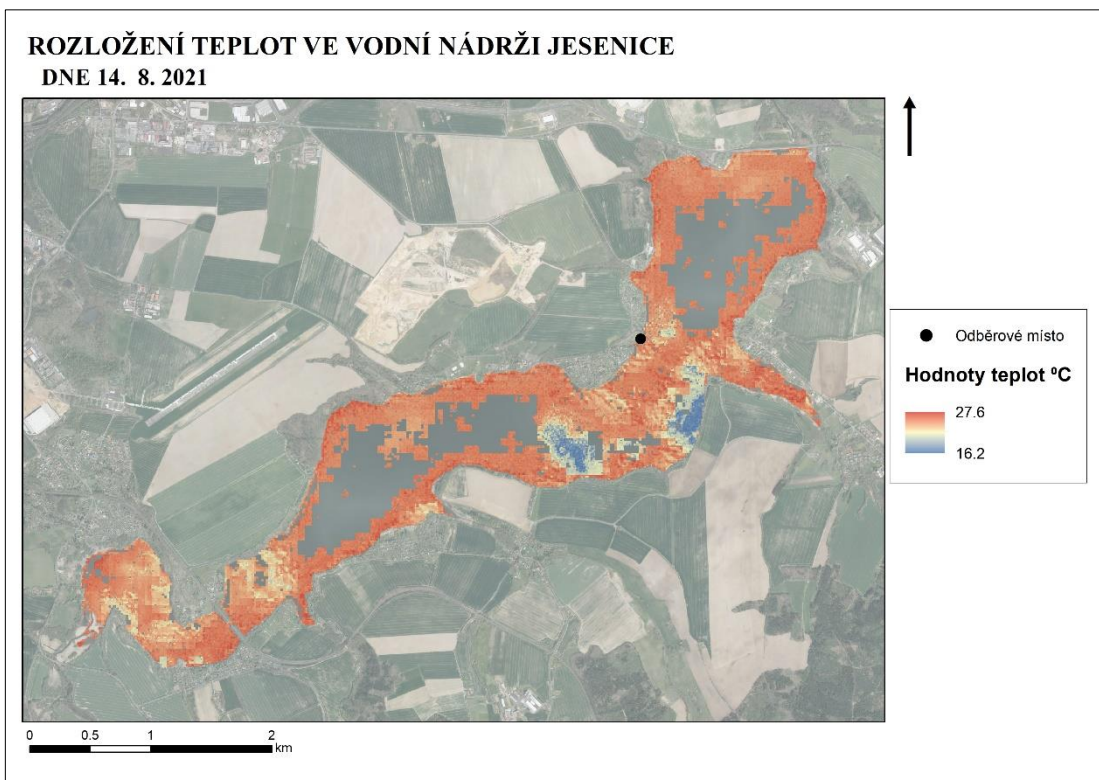
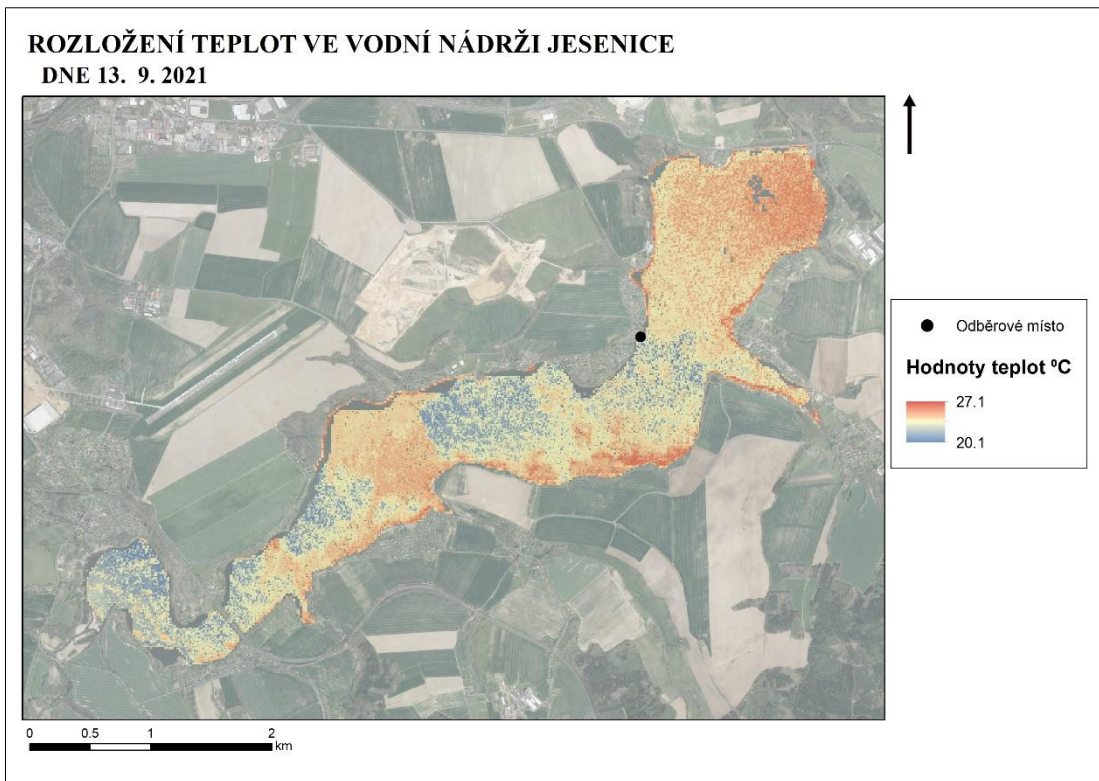


