

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky

**STANOVENÍ VYBRANÝCH EKOSYSTÉMOVÝCH
FUNKCÍ Z DAT DRUŽICE SENTINEL**

Diplomová práce

Bc. Pavel VYVLEČKA

Vedoucí práce doc. RNDr. Vilém PECHANEC, Ph.D.

Olomouc 2020
Geoinformatika

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá nalezením vhodných algoritmů pro zpracování družicových dat Sentinel-2 a Sentinel-1. Výsledky algoritmů slouží jako kvantifikátory pro konečnou kvantifikaci ekosystémových funkcí. Algoritmy jsou zaměřeny na množství a strukturu biomasy, zásoby uhlíku v nadzemní biomase, vlhkost aktivního povrchu, vlhkost půdy a podíl fotosynteticky aktivní složky vegetace. Testování algoritmů probíhá na zájmovém území povodí řeky Dřevnice. Snímky byly staženy pro každý měsíc v časovém období od března 2018 do prosince 2018. Výsledné hodnoty biomasy a uhlíku jsou konfrontovány s výsledkem pozemního měření výzkumné stanice Bílý Kříž a dále s průměrnými hodnotami uhlíku ve vybraných biotopech zájmového území. Práce je zaměřena ke zjištění, zdali družicová data Sentinel-2 jsou vhodná k dané tematice stanovení ekosystémových funkcí. Důležitou kapitolou je diskuze, kde je právě pojednáváno o použitelnosti, či nepoužitelnosti dat pro danou problematiku. Dalším dílčím výsledkem je porovnání přístupu k datům mezi Sentinel Playground, Sentinel Explorer a Copernicus Open Acces Hub.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sentinel-2; Dálkový průzkum Země; Ekosystémové funkce

Počet stran práce: 70

Počet příloh: 2 (z toho 2 volné)

ANOTATION

Main aim of diploma thesis is finding suitable algorithms for processing remote sensing data of Sentinel-2 and Sentinel-1 satellites. The Results of the algorithms are used as indicators for final quantification of ecosystem functions. The algorithms are focused on estimation and structure of biomass, carbon estimation in above ground biomass, moisture of active surface, soil moisture and proportion of photosynthetically active part of vegetation. Algorithms are tested in area of interest in basin of river Dřevnice. Satellite images were downloaded for each month in the period from March 2018 to December 2018. The values of biomass and carbon estimation are confronted with the results of ground measurements from research station Bílý Kříž and from average values of carbon in selected biotopes. Thesis is focused on finding out if the satellite data from Sentinel-2 are suitable for determining ecosystem functions. An important chapter in this thesis is discussion, where is discussed about usability or unusability Sentinels data for determination of ecosystem functions. Another partial result of thesis is comparison of data access between Sentinel Playground, Sentinel Explorer and Copernicus Open Access Hub.

KEYWORDS

Sentinel-2; Remote Sensing; Ecosystem functions

Number of pages: 70

Number of appendixes: 2

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Pavel VYVLEČKA

Děkuji vedoucímu práce doc. RNDr. Vilému Pechancovi, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel VYVLEČKA**

Osobní číslo: **R180524**

Studijní program: **N1301 Geografie**

Studijní obor: **Geoinformatika**

Název tématu: **Stanovení vybraných ekosystémových funkcí z dat družice Sentinel**

Zadávající katedra: **Katedra geoinformatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je nalézt a aplikovat vhodné algoritmy k analýze obrazových dat z družice Sentinel1 a Sentinel2 za účelem kvantifikace vybraných ekosystémových funkcí. Analýzy budou prováděny na dílčích studijních plochách v ČR v závislosti na probíhajícím pozemním měření. Důraz bude kladen na množství a strukturu biomasy, zásoby uhlíku v nadzemní biomase, vlhkost aktivního povrchu, vlhkost půdy a podíl fotosyntetické aktivní složky vegetace. Dosažené výsledky z analýzy satelitních dat budou konfrontovány z výsledky z pozemních měření a budou statisticky vyhodnoceny. Součástí práce bude testování shody výsledků mezi různými přístupy k datům Sentinel (Sentinel Playground x SNAP x AGOL).

Student vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, do metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI. Povinnou přílohou práce bude poster formátu A2.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

Oficiální dokumentace k technickým parametrům a způsobu přístupu k datům družici Sentinel

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/>

<https://www.sentinel-hub.com/explore/sentinel-playground>

<https://scihub.copernicus.eu/>

Shunlin Liang, Xiaowen Li, Jindi Wang (eds.) Advanced Remote Sensing. 1st Edition. Terrestrial Information Extraction and Applications

William James Frampton, Jadunandan Dash, Gary Watmough, Edward James Milton (2013): Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation

Petr Lukeš (2017): Potenciál satelitních dat Sentinel - 2 pro hodnocení zdravotního stavu lesa

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 1. listopadu 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 5. května 2020

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan

L.S.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA GEONFORMATIKY
17. listopadu 50, 771 46 Olomouc

prof. RNDr. Vít Voženilek, CSc.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 10. prosince 2018

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 CÍLE PRÁCE.....	11
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ.....	12
2.1 Použité metody	12
2.2 Použitá data	13
2.3 Použité programy	14
2.4 Postup zpracování.....	15
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
3.1 Copernicus	17
3.1.1 Sentinel-1	17
3.1.2 Sentinel-2	21
3.1.3 Přístupy k datům Sentinel.....	24
3.2 Ekosystémová služba a funkce	25
3.3 Kvantifikace ekosystémových funkcí z dat DPZ.....	28
3.3.1 Biomasa.....	29
3.3.2 C-FAKTOR	33
3.3.3 Vlhkostní indexy	34
3.3.4 Použité vegetační indexy.....	36
4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ	38
4.1 Zpracování dat.....	38
4.1.1 Oblast zájmu	38
4.1.2 Příprava dat k analýze.....	38
4.2 Testovací část	40
4.2.1 C-FAKTOR	40
4.2.2 BIOMASA A UHLÍK.....	42
4.2.3 FAPAR	47
4.2.4 Leaf Area Index	51
4.2.5 Zachycení PM ₁₀	51
4.2.6 NDMI (NDWI)	52
4.2.7 Wetness-Biomass	52
4.2.8 Surface Soil Moisture	53
4.2.9 Surface Temperature.....	54
5 VÝSLEDKY	56
6 DISKUZE	67
ZÁVĚR	69
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
AGB	Above-Ground Biomass
BP	Biophysical Processor
CICES	The Common International Classification of Ecosystem Services
CLC	Corine Land Cover
DKV	Detailní Kombinovaná Vrstva
EC	European Commission
EEA	European Environment Agency
ESA	European Space Agency
EU	European Union
EW	Extra Wide Swath Mode
FAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
FDBAQ	Flexible Dynamic Adaptive Quantisation
FR	Full Resolution
GIS	Geografický Informační Systém
GMES	Global Monitoring for Environment
GRD	Ground Range Detected
HR	High Resolution
IW	Interferometric Wide Swath Mode
LAI	Leaf Area Index
LST	Land Surface Temperature
MR	Medium Resolution
MSAVI	Modified Soil-Adjusted Vegetation Index
MSI	Multi Spectral Instrument
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NIR	Near Infrared
OSW	Ocean Swell spectra
SAFE	Standard Archive Format for Europe
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLC	Single Look Complex
SM	Strip Map Mode
SSM	Surface Soil Moisture
SWIR	Short Wave Infrared
WB	Wetness-Biomass
WV	Wave Mode

ÚVOD

Správné fungování ekosystémů je nedílnou součástí udržení přírody v rovnováze. Mezi ekosystémy probíhají interakce, které jsou zásahem člověka narušeny, či změněny. Zmíněnými interakcemi mezi ekosystémy jsou ekosystémové funkce. Následek této změny ekosystémových funkcí má dopad pro každodenní život. Typickým příkladem je odlesňování a vznik zemědělsky využívané půdy. Nejčastěji se jedná o tropické lesy v Jižní Americe nebo v Asii. Pokud dojde ke změně daného ekosystému, změní se nebo zanikne i jeho funkce. Mezi hlavní ekologické funkce lesa podle Vyskot a kol. (2003), se řadí stabilizační (udržení rovnováhy), vodohospodářské (retence, akumulace nebo infiltrace vody), půdoochranné (ochrana proti erozi, deflaci či sesuvu) a klimaticko-vzduchoochranné (filtrace vody a vzduchu). V neposlední řadě slouží les jako přirozené krytí pro spoustu živočichů a je důležitý pro udržení biodiverzity druhů.

K odhalení změn uvnitř ekosystémů může sloužit monitoring. V případě monitoringu rozsáhlejších území za časově se opakující období je nejvhodnějším způsobem dálkový průzkum Země (DPZ). Rozvíjející se technické možnosti dovolují vyslat na oběžnou dráhu větší množství družic. Nyní se v kosmickém prostoru nachází řada družic s multispektrálními, hyperspektrálními či radarovými senzory, sloužící pro monitoring změn pokryvu Země. Díky použití spektrálních pásem a jejich kombinací při výpočtech zpracování obsahu vznikají vegetační indexy. Ty mohou sloužit jako kvantifikátor pro stanovení ekosystémové funkce. Pro zpřesnění multispektrálních dat bývají použita radarová nebo bioklimatická data. V diplomové práci jsou zpracovány data z družic Sentinel-1 a Sentinel-2. Tedy k multispektrálním datům jsou pro zpřesnění použity data radarová. Díky svým vlastnostem jsou družicová data efektivním způsobem pro monitoring velkých nebo odlehlých míst, kde by bylo obtížné provádět pozemní měření.

Velkým problémem dnešního světa je prudký nárůst imisí skleníkových plynů. Skleníkové plyny zesilují skleníkový efekt a sním spojené globální oteplování. Jeden z hlavních skleníkových plynů v atmosféře je oxid uhličitý (CO_2). Jedná se o sloučeninu uhlíku a kyslíku a díky fotosyntéze dochází k přeměně na kyslík, vodu a uložení uhlíku ve vegetaci. Aby bylo docíleno snížení imisí v atmosféře, je kromě redukce emisí také nutné zachovat lesní porosty. První zmíněnou ekosystémovou funkcí v práci bude právě sekvestrace uhlíku. Další ekosystémovou funkcí je ochrana půdy před vodní erozí, tu zajišťuje vegetační kryt. Nejméně náchylné k vodní erozi jsou půdy chráněné lesními porosty, nejvíce pak půdy bez vegetačního krytu. Vegetační kryt zajišťuje mnoho dalších funkcí, které jsou v diplomové práci řešeny, jako retence vody v krajině nebo disipace sluneční energie. Problematika sucha je dalším globálním fenoménem, který má vztah na již zmíněné globální oteplování. Esenciální pro retenci vody je opět vegetační kryt, který je zásahem člověka výrazně formován již dlouhá léta. Vegetace je jeden z klíčových faktorů ke správnému fungování jak biosféry, tak i ostatních zemských systémů.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je nalézt a aplikovat vhodné algoritmy k analýze obrazových dat z družice Sentinel-1 a Sentinel-2 za účelem kvantifikace vybraných ekosystémových funkcí. Analýzy budou prováděny na dílčích studijních plochách v ČR v závislosti na probíhajícím pozemním měření. Důraz bude kladen na množství a strukturu biomasy, zásoby uhlíku v nadzemní biomase, vlhkost aktivního povrchu, vlhkost půdy a podíl fotosyntetické aktivní složky vegetace. Dosažené výsledky z analýzy satelitních dat budou konfrontovány s výsledky z pozemních měření a budou statisticky vyhodnoceny. Součástí práce bude testování shody výsledků mezi různými přístupy k datům Sentinel (Sentinel Playground x SNAP x AGOL).

Student vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, do metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI. Povinnou přílohou práce bude poster formátu A2.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

V následující kapitole jsou stručně popsány metody, které jsou využívány pro dosažení cílů práce. Kromě metod jsou zde popsána i použitá data a software.

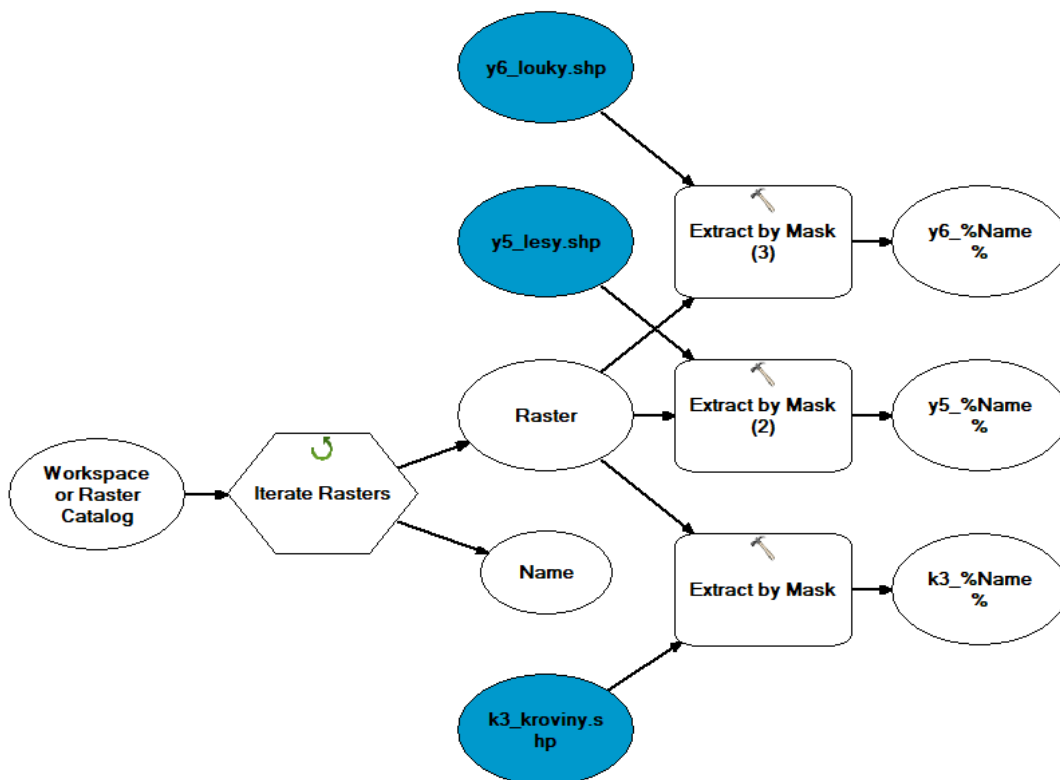
2.1 Použité metody

Bylo použito obecných metod využívajících se v oblasti DPZ, jako je mozaikování (*mosaicing*), prostorový ořez (*spatial subset*), extrakce spektrálních pásem (*spectral band extraction*), kombinace pásem (*band math*), ořez podle masky (*extract by mask*) a převzorkování (*resampling*).

V testovací a analytické části je kladen důraz na metody určování vegetačních indexů z družicových snímků. Pro určení C-faktoru bylo použito pět metod, které ve výpočtu používaly vegetační index NDVI. Podle rozhodovacích kritérií, kterými byly aproximace C-faktoru k tabulkové hodnotě v průběhu času a největší aproximace C-faktoru v hlavní vegetační sezóně, byla vybrána jedna metoda, podle které bude stanovena ekosystémová funkce (Ochrana půdy před vodní erozí). Určení biomasy a uhlíku vycházelo taktéž z pěti metod. Každá metoda používala ve svém výpočtu jiný vegetační index. Jako v předchozím případě je vybrána jedna metoda, která je pro testovací oblast nejvhodnější. Rozhodovacími faktory u biomasy a uhlíku jsou: Aproximace výsledku dané metody k hodnotě pozemního měření z výzkumné stanice Bílý Kříž a aproximace expertních hodnot pro plnění ekologických funkcí biotopů (Seják a kol., 2010) podle detailní kombinované vrstvy (DKV) (Cudlín a kol., 2020) – konkrétně pro biotopy K3 (vysoké mezofilní a xerofilní křoviny), Y5 (hospodářské lesy smíšené), Y6 (hospodářské louky), vyskytující se v povodí Dřevnice. Pro usnadnění práce byl vytvořen model v aplikaci *Model Builder*. Prací modelu bylo ořezat vytvořená rastrová data z každého měsíce podle tří typů biotopů (Obrázek 1).

Hodnoty FAPAR byly určeny pomocí čtyř metod. Tři metody vycházely z korelace k vegetačnímu indexu NDVI, poslední metoda pocházela z nástroje *Biophysical Processor* dostupného v aplikaci SNAP. Předzpracování radarových dat Sentinel-1 je složitější než v případě multispektrálních. Byl použit postup podle Filipponi (2019). Použité metody v postupu jsou aplikace souboru o orbitě (*Apply Orbit File*), kalibrace (*Calibration*), korekce podle terénu (*Range Doppler Terrain Correction*), konverze dat na jednotky decibelů (*Conversion to dB*).

Finální kvantifikace ekosystémových funkcí využívala GIS nástrojů jako reklasifikace rastru (*Reclassify*), výpočet zonální statistiky do tabulky (*Zonal Statistics as Table*) nebo výpočet statistických údajů (*Raster Calculator*).



Obrázek 1 Vytvořený model pro maskování podle vybraných biotopů

2.2 Použitá data

V diplomové práci byla použita volně dostupná data z programu Copernicus. Konkrétně se jedná o snímky z družic Sentinel-2 a Sentinel-1. Snímky z družic Sentinel-2 jsou multispektrální o rozlišení 10 až 60 metrů. Celkově každý snímek obsahuje 13 spektrálních pásem. Hlavní výhodou snímků družic Sentinel-2 je perioda snímání, dostupnost dat a použitelnost spektrálních pásem. Zájmovou oblastí použitou v diplomové práci je povodí Dřevnice, proto musela být data vybrána podle daného rozsahu. Jelikož se povodí rozprostírá na větší ploše, musely být staženy vždy dvě dlaždice (*granule*) za každý měsíc. *Granule* (TT33UYQ, TT33UXQ) byly staženy za časové období od března 2018 do prosince 2018. Data z družic Sentinel-1 byla stažena za stejné časové období. Jedná se o radarová data ze senzoru C-SAR. Pro práci byla použita data z IW módu, stupeň zpracování Level-1 GRD o rozlišení 5x20 metrů. Dalšími použitými daty byly vybrané biotopy podle DKV, obsahující data o uhlíku v nadzemní biomase, kterými byly:

- K3 (vysoké mezofilní a xerofilní křoviny),
- Y5 (hospodářské smíšené lesy),
- Y6 (hospodářské louky).

K finální kvantifikaci ekosystémových funkcí bylo nutno použít data, která by sloužila jako zóny pro vytyčení hodnot ekosystémů. Byla použita data Corine Land Cover 2018, což je databáze s klasifikací zemského povrchu. Poskytovatelem dat je Evropská agentura pro životní prostředí (EEA). Data spadají pod program Copernicus, který mimo jiné

zastřešuje projekt družic Sentinel. Jako další podpůrná data byla použita data Sentinel-3, která sloužila jako zkuška použitelnosti ke vztahu k datům Sentinel-2. Konkrétně se jednalo o level zpracování LST (*Land Surface Temperature*).

Posledními použitými daty byla data z pozemního měření výzkumné stanice Bílý Kříž. Data obsahovala informaci o nadzemní biomase smrkového porostu o stáří 36 let. Měření biomasy proběhlo 11. listopadu 2018. Data z pozemní stanice jsou poskytována výzkumným ústavem CzechGlobe.

2.3 Použité programy

SNAP

Stěžejním programem pro práci se satelitními snímky byl program SNAP vyvíjený evropskou kosmickou agenturou. Jedná se o specializovaný software pro práci s daty družic Sentinel. Obsahuje v rámci aplikační platformy také Sentinel-1 Toolbox, Sentinel-2 Toolbox, Sentinel-3 Toolbox a Radar-Sat, což jsou specializované balíky nástrojů pro jednotlivé družicové snímky. SNAP ovšem dokáže zpracovat a analyzovat i snímky, pocházející z jiných družic. V softwaru byla primárně řešena příprava dat na analýzy (mozaikování, ořez, převzorkování, extrakce vybraných pásem) a samotný výpočet vegetačních indexů pro multispektrální data z družice Sentinel-2. Data z družice Sentinel-1 jsou předzpracována a přepočítána na jednotky decibelů. V diplomové práci byla používána verze 6.0.0. Software je pod licencí GNU General Public Licence.

ArcGIS Desktop

Je balíkem od firmy Esri obsahující dvě desktopové aplikace ArcMap a ArcGIS Pro. Aplikace slouží především k tvorbě mapových výstupů. Kromě tvorby mapových výstupů byly využity pro ořez podle daného území a díky funkci *Raster Calculator* pro výpočet statistických údajů. Aplikace *Model Builder* byla zase využita pro automatizaci opakujících se procesů. Pro kvantifikaci ekosystémových funkcí podle určitých zón, byla použita funkce *Zonal Statistics as Table*. U softwaru ArcMap byla použita verze 10.6.1, která byla vydána v červnu 2018. U ArcGIS Pro verze 2.4 zveřejněna v červnu 2019. Software je komerčním produktem, pro práci v něm byl použit studentský účet KGI.

QGIS 3.0

Open Source software obsahující různé GIS nástroje, obdobně jako ArcGIS Desktop. Software byl využíván pro aplikaci *Low Pass Filter*, který se nachází v extenzi od softwaru SAGA GIS. Výhodou softwaru QGIS je i rychlé otevření NetCDF souborů. Verze použitého programu byla 3.10 A Coruña.

MS Word, Excel

Programy společnosti Microsoft, nacházející se v balíku MS Office 365. MS Word slouží především k tvorbě textové části diplomové práce, MS Excel pro vizualizaci statistických údajů ve formě grafů a tabulek.

Vectr

Volně dostupný program pro grafickou úpravu dat. Verze softwaru 0.1.16.

Draw.io

Volně dostupný online nástroj pro tvorbu diagramů. Pro práci byla použita verze 12.6.6.

2.4 Postup zpracování

Prvním krokem bylo určení, které satelitní snímky budou v rámci testování staženy. Použitý snímek musel splňovat kritéria, kterými byla minimální nebo žádná oblačnost a co nejpravdělnější odstup mezi snímky napříč časem. Stažení snímků proběhlo ze stránek Copernicus Open Acces Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>). Po stažení musela být data upravena do použitelné podoby pro manipulaci.

Nejprve bylo provedeno převzorkování (*resampling*) na rozlišení 20 metrů pro všechna pásma. Pro výpočty je nutné sjednocení a data Sentinel-2 jsou v rozlišeních 10, 20 a 60 metrů. Nicméně byla použita pouze pásma o rozlišeních 10 a 20 metrů, tudíž nebylo nutné převzorkovat na 60 metrů. Po převzorkování došlo k ořezání do menšího území (*spatial subset*). Jakmile byla data ořezána na rozsah menšího území, byly vypočteny charakteristiky LAI (Leaf Area Index) a FAPAR. Výpočet byl dosažen pomocí *Biophysical processor* ze softwaru SNAP. Poté byly snímky očištěny od oblačnosti pomocí maskování (Mask). Stupeň zpracování Level-2A již obsahuje předem vytvořené masky oblačnosti (*Cloud High Probability, Cloud Medium Probability, Cloud Thin Cirrus*). Masky byly používány podle potřeby, buď samostatně nebo kombinací, aby bylo dosaženo odmaskování maximálního množství oblaků. Teprve po maskování bylo provedeno mozaikování dvou rastrů do jednoho. Posledním krokem v softwaru SNAP byl výpočet vhodných algoritmů pro ekosystémové funkce. Tím bylo docíleno pomocí *Band Math*.

Následné zpracování již probíhalo v softwaru ArcGIS Desktop, kde byly výsledky algoritmů ořezány a testovány na území Dřevnice v biotopech K3, Y5 a Y6. K určení C-faktoru bylo vybráno pět algoritmů, které vycházely z dat Sentinel-2. Pro určení biomasy a uhlíku bylo testováno pět algoritmů z dat Sentinel-2 a jeden algoritmus, který kombinoval data Sentinel-1 a Sentinel-2. Data Sentinel-1 jsou složitější co se týče zpracování i velikosti a byly zpracovány a porovnány pouze v jednom měsíci, zdali dosahují korelace k pozemnímu měření. Zpracování radarových dat proběhlo v softwaru SNAP. Bylo docíleno odstranění termálního šumu, kalibrace, korekce podle terénu a poslední částí bylo převedení na jednotky decibelů. Fotosynteticky aktivní záření bylo testováno ze tří algoritmů vybraných podle rešerše a jedním algoritmem, který je součástí *Biophysical processor* v programu SNAP. Ze stejného procesoru byl vypočten i Leaf Area Index. Dalším kvantifikátorem byl WB (Wetness-Biomass index) podle Hesslerová a Pokorný (2010), který je kombinací NDVI indexu a wetness indexu transformovaného z Tasseled Cap (Index Database, 2019). Kvantifikátor vztahující se k vlhkosti byl NDWI (NDMI), což je index určující vlhkost aktivního povrchu. K určení půdní vlhkosti byla použita radarová data Sentinel-1. Konkrétně se jedná o produkt *Surface Soil Moisture*, který je vytvářen v rámci programu Copernicus Land Service v rozlišení jeden kilometr. Rozlišení snímků je značně zmenšeno, jelikož ve větších měřítcích je vlhkost ovlivněna drsností povrchu a vegetačním krytem.

U tří kvantifikátorů (C-faktor, biomasa a uhlík, FAPAR) proběhlo testování algoritmů. Testování probíhalo na třech typech biotopů v povodí Dřevnice. Účelem bylo zjistit použitelnost algoritmů pro data Sentinel a pro povodí Dřevnice. U biomasy bylo navíc provedeno srovnání s daty pozemního měření z Bílého Kříže v Beskydech. Podle konfrontace s daty pozemního měření byl vybrán nejlépe aproximující algoritmus pro každý kvantifikátor ekosystémové funkce.

Poslední fází práce byla kvantifikace ekosystémových funkcí, která vycházela z testovaných algoritmů. V této fázi byla použita data Corine Land Cover 2018, která sloužila jako zóny pro určení a hodnocení ekosystémových funkcí. Pro třídy CLC 2018 byla zpracována souhrnná tabulka, obsahující jednotlivé kvantifikátory.



Obrázek 2 Diagram postupu zpracování

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V následující kapitole jsou popsány technické informace družic Sentinel-1 a Sentinel-2 z programu Copernicus. Kromě celkové specifikace družic je dále popsán radarový senzor C-SAR (*Synthetic Aperture Radar*), který je umístěn na družici Sentinel-1, a multispektrální snímač MSI (*Multi Spectral Instrument*), který je naopak na družici Sentinel-2. Další část je zaměřena na snímky z družic Sentinel-1 a Sentinel-2. Rešerše se věnuje kromě jiného taky ekosystémovým funkcím a službám. Dále je popsána testovací část, ve které jsou vybrány kvantifikátory ekosystémových funkcí, které jsou zaměřené na množství nadzemní biomasy, množství uhlíku v nadzemní biomase, vlhkost aktivního povrchu, vlhkost půdy, podíl fotosynteticky aktivní složky vegetace a indexu listové plochy.

3.1 Copernicus

Copernicus je program Evropské Unie (EU) pro dálkový průzkum Země, který vznikl v roce 2012 přejmenováním dosavadního programu GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), který byl založen v roce 2001 v Göteborgu. Program je spravován Evropskou Komisí (EC) ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou (ESA), Evropskou agenturou pro životní prostředí (EEA) a členskými státy Evropské Unie (European Commission, 2019). Účelem programu je poskytování včasných a spolehlivých prostorových dat o životním prostředí. Poskytovaná data by měla pomoci k pochopení fungování ekosystému Země nebo sloužit jako podklad pro rozhodování a koordinování záchranných prací po přírodních i umělých katastrofách (Český kosmický portál, 2017). Způsoby získávání dat: In-situ (pozemní stanice, senzory na letadlech a lodích) a družice řady Sentinel. Mise z programu Sentinel se skládají z:

- Sentinel-1: Radarové snímání s vysokým rozlišením,
- Sentinel-2: Multispektrální snímání s vysokým rozlišením,
- Sentinel-3: Multispektrální snímání se středním rozlišením a získávání dat o nadmořské výšce,
- Sentinel-4: Sledování složení atmosféry z geostacionárních družic,
- Sentinel-5 a Sentinel-5P: Sledování složení atmosféry z družic s nízkou oběžnou dráhou,
- Sentinel-6: Vysoce přesné získávání dat o nadmořské výšce pomocí radarové altimetrie (Sentinel High Level Operation Plan, 2018).

3.1.1 Sentinel-1

Mise Sentinel-1 obsahuje dvě družice s polární oběžnou dráhou, které provádějí denní i noční radarové snímání pevniny a oceánů. Jelikož se jedná o radarové snímání je možné snímat nezávisle na stavu počasí. Cílem mise Sentinel-1 je především monitorování krajinného pokryvu a využití území, sledování vodních ploch a ledovců, mapování přírodních nebo antropogenních katastrof a podpora krizového řízení (Copernicus ČR, 2016).

První družice Sentinel-1A byla vypuštěna na oběžnou dráhu 3. dubna 2014. Druhá družice Sentinel-1B odstartovala 25. dubna 2016. Obě družice se nachází ve stejné orbitální rovině v úhlové vzdálenosti 180 °. Výška oběžné dráhy družic je 693 Km a perioda oběhu jedné družice je dvanáct dnů, zatímco obě družice dokážou opakovat snímání jednoho místa za šest dnů v oblasti rovníku. Životnost družic je sedm let, nicméně palivo by vystačilo na dvanáct let. Obě družice jsou vybaveny senzorem C-SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Ten snímá zemský povrch v pásmu C (5 404 MHz). Prostorové rozlišení snímače je 5 až 40 metrů v závislosti na vybraném módu snímání. Záběr senzoru je 20 až 400 kilometrů, který je opět závislý na módu. K dispozici jsou celkem čtyři režimy snímání (ESA: Sentinel Online, 2018).

Tabulka 1 Srovnání režimů snímání družic Sentinel-1

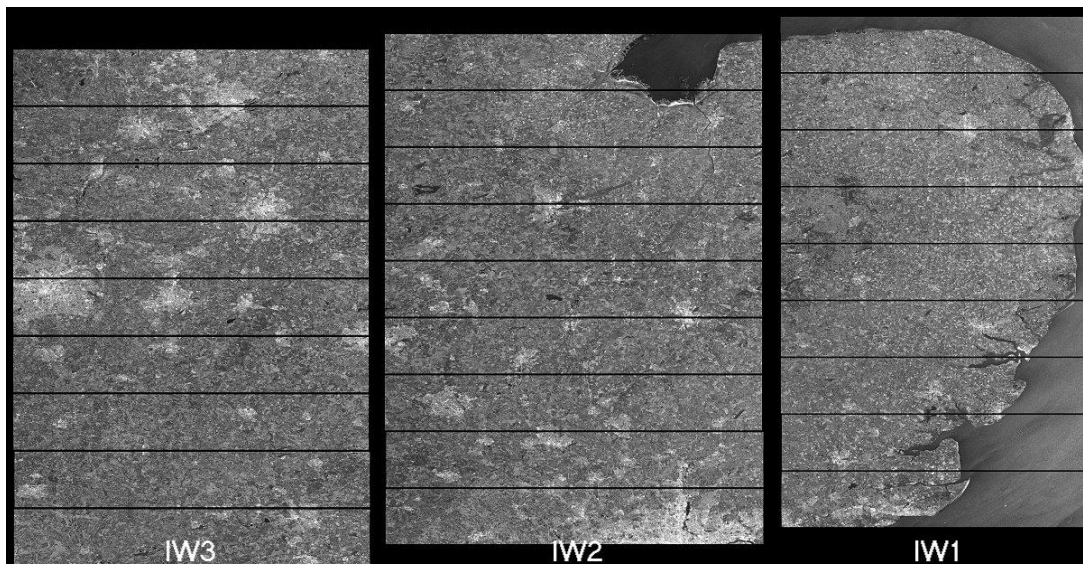
Režim	Způsob využití	Prostorové rozlišení	Šířka záběru
Strip Map Mode (SM)	V mimořádných případech pro podporu krizového řízení	5 x 5 m	80 km
Interferometric Wide Swath Mode (IW)	Hlavní režim pro snímání nad pevninou	5 x 20 m	250 km
Extra Wide Swath Mode (EW)	primárně pro monitoring oblastí severních oblastí (pevnin, moří a mořského zalednění)	20 x 40 m	400 km
Wave Mode (WV)	hlavní režim snímání nad otevřeným oceánem	5 x 5 m	20 km

Strip Map Mode (SM)

Režim se šířkou záběru 80 km a prostorovým rozlišením pět metrů. Snímání může probíhat pod šesti předdefinovanými úhly dopadu od 18,3 ° až po 46,8 °. Strip Map Mode je používán pro mapování malých ostrovů, a především pro podporu krizového řízení.

Interferometric Wide Swath Mode (IW)

Je režim, který snímá s velkou šířkou záběru 250 km a prostorovým rozlišením 5 x 20 m. Při snímání je používána technika TOPSAR (De Zan a Guarneri, 2006), která zvyšuje kvalitu obrazu tím, že snižuje efekt páskování a zajišťuje tak homogenní kvalitu snímku v celé šíři záběru. Snímkování probíhá ve třech páslech s malými překryvy, které jsou následně spojeny do výsledného produktu. IW režim je hlavním režimem snímání používaným nad pevninou.



Obrázek 3 Pásky snímání v režimu IW (zdroj:

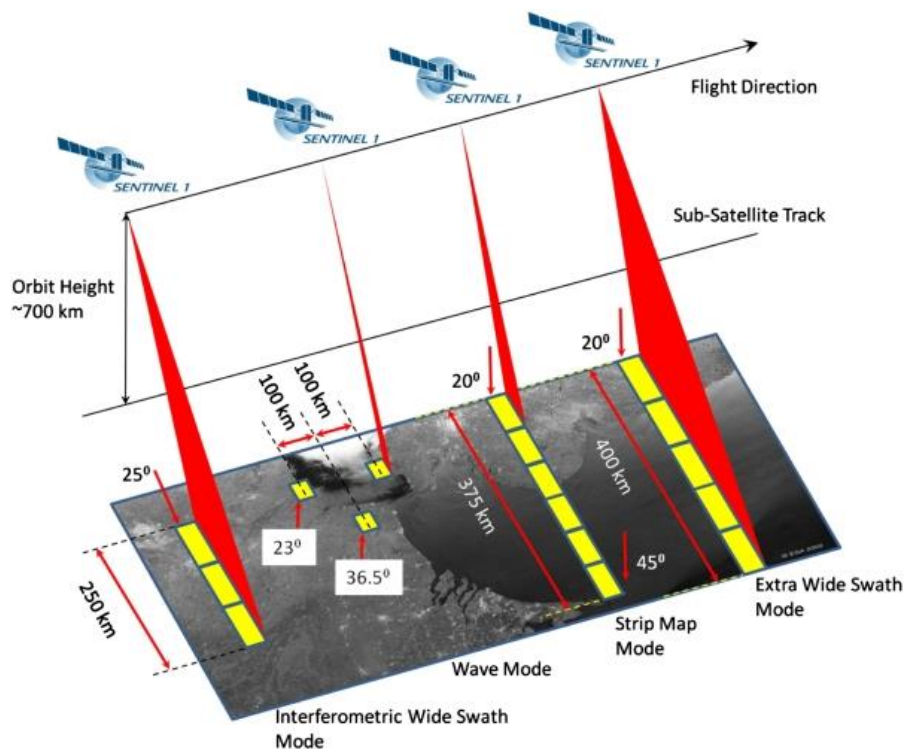
https://sentinel.esa.int/documents/247904/3380902/IW_SLC_Product.jpg)

Extra Wide Swath Mode (EW)

Stejně jako IW i EW využívá technologii TOPSAR, kterou aplikuje na daleko širší území než u režimu IW. Další změnou je používání pěti pásem snímání. Šířka záběru je 400 km a prostorové rozlišení 20 x 40 m. Režim je určen hlavně pro monitoring severovýchodních oblastí (pevnin, moří a mořského ledu), dále se využívá pro detekci ropných skvrn a zajištění bezpečnosti těchto oblastí.

Wave Mode (WV)

Jedná se o režim, snímající primárně nad otevřeným mořem. Skládá se z několika jednotlivých snímků o velikosti 20 x 20 km, prostorové rozlišení snímků je 5 x 5 m. Snímky jsou pořizovány každých 100 km ve dvou střídajících se úhlech dopadu. Jako jediný režim podporuje pouze jednoduchou polarizaci.



Obrázek 4 Režimy snímání družic Sentinel-1 (zdroj:

https://sentinel.esa.int/image/image_gallery?uuid=6ecdcd45-81d4-49f9-a34a-3f37fc2b0571&groupId=247904&t=1355159219434)

C-SAR umožňuje jednoduchou (HH nebo VV) i duální polarizaci (HH+HV, VV+VH). HH nebo VV znamená, že při vyslání horizontálního nebo vertikálního pulzu dokáže zaznamenat pouze odraz se stejnou polarizací. Pokud radar umožňuje i duální polarizaci, tak anténa dokáže vysílat i přijímat série pulzů v horizontální i vertikální polarizaci. SM, IW a EW módy podporují jak jednoduchou, tak i duální polarizaci, zatímco WV pouze jednoduchou polarizaci.

Data z družice Sentinel-1 jsou volně dostupná a distribuována ve formátu SAFE (*Standard Archive Format for Europe*) v různých úrovních zpracování:

- Level-0 (L0)
- Level-1 (L1)
- Level-2 (L2)

LEVEL-0

Data L0 jsou složena z komprimovaných surových dat a slouží jako základ pro zpracování a vytvoření dat vyšších úrovní. Data jsou komprimována metodou FDBAQ (*Flexible Dynamic Adaptive Quantisation*) a pro další použití musí být dekomprimována a zpracována. Obsahují šum, vnitřní kalibraci a informaci o poloze na oběžné dráze při pořízení snímku. Tahle úroveň je dostupná pouze pro režimy SM, IW a SW. Data L0 jsou archivována a mohou být použita pro vytvoření dat vyšších úrovní ještě 25 let po ukončení činnosti kosmického segmentu.

LEVEL-1

L1 je nejčastěji využívaná úroveň zpracování dat. Z L0 do L1 jsou data transformována kalibrací a použitím dalších algoritmů. Poté vznikají dvě varianty:

- Level-1 Single Look Complex (SLC): Georeferencovaná data s využitím informací o výšce a poloze na oběžné dráze, která zachovává informaci o fázi snímku. Produkty SLC jsou v tzv. „zero-Doppler“ orientaci, kde každý řádek pixelů reprezentuje body podél linie kolmé na přeletovou dráhu družice.
- Level-1 Ground Range Detected (GRD): Data zpracována pomocí multilookingu (vícenásobné snímání jednoho místa) a georeferencována pomocí referenčního zemského elipsoidu. Nezachovává se informace o fázi a dochází k redukci šumu (speckle) výměnou za nižší geometrické rozlišení. Oproti korekcím použitých na úrovni Level-1 SLC produktů mají GRD produkty odstraněny termální šum, což zlepšuje celkovou kvalitu snímku. Existují tři kategorie rozlišení produktu GRD:
 - Full Resolution (FR) je dostupný pro režim SM.
 - High Resolution (HR) je dosažitelný pro režim SM, IW, EW.
 - Medium Resolution (MR) lze najít u režimů IW, EW a WV.

LEVEL-2

Úroveň L2 se skládá z konkrétních geolokalizovaných geofyzikálních produktů získaných z úrovně L1. Produkty L2 Ocean (OCN) využívané v oblasti sledování větru, vln a mořských proudů mohou obsahovat následující geofyzikální komponenty získané z radarových dat:

- Ocean Wind field (OWI)
- Ocean Swell spectra (OSW)
- Surface Radial Velocity (RVL)

3.1.2 Sentinel-2

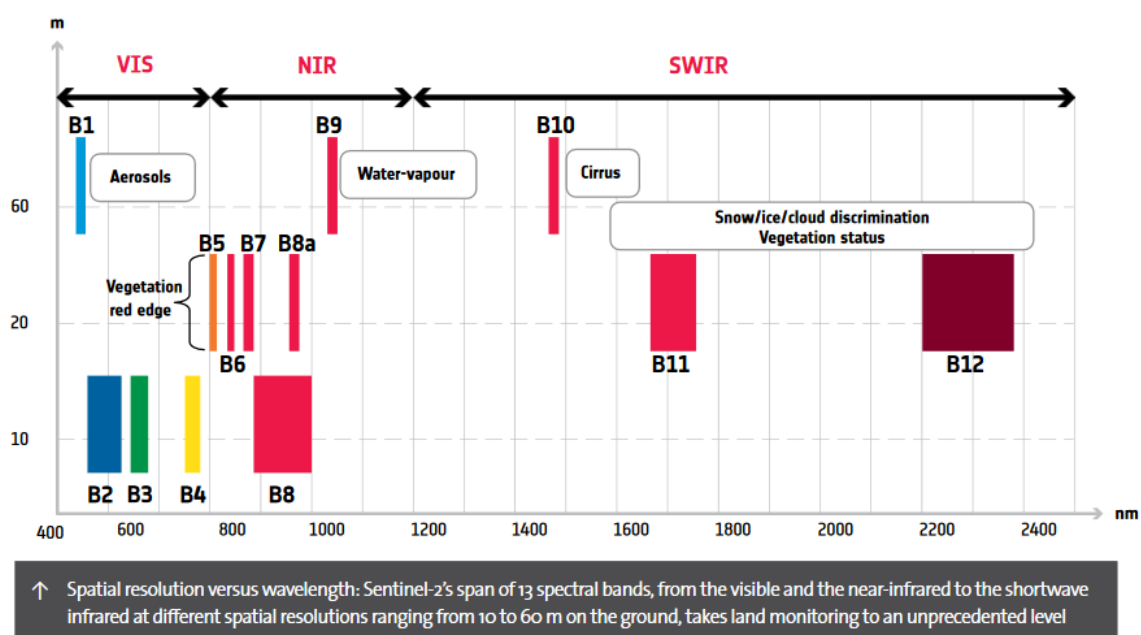
Stejně jako Sentinel-1 i mise Sentinel-2 obsahuje dvě družice s polární oběžnou dráhou s posunem 180 °. Hlavním rozdílem je ale odlišný typ snímače, který je osazen na družicích Sentinel-2. Tím je multispektrální snímač MSI. První družice Sentinel-2A byla vyslána na oběžnou dráhu 23. června 2015, druhá družice Sentinel-2B poté 7. března 2017. Časová perioda oběhu jedné družice je deset dnů, dvou družic pět dnů v oblasti rovníku. Sentinel-2 provádí snímání nad pevninou a pobřežními oblastmi od 56 ° jižní šířky po 84 ° severní šířky. Snímání nad oceánem zahrnuje ostrovy s rozlohou větší než 100 km², ostrovy Evropské unie, všechny ostrovy do 20 km od pobřeží, celou oblast Středozemního moře a všechny uzavřené vnitrozemské vodní plochy (ESA, 2019).

Družice Sentinel-2 jsou určeny především pro monitoring vegetace, půdy, vody, pozorování řek a pobřežních oblastí. Celkově dokáže senzor snímat třináct spektrálních pásem v různých prostorových rozlišeních. Tento snímač jako první dokáže snímat tři pásma v červeném okraji viditelného spektra a jeho data jsou tak svými parametry ideální také pro monitorování vegetace, a to se zaměřením na klasifikaci lesních porostů, mapování obsahu chlorofylu v listech, sledování zdravotního stavu vegetace, tvorbu vegetačních indexů nebo zjišťování vodního stresu. Využití dat těchto družic je také

předpokládáno zejména v oblasti podpory krizového řízení (monitoring lesních požárů, dlouhodobého sucha), v zemědělství a mnoho dalších oborech. Radiometrické rozlišení se většinou pohybuje v rozsahu 8 až 16 bitů. U senzoru MSI je to 12 bitů, což umožňuje zachytit a odlišit až 4095 hodnot intenzity světla.

Prostorové rozlišení dat družic Sentinel-2 se odvíjí podle 13 spektrálních pásem:

- Prostorové rozlišení 10 metrů mají čtyři spektrální pásma: Band 2 (490 nm), Band 3 (560 nm), Band 4 (665 nm), Band 8 (842 nm).
- Prostorové rozlišení 20 metrů je dostupné u šesti spektrálních pásem: Band 5 (705 nm), Band 6 (740 nm), Band 7 (783 nm), Band 8a (865 nm), Band 11 (1610 nm), Band 12 (2190 nm).
- Prostorové rozlišení 60 metrů poté mají tři spektrální pásma: Band 1 (443 nm), Band 9 (945 nm) a Band 10 (1375 nm) (ESA, 2019).



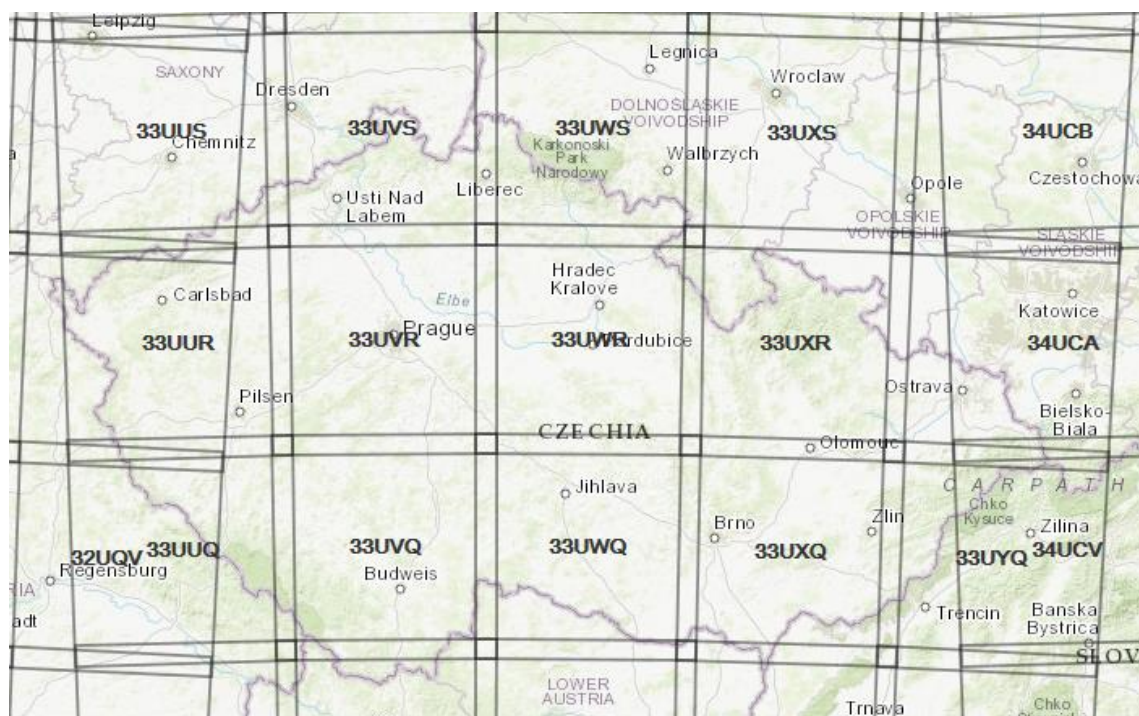
Obrázek 5 Vlnové délky spektrálních pásem družic Sentinel-2 (zdroj: http://www.geosage.com/highview/figures/Sentinel2_Spectral_Bands.jpg)

ÚROVNĚ ZPRACOVÁNÍ DAT

Data družic Sentinel-2 jsou dostupná ve třech úrovních (1B, 1C a 2A). Úrovně Level-0 a Level-1A nejsou dostupné pro běžného uživatele. Snímky jsou poskytovány ve formě dlaždic (*granule*). Základním rozdílem mezi jednotlivými úrovní zpracování je velikost dlaždice a použití atmosférických korekcí. Úroveň Level-1B obsahuje atmosférické korekce *Top-of-atmosphere radiance*, což je celkové vyzářování objektů, které dopadá na plochu senzoru. Oproti vyšším úrovním má velikost dlaždice 25 x 23 km. Level-1C má velikost dlaždice 100 x 100 km a obsahuje korekce *Top-of-atmosphere reflektance*. Reflektance je podíl mezi množstvím odraženého elektromagnetického záření a množstvím dopadajícího elektromagnetického záření na povrch. V této úrovni jsou data ortorektifikována do projekce UTM/WGS84. Nejvýše zpracovaným produktem je Level-2A, který obsahuje atmosférické korekce *Bottom-of-atmosphere reflektance*.

Tabulka 2 Přehled úrovní zpracování dat Sentinel-2

Úroveň zpracování dat	Popis	Přibližná velikost
Level-0	Nedostupná pro běžného uživatele, Komprimovaná surová data, velikost dlaždice je 25 x 23 km	
Level-1A	Opět nedostupná pro běžného uživatele, Dekomprimace surových dat, velikost dlaždice je 25 x 23 km	
Level-1B	Nejnižší zpracovaný dostupný produkt, obsahuje atmosferické korekce (<i>Top-of-atmosphere</i>) a korekci geometrii senzoru, velikost snímku 25 x 23 km	27 MB
Level-1C	Ortorektifikované snímky v projekci UTM/WGS 84, velikost dlaždic 100 km ² .	500 MB
Level-2A	Stejné parametry jako Level-1C, navíc obsahuje atmosferické korekce (<i>Bottom-of-atmosphere</i>)	600 MB



Obrázek 6 Klad dlaždic Sentinel-2 úrovně Level-1C/Level-2A (zdroj: vlastní zpracování, ArcGIS Desktop)

Tabulka 3 Základní informace o družicích Sentinel

Družice	Sentinel-1	Sentinel-2
výška družice	693 Km	786 Km
inklinace	98,18 °	98,5 °
perioda oběhu	12 dnů (6 dnů se dvěma satelity)	10 dnů (5 dnů se dvěma satelity)
Senzor	C-SAR	MSI
typ dat	radarová, jednofrekvenční	optická, multispektrální
počet frekvenčních/ spektrálních pásem	1	13
prostorové rozlišení	5 až 40 m (v závislosti na módu snímání)	10 až 60 m (v závislosti na spektrálním pásmu)
záběr senzoru	20 až 400 Km	290 Km
úhel pohledu	20 až 45 °	20,6 °

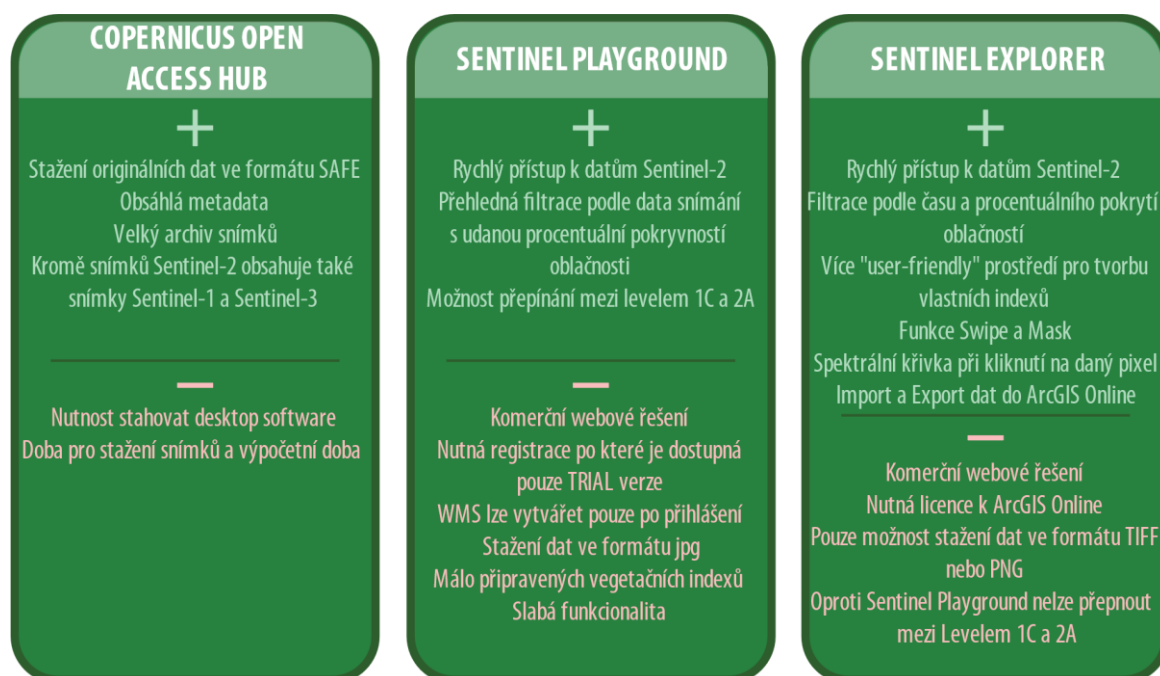
3.1.3 Přístupy k datům Sentinel

K datům Sentinel-1 a Sentinel-2 lze přistupovat z více různých zdrojů. Data jsou volně dostupná a stažitelná z oficiálních stránek Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>). Ke stahování příslušných snímků je nutná registrace. Na portálu jsou dostupná data z družic Sentinel-1, Sentinel-2 a Sentinel-3. Funkcionalita portálu umožňuje snímky filtrovat podle různých kritérií. U družic Sentinel-1 je to zejména typ produktu, mód snímání, polarizace nebo určená družice. U družic Sentinel-2 je to level zpracování obrazu, určená družice nebo pokryvnost území oblačností. Obecně pro všechny snímky lze filtrovat podle data pořízení snímku. Již při náhledu jsou dostupná omezená metadata, která popisují daný produkt. Dalším portálem, na kterém lze stahovat data je: <https://dhr1.cesnet.cz>. Jedná se o stejný portál jako Copernicus Open Access Hub s rozdílem, že data se dají stahovat pouze za území ČR. I uživatelské rozhraní je stejné. Výhodou stahování snímků z otevřeného portálu je možnost editace a další možnosti zpracování snímku. Ze staženými snímky lze poté manipulovat v desktop aplikaci SNAP. Oproti webovým řešením je aplikace nabitá funkcemi, nicméně pokud uživatel potřebuje jednorázově náhled na snímky, je lepším řešením webová aplikace.

Další možností pro přístup k datům Sentinel-2 je pomocí Sentinel-hub Playground (<https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground>). Kromě snímků z družic Sentinel obsahuje portál i snímky z družice Landsat 8. Jedná se o aplikaci, kde lze vybrat snímek ze dne, kdy probíhalo snímání. Výhodou je rychlost načtení dat, kde se k datům dá rychle přistupovat a nemusí být stahována. Další výhodou je nepovinná registrace. Bez registrace lze provádět základní manipulaci se snímky. Nevýhodou je, že s daty lze pracovat pouze jako s náhledem a nelze na nich provádět analýzy, kromě pár předpřipravených vegetačních indexů. Snímek lze stáhnout jako obrázek ve formátu JPG nebo ho lze umístit jako WMS na vlastní webovou stránku. Playground dokáže připravit a vygenerovat HTML kód s WMS právě aktivního snímku ve třech mapových knihovnách (Leaflet, OpenLayers, Google Maps API). Celá aplikace je ale komerčním řešením a pro

pokročilejší zpracování je potřeba registrace a splnění licenčních podmínek ve formě poplatku za používání aplikace. Po registraci je dostupná TRIAL verze, ve které lze nakonfigurovat vlastní snímek kombinací spektrálních pásem, který lze poté šířit jako WMS.