ROZLOŽENÍ TEPLŮT VE VODNÍ NÁDRŽI JESENICE
DNE 17. 6. 2021



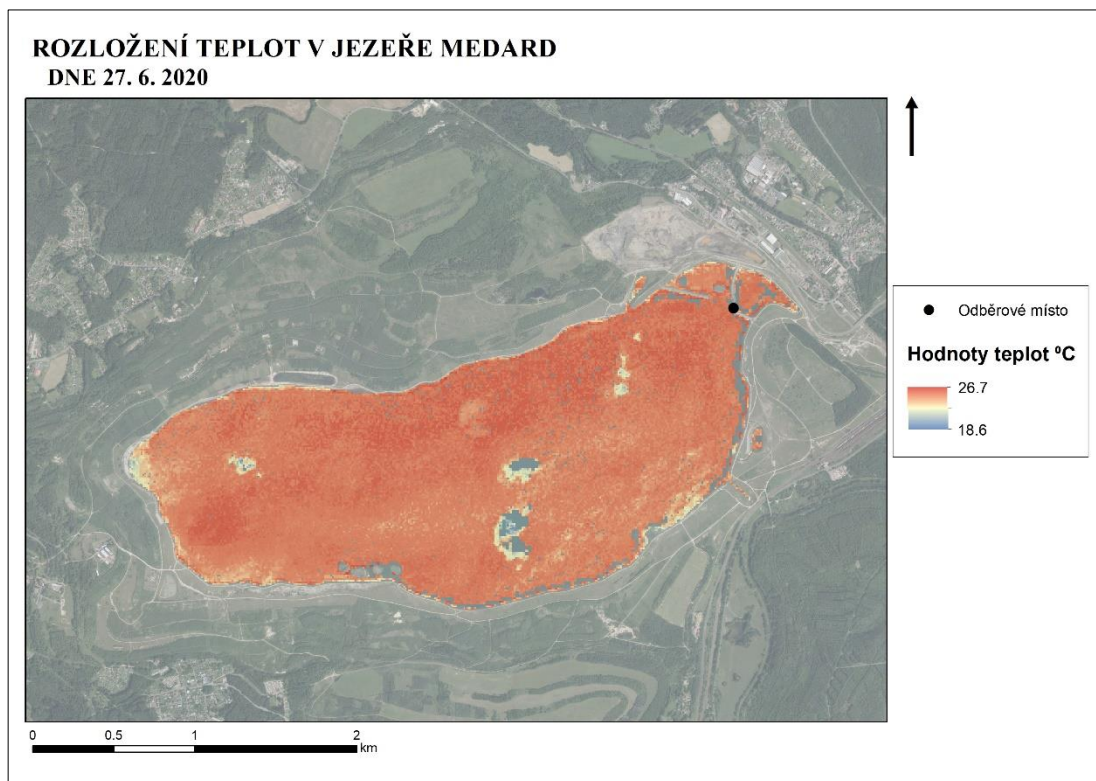
ROZLOŽENÍ TEPLŮT VE VODNÍ NÁDRŽI JESENICE
DNE 10. 7. 2021



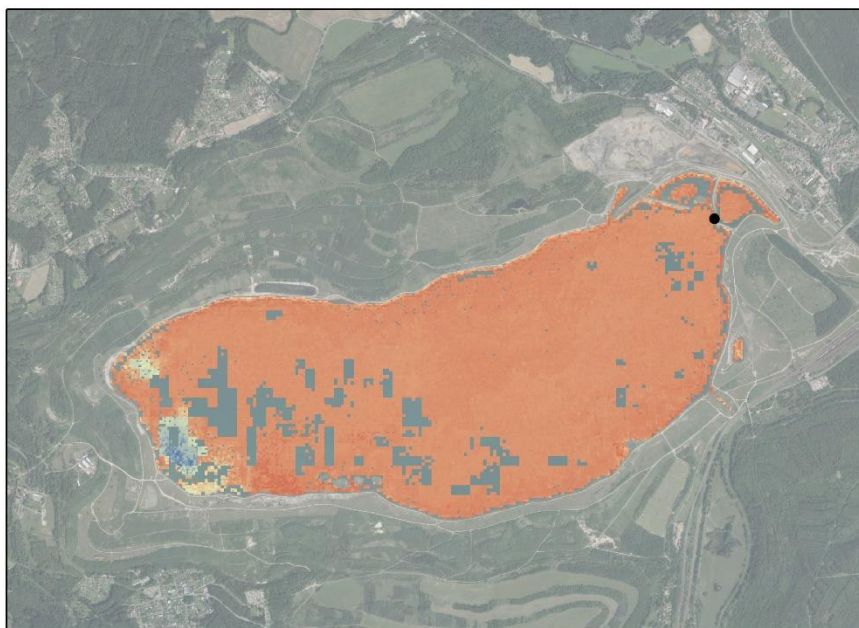


Obr. 20-27: Výsledné rozložení teplot na hladině vodní nádrže Jesenice ve vybrané dny (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, výsledné rastry, vlastní tvorba).

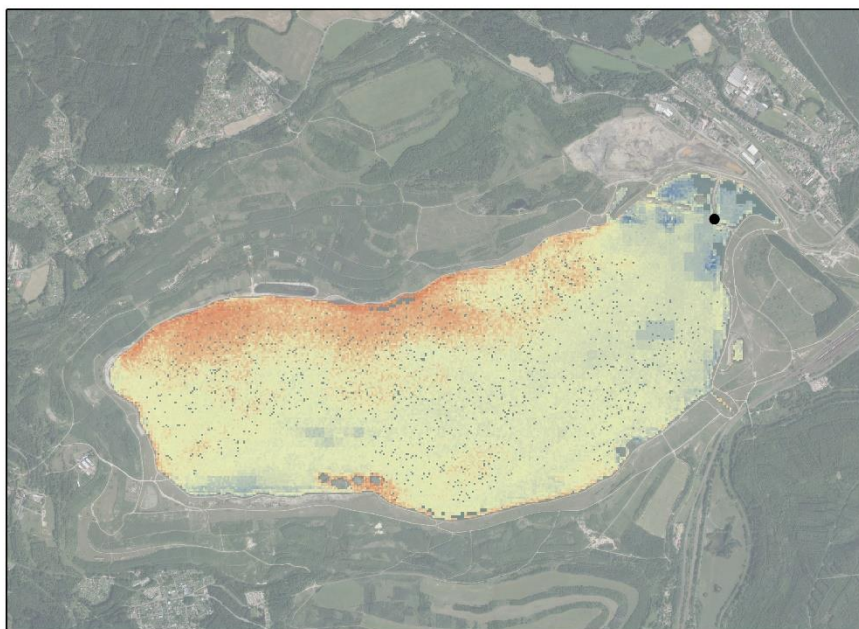
Na obr. 28-33 jsou zobrazeny výsledné mapy s barevnými rastry pro lokalitu Medard. Ani v tomto případě nelze bez obtíží určit platné a nezavádějící trendy, které by se shodovaly ve všech 8 datech. Po přehlédnutí chybějících pixelů působí například na obr. 29 a 34 teplota hladiny téměř homogenně. Nejchladnější oblasti se vyskytují na jihozápadě (obr. 29 a 33), na severovýchodě (obr. 30), podél severního břehu (obr. 31) i víceméně uprostřed jezera (obr. 35).