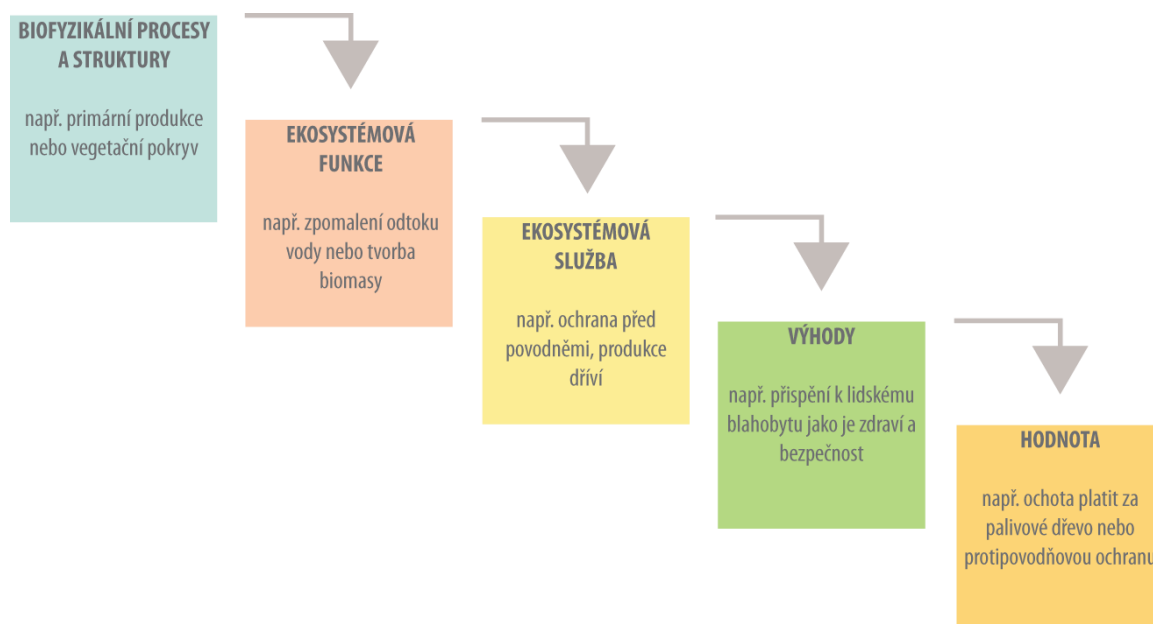
Posledním porovnávaným přístupem je webová prohlížečka Sentinel Explorer od společnosti Esri (<http://sentinel2explorer.esri.com/>). Stejně jako v případě Sentinel Playground je i Sentinel Explorer komerčním řešením, a proto je nutné mít licenci pro ArcGIS Online. Opět je předpřipraveno několik vegetačních a vlhkostních indexů. Lze si vytvořit vlastní index kombinací spektrálních pásem. Dále poskytuje prohlížečka užitečné funkce jako porovnání dvou snímků (funkce *Swipe*) nebo maskování různých ploch. Nástrojem *Identify* lze po kliknutí do snímku zjistit spektrální křivku daného pixelu. Do prohlížečky se dají přidávat data z ArcGIS Online a na druhou stranu se dají data exportovat do ArcGIS Online. V neposlední řadě je možno i snímky stahovat, a to ve formátu TIFF. Prohlížečka obsahuje také tutoriál k jednotlivým funkcím.



Obrázek 7 Srovnání jednotlivých přístupů k datům

3.2 Ekosystémová služba a funkce

Existence živých organismů má základ v biosféře, proto i člověk je závislý na službách, které mu poskytuje ekosystém (Daily, 1997). Životní podmínky všech organismů závisí na tom, jak fungují ekosystémy. Ekosystémy poskytují člověku jak materiální, tak nemateriální věci. Závislost mezi produkcí ekosystémových služeb a zboží v konfrontaci s lidským blahobytem je znázorněna na ekosystémové kaskádě (Haines-Young a Potschin, 2010).



Obrázek 8 Vztah mezi biodiverzitou, ekosystémovými funkcemi, službami a blahobytem lidí (upraveno podle Haines-Young a Potschin, 2010)

Pojem ekosystémová služba je definována jako přínos plynoucí z ekosystému pro lidstvo, který má následně vliv i na samotnou životní úroveň lidí (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ekosystémovou službou se stává ekosystémová funkce až tehdy, pokud ji člověk začne považovat za užitečnou a plynou mu z ní hmotné (zboží) nebo nehmotné (služby) výhody. Podle Millennium Ecosystem Assessment (2005) jsou vymezeny čtyři kategorie ekosystémových služeb:

- Zásobovací služby (materiály a produkty získané ze struktury a funkce ekosystému),
- Regulační služby (regulace přírodních podmínek strukturou a funkcí ekosystému),
- Kulturní služby (přínosy ekosystému, které vedou k nemateriálnímu užítku),
- Podpůrné služby.

Zásobovací služby zahrnují obvykle hmotné či produkční aspekty životního prostředí. Lze mezi ně zařadit produkci potravy, sladkou vodu pro spotřebu, stavební materiály nebo palivo. Regulační služby zahrnují procesy, které vedou k přímému užítku pro lidskou společnost. Může jimi být kvalita vzduchu, kvalita vody, orná půda, ochrana před živelními pohromami a další. Co se týče kulturních služeb, jedná se o nemateriální užítky jako výskyt unikátních druhů zvířat, kulturní rozmanitost krajiny, estetické hodnoty, náboženské hodnoty a jiné. Podpůrné služby obsahují aspekty fungování ekosystémů nezbytné pro udržení života.

Další snahou pro identifikaci a rozdělení ekosystémových funkcí je *The Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES), který zaštiťuje EEA. Cílem bylo vytvoření jednotné klasifikace, která byla založena na klasifikaci Millennium Ecosystem Assessment (2005). V roce 2013 byla vydána verze 4.3, nyní je k dispozici verze 5.1, která vznikla v roce 2016. Klasifikace obsahuje 90 ekosystémových služeb rozdělených do tří kategorií (zásobovací služby, regulační a údržbové služby, kulturní služby).

Ekosystémové funkce jsou interakce mezi složkami ekosystémů nebo napříč ekosystémy. De Groot a kol. (2002) rozdělil ekosystémové funkce do čtyř základních kategorií a vymezil 23 ekosystémových funkcí. Vycházel z práce (Costanza a kol., 1997), kde bylo použito 19 základních ekosystémových funkcí.

Výsledné kategorie dle De Groot a kol. (2002):

- Regulační funkce: Skupina funkcí, která zahrnuje základní ekologické procesy a systémy pro podporu živých organismů prostřednictvím biochemických cyklů. Kromě udržování zdraví ekosystémů, poskytují regulační funkce mnoho služeb, které mají přímý nebo nepřímý dopad na člověka.
- Stanovištní funkce: Skupina funkcí poskytující útočiště a reprodukční stanoviště rostlinám a živočichům. Dále přispívají k zachování biologické rozmanitosti.
- Zásobovací funkce: Poskytování přírodních zdrojů. Tato široká rozmanitost poskytuje mnoho věcí pro lidskou spotřebu, od potravin až po zdroje energie a genetický materiál.
- Informační funkce: Poskytování příležitostí k naplnění života, udržování lidského zdraví, rekreaci nebo duchovnímu obohacení.

Ačkoli pořadí kategorií funkcí je poněkud libovolné, je v jejich uspořádání určitá logika. První dvě skupiny funkcí jsou nezbytné pro udržování přírodních procesů, podmiňují tak dostupnost dalších dvou skupin.

Regulační funkce

Přírodní ekosystémy hrají zásadní roli v regulaci a udržování ekologických procesů a systémů pro podporu života na Zemi. Mezi nejdůležitější procesy patří přeměna sluneční energie na biomasu (primární produktivita), skladování a přenos minerálů a energie v potravinovém řetězci (sekundární produktivita), mineralizace organických látek v půdě a sedimentech. Všechny zmíněné procesy jsou regulovány souhrou abiotických faktorů se živými organismy. Příkladem regulačních funkcí je regulace vzduchu (rovnováha oxidu uhličitého a kyslíku, tloušťka ozonové vrstvy), regulace klimatu (vliv krajinného pokryvu na klima), prevence katastrof (prevence před povodní lesy nebo mokřady), regulace vody (úloha krajinného pokryvu při odtoku vody), zásoby vody, retence půdy nebo třeba opylení rostlin.

Stanovištní funkce

Hlavním úkolem stanovištních funkcí je udržování zdravých stanovišť výskytu pro rostliny a živočichy. Příkladem této skupiny funkcí je funkce útočiště, která zaručuje vhodný prostor k obývání živočichy nebo rostlinami nebo *Nursery function*, zaručující vhodné stanoviště pro reprodukci.

Zásobovací funkce

Přírodní ekosystémy poskytují mnoho zdrojů od vody, potravin, léčiv až po zdroje energie a materiálů. Je důležité rozlišovat mezi biotickými zdroji (žijícími rostlinami a živočichy) a abiotickými zdroji (zejména povrchové minerály). Hlavním rozdílem mezi těmihle zdroji je jejich obnovitelnost. Biotické zdroje jsou obnovitelné, zatímco většina abiotických zdrojů není. Příkladem zásobovacích funkcí je jídlo, suroviny, genetické zdroje nebo zdroje léčiv.

Informační funkce

Přírodní ekosystémy poskytují téměř neomezené příležitosti pro duchovní obohacení, duševní vývoj a volný čas. Příroda je proto důležitým zdrojem inspirace pro vědu, kulturu a umění. Podle Forster (1973) poskytuje přírodní prostředí inspirativní a vzdělávací formu kreativních zkušeností s příležitostmi k zamyšlení, duchovnímu obohacení nebo duševnímu vývoji. Mezi tyto informační funkce patří estetické informace (atraktivita krajiny), rekreace, kulturní a umělecké informace, duchovní a historické informace a věda a vzdělávání.

3.3 Kvantifikace ekosystémových funkcí z dat DPZ

Družice produkují aktuální snímky zemského povrchu a lze je využít pro pozorování změny prvku nebo jevu v krajině v čase. Předpokladem pro naplnění kritérií je nulová oblačnost. V konfrontaci s metodami destruktivními tak lze jednoduše, efektivně a rychle získat přehled o změně v krajině na větším území. Díky způsobům získávání dat o biomase, uhlíku, struktuře biomasy či vlhkostních indexech, je možné kvantifikovat různé ekosystémové funkce, které jsou závislé na daných proměnných. Například výpočet biomasy a uhlíku může sloužit k určení ekosystémové funkce skladování a sekvestrace uhlíku, výpočet C-faktoru jako ekosystémová funkce k zabránění vodní nebo pluvialní (kapkové) eroze. Ve studii Pettorelli a kol. (2018) je sestaven seznam volně dostupných globálních družicových dat, které mají potenciál pro monitoring či určení ekosystémových funkcí. Sentinel-2 je podle studie vhodný pro určení NDVI, LAI, FAPAR či Land Cover.

Data DPZ byla ve spojení s ekosystémovými funkcemi využita v mnoha studiích. Barrette a kol. (2000) využil satelitní data ke klasifikaci mokřadů, Richardson a Harris (1995) zase k dokumentaci změn mokřadů v čase. Hodně rozšířený index ve vztahu k ekosystémovým funkcím je NDVI. Ten byl použit pro odhad čisté primární produkce (Box a kol., 1989), monitorování desertifikace (Tucker a kol., 1991). Změna hodnoty indexu NDVI přímo reaguje na změnu v hustotě listové biomasy, a proto bylo za pomoci NDVI sledován zdravotní stav vegetace (Lukeš a kol., 2017). Alcaraz a kol. (2006) vymezoval pomocí NDVI funkční typy ekosystémů na Pyrenejském poloostrově.

Ohledně problematiky kvantifikace ekosystémových funkcí se v česky odborně psané literatuře zabývají hlavně tři studie (Vyskot a kol., 2003; Seják a Dejmal, 2003; Seják a kol., 2010). Vyskot a kol. (2003) určuje funkční potenciál lesa pro jednotlivé složky ekosystémových funkcí. Kvantifikátory funkcí jsou rozděleny podle kritéria na funkční stupně. Funkční stupně hodnotí, potenciál funkčnosti ekosystému od nevhodného po mimořádný. Nicméně nepoužívá kvantifikátory vytvořené dálkovým průzkumem Země. Seják a kol. (2003) používá ve své práci podobný přístup. Ve studii Seják a Dejmal (2003) bylo provedeno hodnocení a oceňování biotopů na území ČR. Hodnoty pro každý kvantifikátor jsou sečteny do základní bodové hodnoty biotopů. Finální hodnota biotopu je poté interpretována v procentech z maximálně dosažitelné základní hodnoty biotopů. V práci je zmíněno, že satelitní data určují pouze hrubý odhad hodnoty daného biotopu. Studie Seják a kol. (2010) Kromě pozemního měření využívá i satelitních dat, jmenovitě Landsat 5 TM. Pomocí satelitních dat je určeno hodnocení disipační schopnosti krajiny (Hesslerová a Pokorný, 2010). Ve výsledku jsou pro třídy CLC určeny základní hodnoty funkcí ekosystémů.

3.3.1 Biomasa

Obecně biomasa se skládá z nadzemní biomasy (*above ground biomass*) a podzemní biomasy (*bellow-ground living biomass*). Do nadzemní biomasy lze zařadit stromy nebo keře. Do podzemní biomasy patří kořeny a odumřelá biomasa nacházející se v půdě. Biomasa je často definována při suché hmotnosti a udává se jako podíl hmotnosti k jednotce plochy ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$). Biomasa řídí potenciální emise uhlíku, které mohou být vypuštěny do atmosféry kvůli odlesňování a regionálním změnám v biomase (Liang a kol., 2012).

Alokační metody

Tradiční technika založená na pozemním měření zahrnující destruktivní metody vzorkování a nedestruktivní metody. Destruktivní vzorkování velkého množství dominantních druhů stromů na každém místě může být velmi únavné, a ne vždy praktické. Alokační metoda se ovšem prakticky používá velmi často. Základním principem alometrických rovnic je to, že v mnoha organismech je rychlost růstu jedné části organismu úměrná druhé části. Například průměr kmene stromu vysoce koreluje s hmotností kmene. Komiyama a kol. (2008) zkoumali reprezentativní alokační rovnice pro mangrovové lesy. Z práce vyšlo najevo, že alometrické vztahy často ukazují závislost na místě nebo na druhu.

Pasivní metody dálkového průzkumu

Dostatečný počet terénních měření je předpokladem pro vývoj modelů pro odhad nadzemní biomasy (AGB) a pro vyhodnocení výsledků odhadu AGB. V mnoha studiích bylo vyvinuto mnoho regresních modelů pro odhad nadzemní biomasy. Ačkoli jsou tyto modely přesné na úrovni stromů, pozemků a porostů, jsou omezeny, pokud uvažujeme o analýze prostorového rozlišení nadzemní biomasy napříč krajinou. Tyto přístupy jsou však časově náročné, náročné na pracovní sílu a obtížně proveditelné, zejména v odlehlých a špatně dostupných oblastech. Aby bylo možné škálovat nadzemní biomasu v regionální úrovni, je nutné odhady spojit s daty dálkového průzkumu.

Data dálkového průzkumu jsou důležitým zdrojem pro odhad množství biomasy. Mnoho studií prokázalo, že spektrální odrazivost u povrchu korelovala s biomasou. Například Muukkonen a Heiskanen (2005) zjistili, že spektrální odrazivost pásma 1 (green) u *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) vykázala největší korelaci s objemem porostu stromů, větví a veškeré nadzemní biomasy lesní vegetace (Korelační koeficient se pohyboval od -0,69 do -0,67. Pásmo 3 (NIR) ukázalo největší korelaci s biomasou stonků a pařezů (-0,68) a s biomasou podrostové vegetace (-0,36).

Pro určení odhadu biomasy je dostupná řada datových sad. Pro kvantifikaci biomasy na místní až regionální úrovni je zapotřebí dat s alespoň průměrným prostorovým rozlišením, jako je Landsat TM (Fazakas a kol., 1999; Turner a kol., 2004) a ASTER (Muukkonen a Heiskanen, 2005). Při mapování v kontinentálním nebo globálním měřítku stačí nižší rozlišení jako *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) (Dong a kol., 2003) a *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (Baccini a kol., 2004).

Další metodou k určení odhadu biomasy je také použití vegetačních indexů. Obecně mohou částečně vegetační indexy snížit dopady stavu prostředí a stíny na odrazivosti. Například Dong a kol. (2003) vymezil vztah pro výpočet biomasy z dat AVHRR s použitím vegetačního indexu NDVI:

$$B = \frac{1}{\alpha + \beta \left[\frac{1}{NDVI\varphi^2} + \gamma\varphi \right]} \quad (1)$$

Kde B je biomasa α , β , γ , φ jsou koeficienty. Stanovení biomasy pomocí vegetačních indexů s daty dálkového průzkumu se zdá být velmi dobrým a rychlým řešením. Avšak i tahle metoda má své úskalí. Foody a kol. (2001) identifikovali čtyři problémy s použitím vegetačních indexů jako je například NDVI:

1. Vztah mezi vegetačním indexem a biomasou je asymptotický, což může omezit schopnost přesně reprezentovat vegetaci s velkou biomasou. NDVI poskytuje horší odhady, kde je 100% vegetační pokryv, a proto má omezenou hodnotu při posuzování biomasy během vrcholu sezóny.
2. Je nezbytné, aby družicová data byla přesně kalibrována, obvykle na radianci.
3. Citlivost vegetačních indexů na biomasu se v různých prostředích liší.
4. Většina vegetačních indexů využívá pouze dvě spektrální pásma, ačkoli senzor snímá ve více pásmech.

Alternativou k vegetačním indexům je použití vícenásobné regresní analýzy. Ta může využívat všechna dostupná spektrální data, což snižuje potřebu výběru podmnožiny vlnových pásem a může poskytnout přesnější odhad biofyzikálních proměnných než vegetační indexy. Na druhou stranu je daleko pracnější a časově náročnější.

REIP (*Red-Edge Inflection Point*) je algoritmus, který byl vyvinut pro aplikace měření biomasy a absorpci dusíku v heterogenních polích (Baret a kol., 1988). „Red edge“ neboli červená hrana je brána jako inflexní bod mezi silnou absorpcí červeného záření k odrazivosti v infračervené části spektra. Odrazivost kolem červené hrany je citlivá na širokou škálu obsahu chlorofylu v plodinách, obsahu dusíku, LAI a biomasy (Hatfield a kol., 2008). Obecný vzorec používá čtyři vlnová pásma (670, 700, 740 a 780 nm). Pro data z družice Sentinel-2 se jedná o vzorec:

$$REIP = 700 + 400 \times \left(\frac{B4 + B5}{\frac{2 - B5}{B6 - B5}} \right) \quad (2)$$

Zheng a kol. (2004) Vytvořili vztah pro výpočet biomasy pomocí indexu MSAVI (*Modified soil-adjusted vegetation*) a družicových dat Landsat 7. Jednalo se o kombinaci jehličnatých i listnatých porostů, pro které platil následující vztah:

$$AGB = 48,8 \times \frac{NIR}{RED} + 2,3 \times Age - 454 \times MSAVI - 38 \quad (3)$$

Kde AGB je nadzemní biomasa, NIR = blízké infračervené spektrální pásmo (B8 u Sentinel-2), RED = viditelné červené spektrální pásmo (B4 u Sentinel-2) a Age = stáří porostu. Výpočet pro index MSAVI (Qi a kol., 1994) je následující:

$$MSAVI = \frac{(NIR - RED)(1 + L)}{NIR + RED + L} \quad (4)$$

Kde L je faktor úpravy půdy, NIR a RED stejné jako v případě vztahu pro výpočet nadzemní biomasy.

Jelikož se tahle práce zabývá určením ekosystémových proměnných z dat Sentinel-2 v mírném podnebném pásmu, bylo nutné nalézt práce, které byly testovány v podobných podnebných podmínkách nebo již k výpočtu používaly data Sentinel-2. Snímky Sentinel-2 používal ve své studii (Askar a kol., 2018), nicméně zájmová oblast studie byly soukromé lesy v Indonésii, což je tropický podnebný pás. Vztah pro výpočet nadzemní biomasy (AGB) vychází ze dvou vegetačních indexů (EVI, NDI45):

$$AGB = 537 \times NDI45 + 158,42 \times EVI - 353,66 \quad (5)$$

Kde NDI45 (Delegido a kol., 2011) a EVI (Liu a Huete, 1995):

$$EVI = G \times \frac{(B8 - B4)}{(B8 + C1 \times B4 - C2 \times B2 + L)} \quad (6)$$

$$NDI45 = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)} \quad (7)$$

A vztahu EVI jsou C1, C2, L a G konstanty. Jejich hodnota je L=1, C1=6, C2=7,5 a G=2,5. Index NDI45 je využit namísto NDVI, protože NDVI má problémy se saturací, pokud je hodnota biomasy vyšší. Oba vzorce jsou upraveny pro použití dat Sentinel-2.

Dalším možným způsobem určení biomasy je způsob od Goodenough a kol. (2005). Oblast zájmu se nacházela ve státě Alberta v Kanadě. Byla použita družicová data Landsat TM nad třemi typy lesních porostů (listnatý, jehličnatý a smíšený). Vzorec pro výpočet je následující:

$$ND45 = 128 \times \frac{TM4 - TM5}{TM4 + TM5} + 128 \quad (8)$$

Vzorec je nutno upravit na pásma pro Sentinel-2, kde ekvivalentem k TM4 je pásmo B8, k TM5 je to pásmo B11. Z výsledného indexu ND45 byla vypočítána jak biomasa, tak i uhlík v biomase. Výsledná biomasa musela být ještě přepočítána pomocí objemové hustoty dřeva, aby bylo dosaženo jednotek (kg.ha⁻²). Koeficient pro přepočítání uhlíku z biomasy je pro listnáče 0,49 a pro jehličnany 0,51 (Národní inventarizace lesů, 2018). Pokud se jedná o smíšené lesy, je použita průměrná hodnota koeficientu, která je 0,5.

$$\text{Biomasa} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = -478,58 + 4,5041 \times \text{ND45} \quad (9)$$

$$\text{Carbon} = \text{Biomasa} \times \text{Density} \times 0,5 \quad (10)$$

Density je objemová hustota dřeva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Vztah ze studie (Goodenough a kol., 2005) je stále uváděn jako nejpoužívanější pro výpočet biomasy nebo uhlíku. K výpočtu biomasy byla metoda použita v bakalářské práci Stržínek (2016), kde na stejném zájmovém území dosahovala nejlepších výsledků odhadu biomasy. Podle bakalářské práce byla určena i objemová hustota dřeva, jejíž hodnota byla určena na $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Byla vytvořena spousta prací na téma určení biomasy z dat DPZ. Další zmíněnou je studie (Macedo a kol., 2018), ve které byla odhadována biomasa pro listnáče (především duby). Ve studii bylo vytvořeno 8 modelů pro výpočet biomasy. Autor vycházel ze čtyř vegetačních indexů SR, NDVI, EVI a SAVI. Pro každý index byl poté brán průměr a medián všech pixelů a přepočten na hektar. Podle výsledků je nejlepší pro stanovení biomasy M1, což je určení pomocí Simple Ratio indexu a jeho mediánu v hektaru. Dalším použitelným je model M5, kde se využívá NDVI a jeho průměr v hektaru. Oba vztahy jsou k nalezení v Tabulce 4.

Tabulka 4 Přehled testovaných vztahů pro výpočet biomasy a uhlíku

Studie	Druh vegetace	Vzorec
Zheng a kol. (2004)	smíšený les	$AGB = 48,8 \times \frac{B8}{B4} + 2,3 \times \text{Age} - 454 \times \text{MSAVI} - 38$
Goodenough a kol. (2005)	smíšený les	$\text{Biomasa} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = -478,58 + 4,5041 \times \text{ND45}$ $\text{ND45} = 128 \times \frac{B8 - B11}{B8 + B11} + 128$
Askar a kol. (2018)	smíšený les	$AGB = 537 \times \text{NDI45} + 158,42 \times \text{EVI} - 353,66$
Macedo a kol. (2018)	listnatý les	$AGB = -47,108 + 42,582 \times \text{SR}$ $AGB = -37,026 + 223,808 \times \text{NDVI}$

Použití dat Sentinel-1

V předešlé kapitole jsou zmíněny algoritmy k výpočtu biomasy a uhlíku z multispektrálních dat Sentinel-2. Některé odborné práce využívají k těmto algoritmům zpřesňující informace v podobě bioklimatických nebo radarových dat. Výsledky s použitím přidáných radarových dat vykazovaly větší přesnost v odhadu biomasy (Norovsuren a kol., 2019). Zpravidla jsou aplikovány hodnoty polarizací VV, VH, které jsou extrahovány z dat Sentinel-1 a vegetační index NDVI, získaný z multispektrálních dat Sentinel-2. Z radarových dat byly použity hodnoty intenzity pro polarizaci VV a VH. Hodnoty intenzity ovšem nelze hned použít, je nutný přepočet na normalizovaný koeficient zpětného rozptylu (σ_0), který se udává v decibelech (dB).

$$\sigma_0 \text{ dB} = 10 \log_{10} \sigma_0 \quad (11)$$

Model pro výpočet biomasy podle Norovsuren a kol. (2019):

$$AGB = 3,35 + 3,13 \times VV + 0,21 \times VH + 1,53 \times NDVI \quad (12)$$

Kde VV, VH jsou koeficienty zpětného rozptylu pro danou polarizaci. NDVI je normalizovaný diferencovaný vegetační index.

3.3.2 C-FAKTOR

Vegetační faktor určující strukturu a pokrývnost biomasy. Vegetační kryt má ochranný vliv na půdu před erozí, zejména v oblastech s velkým sklonem svahu. Proto je počítán C-faktor v souvislosti s danou ekosystémovou funkcí, která se nazývá regulace eroze půdy. Struktura vegetace dokáže rozložit dobu dopadu dešťové kapky na delší dobu, tím zmírní jak erozi pluvialní tak i horizontální. Jedná se o součást rovnice ztráty půdy USLE (*Universal Soil Loss Equation*), do které vstupuje další řada faktorů. Dále lze říct, že se jedná o faktor, který lze ovlivnit lidskou činností. Hodnota C-faktoru je nejmenší pro lesní porosty, nicméně ochrana proti erozi je největší. Největší hodnota C-faktoru je pro holou půdu, kde je ochrana proti erozi naopak nejmenší. Podle Rozos a kol. (2013) je hodnota C-faktoru pro jehličnaté, listnaté i smíšené lesy 0,001. Pro křoviny 0,05 a pro trvalý travní porost 0,1. Nejvyšší hodnoty 1 dosahují pláže, písčité oblasti bez vegetace nebo spálené oblasti. Nutno dodat, že zkoumanou oblastí dané práce je ostrov Euboia, což je druhý největší ostrov Řecka. V práci Dragicevic a kol. (2011) byla určena průměrná hodnota C-faktoru podle tříd Corine Land Cover. Hodnota pro listnaté (311), jehličnaté (312) a smíšené lesy (313) byla určena na 0,004. Pro louky (231) byla hodnota 0,02 a pro přírodní pastviny (321) to bylo 0,05. Přechodová stádia lesa a křovin (324) dosahovaly průměrné hodnoty 0,007. Zájmovým územím bylo území Srbska. Ve studii Vatandaşlar a Yavuz (2017) je srovnáno více studií zabývajících se stanovením C-faktoru z vegetačních indexů a oznámkováno podle různých „ranků“. Výsledkem této studie bylo zjištěno, že nejlepším a nejuniverzálnějším vzorcem je ze studie Vatandaşlar a Yavuz (2017). Podobného výsledku dosáhl i vzorec Knijff a kol. (1999). Obě zmíněné studie stanovují C-faktor z NDVI. I ostatní použité vztahy používají NDVI, jedná se o nejčastější způsob určení

C-faktoru z dat DPZ. Dalším možným použitým vegetačním indexem pro výpočet C-faktoru může být SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), ze kterého později vznikl MSAVI. SAVI použil ve své práci Lanorte a kol. (2019). Studie se zabývala určením struktury vegetačního krytu před požárem a po požáru v jižní Itálii. Vztah pro výpočet byl následující:

$$C = -1,18 \times SAVI + 1 \quad (13)$$

Vztah pro výpočet C-faktoru s použitím SAVI indexu nebyl použit ani do testovací části. Jeho hodnoty jsou daleko vyšší, než by hodnoty C-faktoru měly nabývat (Rozos a kol., 2013; Dragicevic a kol., 2011).