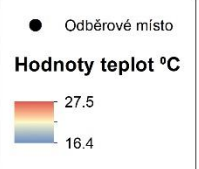
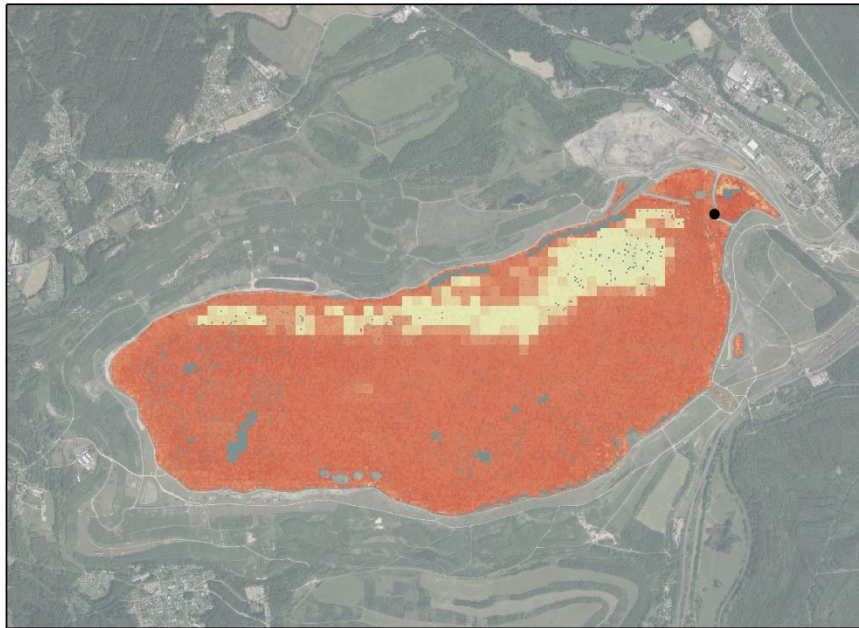
**ROZLOŽENÍ TEPLIT V JEZEŘE MEDARD
DNE 22. 7. 2020**



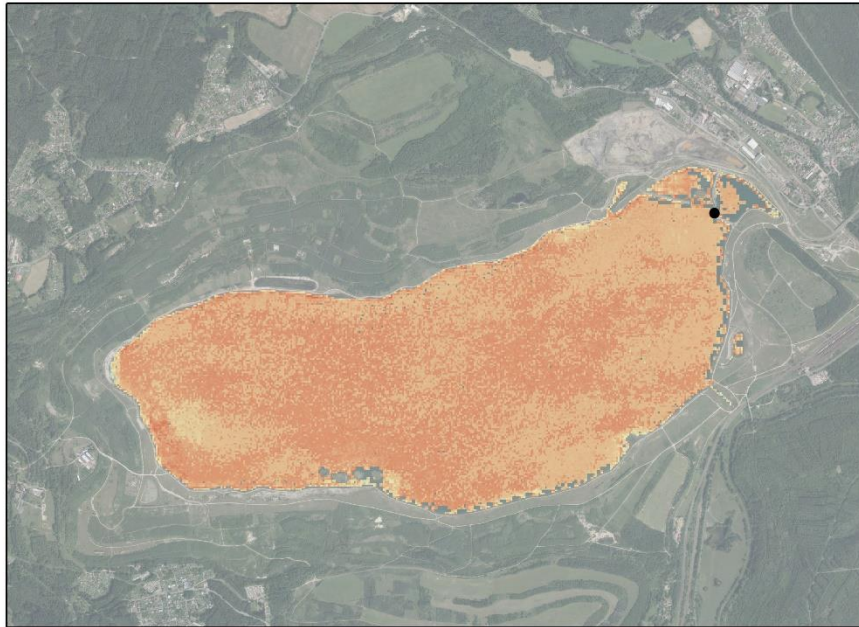
**ROZLOŽENÍ TEPLIT V JEZEŘE MEDARD
DNE 9. 8. 2020**



**ROZLOŽENÍ TEPLŮT V JEZEŘE MEDARD
DNE 18. 9. 2020**



**ROZLOŽENÍ TEPLŮT V JEZEŘE MEDARD
DNE 17. 6. 2021**

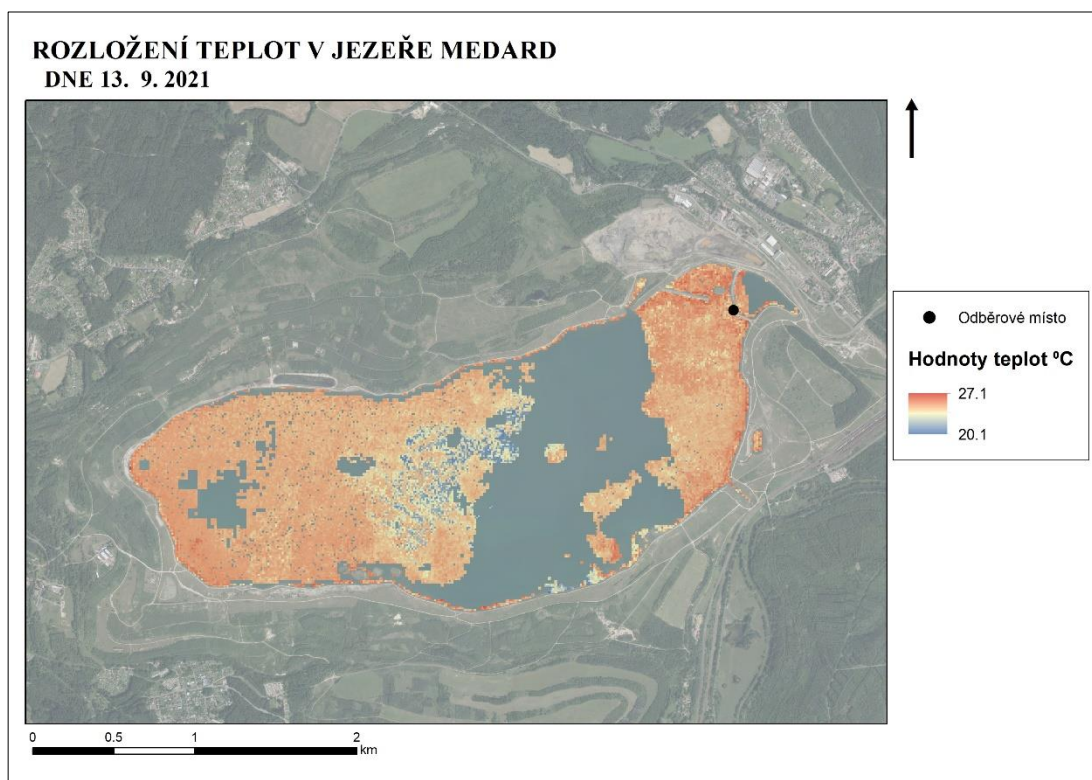


**ROZLOŽENÍ TEPLŮT V JEZEŘE MEDARD
DNE 10. 7. 2021**



**ROZLOŽENÍ TEPLŮT V JEZEŘE MEDARD
DNE 14. 8. 2021**





Obr. 28–35: Výsledné rozložení teplot na hladině jezera Medard ve vybrané dny (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, výsledné rastry, vlastní tvorba).

6. DISKUZE

Tato práce byla zaměřena na využití kombinace DPZ a prediktivního modelování pro výpočet jednoho z důležitých parametrů vodních ploch – teploty. Pomocí modelovací techniky *Random Forests* byly spočítány teploty hladiny vody na vodní nádrži Jesenice a na jezeře Medard, a to pro osm vybraných dní z předešlých dvou let. Výsledné teploty z modelu byly následně validovány terénními daty naměřenými in-situ a poskytnutými správci obou vodních ploch.

V první řadě bylo nutné vybrat vhodné lokality, a to zejména z hlediska dostupnosti dat. Nejprve byla snaha zvolit taková dvě místa, která by byla vždy na stejné dlaždici (viz kap. 3.2.3 *Sentinel-2*). To by samozřejmě snížilo množství stahovaných družicových snímků a veškeré úkony sloužící k jejich úpravě na polovinu. Také byla snaha zvolit vodní plochy v Karlovarském kraji. Jednak jsou lokality studentce blízké, jednak jsou i snáze dostupné, kdyby vznikla potřeba osobně navštívit daná místa nebo jejich správce. Dále musela být vzata v potaz dostupnost dat terénních. Po

několikadenní analýze a rozsáhlé mailové korespondenci s pracovníky Povodí Ohře, s. p., které spravuje mimo jiné 22 velkých vodních nádrží, a se zástupci Sokolovské uhelné, právní nástupce, a.s., byly vybrány vodní nádrž Jesenice a rekultivační jezero Medard.

Co se týče satelitních dat, je velice obtížné a zdlouhavé najít vhodné snímky, které by nebyly (případně byly jen částečně) zakryty oblačností. Ze září 2020 bylo například dostupných 12 snímků, z toho pouze 5 nebylo zakrytých mraky. Z červnových 12 snímků roku 2021 se daly použít dokonce jen 2. Z tohoto důvodu není vzorek vstupních dat příliš obsáhlý a byl vybrán vždy jen jeden den z měsíce, a to se snažou, aby mezi vybranými daty byly alespoň přibližně stejně velké časové rozestupy. Téměř všechny vybrané snímky se podařilo získat čisté, pouze dne 27. 6. 2020 byla přehrada Jesenice na několika málo místech zakryta mračny. Pixely, překryté mraky, mají být během předpracování satelitních dat zamaskovány pomocí SCL mapy. Po bližším zkoumání výsledného rastru ze dne 27. 6. 2020 a po kontrole původního snímku v prohlížeči *EO Browser* bylo zjištěno, že maskování pixelů s oblačností sice proběhlo, ale předtím byly nejspíše pixely vyhodnoceny jako bezoblačné. Nejchladnější oblasti (modré a žluté) totiž přesně zobrazují místa, kde se na snímku vyskytují mraky a jejich stíny. Takovéto pixely ovšem měly být z predikce vynechány a výpočty na nich neměly vůbec proběhnout.

Co je dále důležité zmínit, je různorodost vstupních hodnot teplot. Družice mise *Sentinel-2* přelétají nad povrchem Země vždy v pravidelném čase (s rozdílem několika málo minut). Nad Karlovarským krajem letí vždy v čase 10:05 až 10:20 (lze vidět v tab. 4). Vstupní informace ze satelitních snímků tak pocházejí právě z těchto časů. Poskytnuté teploty měřené in-situ jsou ovšem průměrné denní. Měření tedy probíhá pravidelně několikrát denně (např. každou hodinu) a tyto hodnoty jsou pak zprůměrovány. To znamená, že zahrnují i chladnější části dne (ráno a večer), což může hodnoty zkreslit o několik desetin až jednotek stupňů. Na to je potřeba myslet při validaci RF modelu. Výsledky mohou tedy být do určité míry zkreslené, ale nejspíše ne natolik, aby vycházely až o 12 °C jinak.