Tabulka 5 Přehled testovaných vztahů pro výpočet C-faktoru

Studie	Vzorec
De Jong (1994)	$C = 0,431 - 0,805 \times NDVI$
Knijff a kol. (1999)	$C = \exp\left(\frac{-2 \times NDVI}{1 - NDVI}\right)$
Karaburun (2010)	$C = 1,02 - 1,21 \times NDVI$
Durigon a kol. (2014)	$C = \frac{-NDVI + 1}{2}$
Vatandaşlar a Yavuz (2017)	$C = 0,345 - 0,546 \times NDVI - 0,265 \times NDVI^2 + 0,468 \times NDVI^3$

3.3.3 Vlhkostní indexy

Jsou indexy, které zjišťují vlhkost půdy nebo vodu obsaženou ve vegetaci. Lze tak definovat kde je dostatečná vlhkost v půdě nebo zdali je vegetace zdravá a obsahuje správnou hodnotu vody obsažené v ní.

Prvním používaným indexem je NDWI (*Normalized Difference Water Index*), neboli normalizovaný diferenční vodní index (Gao, 1996). Index se někdy označuje také jako NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*). NDMI je citlivý na změnu obsahu vody ve vegetačních porostech. Ve vztahu se vyskytuje pásmo SWIR (krátkovlnné infračervené) a NIR (blízké infračervené). SWIR odráží změny jak v obsahu vegetační vody, tak i v hloubkové struktuře mezofylu. Odrazivost NIR je ovlivněna obsahem sušiny listu. Oproti NDVI je méně citlivý na atmosférické jevy. Někdy je NDMI používán pro monitorování vodních ploch nebo toků. NDMI byl využit pro vlhkostní podmínky rostlin na velkých územích (Delbart a kol., 2005; Jackson a kol., 2004).

$$NDMI = \frac{B8 - B11}{B8 + B11} \quad (14)$$

Dalším možným indexem je NDII (*Normalized Difference Infrared Index*), který je používán pro monitorování ekvivalentní tloušťky vody listů. Sriwongsitanon a kol. (2016) určil, že hodnoty NDII prudce klesají na konci mokré sezóny v říjnu a nejmenších hodnot dosahují v březnu. Výsledky byly zjištěny pro studijní oblast povodí řeky Ping v Thajsku. Změna ve vztahu oproti NDMI je pouze nahrazení pásma B8 za B8A. Rozdíl mezi centrální vlnovou délkou je 20 nm, přičemž pásmo B8A je efektivnější v semiaridních oblastech (Index Database, 2019). Vzorec pro výpočet NDII z dat Sentinel-2:

$$NDII = \frac{B8A - B11}{B8A + B11} \quad (15)$$

SLUNEČNÍ DISIPACE

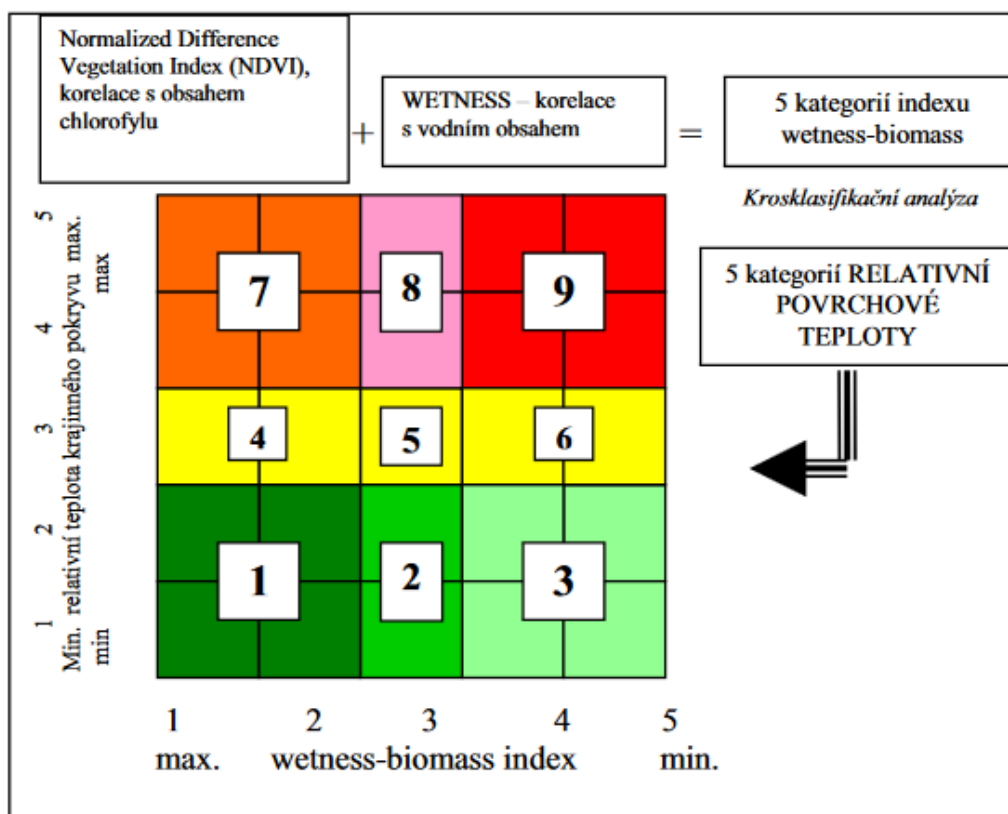
Jedná se o index hodnotící krajinu podle tří parametrů: povrchová teplota, zelená biomasa a vlhkost krajinného povrchu. Při integraci těchto tří parametrů lze krajinu hodnotit z hlediska disipace sluneční energie. Jedná se o nenávratnou změnu sluneční energie na energii tepelnou, při které vzniká teplo ohřívající prostředí nebo latentní teplo, které se spotřebovává na výpar a prostředí ochlazuje. Dalším faktorem ovlivňující transformaci je typ vegetace a množství vody vázané ve vegetaci (Hesslerová a Pokorný, 2010).

$$WB = NDVI + WET \quad (16)$$

$$WET = 0.1509 \times B2 + 0.1973 \times B3 + 0.3279 \times B4 + 0.3406 \times B8 - 0.7112 \times B11 - 0.4572 \times B12 \quad (17)$$

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (18)$$

NDVI je použito z hlediska korelace s množstvím chlorofylu, *Wetness* koreluje s vodním obsahem. Je použita komponenta *Wetness* z transformace *Tasseled Cap* (Kauth a Thomas, 1976). Ve výsledku byl index klasifikován do devíti kategorií podle relativní teploty a hustoty vegetace. Problém nastává v použití pro data Sentinel-2, které neobsahují snímky v termálním spektru. Data Landsat 8 obsahují dvě pásma snímající v termální části spektra o rozlišení 100 metrů. Ještě použitelnější je v tomhle případě Landsat 7, který obsahuje pásmo snímající v termální části o rozlišení 30 metrů. U dat Sentinel v termální části spektra snímá pouze družice Sentinel-3, kde je rozlišení 1 Km.



Obrázek 9 Disipační kategorie, převzato z (Hesslerová a Pokorný, 2010)

3.3.4 Použité vegetační indexy

NDVI

Normalized difference vegetation index kvantifikuje vegetaci měřením rozdílu mezi blízkým infračerveným zářením, které vegetace odráží, a červeným zářením, které vegetace absorbuje. Index byl poprvé použit podle Rouse a kol. (1973) a nyní je jedním z nejpoužívanějších vegetačních indexů. Jak již bylo zmíněno výše, index se používá hojně ve vztahu k ekosystémům a jejich funkcím (Box a kol., 1989; Tucker a kol., 1991; Alcaraz a kol., 2006; Lukeš a kol., 2017). Obecně se NDVI používá jako odrazový můstek pro určení dalších kvantifikátorů jako biomasa, uhlík, podíl fotosynteticky aktivního záření, disipace sluneční energie apod.

LAI

Leaf Area Index byl definován Watsonem (1947) jako celková jednostranná plocha listů na jednotku plochy povrchu. LAI je jedním z nejdůležitějších procesů, který souvisí s obsahem chlorofylu nebo uhlíku, rychlostí fotosyntézy nebo mezi suchou a čerstvou biomasou (Darvishzadeh a kol., 2008; Herrmann a kol., 2011). LAI lze vypočítat pomocí přímých nebo nepřímých metod. Přímé metody jsou založeny na destruktivním vzorkování listoví a výpočtu jeho celkové plochy. Nepřímé metody jsou založeny na měření propustnosti světla porostem nebo zjištěním úhlové distribuce děr v prostoru, což je metoda, která je méně nákladná. Další nepřímou metodou může být metoda DPZ, která poskytuje aktuální informace o stavu krajiny v konzistentním časovém rozmezí.

Spojitosť s LAI má také odstraňování prachových částic z ovzduší a následná regulace ovzduší. Ve studii Bottalico a kol. (2015) je řešena regulace znečištění ovzduší pomocí lesů. Konkrétně odstraňování O₃ a PM₁₀. Výpočet regulace prachových částic vychází z určení LAI a byla počítána následujícím vztahem:

$$TotalPM_{10} = (\sum_{i=1}^{12} V * C * T * 24 * 3600 * LAI * 0,5) * A \quad (19)$$

Kde hodnota V je určena na 0,0064, C je průměrná denní hodnota PM₁₀ za měsíc, T je počet dnů v měsíci, LAI je hodnota Leaf Area indexu v daném území, míra resuspendace měla hodnotu 0,5 (Zinke, 1967) a A je plocha lesního porostu. Regulace byla počítána v ročním souhrnu.

FAPAR

Je podíl fotosynteticky aktivního záření pohlceného vegetací pro aktivitu fotosyntézy. Vztahuje se pouze na zelené a živé části rostlin. FAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) závisí na struktuře rostliny, optických vlastnostech vegetačního prvku, atmosférických podmínkách a úhlové konfiguraci (Copernicus, 2019). FAPAR lze vyjádřit pomocí vegetačních indexů. Koeficient determinace dosahuje u těchto modelů velmi vysokých hodnot a lze ho považovat za užitečný v podmínkách a oblastech použitých ve studii.

Tabulka 6 Vybrané vztahy pro výpočet FAPAR

Studie	Vztah	R ²
Hatfield a kol. (1984)	$FAPAR = 1,2 \times NDVI - 0,18$	0,974
Myneni a kol. (1992)	$FAPAR = 0,846 \times NDVI - 0,08$	0,92
Goward a kol. (1994)	$FAPAR = 1,21 \times NDVI - 0,04$	0,99

Další použité vegetační indexy

Kromě výše zmíněných vegetačních indexů lze využít i další. Jedná se tak o SR (*Simple Ratio*) index, který vyjadřuje podíl blízkého infračerveného pásma a viditelného červeného pásma. EVI (*Enhanced vegetation Index*) je optimalizovaný index, který má zlepšenou sensitivitu na hodnoty s velkým množstvím biomasy. Oproti NDVI více reaguje na strukturu vegetace. SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) vychází z NDVI, kde se ve vztahu vyskytuje navíc pouze koeficient faktoru půdy L, u kterého je výchozí hodnota 0,5. Modifikované SAVI (MSAVI) se mění pouze o koeficient L. NDI45 je opět modifikace NDVI, kde se u snímků Sentinel-2 používá u blízkého infračerveného pásma místo B8 pásmo B5.

Tabulka 7 Použité vegetační indexy

Vegetační index	Vztah	Studie
SR	$SR = \frac{B8}{B4}$	Jordan (1969)
NDI45	$NDI45 = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)}$	Delegido a kol. (2011)
MSAVI	$MSAVI = \frac{(NIR - RED)(1 + L)}{NIR + RED + L}$	Qi a kol. (1994)
EVI	$EVI = G \times \frac{(B8 - B4)}{(B8 + C1 \times B4 - C2 \times B2 + L)}$	Liu a Huete (1995)

4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Zpracování dat

4.1.1 Oblast zájmu

Sledovanou oblastí pro diplomovou práci je povodí Dřevnice. Povodí se nachází ve Zlínském kraji a jeho plocha činí 436,52 km² (ČHMÚ, 2018). Řeka pramení v oblasti Hostýnských vrchů poblíž obce Držková. Její ústí se nachází u Otrokovic, kde se vlévá do Moravy. Ve zkoumané oblasti se nacházejí oblasti lesních pozemků, luk, zemědělské oblasti, ale také konurbace Zlín – Otrokovice. V oblasti zájmu tak lze pozorovat velkou rozmanitost územního pokryvu. Dalším důležitým stanovištěm je experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž, které se nachází na území Moravskoslezského kraje v CHKO Beskydy. Celý areál pracoviště je rozmístěn v nadmořské výšce 850 až 908 metrů nad mořem. Cílem pracoviště je výzkum jedolitého ekosystému, monitorování energie a látek a fyziologických procesů (CzechGlobe, 2019). Ekosystém nacházející se v areálu je smrkový les o stáří 36 let.

4.1.2 Příprava dat k analýze

Prvním krokem vůbec, bylo stažení satelitních snímků z družic Sentinel-2. Data byla stažena z portálu *Copernicus Open Access Hub*, což je oficiální zdroj ke stažení dat Sentinel. Primárním kritériem bylo vybrat ta data, která neobsahovala žádnou oblačnost nebo pouze minimální procentuální podíl na sledovaném území. Sekundárním kritériem bylo vybrat vždy jeden snímek za jednotlivý kalendářní měsíc. Ve výsledku bylo celkově staženo 16 dlaždic. Kvůli rozloze povodí musely být pro každý měsíc staženy 2 dlaždice (TT33UYQ, TT33UXQ). Úroveň zpracování snímků byl Level-2A.

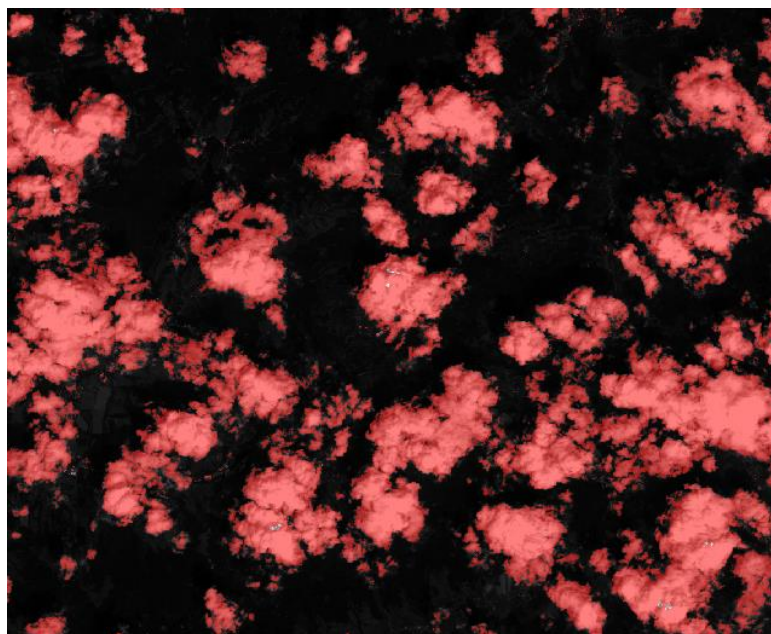
Tabulka 8 Přehled použitých snímků Sentinel-2

Měsíc	Družice	Level zpracování	Datum pořízení snímku
březen	S2B, S2A	2A	22 a 24.3.2018
duben	S2B	2A	21 a 18.4.2018
květen	S2A	2A	3.5.2018
červen	S2B	2A	17.6.2018
červenec	S2A	2A	12.7.2018
srpen	S2A	2A	21.8.2018
září	S2A	2A	20.9.2018
říjen	S2B	2A	15.10.2018
listopad	S2A	2A	29.11.2018
prosinec	S2A	2A	19.12.2018

Po stažení družicových dat následovalo převzorkování pomocí *S2Resampling Processoru*. Všechna pásma byla převzorkována na rozlišení 20 metrů. Pásma B9 a B10, která vycházejí z rozlišení 60 metrů, nejsou dále používána, tudíž stačilo pomocí *downsamplingu* změnit rozlišení z 10 na 20 metrů u pásem B2, B3, B4, B8. Nebylo nutné dále používat dlaždice v celém rozsahu, a tak byly ořezány do přibližného čtyřúhelníku kolem testovacího území pomocí funkce *Spatial Subset*. Následoval výpočet kvantifikátorů LAI a FAPAR pomocí *Biophysical Processor*. Výpočet musel proběhnout ještě před maskováním a mozaikováním, jelikož poté byla provedena extrakce potřebných pásem, kvůli úspoře dat. Do výpočtu *Biophysical Processor* vstupuje jedenáct vrstev:

- B3,
- B4,
- B5,
- B6,
- B7,
- B8a,
- B11,
- B12,
- $\cos(\text{viewing_zenith})$,
- $\cos(\text{sun_zenith})$,
- $\cos(\text{relative_azimuth_angle})$.

U stupně zpracování Level-2A jsou již dostupné masky pro tři typy oblačnosti (*Cloud High Probability*, *Cloud Medium Probability*, *Cloud Thin Cirrus*). Masky byly použity buď kombinací nebo samostatně, aby bylo docíleno maximální eliminace oblačnosti ze snímku. Maskování bylo provedeno nástrojem *Land/Sea Mask*.



Obrázek 10 Maska oblačnosti pro část snímku z měsíce července

Časově nejnáročnější částí přípravy dat bylo mozaikování dvou rastrů do jednotitého rastru pomocí nástroje *Mosaic*. U mozaikování vznikl jednotitý rastr o rozlišení 20 metrů, 12 pásmech a souřadnicovém systému WGS UTM zone 33N. Poslední fází přípravy dat v programu SNAP byl výpočet algoritmů pro jednotlivé kvantifikátory. Kromě toho byly

vypočteny i podpůrné vegetační indexy, které jsou potřeba k realizaci výpočtu algoritmů. Výpočet byl docílen pomocí funkce *BandMath*.

Data z družice Sentinel-1 bylo také nutné předzpracovat. I pro ně byl použit software SNAP. První bylo zapotřebí určení přesných informací o orbitě (*Apply Orbit File*). V původních metadatech nejsou informace o orbitě dostatečně přesné, proto se musí aktualizovat. Data byla následně pomocí funkce *Subset* ořezána do menší oblasti. Dále byla použita funkce *Calibration*, která převedla hodnoty DN na hodnoty σ^0 . Kalibrace je nutná pro finální převedení na jednotky decibel. Ještě předtím byla aplikována terénní korekce *Range Doppler Terrain Correction*, při které jsou minimalizovány vlivy nerovnosti terénu a snímek je zasazen do geografického systému. Převod na jednotky decibel je docílen funkcí *Conversion to dB*.

4.2 Testovací část

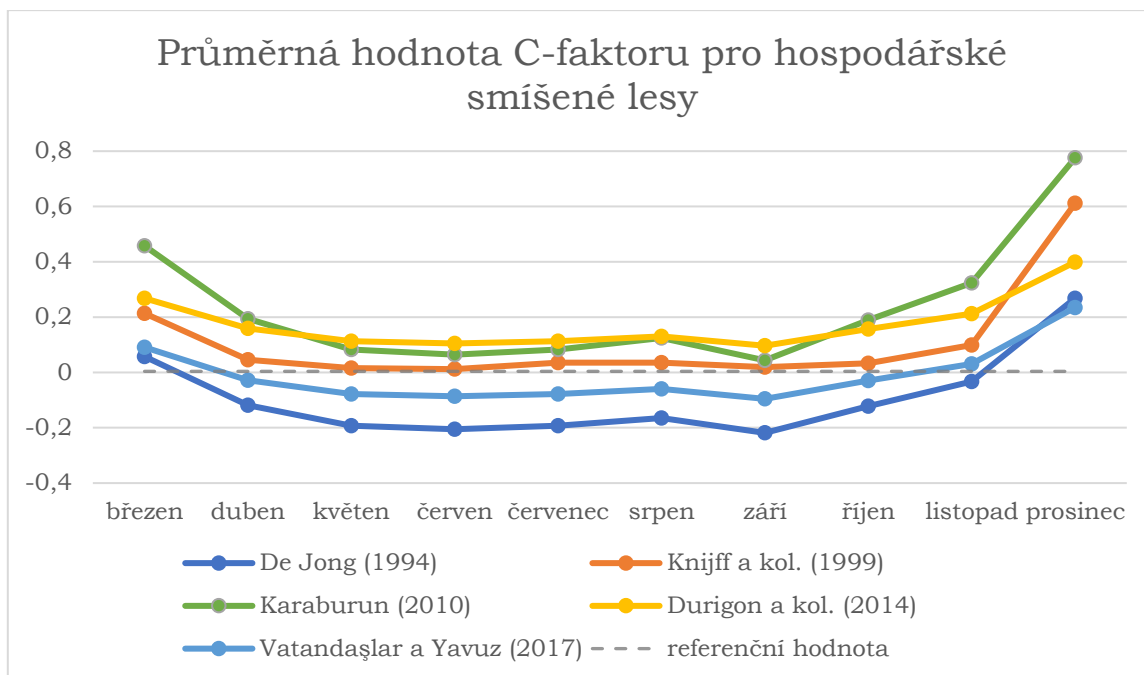
4.2.1 C-FAKTOR

Prvním testovaným kvantifikátorem byl C-faktor neboli faktor ochranného vlivu vegetace před srážkovou erozí. Podle rešerše bylo použito pět vztahů počítající C-faktor z družicových multispektrálních dat. Výpočet C-faktoru vychází z vegetačního indexu NDVI, bylo použito rozlišení 10 metrů. Pro výpočet algoritmů byl opět použit software SNAP, následné ořezání podle testovacího území ale proběhlo v programu ArcGIS for Desktop.

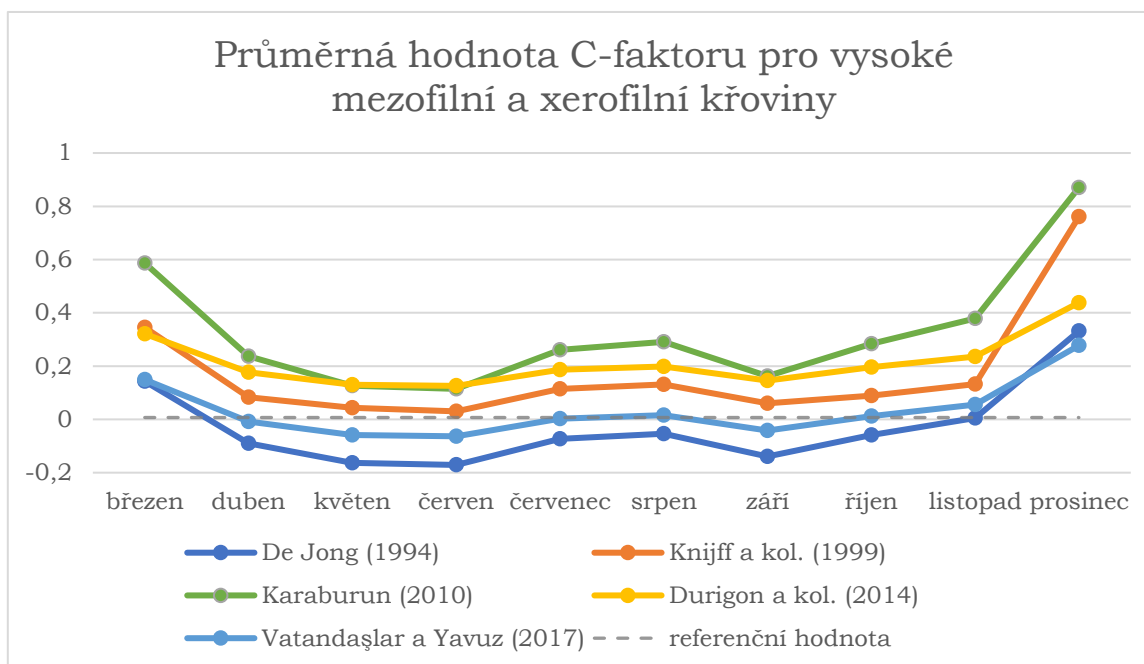
Zájmové území v testovací fázi pro C-faktor byly biotopy K3 (vysoké mezofilní a xerofilní křoviny), Y5 (smíšené hospodářské lesy) a Y6 (hospodářské louky). Zde byly porovnávány hodnoty C-faktoru odvozené z dat Sentinel-2 a referenční průměrné hodnoty podle Dragicevic a kol. (2011):

- Smíšené lesy = 0,004,
- Křoviny = 0,007,
- Přírodní travní porost = 0,05.

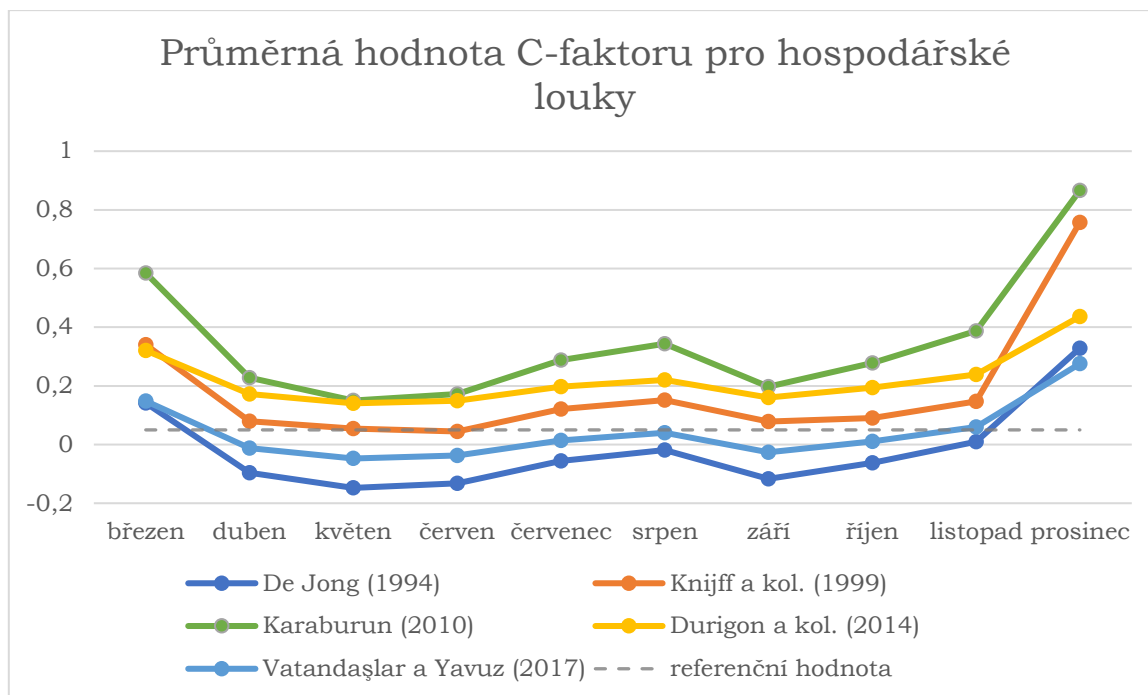
Tabulková hodnota metodiky pro ČR (Janeček a kol., 2012) nebyla použita z důvodu omezení hodnot C-faktoru pouze na zemědělskou půdu.



Obrázek 11 Průměrná hodnota C-faktoru pro hospodářské smíšené lesy (Y5) v průběhu roku 2018



Obrázek 12 Průměrná hodnota C-faktoru pro vysoké mezofilní a xerofilní křoviny (K3) v průběhu roku 2018



Obrázek 13 Průměrná hodnota C-faktoru pro hospodářské louky (Y6) v průběhu roku 2018

Z výsledků testování lze usoudit, že průběh všech křivek je téměř stejný s rozdílem posunutí v ose y. Všechny křivky mají pokles hodnot v měsíci dubnu, nárůst v srpnu, pokles v září a pak prudký nárůst v prosinci. Hodnoty v měsíci březnu a prosinci jsou odlišné z důvodu místy vyskytující se sněhové pokrývky. Dalším poznatkem z výsledku testování je, že vztah pro výpočet C-faktoru, ze studie De Jong (1994), Vatandaşlar a Yavuz (2017) není vhodné použít pro zájmové území. Výsledný C-faktor nabývá záporných hodnot u všech tří typů biotopů, což je nežádoucí. Hodnoty by se měly pohybovat mezi čísly 0 a 1. Vztah ze studie Karaburun (2010) je opakem dvou zmíněných a jeho výsledky dosahují vysokých hodnot, které se nejméně přibližují referenčním průměrným hodnotám. Nejvhodnějším kandidátem pro dané území je algoritmus ze studie Knijff a kol. (1999), který je nejbližší aproximací referenční hodnoty napříč časovým obdobím a má i největší aproximaci v hlavní vegetační sezóně. Výsledky navíc nenabývají záporných hodnot. Jedná se tak o metodu nejvhodnější k použití pro určení ochranného vlivu vegetace před vodní erozí v testovaném čase a území.

4.2.2 BIOMASA A UHLÍK

Je testována vzhledem k pozemnímu měření, tak i k referenčním hodnotám vybraných biotopů. Výsledky hodnot pozemního měření jsou získány z výzkumné stanice Bílý Kříž z 11. listopadu 2018. Bylo nutné najít nejbližší použitelný snímek, kterým byl snímek ze 4. listopadu 2018. Hodnoty nadzemní biomasy z pozemního měření výzkumné stanice dosahovaly 127,38 t.ha⁻¹. Cílem testování je zjištění, který z testovaných modelů bude mít největší aproximaci s hodnotou pozemního měření.

Získání hodnot biomasy z dat Sentinel-2 proběhlo z plochy čtyři hektary. Průměrem byla zjištěna hodnota pro každý algoritmus (Tabulka 9). Nejpodobnějším výsledkem byla hodnota biomasy z algoritmu Macedo a kol. (2018) s použitím indexu NDVI, který se lišil zhruba o 20 t.ha⁻¹. Druhým nejpřesnějším byl algoritmus Goodenough a kol. (2005). Algoritmus ze studie Askar a kol. (2018) dosáhl záporných hodnot, což je opět nežádoucí, tudíž nebyl dále testován v konfrontaci s referenčními hodnotami uhlíku ve vybraných biotopech.

Tabulka 9 Konfrontace odhadovaných hodnot biomasy z vybraných algoritmů s výsledky pozemního měření

Srovnání hodnoty biomasy (t.ha⁻¹) z pozemního měření a získaného z dat Sentinel-2 (listopad 2018)	
Pozemní měření AGB	127,38
Zheng a kol., 2004	430,78
Goodenough a kol., 2005	190,66
Macedo a kol., 2018 (SR)	412,88
Macedo a kol., 2018 (NDVI)	148,25
Askar a kol., 2018	-78,43

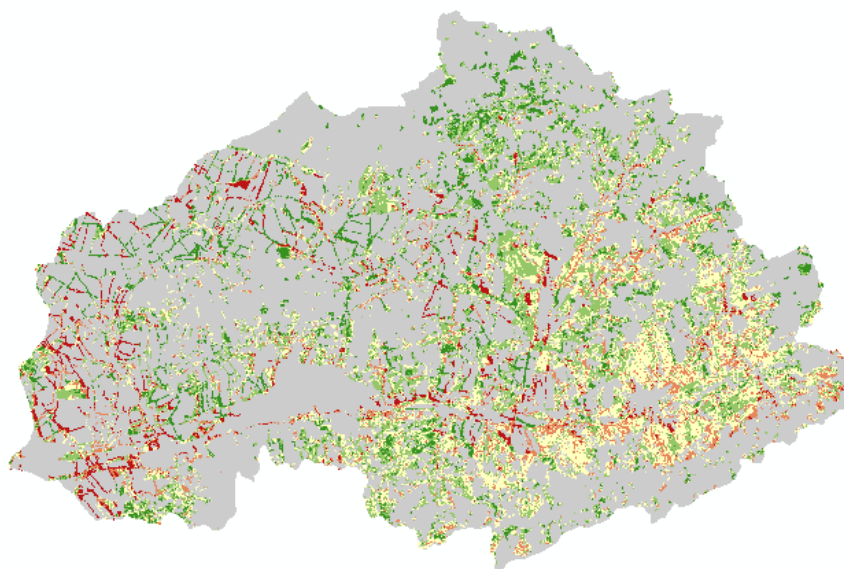
Další částí je porovnání s hodnotami uhlíku z biotopů DKV, které jsou brány jako průměrná hodnota v hlavní vegetační sezóně. Referenční hodnoty uhlíku jsou následující:

- K3 (vysoké mezofilní a xerofilní křoviny) = 12,89 t.ha⁻¹,
- Y5 (smíšené hospodářské lesy) = 103,75 t.ha⁻¹,
- Y6 (hospodářské louky) = 2,07 t.ha⁻¹.

Uhlík je odvozen z výsledků biomasy podle koeficientu 0,5. Jedná se o průměrnou hodnotu, která vychází z koeficientu pro listnaté lesy (0,49) a jehličnaté lesy (0,51). První testovaným modelem byl podle Zheng a kol. (2004). Výsledky z prvního algoritmu se poměrně lišily oproti referenčním datům. Ve všech třech typech biotopů o cca 83 až 104 t.ha⁻¹. Druhý testovaný algoritmus dopadl lépe a odchylka se pohybovala v rozmezí 26 až 50 t.ha⁻¹. Třetí testovaný dopadl nejhůře ze všech, odchylka se pohybovala od 104 do 133 t.ha⁻¹. Poslední algoritmus byl srovnatelný s druhým testovaným, odchylka se pohybovala od 32 do 55 t.ha⁻¹ (Tabulka 10). Všechny algoritmy jsou však vyvinuté pro výpočet nadzemní biomasy lesního porostu. Z daného pohledu lze říct, že algoritmus Goodenough a kol. (2005), je nejpoužitelnější v zájmovém území povodí řeky Dřevnice, pro lesní porosty. Nicméně, pro louky a křoviny se nejedná o vhodný algoritmus, který by se přibližoval referenčním hodnotám.

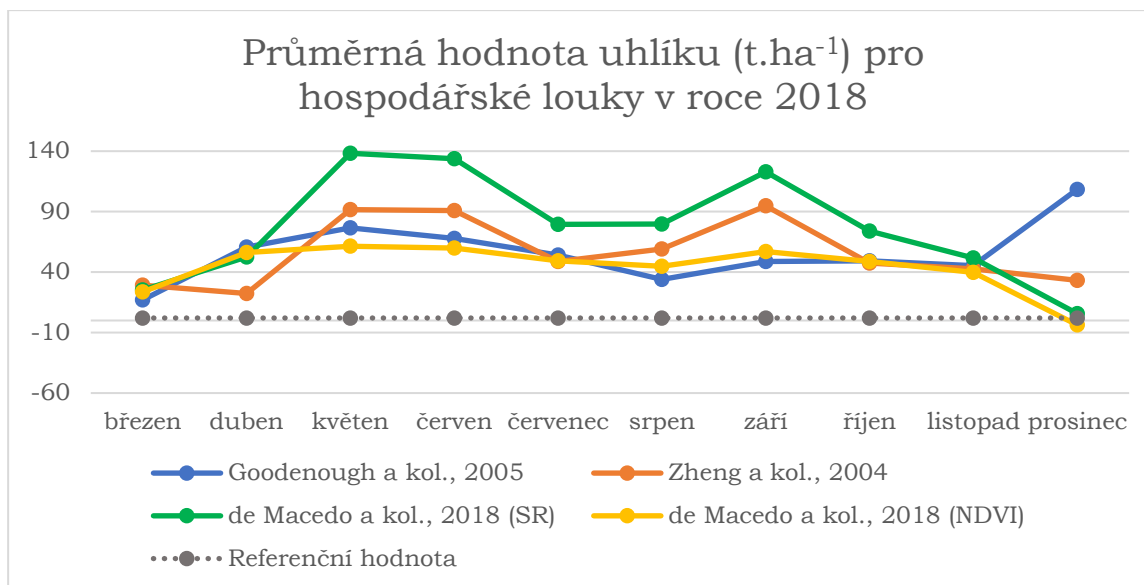
Tabulka 10 Srovnání hodnot uhlíku určených z vybraných algoritmů s referenčními daty

Průměrná hodnota uhlíku (t.ha⁻¹) v biotopech v září 2018					
	Zheng a kol., 2004	Goodenough a kol., 2005	Macedo a kol., 2018 (SR)	Macedo a kol., 2018 (NDVI)	Referenční hodnoty
Y5 (Hospodářské lesy smíšené)	186,5	76,53	207,87	71,05	103,75
Y6 (Hospodářské louky)	94,73	48,78	122,98	57,03	2,07
K3 (Vysoké mezofilní a xerofilní křoviny)	117,53	52,55	145,1	60,44	12,89



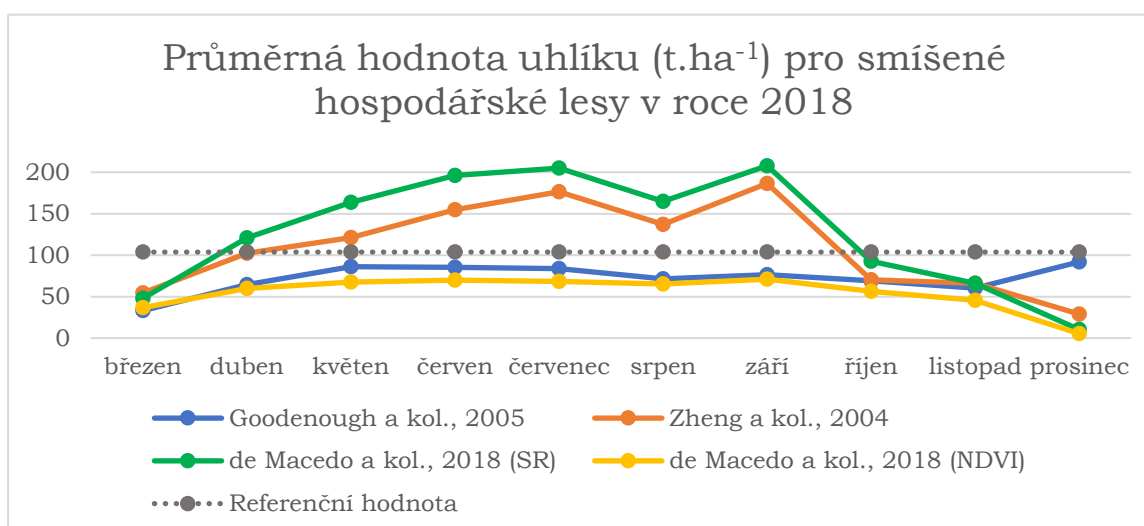
Obrázek 14 Náhled testovacích dat pro metodu Zheng a kol. (2004) určující množství uhlíku

Oblast zájmu testovací fáze lze spatřit na Obrázku 14. Hodnoty uhlíku byly testovány nejen pro jeden měsíc v roce, ale i v časové ose od března do prosince 2018. Jak již bylo zmíněno výše, algoritmy jsou určeny pro odhad biomasy (uhlíku) v lesních porostech. Obrázek 15 ukazuje graf odhadu uhlíku pro časovou osu od března do prosince 2018. Nejvíce kolísající hodnoty v průběhu roku jsou určeny pomocí algoritmů Zheng a kol. (2004) a Macedo a kol. (2018) s použitím indexu SR. Následující dvě metody mají výkyv hodnot menší, nicméně pořád se nejedná o vhodný algoritmus k použití pro hospodářské louky.

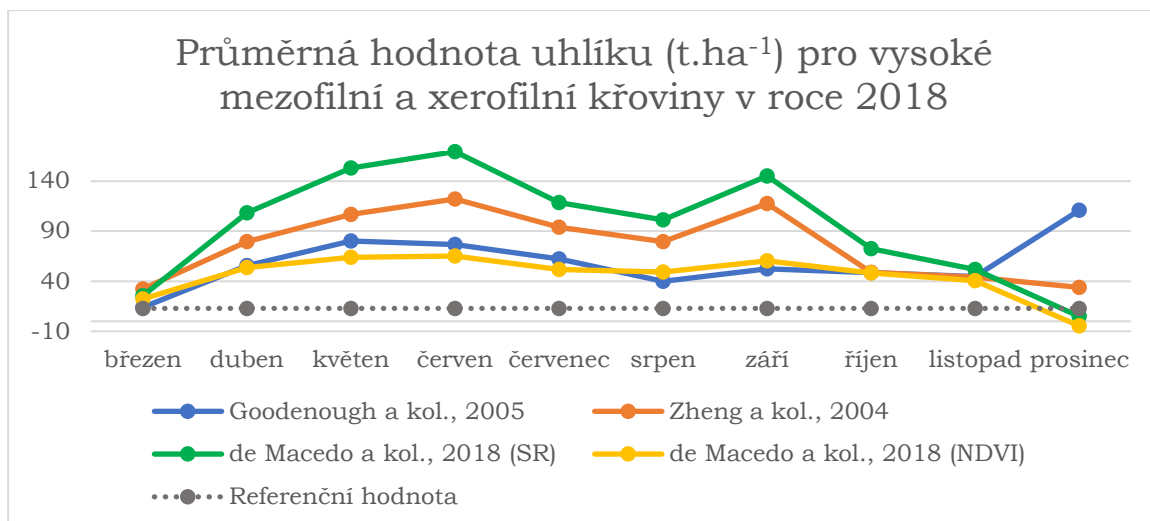


Obrázek 15 Průměrné hodnoty uhlíku pro hospodářské louky v průběhu roku 2018

U dalších dvou biotopů byl výsledek víceméně podobný jako v prvním případě. Obrázek 16 ukazující graf hodnot pro hospodářské lesy. Pokud bude bráno v potaz, že algoritmus je určen právě pro odhad biomasy v lesích, měla by u lesních porostů být největší aproximace k referenčním hodnotám. Nejvyšší aproximace dosáhl algoritmus Goodenough a kol. (2005). Odlišení oproti referenčním datům je vůči ostatním algoritmům malé, tudíž se dá říct, že je nejvhodnější pro další použití v daném časovém období a zájmovém území. Obrázek 17 ukazující průběh hodnot pro křoviny, kde je nutno jako v případě luk použít jiný algoritmus. Proto byla i konečná zásoba uhlíku v nadzemní biomase stanovena pouze pro lesní porosty. Byla k tomu určena metoda Goodenough a kol. (2005), která měla v testování nejlepší výsledky oproti ostatním metodám.



Obrázek 16 Průměrné hodnoty uhlíku pro hospodářské lesy v průběhu roku 2018

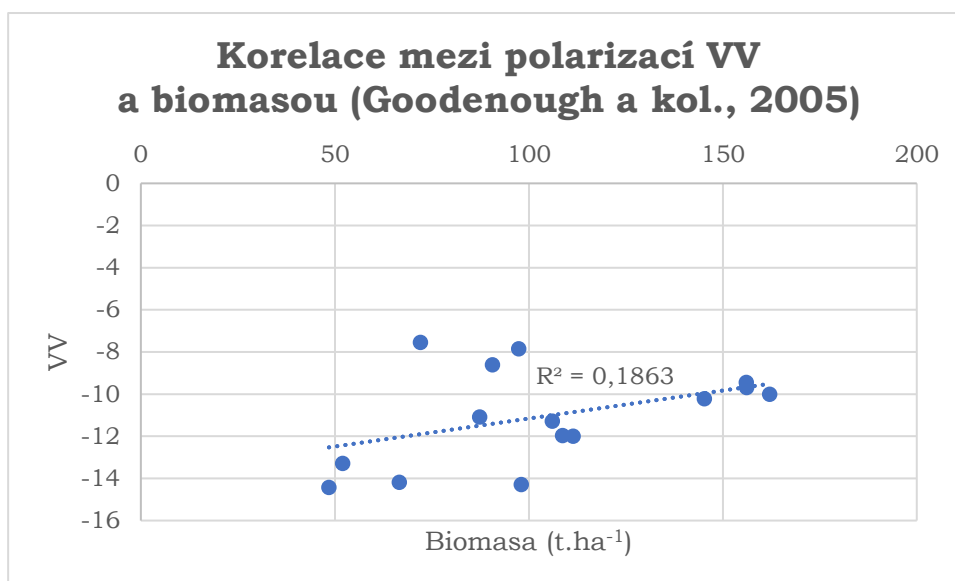


Obrázek 17 Průměrné hodnoty uhlíku pro vysoké mezofilní a xerofilní křoviny v průběhu roku 2018

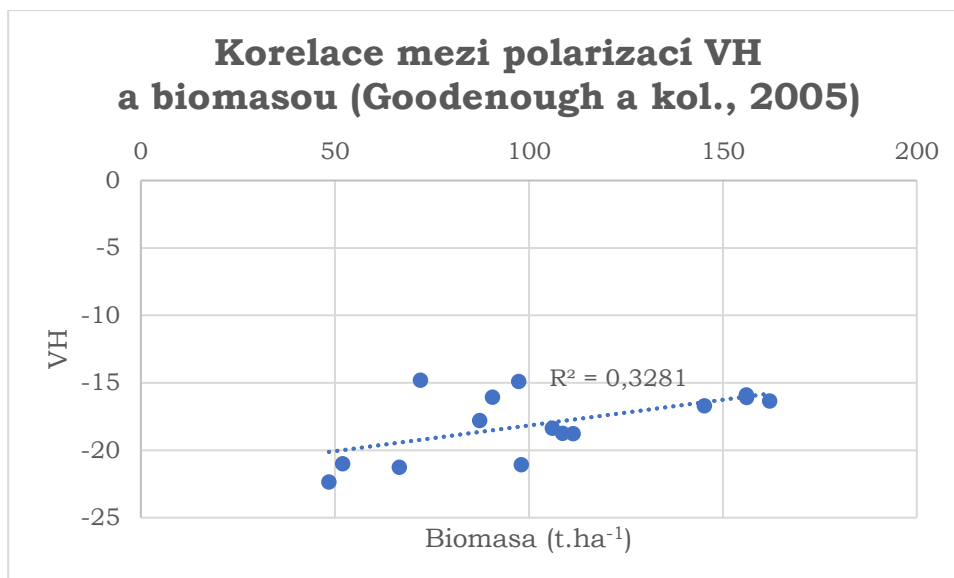
POUŽITÍ DAT SENTINEL-1

V souvislosti s biomasou byla testována metoda, která určuje hodnotu biomasy za pomoci kombinace dat Sentinel-1 a Sentinel-2 (Norovsuren a kol., 2019). Zájmové území, kde byla metoda zkoušena je malé území v Mongolsku, pro odhad biomasy v lesních porostech. Autor sám podotýká, že korelace mezi pozemním měřením a polarizací VV či VH je velmi malá. Korelace s pozemním měřením u polarizace VV byla 0,3168. Trochu větších hodnot dosahovala korelace s VH, která byla 0,5739. Při použití vztahu (12), což je kombinace dat Sentinel-2 a Sentinel-1 za účelem odhadu biomasy, byla korelace s pozemním měřením 0,7344. Zájmové území ale obsahovalo pouze lesní, či travní ekosystémy.

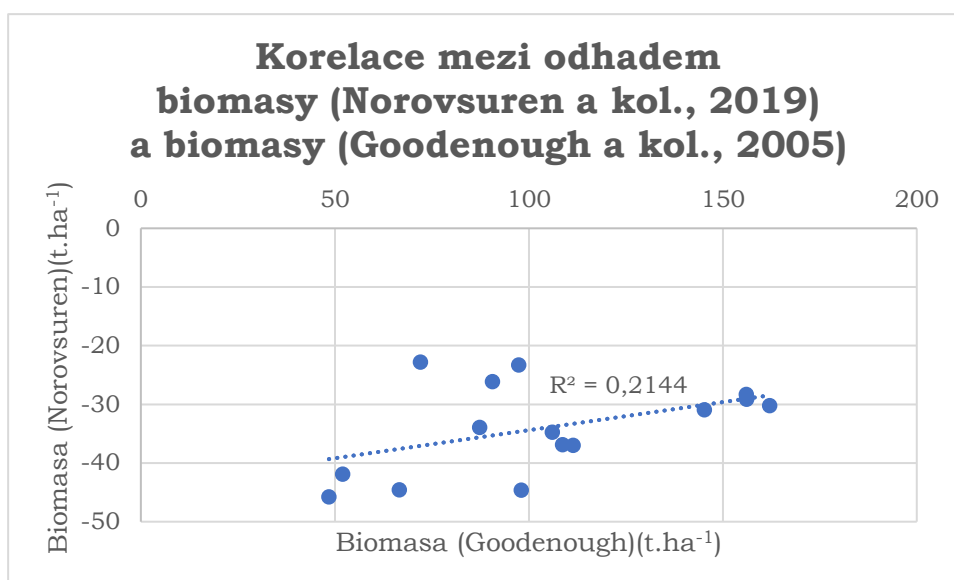
Při testu se zájmovým územím povodí řeky Dřevnice bylo srovnáno, zdali korelují data polarizací VV a VH s predikovanou biomasou metody Goodenough a kol. (2005).



Obrázek 18 Graf hodnot polarizace VV a biomasy



Obrázek 19 Graf hodnot polarizace VH a biomasy



Obrázek 20 Graf hodnot mezi dvěma metodami pro určení biomasy

Jak je již patrné z grafů, hodnoty polarizací s predikovanou biomasou vůbec nekorelují. Největší propad je v korelaci výsledného algoritmu, kde je korelace pouze 0,2144. U hodnot polarizace VV je to 0,1863 a u polarizace VH 0,3281. Model je nepoužitelný z hlediska predikce biomasy v daném zájmovém území, proto dále není používán.

4.2.3 FAPAR

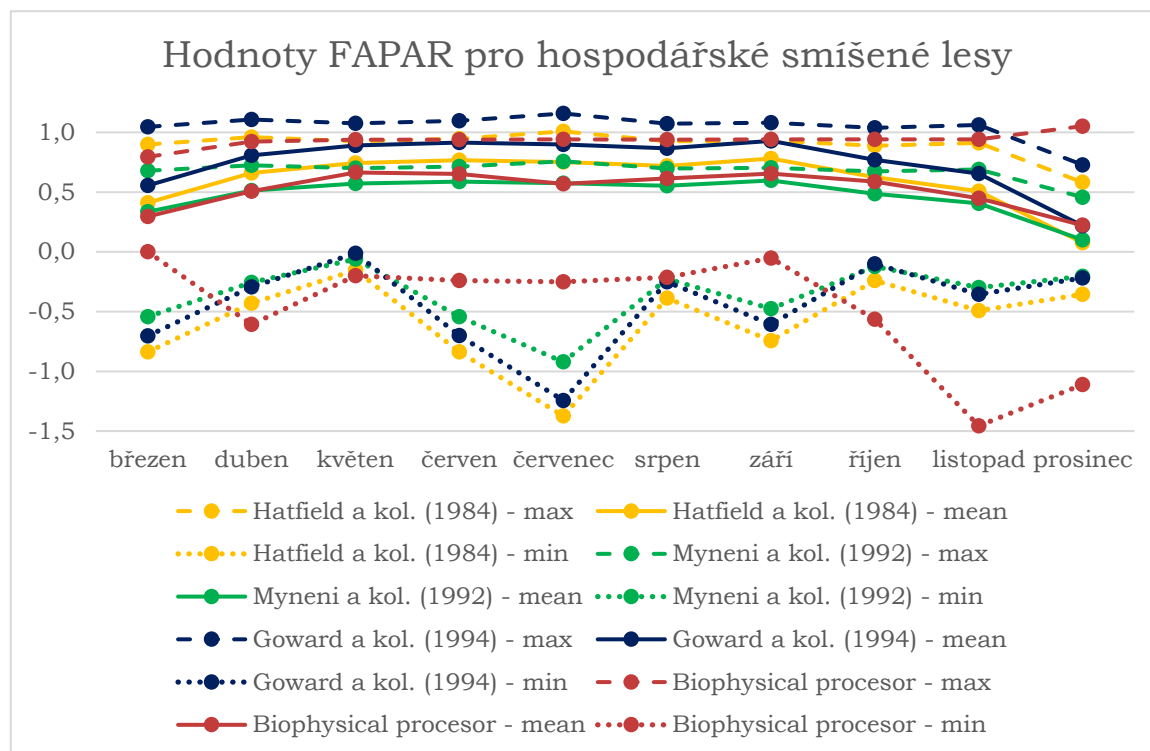
Neboli fotosynteticky aktivní složka vegetace, je důležitá pro přeměnu oxidu uhličitého na kyslík. Uhlík se díky procesu fotosyntézy váže do rostlin. Proto je i FAPAR důležitým ukazatelem, který je také testovaný. Testování probíhalo mezi třemi algoritmy vycházejících z indexu NDVI a mezi algoritmem dostupným v *Biophysical processor* ze softwaru SNAP. Ideální obor hodnot by se měl pohybovat mezi hodnotami nula a jedna. Hodnoty blízké nule se vyznačují minimální složkou fotosynteticky aktivní vegetace. Hodnoty přibližující se jedné se vyznačují vysokým podílem fotosynteticky aktivní složky vegetace. Jako v předchozích dvou testování, i FAPAR byl testován v časové ose od března

2018 do prosince 2018. Hlavními kritériem bylo minimální překročení hodnot nula a jedna.

U prvního testovaného biotopu byly patrné vzory mezi indexy, které vycházely z NDVI, hlavně u minimálních hodnot. Trendem byl nárůst hodnot od měsíce března do května, poté pokles k měsíci červenci, prudký nárůst v září a pak víceméně opakující se výkyv do prosince. Hodnoty z *Biophysical processor* mají konstantnější chování. S mírným poklesem v měsíci dubnu a poté pokles v září až do listopadu. Jedná se však o takzvané outliersy. Nežádoucí hodnoty, které vznikly odrazem od jiných objektů, než je vegetace. Co se týče procentuálního zastoupení hodnot, které se vyskytovaly pod nulou. U metody Goward a kol. (1994) se v měsíci květnu vyskytovalo 0,005 % hodnot v záporných číslech, v září to bylo 0,1 %. U metody Hatfield a kol. (1984) to bylo v květnu 0,2 % a v září 0,6 %. Procentuální zastoupení hodnot v záporných číslech u metody Myneni a kol. (1992) bylo 0,02 % v květnu a 0,2 % v září. U hodnot vypočítaných z *Biophysical processor* to bylo i v květnu i v září 0,0005 %. Celkové množství pixelů pro lesy činilo 55410 (v rozlišení 20x20 metrů), z čehož u BP se pouze 30 nacházelo v záporných hodnotách.

Průměrné hodnoty měly poměrně stejný průběh u všech čtyř testovaných metod. Hodnoty od března do května rostly, pak nastal zhruba konstantní průběh až do září, kdy hodnoty začaly zase klesat. Nejvíce odlišnou v tomhle případě byla hodnota metody Goward a kol. (1994), která je oproti ostatním nadhodnocená a výsledky hodnot jsou vyšší.

U maximálních hodnot jsou průběhy taktéž bez větších výkyvů oproti ostatním. Důležitým faktorem je ale nadhodnocení výsledku. U Goward a kol. (1994) je v měsíci květnu 9,5 % hodnot nad číslem jedna, v září je to dokonce 33,4 %. Z tohoto důvodu je algoritmus nepoužitelný pro zájmové území. Jedinou možností je modifikace metody. Z ostatních metod překročily v maximální hodnotě číslo jedna pouze algoritmus z BP. Konkrétně v prosinci, kdy už jsou patrné známky sněhové pokrývky.