Vhodná k diskuzi je jistě i volba mise *Sentinel-2*. Hojně využívaná k tematickým sledováním jsou například i data ze satelitů *Landsat*. Prvním nedostatkem těchto satelitů je však perioda snímání, která je dlouhá 16 dní. Oproti tomu *Sentinel-2* snímá

Zemi každých 5 dní, při překryvu dlaždic, jako se to stalo s vybranými lokalitami, je perioda dokonce 2-3 dny. Dalším rozdílem, který by ale v této práci význam neměl, je šíře snímaných pásů. Ovšem největší předností *Sentinelu-2* je prostorové rozlišení nasnímaných scénérií. Zatímco pixel na snímku z *Landsatu* zobrazuje plochu 60 x 60 m, pixel ze *Sentinelu* má rozměry pouhých 10 x 10 m. Na data, poskytovaná uživatelům zdarma, je to značná výhoda. *Sentinel-2* byl zkrátka vybrán, protože má pro účely této práce vhodné parametry. Navíc byl pro predikci teplot použit model validovaný přímo na vodní hladiny z dat *Sentinelu-2*, zatímco data získaná *Landsatem* se používají převážně na analýzu teplot krajinného pokryvu (Václava Mařašovská, I. 2022, in verb).

Tím se diskuze stáčí k samotnému modelu. Nejdříve je vhodné zmínit několik faktů ohledně původního natrénování v rámci projektu Zéta II TJ02000091. Při tvorbě modelu neměla p. Mařašovská k dispozici klimatická data. Meteorologické podmínky (např. rychlost a síla větru) tedy nebyly vzaty v úvahu a model je natrénován konkrétně pro predikci či klasifikaci parametrů vodních ploch (teplota, výskyt sinic a řas aj.) bez ohledu na okolí. K validaci byla použita data in-situ naměřená mnohými kolegy celkem na 14 lokalitách, přičemž je důležité, že byly upřednostňovány převážně lokality zatížené výskytem sinic. V tomto projektu byly testovány 2 modelovací techniky, konkrétně se jednalo o *Random Forests* a *Partial Least Square Regression* (PLSR). Z hodnocení jejich výkonnosti vyplývá, že nejlepší výsledky dosahovaly modely zkonstruované právě technikou *Random Forests*, a dokonce se nejpřesněji hodnoceným parametrem ukázala být právě teplota vody (v měřených horizontech 10 cm a 30 cm pod hladinou) (Mařašovská 2021a). I přesto výsledky této bakalářské práce nejsou příliš uspokojivé a zdá se, že se natrénovaný model jeví jako nadhodnocující, v některých případech až chybně natrénovaný. Dva původní snímky byly dokonce vyměněny (snímek z 21. 8. 2020 byl nahrazen snímkem z 9. 8. 2020 a snímek z 20. 9. 2020 byl nahrazen tím z 18. 9. 2020), protože model vypočítal jen teploty břehů, a analýza tedy proběhla znovu. Alespoň u prvního se nejdříve zdálo, že to pomohlo.

Příčin chaotických výsledků může být hned několik. Na jednu stranu je nutné si připomenout nesoulad mezi daty z družic a daty od správců vodních ploch. Průměrné denní teploty mohly zkreslit výsledky z modelu. Nejspíše by se ale zkreslení projevilo v řádů několika jednotek °C a ne desítek. Další možná příčina byla shledána v tom, že

model byl původně natrénován na odlišných vstupních datech a nemusel tak být „připraven“ na jiné podmínky. Například se mohlo stát, že tak nízké hodnoty teplot, jako se objevily zejména na Medardu v roce 2021, model nerozpoznal. Přeci jen jsou to právě dva výsledky z této lokality (18. 9. 2020 a 13. 9. 2021), kdy z hlediska modelu očividně nastala nějaká extrémní situace.

Dále by se dalo vytknout, že výkonnost modelu byla v této bakalářské práci posouzena pouze na základě porovnání výsledných teplot. Neproběhla žádná statistická hodnocení přesnosti, sensitivity nebo různých indexů. Přesto by tato vizuální kontrola výsledků měla být také vypovídající.

Sice tyto výsledky nebyly dokonalé, o to větší přínos však spočívá v této studii. Nabízí se možnost podrobněji zkoumat příčiny nepřesnosti modelu a zkonstruovaný model dále upravovat a vylepšovat. Nyní je ovšem třeba zůstat jen u tohoto nastínění, hlubší úvahy na dané téma už jsou nad rámec této bakalářské práce.

7. ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE

Tato práce byla zaměřena na kombinaci metod strojového učení a dálkového průzkumu Země. Pomocí modelovací techniky *Random Forests* byly ze satelitních snímků mise Sentinel-2 vypočítány teploty hladiny vody na 2 vybraných lokalitách, kterými se staly vodní nádrž Jesenice a jezero Medard v Karlovarském kraji. Satelitní snímky bylo třeba nejdříve předzpracovat a díky spočítaným spektrálním indexům mohlo dojít v rámci software R k predikci (regresi) rozdělení teplot. Teplota je totiž brána jako jeden z důležitých parametrů vodních ploch, lze ji například využít pro další výpočty, jako je výpar či vodní bilance značně ovlivňující celé ekosystémy. Vyhodnocení časových řad sledovaného jevu nemělo moc smysl, protože výsledky byly poměrně překvapující a minimálně nadhodnocené, ne-li v některých případech zavádějící. Každopádně právě v tom spočívá obrovský přínos této práce. Fakt, že byly nalezeny nedostatky v použitém modelu, přináší možnost tyto nedokonalosti podrobněji zanalyzovat a model opravit či dokonce vylepšit. Po takových úpravách by s přehledem jistě mohl nahradit klasický terénní sběr dat a být tak nápomocen při kompletním určování parametrů kvality vodních stanovišť, a to na celé jejich ploše.

8. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

8.1 Odborné publikace

Aguirre M., Berruti B., Bezy J.-L., Drinkwater M., Heliere F., Klein U., Mavrocordatos P., Greco B., Benveniste J. 2007: Sentinel-3: The Ocean and Medium-Resolution Land Mission for GMES Operational Services. ESA bulletin 131. S. 24-29.

Booth B., Mitchell A., 2001: Welcome to ArcGIS. In: Booth B., Mitchell A.: Getting Started with ArcGIS. ESRI, USA, s. 5-16.

Bourhis P., Reutter J. L., Vrgoč D., 2020: JSON: Data model and query languages. Information Systems 2020, 89. článek 101478.

Campbell J. B., Wynne R. H., 2011: Introduction to remote sensing. The Guilford Press, New York, 667 s.

Candra D. S., Phinn S., Scarth P., 2020: Cloud and cloud shadow masking for Sentinel-2 using multitemporal images in global area. International Journal of Remote Sensing 41(8). S. 2877-2904.

Dobrovolný P., 1998: Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu. Vydavatelství Masarykovy univerzity, Brno, 210 s.

Donlon C. J., Cullen R., Giulicchi L., Vuilleumier P., Francis C. R., Kuschnerus M., Simpson W., Bouridah A., Caleno M., Bertoni R., Rancaño J., Pourier E., Hyslop A., Mulcahy J., Knockaert R., Hunter Ch., Webb A., Fornari M., Vaze P., Brown S., Willis J., Desai S., Desjonqueres J.-D., Scharroo R., Martin-Puig C., Leuliette E., Egido A., Smith W. H. F., Bonnefond P., Le Gac S., Picot N., Tavernier G. 2021: The Copernicus Sentinel-6 mission: Enhanced continuity of satellite sea level measurements from space. Remote Sensing of Environment 258. Článek 112395.

Dörnhöfer K., Oppelt N., 2016: Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. Ecological Indicators 64. S. 105-122.

Gascon F., Bouzinac C., Thépaut O., Jung M., Francesconi B., Louis J., Lonjou V., Lafrance B., Massera S., Gaudel-Vacaresse A., Languille F., Alhammoud B., Viallefont F., Pflug B., Bieniarz J., Clerc S., Pessiot L., Trémas T., Cadau E., De Bonis R., Isola C., Martimort P., Fernandez V. 2017: Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. Remote Sensing 2017, 9(6), 584. S. 1-81.

Halounová L., Pavelka K., 2005: Dálkový průzkum Země. ČVUT, Praha, 182 s.

Handcock R. N., Torgersen Ch. E., Cherkauer K. A., Gillespie A. R., Tockner K., Faux R. N., Tan J., 2012: Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. In: Carbonneau P., Piégay H.: Fluvial Remote Sensing for Science and Management, First Edition. John Wiley & Sons, Ltd, USA, s. 85-113.

Jones H. G., Vaughan R. A., 2010: Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications. Oxford University Press, New York, 352 s.

- Jutz S., Milagro-Pérez M. P. 2020:** Copernicus: the European Earth Observation programme. *Revista de Teledetección* No 56. S. V-XI.
- Kaplan G., Avdan U., 2017:** Object-based water extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing* 50(1). S. 137-143.
- Lellák J., Kubíček F., 1991:** *Hydrobiologie*. Univerzita Karlova, Praha, 257 s.
- Liaw A., Wiener M., 2002:** Classification and Regression by randomForest. *R News* 2002, 2/3. S. 18-22.
- Louis J., Debaecker V., Pflug B., Main-Knorn M., Bieniarz J., Mueller-Wilm U., Cadau E., Gascon F., 2016:** Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users. *ESA Proceedings Living Planet Symposium, Praha*, s. 1-8.
- MacCallum S. N., Merchant Ch. J., 2012:** Surface Water Temperature Observations of Large Lakes by Optimal Estimation. *Canadian Journal of Remote Sensing* 38(1). S. 25-45.
- Main-Knorn M., Pflug B., Louis J., Debaecker V., Müller-Wilm U., Gascon F. 2017:** Sen2Cor for Sentinel-2. In: Bruzzone L: *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*. International Society for Optics and Photonics, článek 1042704.
- Mat'ášovská V., 2018:** DC7-3 Možnosti využití DPZ ve vodním hospodářství: Analýza dostupných informačních zdrojů s vazbou na řešenou problematiku. Průběžná zpráva. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M., v. v. i., Praha, 28 s.
- Mat'ášovská V., Kothan F., Ledvinka O., Pumann P., Fojtík T., Makovcová M., Bendakovská L., 2021a:** Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu koupacích vod. *VTEI* 2021/1. S. 37-45.
- Mat'ášovská V., Fojtík T., Jašíková L., Kothan F., Makovcová M., Mayerová L., Nováková H., Pumann P., Šuhájková P., 2021b:** Atlas koupacích vod České republiky. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M., v. v. i., Praha, 226 s.
- Pei T., Xu J., Liu Y., Huang X., Zhang L., Dong W., Qin Ch., Song C., Gong J., Zhou Ch., 2021:** GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives. *Geography and Sustainability* Volume 2, Issue 3. S. 207-215.
- Povodí Ohře Chomutov, 2019:** Jesenice. In: *Povodí Ohře Chomutov: Přehradý Povodí Ohře*. Povodí Ohře Chomutov, Chomutov. S. 12–13.
- Ranghetti L., Boschetti M., Nutini F., Busetto L. 2020:** „sen2r“: An R toolbox for automatically downloading and preprocessing Sentinel-2 satellite data. *Computers and Geosciences* 139. Článek 104473.
- Sent G., Biguino B., Favareto L., Cruz J., Sá C., Dogliotti A. I., Palma C., Brotas V., Brito A. C., 2021:** Deriving Water Quality Parameters Using Sentinel-2 Imagery: A Case Study in the Sado Estuary, Portugal. *Remote Sensing* 2021, 13(5). Článek 1043.