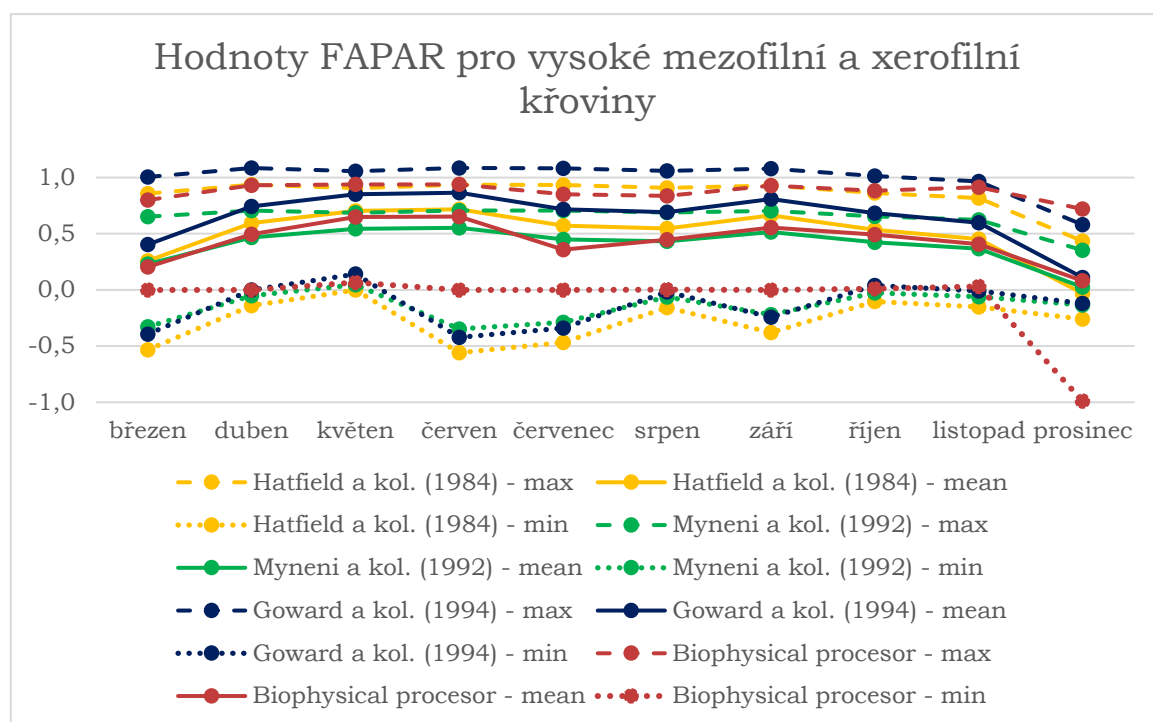


Obrázek 21 Graf porovnání hodnot FAPAR pro hospodářské lesy v roce 2018

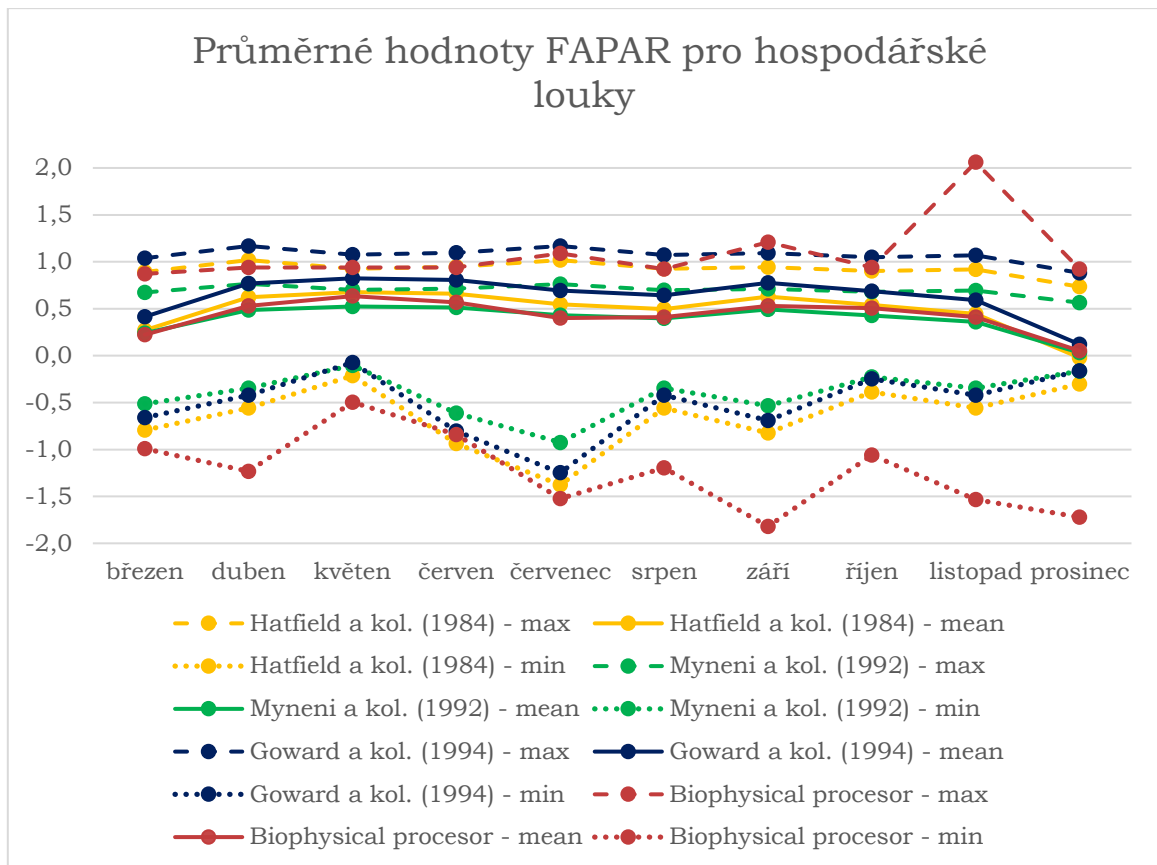
Biotop vysokých mezofilních a xerofilních křovin obsahuje celkem 1224 pixelů při rozlišení 20x20 metrů. U minimálních hodnot je opět stejný průběh hodnot pro tři metody využívající NDVI a odlišný průběh pro metodu z BP. V měsíci červnu měly dokonce všechny tři metody používající NDVI stejný procentuální podíl hodnot v záporných číslech, a to 0,6 %. V září to bylo trochu odlišné, kde Goward a kol. (1994) měl 0,4 %, Hatfield a kol. (1984) 1,5 % a Myneni a kol. (1992) 0,6 % v záporných číslech. Minimální hodnoty algoritmu z BP byly po celou dobu konstantní a držely se na hodnotě nula, pouze v případě prosince klesly pod nulu.

Trend průměrných hodnot je téměř podobný u všech čtyř testovaných algoritmů. Liší se ovšem posun hodnot v ose y. Nejvyšší průměrné hodnoty má algoritmus Goward a kol. (1994) a nejmenší Myneni a kol. (1992). Maximální hodnoty jsou v trendu identické. Opět pouze algoritmus Goward a kol. (1994) překračuje hodnoty jedna. V měsíci červnu se jedná o procentuální podíl 19,45 %. V září pak překračuje 13,9 % hodnot číslo jedna.

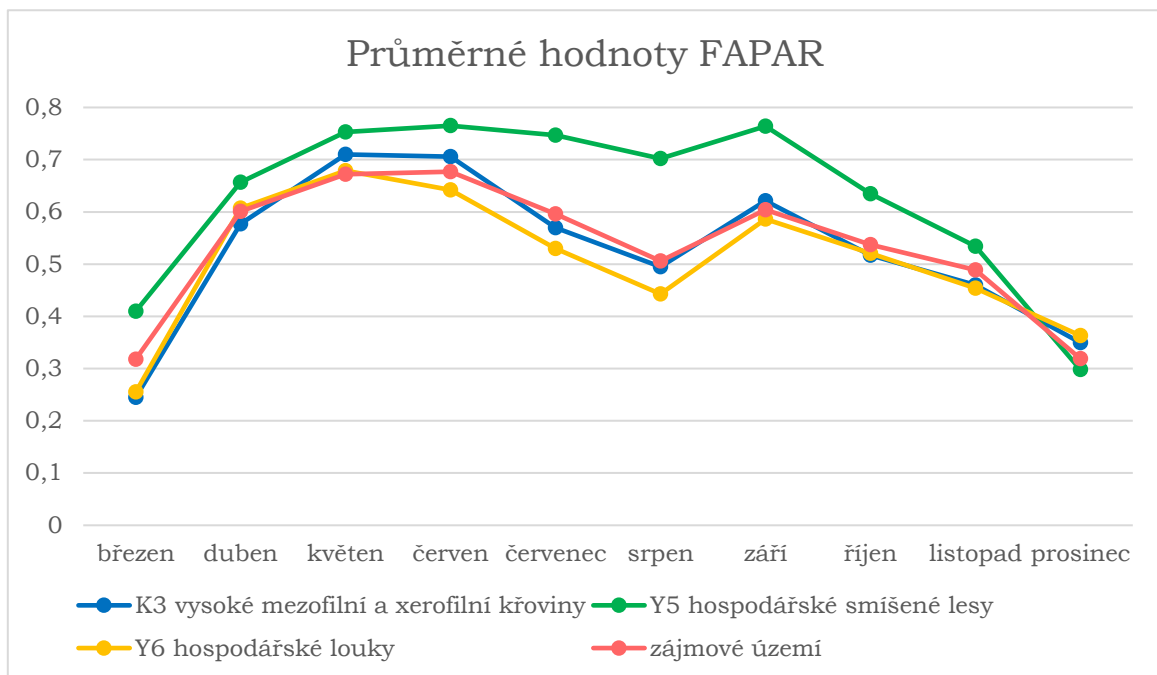
U hospodářských luk bylo dosaženo velmi podobných výsledků. Celkový počet pixelů v biotopu byl 199676, při rozlišení 20 metrů. Jako u předchozích biotopů, i zde byl zaznamenán podobný průběh hodnot v čase. Nejvyšších anomálií zde dosahoval algoritmus z BP. Nicméně v měsíci září je to pouze 0,001 % hodnot nacházejících se nad číslem jedna a 0,1 % hodnot pod číslem nula. Oproti zbylým třem metodám byl procentuální podíl daleko menší. V případě Goward a kol. (1994) se jednalo v měsíci září o 8 % hodnot vyšších než jedna a 0,3 % hodnot v záporných číslech. Podle Senna (2005) je průměrná hodnota FAPAR v průběhu roku pro deštné pralesy ve výšce 15 metrů 0,668.



Obrázek 22 Graf porovnání hodnot FAPAR pro vysoké mezofilní a xerofilní křoviny v roce 2018



Obrázek 23 Graf porovnání hodnot FAPAR pro hospodářské louky v roce 2018

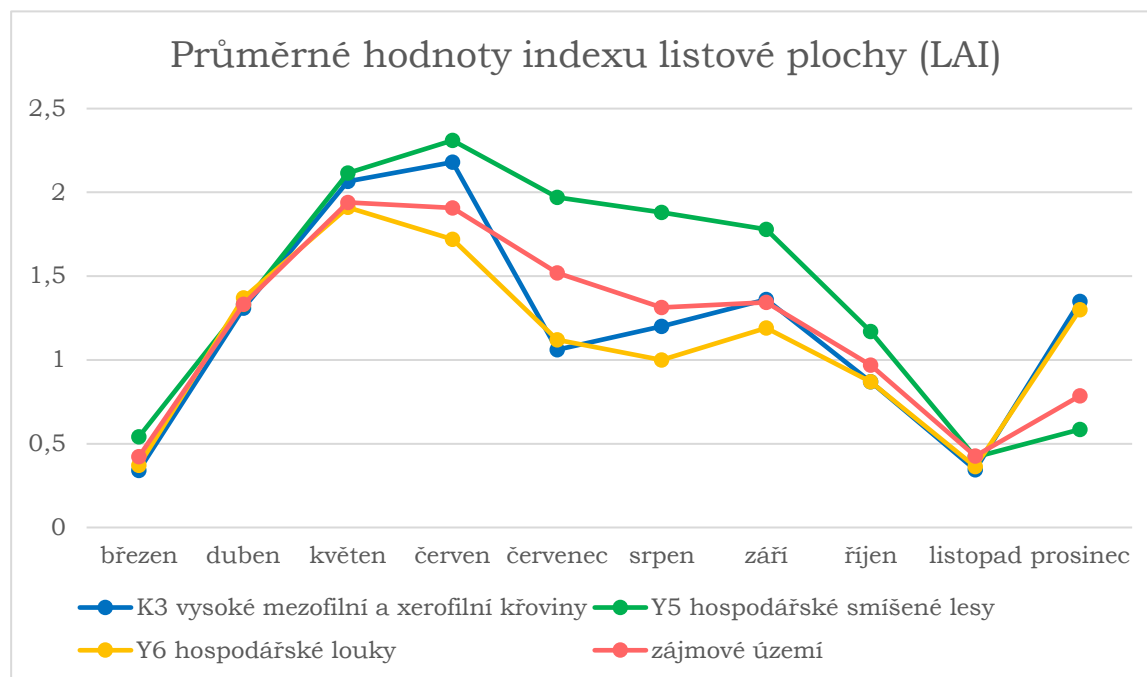


Obrázek 24 Průběh průměrných hodnot FAPAR získaných z *Biophysical Processor*

Jak již bylo zmíněno výše, nejvhodnějším algoritmem pro skupinu produkční ekosystémové funkce zaměřené na fotosyntézu, je algoritmus z nástroje *BP*. FAPAR je vhodné k určení dané funkce, jelikož indikuje složku vegetace, která je schopná fotosyntézy. Určení jako nejvhodnější je omezeno na testované časové období a zájmové území.

4.2.4 Leaf Area Index

LAI neboli index listové plochy byl vypočten stejným nástrojem jako FAPAR pomocí *Biophysical Processor*. Nástroj k výpočtu potřebuje jedenáct vrstev dat z družice Sentinel-2, které jsou uvedeny v kapitole (4.1.2). Podle Obrázku 25 lze říct, že průměrně největší hustotu olistění mají hospodářské smíšené lesy. U všech testovaných biotopů byl patrný nárůst do měsíce května a poté úbytek až do listopadu s maximálně jedním výkyvem v průběhu. Výsledek LAI má vztah ke klimatizační funkci. Díky hustotě olistění dokáže regulovat teplotu povrchu.



Obrázek 25 Průběh průměrných hodnot LAI

4.2.5 Zachycení PM₁₀

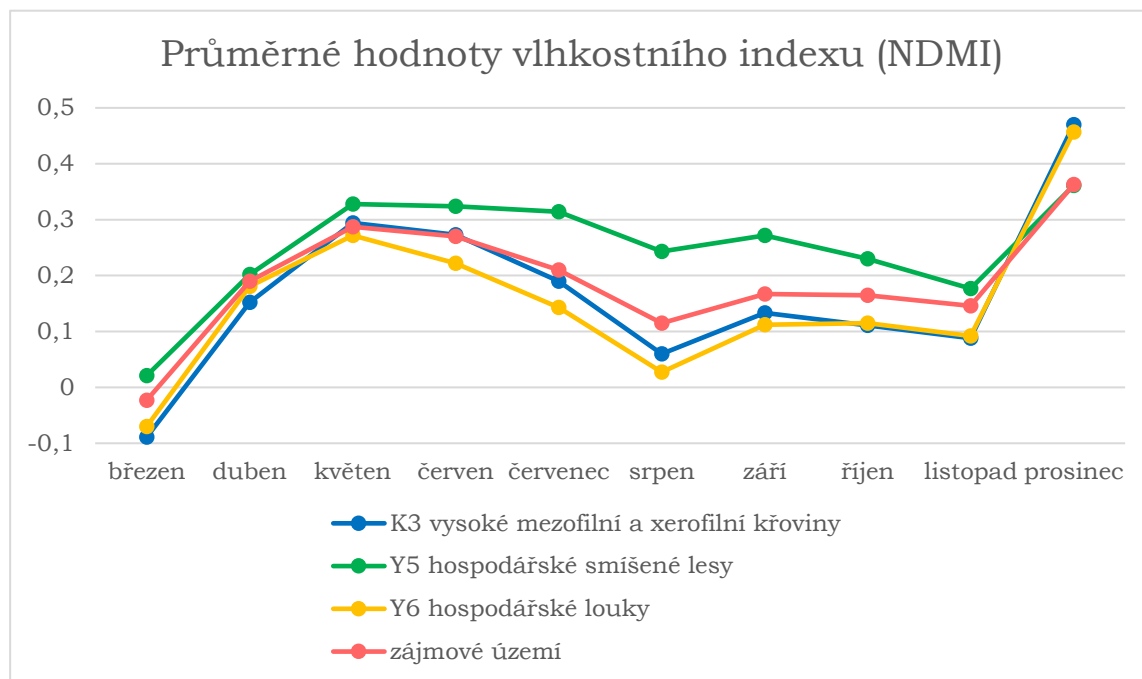
Z indexu LAI dále vycházel výpočet odstranění prachových částic PM₁₀ z ovzduší. Byl použit vztah (19). Kromě převzatých parametrů byly nastaveny následující proměnné: T=30 (počet dnů v měsíci), C=20 μg*m⁻³ (průměrná hodnota částic PM₁₀ v ovzduší, která byla získána z tabelárního přehledu ČHMÚ (http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2018_enh/pollution_overview/overview_PM10_CZ.html)), A=400 m² (plocha jednoho pixelu při rozlišení 20 metrů). Výsledný vztah byl upraven pro použití pro jeden měsíc a měl následující podobu:

$$TotalPM_{10} = 0,0064 * 20 * 30 * 24 * 3600 * LAI * 0,5 * 400 \quad (20)$$

Po proběhnutí výpočtu byla data v netradičním formátu jednotek a to g*400m⁻². Bylo nutné data převést na jednotky kg*ha⁻², což bylo provedeno pomocí *Raster Calculator*.

4.2.6 NDMI (NDWI)

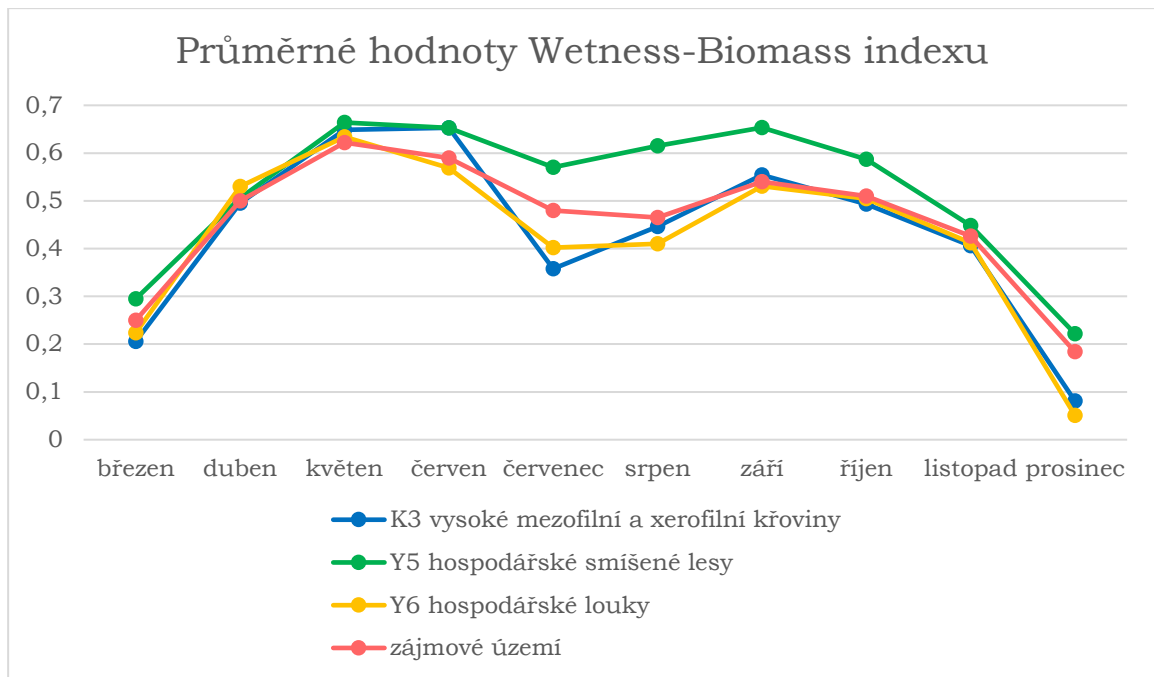
I vlhkostní index NDMI byl vypočítán nástrojem *Band Math* z programu SNAP. Výsledky indexu dokážou v jisté míře detekovat rostliny, které trpí vodním stresem. Index je dále citlivý na celkové množství vody obsažené v aktivním povrchu. Při porovnání hodnot NDMI v průběhu roku, největší vlhkost má vegetace na jaře. V létě a na podzim vlhkost klesá. Nárůst hodnot v prosinci je způsoben i místy vyskytující se sněhovou pokrývkou. Index lze použít k indikaci retence vody v krajině.



Obrázek 26 Průběh průměrných hodnot vlhkostního indexu NDMI

4.2.7 Wetness-Biomass

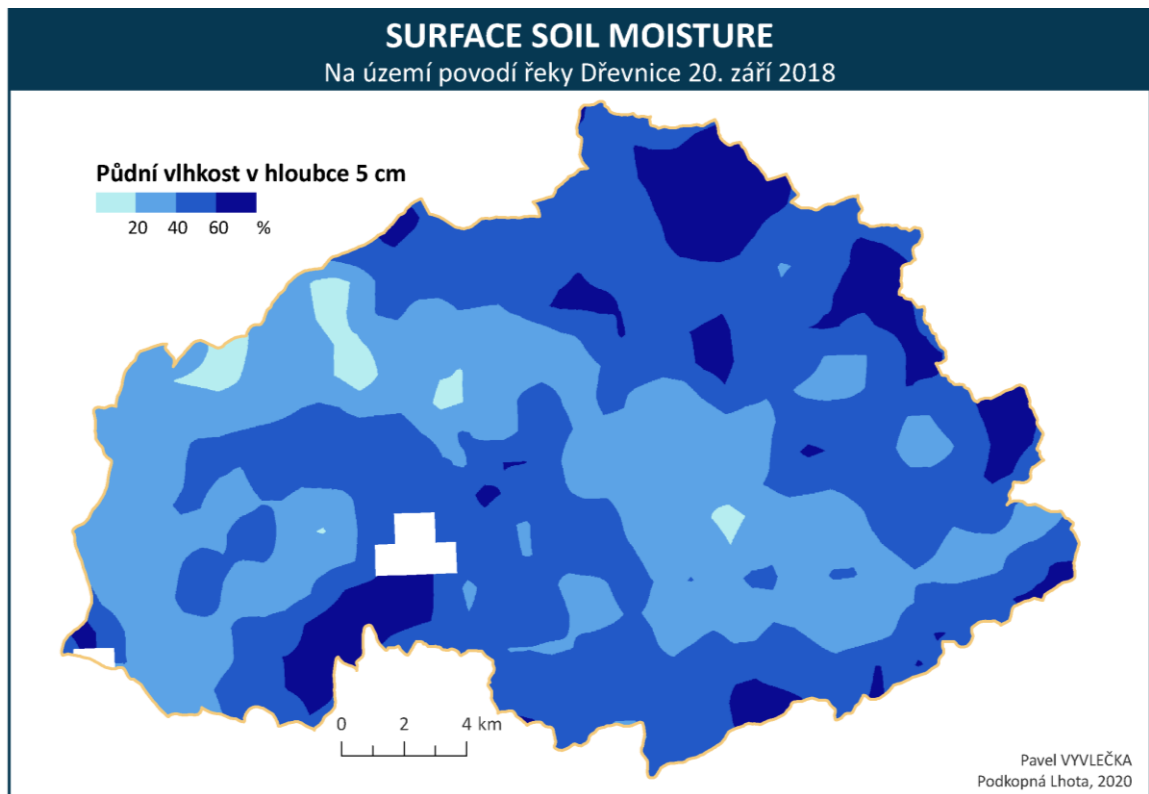
Podobně jako NDMI dokáže indikovat retenci vody v krajině. V kombinaci se zelenou biomasou dokáže k retenci vody detekovat i místa zdravé zelené vegetace. Díky dané kombinaci lze použít index ke stanovení produkční funkce (zelená biomasa) a retenci vody (vlhkost). Obrázek 27 ukazuje průběh hodnot WB indexu v průběhu roku. Průběh hodnot je podobný předchozím indexům, kde je patrný nárůst hodnot v květnu a poté mírný pokles. Hodnoty však znovu rostou v měsíci září a poté klesají až do prosince.



Obrázek 27 Průběh průměrných hodnot WB indexu

4.2.8 Surface Soil Moisture

Wagner a kol. (2009) uvádí, že určení vlhkosti půdy narušuje vliv drsnosti půdy a celkově přítomné vegetace. K dobrému určení vlhkosti půdy dochází pouze v malých měřítkách (25-50 Km). Při menším rozlišení dochází k redukci radarového šumu, a tedy lepších výsledků než v případě velkého rozlišení. Proto i Copernicus Global Land Service vytváří produkt SSM (*Surface Soil Moisture*), který je v rozlišení 1 Km. Data SSM byla stažena z portálu Land Service (www.land.copernicus.vgt.vito.be). Po stažení bylo nutné použít reprojekci (*reprojection*) na souřadnicový systém WGS UTM 33N. Data byla ořezána a poté spouštěna v programu QGIS, díky jednoduchému otevření NetCDF souborů. V QGIS proběhla konverze formátu na TIFF, se kterým bylo pracováno dále. V softwaru ArcGIS Desktop byla data převzorkována na 20 metrů, pomocí metody bilineární interpolace.

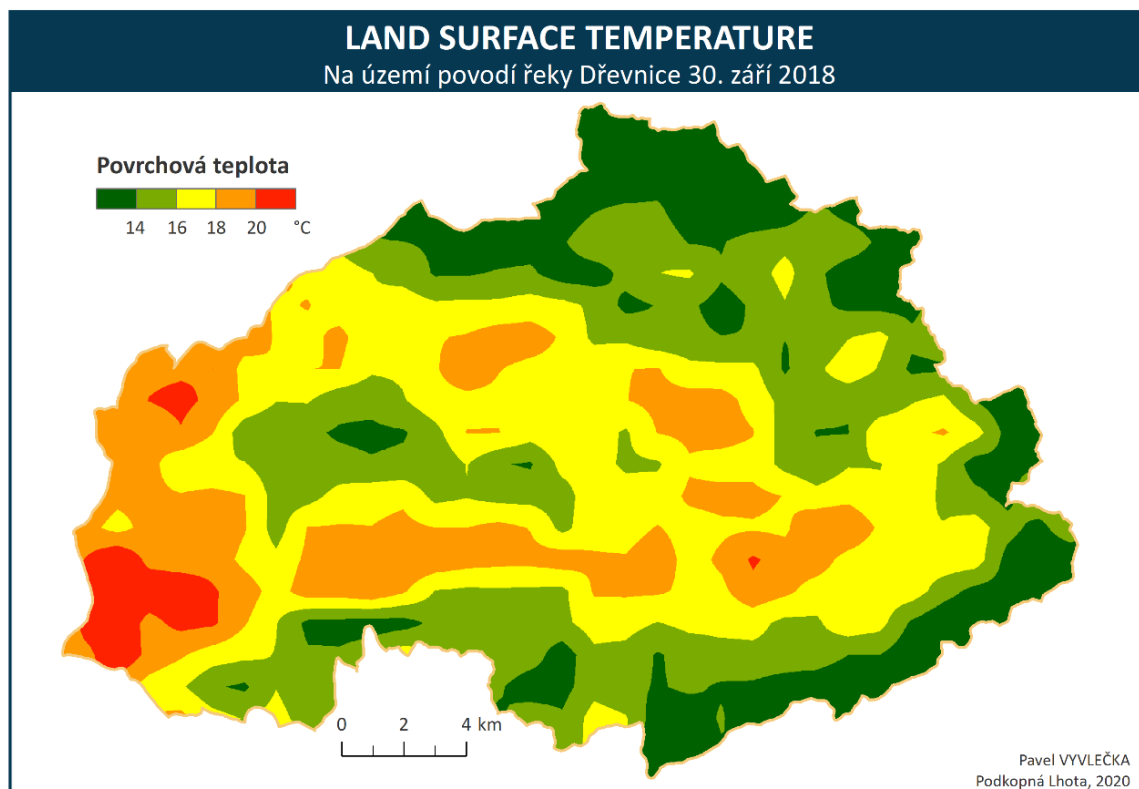


Obrázek 28 Surface Soil Moisture, převzorkováno na 20 metrů

4.2.9 Surface Temperature

U určení sluneční disipace je u dat Sentinel-2 problémem absence snímání v termální části spektra. Alternativou může být použití pásma B6 z družice Landsat 7, které má rozlišení 30 metrů. Pokud budeme uvažovat o družicích Sentinel, je možné použít data z družice Sentinel-3. Sentinel-3 SLSTR obsahuje v módu zpracování Level-2 teplotu povrchu v kelvinech o rozlišení 1 Km. Což je oproti datům z Landsatu daleko horší, nicméně v rámci použití dat Sentinel je jedinou volbou. Data Sentinel-3 byla stažena z portálu Open Acces Hub. Data jsou ve formátu NetCDF a stejně jako u SSM musela proběhnout reprojekce a ořezání. Následoval ořez do menšího rozsahu a převod na formát TIFF. V ArcGIS Desktop pak byla použita bilineární interpolace na rozlišení 20 metrů.