Szantoi Z., Strobl P., 2019: Copernicus Sentinel-2 Calibration and Validation. *European Journal of Remote Sensing* 52(1). S. 253-255.

Tarrio K., Tang X., Masek J. G., Claverie M., Ju J., Qiu S., Zhu Z., Woodcock C. E., 2020: Comparison of cloud detection algorithms for Sentinel-2 imagery. *Science of Remote Sensing* 2020, 2. Článek 100010.

Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H. J., de Haan J. F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P. F. 2012: TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment* 120. S. 70-83.

Verzani J., 2011: Getting Started with RStudio. O'Reilly Media, Inc., USA, 92 s.

Warren M. A., Simis S. G. H., Martinez-Vicente V., Poser K., Bresciani M., Alikas K., Spyrakos E., Giardino C., Anspér A., 2019: Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Image over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment* 225. S. 267-289.

Wetzel R. G., 2001: Limnology: Lake and River Ecosystems, Third Edition. Academic Press, USA, 1006 s.

8.2 Legislativní zdroje

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2021/696, v platném znění.

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 377/2014.

8.3 Internetové zdroje

Boldt-Christmas L., 2020: Polar and Sun-synchronous orbit (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Polar_and_Sun-synchronous_orbit.

Copernicus Open Access Hub, ©2014: Copernicus Open Access Hub (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Ekolist, ©2020: Medard je v současnosti největším rekultivačním jezerem v Česku (online) [cit. 2021.01.15], dostupné z <https://ekolist.cz/cz/publicistika/priroda/medard-je-v-soucasnosti-nejvetsim-rekultivacnim-jezerem-v-cesku>.

ESA, ©2000: Sentinel-5P (online) [cit. 2021.11.22], dostupné z <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>.

ESA, ©2022b: Level-2A Algorithm Overview (online) [cit. 2022.03.10], dostupné z <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>>.

ESA, ©2022c: Sentinel-2 operations (online) [cit. 2021.11.22], dostupné z <https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations>.

IDB, ©2011: Index DataBase (online) [cit. 2022.03.14], dostupné z <<https://www.indexdatabase.de/>>.

JICmagazín, ©2019: Satelitní data: Jak je využít pro podnikání (online) [cit. 2022.03.02], dostupné z <<https://www.jic.cz/magazin/satelitni-data-jak-je-vyuzit-pro-podnikani/>>.

Knudby A. J., 2021: Calculations of TOA radiance and TOA reflectance. In: Knudby A. J.: Remote Sensing. Creative Commons Attribution 4.0 International License (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <<https://ecampusontario.pressbooks.pub/remotesensing/>>.

MathWorks, ©2022: Hyperspectral Data Correction (online) [cit. 2022.02.09], dostupné z <<https://es.mathworks.com/help/images/hyperspectral-data-correction.html>>.

Povodí Ohře, ©2019a: Vodní bilance (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <<https://www.poh.cz/vodni-bilance/ds-1048/p1=1557>>.

Povodí Ohře, ©2019b: Vodní dílo Jesenice (online) [cit. 2021.12.28], dostupné z <<https://www.poh.cz/vodni-dilo-jesenice/d-2612/p1=2709>>.

R Project, ©2022: What is R? (online) [cit. 2022.03.03], dostupné z <<https://www.r-project.org/about.html>>.

Sentinel Hub, ©2018: EO Browser (online) [cit.2022.02.20], dostupné z <<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>>.

Sentinel Online, ©2022: Naming Convention (online) [cit. 2022.03.10], dostupné z <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention>>.

SUAS, ©2021: Skončila těžba uhlí v lomu Medard (online) [cit. 2021.12.30], dostupné z <<https://www.suas.cz/10-suas/aktuality/958-skoncila-tezba-uhli-v-lomu-medard>>.

8.4 Ostatní zdroje

ESA, ©2015: Snetinel-2 User Handbook. Esa Standard Document, 64 s.

Poláčková V., 2005: Urbanistická studie Západní části Sokolovské pánve. Urbanistický atelier UP-24, Praha, 68 s. „nepublikováno“. Dep.: Krajský úřad Karlovarského kraje, odbor regionálního rozvoje.

Sokolovská uhelná, právní nástupce., a.s., 2021: Zadání urbanistické studie jezero Medard (online) [cit. 2021.10.28], dostupné z <<https://www.suas.cz/images/clanky/Medard/URB.pdf>>.

8.5 Použitý software

ESRI: ArcGIS [software]. ArcGIS for Desktop 10.7.1 [cit. 2022.03.13]. Dostupné z: (není již dále podporován, nahrazen ArcGIS Online). Požadavky na systém: Windows, Linux.

Microsoft: Excel [software]. 2019 [cit. 2022.03.13]. Dostupné z: <<https://www.microsoft.com/cs-cz/microsoft-365/excel>>. Požadavky na systém: Windows, Mac OS, Mac OS X.

R Core Team: R [software]. R Version 4.1.1 [cit. 2022.03]. Dostupné z: <<https://www.r-project.org/>>. Požadavky na systém: Windows, MacOS, Linux, FreeBSD.

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Střídání jarních a podzimních cirkulací a letních a zimních stagnací vody v typické vodní nádrži (Skoglund N. S. In: Helland I. P., Johnsen S. I., Eloranta A. P., 2019: Towards environmental design in hydropower reservoirs – Developing a handbook for mitigation measures in regulated lakes (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <https://www.researchgate.net/figure/Pattern-of-temperature-stratification-and-mixing-in-Norwegian-lakes-Figure-by-S_fig10_337856685>).