Data relativní povrchové teploty vstupují do výpočtu solární disipace, kde tvoří jednu kategorii, podle které jsou data klasifikována.



Obrázek 29 Teplota povrchu získaná z dat Sentinel-3, převzorkováno na 20 metrů

5 VÝSLEDKY

Celkem bylo otestováno 18 algoritmů, které mají potenciál identifikovat a kvantifikovat sedm ekosystémových funkcí. Testování probíhalo v období od března 2018 do prosince 2018 se zhruba měsíčním krokem mezi snímky. Kromě absolutní hodnoty v jednom časovém okamžiku byla zohledněna i křivka vývoje hodnoty. Na základě provedeného hodnocení byly pro každou z vybraných ekosystémových funkcí určeny nejvhodnější algoritmy pro její kvantifikaci.

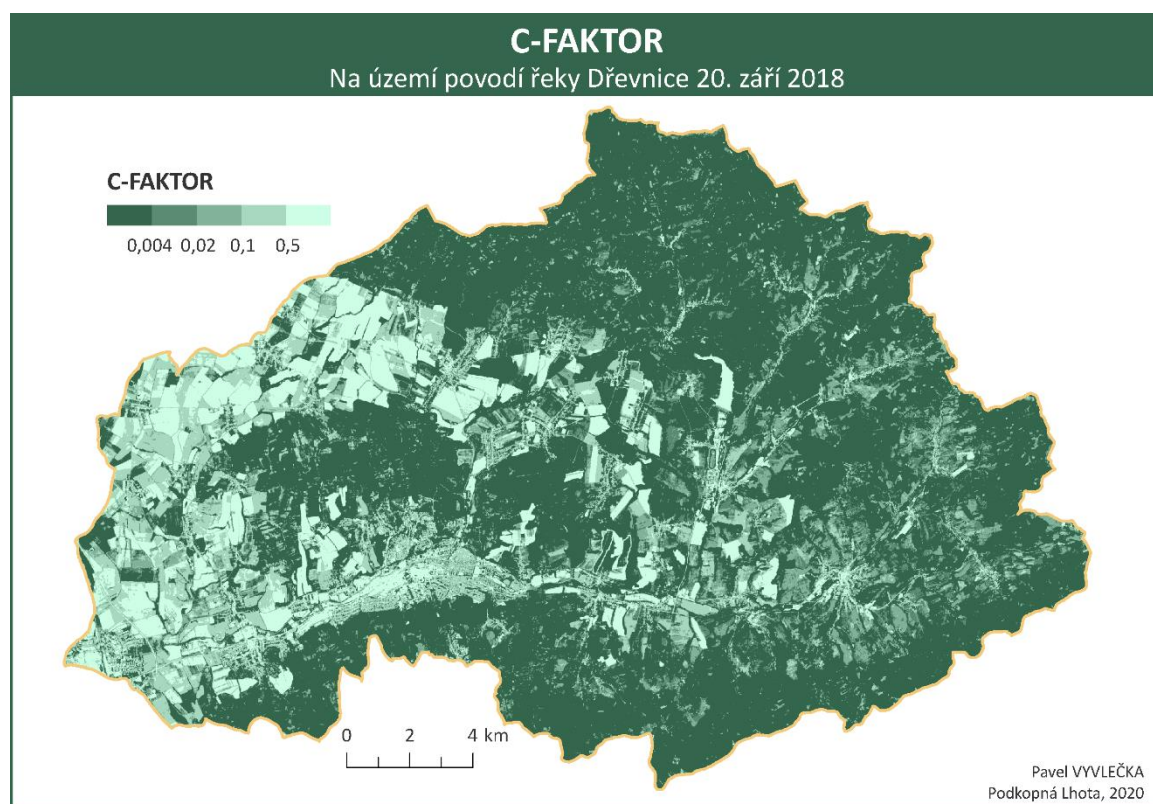
Tabulka 11 Vybrané algoritmy k určení ekosystémových funkcí

EKOSYSTÉMOVÁ FUNKCE	VHODNÝ ALGORITMUS	ZDROJ
Produkční funkce (sekvestrace uhlíku)	$ND45 = 128 \times \frac{B8 - B11}{B8 + B11} + 128$ $Biomasa \left(\frac{m3}{ha} \right) = -478,58 + 4,5041 \times ND45$ $Carbon = Biomasa \times 600 \times 0,5$	Goodeenough a kol., 2005
Protierozní funkce	$C = \exp \left(\frac{-2 \times NDVI}{1 - NDVI} \right)$	Knijff a kol., 1999
Kondenzační funkce	$WB = NDVI + WET$ $WET = 0.1509 \times B2 + 0.1973 \times B3 + 0.3279 \times B4 + 0.3406 \times B8 - 0.7112 \times B11 - 0.4572 \times B12$ $NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	Hesslerová a Pokorný, 2010
Vodoretěňní funkce	$NDMI = \frac{B8 - B11}{B8 + B11}$	Gao, 1996
Evapotranspirační funkce	11 vrstev z dat Sentinel-2 (LAI)	Biophysical Processor
Produkční funkce (fotosyntéza)	12 vrstev z dat Sentinel-2 (FAPAR)	Biophysical Processor
Regulační funkce	$TotalPM_{10} = 0,0064 * 20 * 30 * 24 * 3600 * LAI * 0,5 * 400$	Bottalico a kol., 2015

PROTIEROZNÍ FUNKCE

K určení protierozní funkce byl použit C-faktor, protože se jedná o index, který udává ochranu půdy před vodní erozí, kterou zajišťuje vegetační kryt. Konkrétní použitý algoritmus pro výpočet byl ze studie Knijff a kol. (1999). Hodnoty do 0,004 určují nejvyšší míru ochrany, zpravidla jsou to lesní porosty či křoviny. Hodnoty od 0,004 do 0,02 určují vysokou míru ochrany, která je charakteristická křovinami či vysokou trávou. Střední míru ochrany zajišťují louky s nižší vegetací, které mají hodnoty C-faktoru od 0,02 do 0,1. Hodnoty, které jsou v rozmezí 0,1 až 0,5 se vyznačují menší ochranou půdy, zejména zemědělské nebo zastavěné oblasti. Nejmenší nebo žádnou ochranu půdy mají zemědělské oblasti bez vegetace (holá půda), kde jsou hodnoty vyšší než 0,5. Z mapy (Obrázek 30) lze jednoduše určit oblasti s vysokou a nízkou mírou ochrany půdy před vodní erozí. Největší ochranu půdy proti vodní poskytovaly listnaté lesy s průměrnou hodnotou C-faktoru 0,004. Následovaly smíšené lesy s průměrnou hodnotou 0,006.

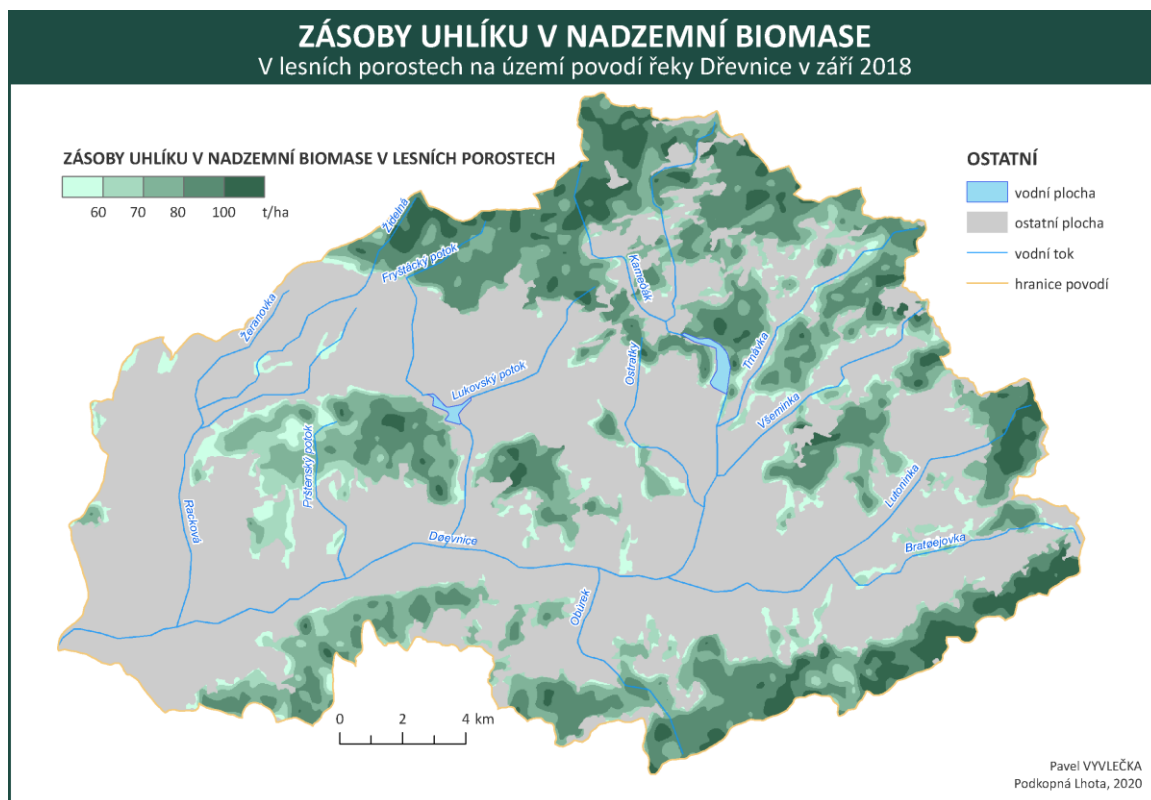
Naopak nejmenší ochranu půdy před vodní erozí byly zaznamenány u průmyslových a obchodních areálů, kde byla průměrná hodnota 0,465. Druhou nejmenší ochranu půdy poskytovala orná půda mimo zavlažovacích ploch s průměrnou hodnotou 0,339.



Obrázek 30 C-faktor získaný metodou Knijff a kol. (1999)

PRODUKČNÍ FUNKCE (SEKVESTRACE UHLÍKU)

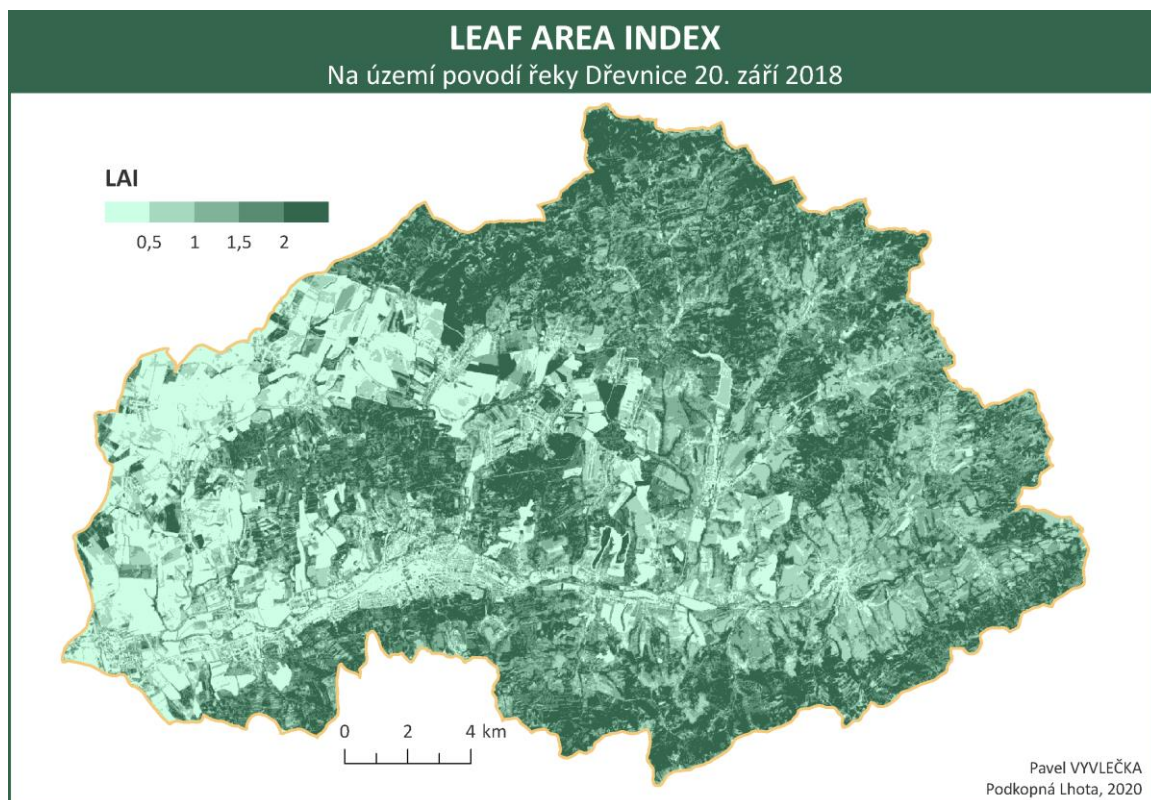
Pro zásobu nadzemní biomasy a poté uhlíku v nadzemní biomase byl použit algoritmus ze studie Goodenough a kol. (2005). Algoritmus je určený pouze pro lesní ekosystémy a není vhodné ho používat pro výpočet biomasy pro jiné typy ekosystémů. Zásoba uhlíku určuje sekvestraci uhlíku, která vzniká při fotosyntéze a váže do rostlin uhlík. Co se týče prostorového rozložení, nejvíce uhlíku vážou lesy na severu povodí v oblastech Hostýnských vrchů a v jihovýchodní části povodí v oblasti Vizovických vrchů. Méně uhlíku v nadzemní biomase sekvestrují lesy kolem města Zlín (Obrázek 31). Celková zásoba uhlíku v nadzemní biomase pro povodí řeky Dřevnice v září 2018 byla 1 389 tisíc tun při použití metody Goodenough a kol. (2005). Udaná zásoba platí pouze pro třídy CLC 311, 312 a 313, což jsou lesy. Průměrně nejvíce uhlíku bylo obsaženo v jehličnatých lesech o hodnotě 81,04 t.ha⁻¹. Druhou největší průměrnou hodnotu dosahovaly smíšené lesy o 78,07 t.ha⁻¹ s minimálním odstupem od listnatých lesů s hodnotou 78,03 t.ha⁻¹. Nejmenší množství biomasy obsahovala silniční a železniční síť s přilehlými prostorami o hodnotě 24,23 t.ha⁻¹. Jak již bylo zmíněno, metoda je vhodná pro určování pouze lesní biomasy a dá se předpokládat, že daná hodnota je mylná. Vycházelo se z výpočtu nadzemní biomasy a pro přepočítání na uhlík byl použit koeficient 0,5. Zásoba uhlíku je proto vhodná k určení produkční funkce (sekvestrace uhlíku).



Obrázek 31 Zásoby uhlíku získané metodou Goodenough a kol. (2005)

EVAPOTRANSPIRAČNÍ FUNKCE

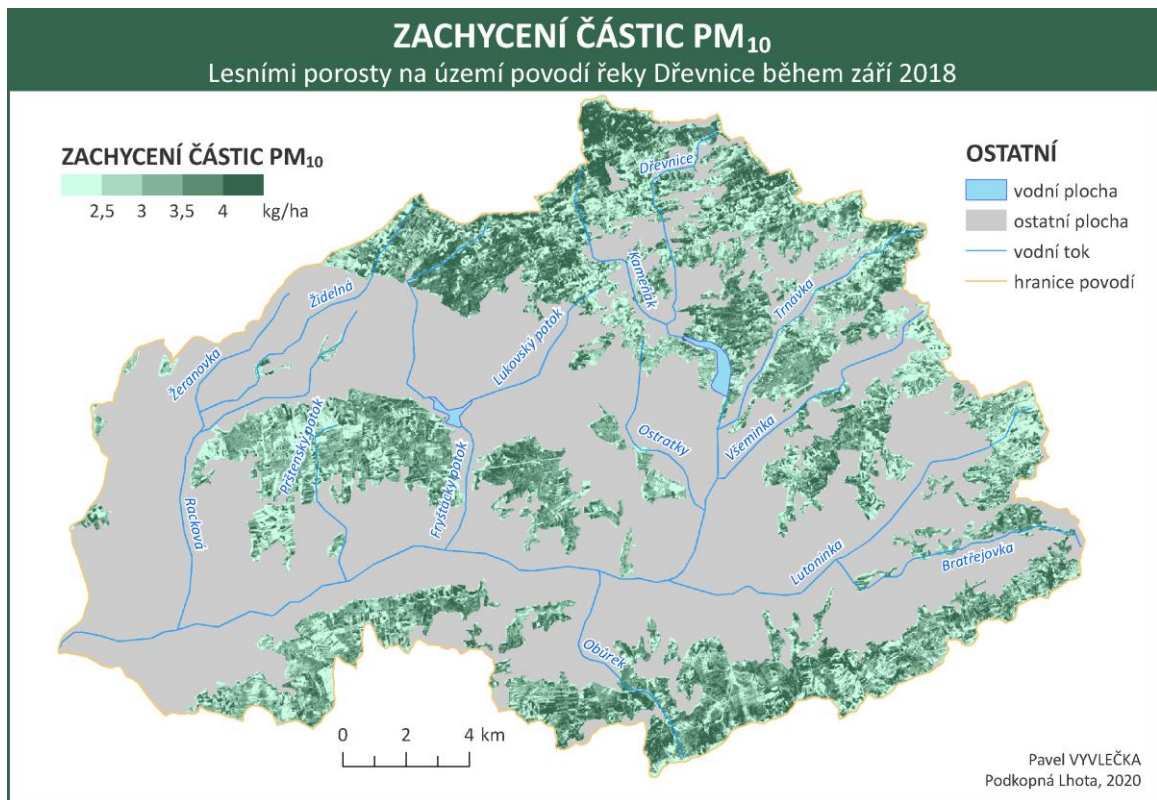
Index listové plochy je důležitý parametr, který má vazbu na další, jako je FAPAR a fotosyntéza, sekvestrace uhlíku, intercepce srážek, regulace ovzduší a klimatizační funkce. Díky vyšší hodnotě LAI dochází k ochlazení povrchu v letních a tropických dnech a nedochází k přílišnému vysušování půdy. Proto je vhodné tento index použít ve spojení s evapotranspirační funkcí. Hodnoty LAI se pohybují v kladných číslech. Nejmenší hodnoty značí vegetaci s řídkým porostem (nízké olistění), vyšší hodnoty značí hustou vegetaci (vysoké olistění). Nejvyšší průměrné hodnoty LAI byly zaznamenány u listnatých lesů o hodnotě 2,096. Druhou nejvyšší průměrnou hodnotu dosahovaly smíšené lesy o hodnotě 1,925. Třetí nejvyšší hodnotu zaznamenala třída přechodového stádia lesa a křovin s hodnotou 1,753. Hodnota LAI u jehličnatého lesu byla mírně nižší (1,716), což může do jisté míry značit jeho zdravotní stav, jelikož jehličnaté lesy daného území jsou napadeny kůrovcem. Nejmenší hodnoty LAI byly zaznamenány u silniční a železniční sítě s přilehlými prostory o hodnotě 0,528 (Obrázek 32).



Obrázek 32 Hodnoty LAI pro povodí řeky Dřevnice

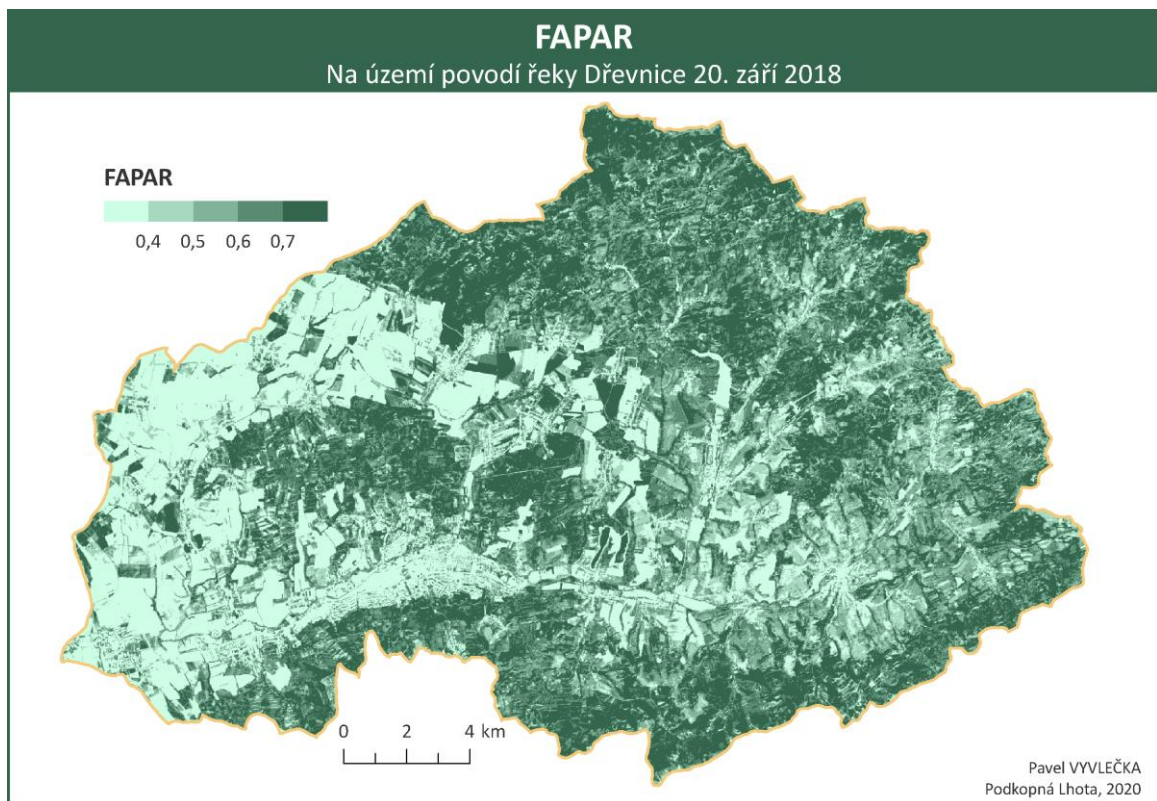
REGULAČNÍ FUNKCE

Návaznost na LAI má i regulace ovzduší pomocí zachycování prachových částic PM_{10} . Jedná se o polétavé prachové částice o velikosti menší než $10 \mu m$, které mají negativní vliv na lidský organismus a ostatní živé organismy. Algoritmus pro výpočet zachycení částic z ovzduší je ovšem platný pro lesní ekosystémy stejně jako algoritmus pro určení nadzemní biomasy. Celkové množství zachycených částic PM_{10} z ovzduší v září 2018 lesními porosty bylo 56,05 tun. Největší průměrné zachycení měly listnaté lesy o hodnotě $3,48 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Smíšené lesy zachytily $3,19 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ a nejméně zachytily jehličnaté lesy o průměrné hodnotě $2,84 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Obrázek 33). Na mapě lze rozlišit lesní porosty s větším a menším potenciálem pro zachycení prachových částic PM_{10} , tím pádem i vyšší a nižší potenciál regulační funkce.



Obrázek 33 Hodnoty zachycení částic PM₁₀ lesními porosty

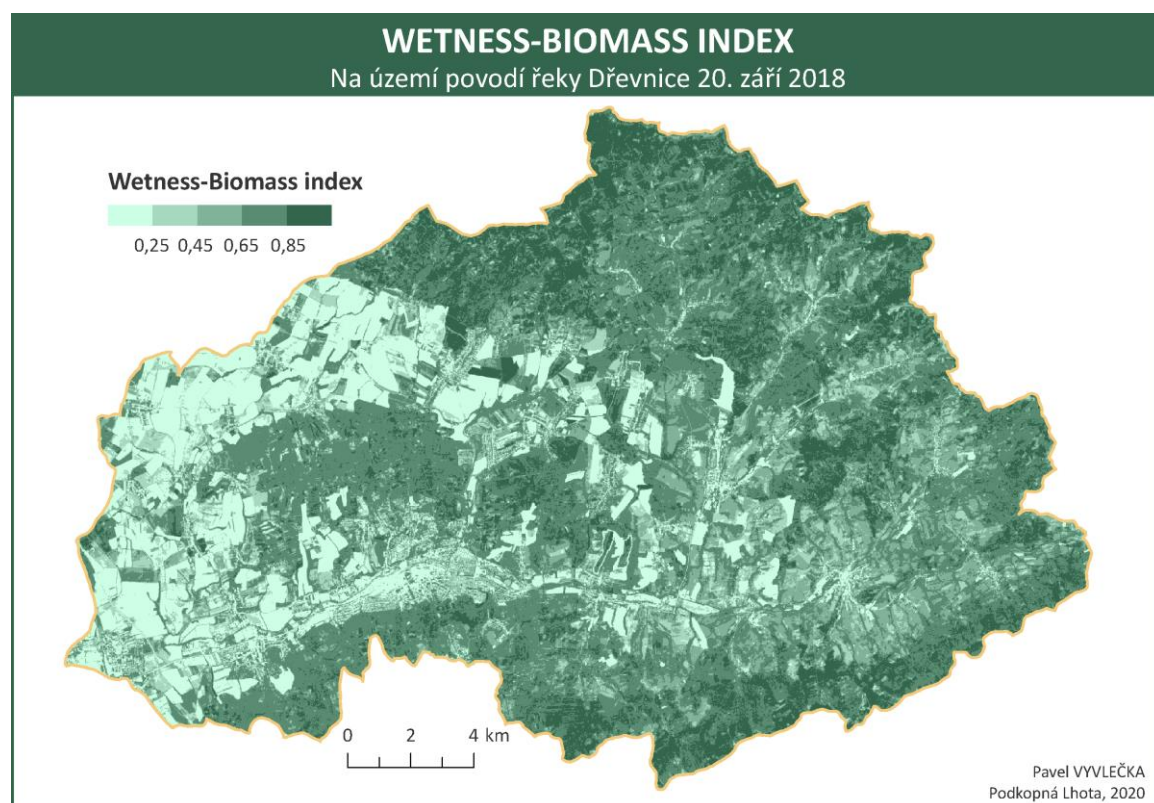
PRODUKČNÍ FUNKCE (FOTOSYNTÉZA)



Obrázek 34 Hodnoty FAPAR pro povodí řeky Dřevnice

Podíl fotosynteticky aktivní složky vegetace může odhalit zdravotní stav vegetace. Detekuje složky vegetace, která je schopná fotosyntézy. V zájmovém území lze jako v předchozích případech byly rozpoznány části území pokryté lesními ekosystémy, a naopak zemědělské oblasti. Nejvyšších průměrných hodnot v povodí řeky Dřevnici dosahovaly listnaté lesy, jejichž hodnota byla v září 0,719. Druhou nejvyšší průměrnou hodnotu měly smíšené lesy. Průměrná hodnota byla 0,682, což předčilo přechodová stádia lesa a křovin, kde byla průměrná hodnota 0,646. Jehličnaté lesy měly průměrnou hodnotu 0,635 a jak bylo zmíněno u indexu listové plochy, i tohle může mít za příčinu kůrovcová kalamita. Nejmenší hodnotu měly průmyslové a obchodní areály, které měly 0,264. Druhou nejmenší průměrnou hodnotu (0,299) měla silniční a železniční síť s přilehlými prostory (Obrázek 34). Hodnoty indexu se díky vztahu k fotosynteticky aktivní složce vegetace hodí pro určení regulační funkce (fotosyntéza).