Obr. 2: Zjednodušený princip pasivního (vlevo) a aktivního (vpravo) snímání Země (Shaik A., 2022: LIDAR (Light Detection And Ranging) (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <<https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/lidar-light-detection-ranging/>>, vlastní úprava).

Obr. 3: Spektrum elektromagnetického záření včetně vlnových délek a frekvencí (Domestomas, 2021: Elektromagnetické spektrum (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum>, vlastní úprava).

Obr. 4: Schéma oběžné dráhy synchronizované se Sluncem (fialově) (Boldt-Christmas L., 2020: Polar and Sun-synchronous orbit (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Polar_and_Sun-synchronous_orbit>).

Obr. 5: Připodobnění, jakým způsobem snímá MSI senzor odražené sluneční světlo od Země (ESA, 2012: Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z <https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/s2_sp-1322_2.pdf>).

Obr. 6: 13 spektrálních pásem, ve kterých senzor MSI snímá povrch Země (Gascon a kol. 2017: Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing* 2017, 9(6), 584. S. 1-81 (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z <<https://www.mdpi.com/2072-4292/9/6/584#cite>>).

Obr. 7: Schématické zobrazení paralelního snímání obou družic (2A a 2B) (ESA, 2017: Sentinel-2 global coverage (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/03/Sentinel-2_global_coverage>).

Obr. 8: Umělé rozdělení nasnímaných pásů do dlaždic (Schiller Ch., 2015: Understanding Sentinel-2 Satellite Data (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z <<https://eox.at/2015/12/understanding-sentinel-2-satellite-data/>>).

Obr. 9: Rozdíl v principu snímání odrazivosti TOA a BOA (MathWorks, 2022: Hyperspectral Data Correction (online) [cit. 2022.02.09], dostupné z <<https://es.mathworks.com/help/images/hyperspectral-data-correction.html>>.

Obr. 10: Porovnání úrovní snímků L1C – TOA (vlevo) a L2A – BOA (uprostřed), na kterém již byly aplikované atmosférické korekce (ESA, 2022a: Level-2 (online) [cit. 2022.03.11], dostupné z <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>>).

Obr. 11: Přehledová mapa Karlovarského kraje s vyznačenou polohou jezera Medard a vodní nádrže Jesenice (zdroj dat: ©ArcČR, ARCDATA PRAHA, 2016; ZABAGED® 2022, vlastní tvorba).

Obr. 12: Postupné napouštění jezera Medard (mapy.cz, 2022 (online) [cit. 2022.02.28], dostupné z <<https://mapy.cz/zakladni?x=12.5946410&y=50.1814857&z=14&q=medard&source=base&id=2026923&ds=2>>, vlastní úprava).

Obr. 13: Ukázka vyhledávání vhodných snímků pomocí *EO Browser* (Sentinel Hub, 2018: EO Browser (online) [cit.2022.02.20], dostupné z <<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>>).

Obr. 14: Překryv dvou dlaždic ze Sentinelu-2 (Copernicus Open Access Hub, 2014: Copernicus Open Access Hub (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>).

Obr. 15: Mapa zobrazující místo, kde dochází k pravidelnému odběru vody z důvodu měření teploty v nádrži Jesenice (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, vlastní tvorba).

Obr. 16: Mapa zobrazující místo, kde dochází k pravidelnému odběru vody z důvodu měření teploty v rekultivačním jezeře Medard (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, vlastní tvorba).

Obr. 17: Odrazivost slunečního záření od listů je dána především obsahem chlorofylu a vody (MIDOPT, 2022: Healthy Crop (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <<https://midopt.com/healthy-crop/>>).

Obr. 18: Graf srovnávající teplotu vypočítanou modelem s teplotou naměřenou in-situ ve vodní nádrži Jesenice.

Obr. 19: Graf srovnávající teplotu vypočítanou modelem s teplotou naměřenou in-situ v jezeře Medard.

Obr. 20-27: Výsledné rozložení teplot na hladině vodní nádrže Jesenice ve vybrané dny (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, výsledné rastry, vlastní tvorba).

Obr. 28-35: Výsledné rozložení teplot na hladině jezera Medard ve vybrané dny (zdroj dat: ČÚZK, WMS - Ortofoto 2021, výsledné rastry, vlastní tvorba).

Tab. 1: Rozdíly mezi konvenčními a nekonvenčními metodami DPZ (Mařašovská V., 2018: DC7-3 Možnosti využití DPZ ve vodním hospodářství: Analýza dostupných informačních zdrojů s vazbou na řešenou problematiku. Průběžná zpráva. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M., v. v. i., Praha.).

Tab. 2: Seznam spektrálních pásem Sentinelu-2 včetně jejich středních vlnových délek (ESA, 2015: Snetinel-2 User Handbook. Esa Standard Document, vlastní úprava).

Tab. 3: Jednotlivé třídy, do kterých jsou pixely barevně rozdělené v SCL mapě (ESA, 2022b: Level-2A Algorithm Overview (online) [cit. 2022.03.10], dostupné z <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>>, vlastní úprava).

Tab. 4: Vhodné snímky pro analýzu z let 2020 a 2021 (Copernicus Open Access Hub, 2014: Copernicus Open Access Hub (online) [cit. 2022.03.27], dostupné z <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>).

Tab. 5: Průměrné denní teploty vody v nádrži Jesenice ve vybraných dnech, naměřeno in-situ (vlastní úprava).

Tab. 6: Průměrné denní teploty vody v jezeře Medard ve vybraných dnech, naměřeno in-situ (vlastní úprava).

Tab. 7: Použité spektrální indexy včetně vzorce pro jejich výpočet (IDB, 2011: Index DataBase (online) [cit. 2022.03.14], dostupné z <<https://www.indexdatabase.de/>>, vlastní úprava).

Tab. 8: Porovnání teplot naměřených in-situ s hodnotami spočítanými modelem pomocí techniky *Random Forests*.