KONDENZAČNÍ FUNKCE

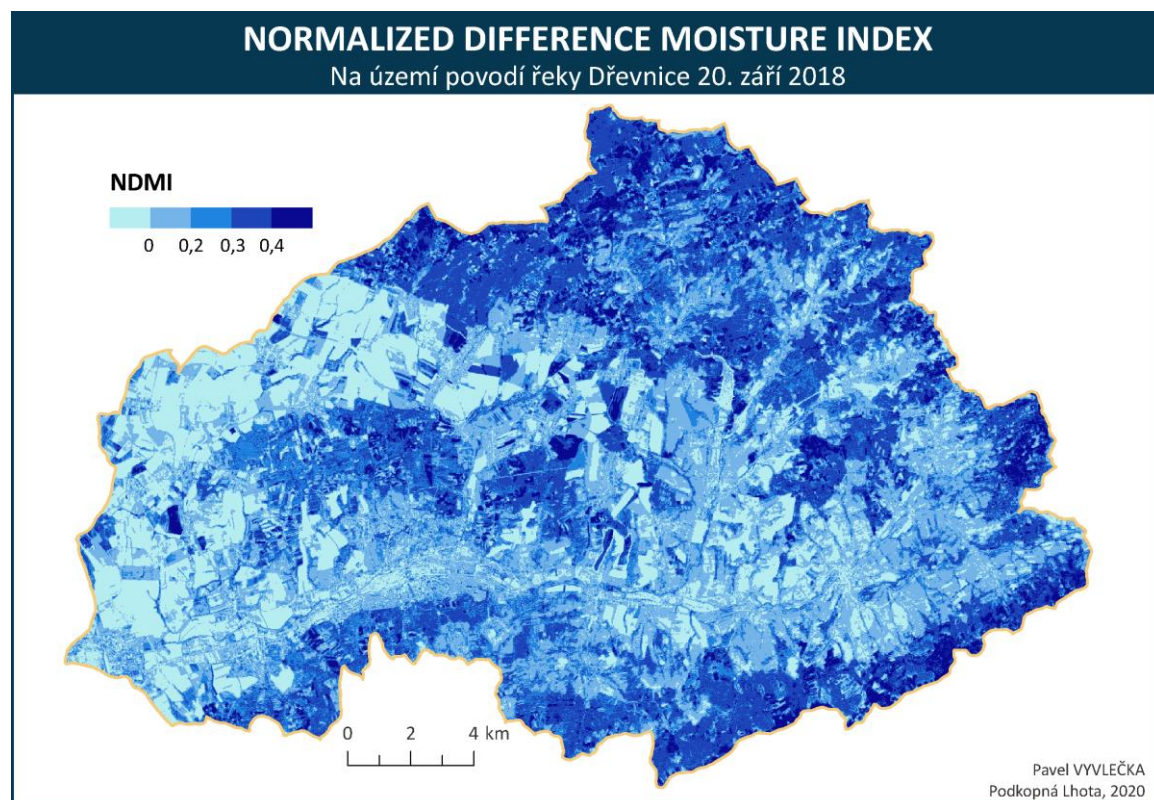


Obrázek 35 Wetness-Biomass index na území řeky Dřevnice

Wetness-Biomass je spojením množství zelené biomasy a vlhkosti v krajině do samostatného indexu. Standardně se používá pro klasifikaci území podle disipace sluneční energie. Společně v kombinaci s povrchovou teplotou pomocí krosklasifikační analýzy. Nicméně jak bylo zmíněno, Sentinel-2 nesnímá povrch v tepelné části spektra a nemá informace o teplotě povrchu. Proto byl index použit samostatně. Hodnoty jsou rozmístěny v rozmezí zhruba od -1 do 2. Nejmenší hodnoty značí povrchy s malým množstvím zelené biomasy a malou vlhkostí, vyšší hodnoty poté velké množství zelené biomasy a vysokým vodním obsahem. Nejvyšší průměrnou hodnotu WB indexu měly listnaté lesy (0,816). Následovaly smíšené lesy o průměrné hodnotě 0,807 a jehličnaté

lesy s průměrnou hodnotou 0,785. Nejmenších hodnot dosahovaly průmyslové a obchodní areály s hodnotou 0,270. Orná půda mimo zavlažovacích ploch dosáhla druhého nejhoršího výsledku, a to 0,291 (Obrázek 35). Díky zaměření indexu na zelenou biomasu a vlhkost se hodí pro určení kondenzační funkce. Ta zahrnuje například podporu malého vodního cyklu.

VODORETENČNÍ FUNKCE



Obrázek 36 Vlhkostní index NDMI pro povodí řeky Dřevnice

Výsledek indexu NDMI je používán k odhalení vodního stresu ve vegetaci. V návaznosti na to je index vhodný pro stanovení vodoretěňní funkce. Vodní stres může být u rostliny způsoben právě nedostatkem vody v půdě, proto je NDMI používán k určení dané funkce. Hodnoty indexu se pohybují v rozmezí -1 až 1. Největší průměrnou hodnotu NDMI v povodí řeky Dřevnice obsahovaly jehličnaté lesy. Hodnota byla 0,314 což značí vysoký podíl vegetace s minimálním nebo velmi malým vodním stresem. Podobné průměrné hodnoty měly i smíšené lesy (0,303) a listnaté lesy (0,295). CLC třída luk měla průměrné hodnoty 0,082, což ukazuje průměrný vodní stres. Největší vodní stres podle NDMI dosahovaly třídy silnic a železnic s přilehlými prostory a skládky, kde byla výsledná hodnota -0,014.

Všechny hodnoty identifikátorů byly sepsány do souhrnné tabulky (Tabulka 12). Lze tak mezi jednotlivými třídami CLC 2018 porovnat hodnoty dosažených výsledků. Nejmenší průměrné hodnoty identifikátorů dosahovaly třídy CLC 2018 pro silniční a železniční síť a přilehlé prostory, skládky, průmyslové a obchodní areály a orná půda mimo zavlažovacích ploch. Průměrně právě ve zmíněných třídách bylo velmi malé množství zelené biomasy, indexu listové plochy i vlhkosti. Nedostatek biomasy a vlhkosti neumožňuje daným typům ekosystémům provádět základní ekosystémové funkce a dochází k jejich degradaci. Oblasti mají deficit v klimatizační funkci (bez vegetace dochází k přehřívání povrchů), retenci vody (dochází k rychlému povrchovému odtoku a výparu), ochraně před vodní erozí, zachycení prachových částic z ovzduší, udržení biodiverzity v krajině. Průměrně největší hodnoty identifikátorů byly dosaženy pro listnaté, jehličnaté a smíšené lesy. Zjednodušeně tak může být řečeno, že právě tyto typy ekosystémů mají největší potenciál tvorby a udržení ekosystémových funkcí. Obsahují velké množství biomasy a uhlíku a pokud jsou porosty zdravé a bez vodního stresu mají také vyšší hodnoty vlhkosti, FAPAR a LAI. Díky kombinaci vyšších hodnot daných kvantifikátorů dochází k retenci vody v krajině a tím i zvýšená půdní vlhkost oproti holé půdě. Zdravá lesní vegetace prospívá taktéž k udržení vodního cyklu nebo jako klimatizační funkce při letních a tropických dnech. GCOS (*Global Climate Observing System*) sestavil 50 nezbytných klimatických proměnných, které slouží k charakteristice klimatu na Zemi. Mezi těchto 50 indikátorů je zařazeno také LAI, FAPAR, nadzemní biomasa, uhlík, vlhkost půdy nebo teplota povrchu půdy (GCOS, 2020).

Tabulka 12 Průměrné hodnoty funkcí ekosystémů pro třídy CLC 2018 v září 2018

PRŮMĚRNÉ HODNOTY VYBRANÝCH FUNKCÍ EKOSYSTÉMŮ ZÍSKANÝCH Z DRUŽICOVÝCH DAT SENTINEL-2 A SENTINEL-1										
Kód CLC	Třída CLC 2018	Nadzemní biomasa (t.ha ⁻¹)	Uhlík (t.ha ⁻¹)	C-faktor	FAPAR	LAI	Zachycení PM ₁₀ (kg.ha ⁻¹)	WB	NDMI	Vlhkost půdy (%)
112	Městská nesouvislá zástavba	-	-	0,183	0,419	0,884	-	0,456	0,086	41,234
121	Průmyslové a obchodní areály	-	-	0,465	0,264	0,584	-	0,270	0,020	41,554
122	Silniční a železniční síť a přilehlé prostory	-	-	0,251	0,299	0,528	-	0,343	-0,014	32,328
132	Skládky	-	-	0,321	0,322	0,660	-	0,296	-0,014	25,377
141	Plochy městské zeleně	-	-	0,080	0,550	1,332	-	0,629	0,163	-
142	Zařízení pro rekreaci a sport	-	-	0,111	0,513	1,426	-	0,590	0,139	36,744
211	Orná půda mimo zavlažovacích ploch	-	-	0,339	0,323	0,769	-	0,291	0,004	33,376
222	Ovocné sady a keře	-	-	0,039	0,511	1,159	-	0,592	0,083	37,414
231	Louky	-	-	0,026	0,537	1,159	-	0,591	0,082	39,752
242	Komplexní systémy kultur a parcel	-	-	0,024	0,590	1,379	-	0,659	0,167	47,029
243	Převážně zemědělské území s příměsí přirozené vegetace	-	-	0,029	0,580	1,378	-	0,654	0,142	43,189
311	Listnaté lesy	156,071	78,035	0,004	0,719	2,096	3,48	0,816	0,295	50,592
312	Jehličnaté lesy	162,088	81,044	0,008	0,635	1,716	2,84	0,785	0,314	56,602
313	Smišené lesy	156,157	78,079	0,006	0,682	1,925	3,19	0,807	0,303	52,165
324	Přechodová stádia lesa a křovin	-	-	0,011	0,646	1,753	-	0,760	0,271	51,896

Souhrnné hodnocení ekosystémových funkcí

Souhrnné hodnocení ekosystémových funkcí (Obrázek 37) proběhlo pouze třídy CLC 311, 312 a 313, tj. pro lesní porosty. Některé kvantifikátory funkcí jsou určeny pouze pro lesní porosty a v jiných typech ekosystémů by měly nesprávné hodnoty. Proto byla zvolena možnost určit potenciální hodnotu ekosystémových funkcí pouze pro lesy. Výsledný potenciál byl počítán následujícím způsobem:

1. Všechny kvantifikátory (Tabulka 11) byly ořezány podle tříd CLC 311, 312 a 313
2. Kvantifikátory byly reklasifikovány do pěti tříd. Kvantilová metoda reklasifikace byla vybrána podle Hesslerová a Pokorný (2010), kdy do každé třídy spadalo zhruba 25 % pixelů. Nové hodnoty byly udělovány od nuly do čtyř. První třídě byla přiřazena hodnota nula (nejmenší potenciál ekosystémové funkce), druhá třída měla hodnotu jedna (malý potenciál EF), třetí třídě byla přiřazena hodnota dva (průměrný potenciál EF), čtvrtá třída měla hodnotu tři (vysoký potenciál EF) a pátá třída měla hodnotu čtyři (nejvyšší potenciál EF).
3. Pouze jeden identifikátor nebyl reklasifikován způsobem podle kvantilu, ačkoli přiřazení hodnot už bylo provedeno stejným způsobem. Jednalo se o C-faktor, pro který byla použita reklasifikace podle Dragicevic a kol. (2011). Reklasifikační meze byly určeny na 0,004; 0,02; 0,1; 0,5.
4. Po reklasifikaci byly hodnoty sečteny pomocí *Raster Calculator* do výsledného rastru (Obrázek 33).
5. Výsledný rastr byl klasifikován na osm tříd potenciálu ekosystémových funkcí (Tabulka 13)

Tabulka 13 Třídy potenciálu ekosystémových funkcí

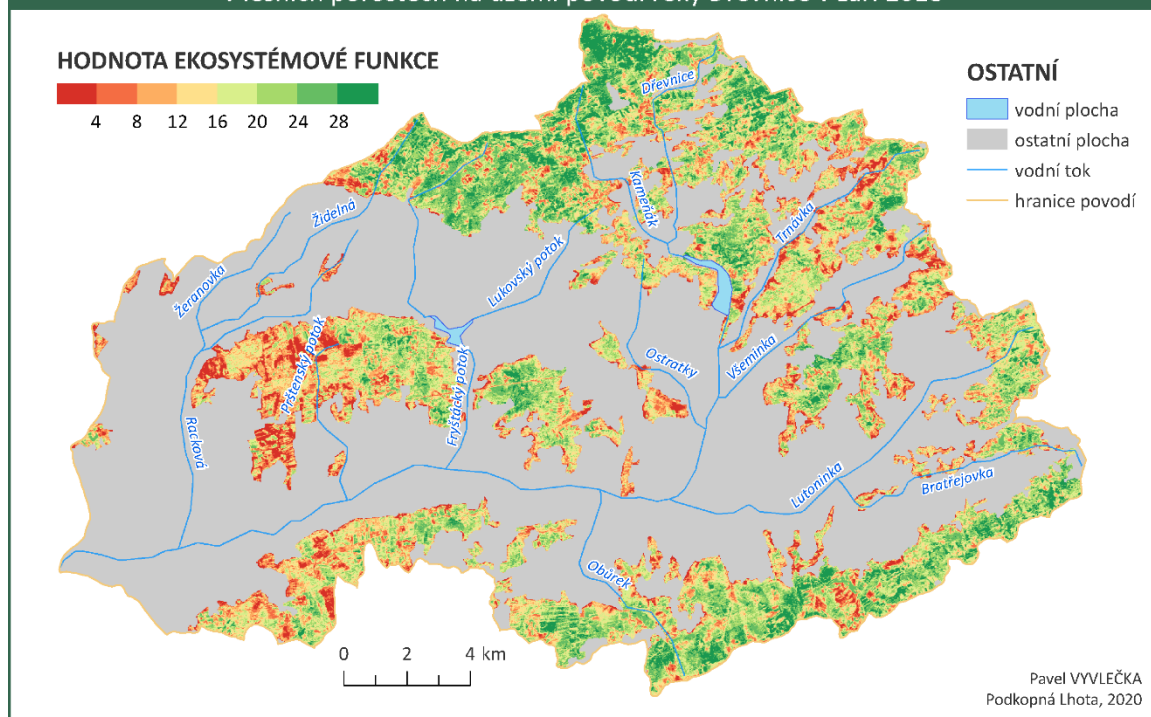
Hodnota rastru	Potenciál hodnoty ekosystémových funkcí
28 a vyšší	mimořádný
24 až 27	velmi vysoký
20 až 23	vysoký
16 až 19	průměrný nebo mírně vyšší
12 až 15	průměrný nebo mírně nižší
8 až 11	malý
4 až 7	velmi malý
menší než 4	téměř žádný

Mapa souhrnného hodnocení ukazuje podle vybraných kvantifikátorů potenciál hodnoty ekosystémových funkcí daného pixelu (Obrázek 37). Při porovnání s RGB snímky lze určit, že třídy s potenciálem velmi malým nebo téměř s žádným, jsou buď:

- Louky klasifikovány jako les,
- holiny po těžbě,
- široké lesní cesty nebo místa kde vedou sítě vysokého napětí.

Co se týče prostorového zhodnocení, největší potenciál ekosystémových funkcí mají lesy Hostýnských vrchů s částmi lesů Vizovických vrchů v jihovýchodní části území.

POTENCIÁLNÍ HODNOTA EKOSYSTÉMOVÝCH FUNKCÍ v lesních porostech na území povodí řeky Dřevnice v září 2018



Obrázek 37 Potenciální hodnota ekosystémových funkcí

6 DISKUZE

Při výběru satelitních snímků pro stažení bylo vhodné vybrat snímky zpracované v nejvyšším levelu zpracování. Snímky Level-2A jsou nejvyšším možným zpracováním, které je poskytováno pro Sentinel-2. Jsou pro něj provedeny atmosférické korekce a snímek disponuje reflektancí BoA (*Bottom-of-Atmosphere*). Urychlila se tím práce s daty, protože pokud by bylo použito zpracování Level-1C a korekce byly provedeny nástrojem *Sen2Cor*, bylo by dosaženo stejného výsledku jako pro Level-2A s vyšší časovou náročností. Pro Level-2A poskytovaný z portálu Copernicus Open Access Hub je totiž použit stejný nástroj. Co se týče výběru snímků za jednotlivé měsíce, hlavním kritériem byla minimální oblačnost na snímku. Druhým kritériem bylo téměř stejné časové rozmezí mezi vybranými snímky. Byla tedy brána větší váha na hlavní kritérium a pokud byl použitelný jediný snímek v určitém měsíci, tak byl vybrán.

U zpracování byla data převzorkována na 20 metrů. Aby tak mohlo být docíleno výpočtu vegetačních indexů, které vycházely ze spektrálních pásem o rozlišení 10 nebo 20 metrů. Spektrální pásma o rozlišení 60 metrů nebyly použita, tudíž nebylo nutné vzorkovat na ještě menší rozlišení. Pouze pro C-faktor bylo použito rozlišení 10 metrů, protože vycházel z pásem dostupných v 10 metrech, aby nedocházelo zbytečně ke zmenšení informace z původních spektrálních pásem. Největším nepřítelem v této části práce byla časová náročnost a také místo na disku, kvůli velkému množství dat.

V testovací části byly srovnány tři sady algoritmů. První sloužil pro výpočet biomasy v zájmovém území. Podle rešerše bylo zjištěno, že algoritmy pro výpočet biomasy a uhlíku je vhodné použít pouze pro lesní porosty. Hodně záleží ovšem i na nastavení parametrů vstupujících do výpočtů. Metody pro výpočty biomasy a uhlíku na stejném zájmovém území prováděl v bakalářské práci Stržínek (2016). Autor srovnával metody, které využívaly i jiná data než multispektrální snímky. V mé diplomové práci jsou srovnány pouze metody využívající data Sentinel-2. Nejlepší odhad biomasy dosáhl algoritmus Goodenough a kol. (2005), který byl nejvhodnější v obou případech. Při srovnání metod stanovení C-faktoru hrálo největší roli nepřekročení hraniční meze nula do záporných hodnot a nejvyšší aproximace k referenčním hodnotám. Podle zmíněného uvážení byl vybrán algoritmus z metody Knijff a kol. (1999). Podobné požadavky na výběr měl i algoritmus pro výpočet FAPAR.

Při porovnání expertních hodnot s hodnotami získanými z dat DPZ je nutné brát v úvahu pár souvislostí. Expertní určení hodnot uhlíku v biotopech probíhalo v rámci let od roku 2010, kde byla brána průměrná hodnota. Aktuální hodnota získaná z dat DPZ je odlišná, kde může hrát roli více činitelů, jako vývoj vegetace nebo kůrovcová kalamita v zájmovém území. Dalším faktorem může být rozlišení dat. Při rozlišení 20 metrů nelze vhodně zobrazit heterogenitu v daném pixelu. Expertní hodnoty jsou získávány přesně z daného biotopu tzv. reprezentativními vzorky. Při rozlišení dat DPZ tak může docházet k průměrování hodnot, kdy pixel bude z poloviny tvořen travním porostem a z druhé poloviny lesním porostem.

Po testování byly k jednotlivým indexům přiřazeny ekosystémové funkce. Některé funkce však nelze pouze z družicových dat určit úplně, a tak jsou nahrazeny bezrozměrnou jednotkou, kterou může být vegetační, či vlhkostní index. Co se týče vybraných bezrozměrných jednotek, jedná se o velmi důležité kvantifikátory kvality životního

prostředí (FAPAR, LAI, NDMI, C-faktor, sluneční disipace). Některé kvantifikátory nelze pouze z dat Sentinel-2 vypočítat. Prvním případem může být sluneční disipace. Výpočet probíhá pomocí krosklasifikační analýzy mezi pěti kategoriemi teploty povrchu a pěti kategoriemi wetness-biomass indexu. Problémem je absence snímání v termální části spektra u družic Sentinel-2. Mírnou kompenzací může být snímání v termálním spektru u družice Sentinel-3 za cenu prostorového rozlišení, které je 1 kilometr. V takovém případě je nesmyslné používat data o tak malém měřítku s daty o vysokém rozlišení. Pokud ovšem budeme brát v úvahu pouze data z družic Sentinel, jiná možnost není. Alternativou k použití termálního pásma ze Sentinel-3 je pásmo B10, B11 z družice Landsat 8, která jsou dostupná v rozlišení 100 metrů. Nejlepší alternativou, co se týče rozlišení, je pásmo B6 z družice Landsat 7, které je sice nasnímáno v rozlišení 60 metrů, ale postprocessingem převzorkováno na 30 metrů. Úskalím daného problému je jiná perioda obletu pro Landsat (16 dnů) a pro Sentinel-2 (pět dnů s využitím obou družic). Není vhodné mít data pro teplotu povrchu z jiného dne či hodiny, než data o vlhkosti a biomase. Za daných předpokladů bylo usouzeno, že není vhodné tenhle kvantifikátor počítat.

Dalším problémem bylo použití a integrace dat Sentinel-1. Pro odhad množství biomasy byla použita metoda kombinující data Sentinel-1 a Sentinel-2. Autor sám udával, že korelace mezi jednotlivými polarizacemi a naměřenou pozemní biomasou není signifikantní, ale s použitím dat Sentinel-2 je použitelná. V diplomové práci tak byla metoda otestována pro měsíc květen, kde byla data Sentinel-1 o polarizacích VV a VH konfrontována s biomasou určenou metodou Goodenough a kol. (2005). Konfrontace těchto dat určila, že korelace mezi daty není skoro žádná. Díky tomuhle zjištění nebylo pokračováno k určení biomasy z dat Sentinel-1 a Sentinel-2. Data Sentinel-1 jsou v mnoha případech používány k určení půdní vlhkosti do pěti centimetrů hloubky. Je zde ale další problém týkající se rozlišení. Aby byla data použitelná k určení vlhkosti, je nutné provést vzorkování na rozlišení 1 kilometr. Děje se tomu tak vlivem drsnosti povrchu a struktury vegetace a je potřeba potlačit šum. Je doporučeno používat Sentinel-1 pro určení vlhkosti pouze v malých měřítkách, a proto i v rámci programu Copernicus je vydávána vrstva vlhkosti půdy o rozlišení 1 kilometr. V práci je použita zmíněná vrstva, která je převzorkována na 20 metrů. Je uvedena v tabulce kvantifikátorů, ale do souhrnného hodnocení funkcí ekosystémů není kvůli svému rozlišení použita.

Práci je možné využít v kontextu zájmového území jako doporučení pro volbu některých algoritmů. Lze také rozšířit rozsah práce na větší území nebo se zaměřit na jiné funkce ekosystémů. Ve studiích s podobnou tematikou je použito k porovnání nebo optimalizaci algoritmů více dat pozemního měření. Potenciál dat Sentinel-2 pro stanovení ekosystémových funkcí je vysoký, nicméně slabinou je absence termálního pásma. Dalším doporučením je kombinace s daty pozemního měření, která jsou pro takový typ studie velmi důležitá a určovat funkce s použitím samotných dat DPZ je celkem obtížné.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vybrat vhodné algoritmy ke stanovení ekosystémových funkcí s použitím dat Sentinel-2 a Sentinel-1. Vybrané algoritmy byly srovnány s daty pozemního měření za účelem selekce nejvhodnějšího algoritmu pro zájmové území. Dalším dílčím cílem bylo srovnání přístupu k datům Sentinel-2 pomocí různých webových portálů jako Sentinel Playground, Sentinel Explorer a Copernicus Open Acces Hub.

V diplomové práci byly vybrány algoritmy zaměřující se na množství nadzemní biomasy, množství uhlíku v nadzemní biomase, vegetační ochranu půdy před vodní erozí (C-faktor), podíl fotosynteticky aktivní složky vegetace (FAPAR), index listové plochy (LAI), vlhkost vegetace (NDMI), disipaci sluneční energie a vlhkost půdy. Algoritmy pro stanovení biomasy, uhlíku, ochrany půdy před erozí a FAPAR byly zvláště testovány ve vybraných biotopech zájmového území povodí řeky Dřevnice. Vybranými biotopy byly hospodářské smíšené lesy, vysoké mezofilní a xerofilní křoviny a hospodářské louky. Za vybrané biotopy byla dostupná data z pozemního měření uhlíku a byla konfrontována s testovanými. Při testování byly vybrány vhodné algoritmy pro dané zájmové území k určení ekosystémových funkcí. Vhodnými algoritmy byly pro stanovení množství biomasy a uhlíku (Goodenough a kol., 2005), Ochranu půdy před vodní erozí (Knijff a kol. 1999), podíl fotosynteticky aktivní složky vegetace (*Biophysical Processor* ze softwaru SNAP). Dále bylo potvrzeno, že použité algoritmy pro stanovení biomasy a uhlíku jsou použitelné jen pro lesní porosty. Dalšími daty pozemního měření byla data z výzkumné stanice Bílý Kříž, která obsahovala údaje o biomase. Testované algoritmy pro stanovení biomasy tak byly konfrontovány s dalšími daty pozemního měření. Další algoritmy již nebyly testovány a byly použity rovnou ke kvantifikaci ekosystémových funkcí.

Celkově tak bylo stanoveno sedm ekosystémových funkcí, které byly určeny přímo nebo nepřímo pomocí bezrozměrného vegetačního indexu. Kvantifikátory byly určeny pro zájmové území lesů v povodí řeky Dřevnice podle tříd CLC 311, 312, 313. První ekosystémovou funkcí byla produkční funkce zásoba nadzemní biomasy ($t \cdot ha^{-1}$), která úzce souvisí s další funkcí, kterou je zásoba (sekvestrace) uhlíku ($t \cdot ha^{-1}$). Dále byla určena ochrana půdy před vodní erozí, kterou zajišťuje vegetační kryt (protierozní funkce). Tahle funkce byla určena podle výsledku indexu C-faktor. Index listové plochy určuje strukturu biomasy (evapotranspirační funkce) a lze z něj stanovit regulační funkci, zachycení prachových částic PM_{10} pomocí vegetace ($kg \cdot ha^{-1}$). Další je podíl fotosynteticky aktivní složky vegetace, která je určena pomocí indexu FAPAR (produkční funkce, fotosyntéza). Co se týče vlhkostních indexů, byl použit index NDMI pro určení vlhkosti aktivního povrchu vegetace, který může indikovat vodní stres rostlin a tím pádem do jisté míry i retenci vody v krajině (vodoretenční funkce). Podobným indexem je i wetness-biomass, který dokáže odhalit zelenou biomasu a vlhkost povrchu vegetace. Je tak druhým vegetačním indexem, který určuje retenci vody v krajině a také podporu malého vodního cyklu (kondenzační funkce). Wetness-biomass měl být původně určen ke krosklasifikační analýze při výpočtu solární disipace. Jak již bylo zmíněno, Sentinel-2 nesnímá v termálním spektru a od výpočtu bylo upuštěno. Bylo upuštěno také od stanovení vlhkosti půdy z dat Sentinel-1, jelikož rozlišení 1 kilometr je v konfrontaci s 20 metry nevhodný k použití. Data *Surface Soil Moisture* byla zařazena pouze do tabulkového přehledu kvantifikátorů pro třídy CLC. Kromě toho i další data vycházející ze Sentinel-1

nebyla dále použita, a to k určení zásoby nadzemní biomasy. Výsledná data nedisponovala žádnou korelací k metodě pro výpočet biomasy, které byla finálně určena. Z celkově osmi kvantifikátorů tak bylo nakonec určena potenciální hodnota ekosystémové funkce pro lesní porost v zájmovém území. Hodnoty předešlých kvantifikátorů byly nejprve reklasifikovány a poté sečteny do výsledného rastru. Nízké hodnoty indikovaly malý potenciál k tvorbě či udržení ekosystémové funkce. Vysoké hodnoty indikovaly zdravé lesní porosty s vysokým potenciálem ekosystémových funkcí a správné funkci lesa.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

ALCARAZ, Domingo, Jose PARUELO a Javier CABELLO. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography* [online]. 2006, **15**(2), 200-212 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x. ISSN 1466-822X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x>

ASKAR, Narissara NUTHAMMACHOT, Worradorn PHAIRUANG, Pramaditya WICAKSONO a Tri SAYEKTININGSIH. Estimating Aboveground Biomass on Private Forest Using Sentinel-2 Imagery. *Journal of Sensors* [online]. 2018, **2018**, 1-11 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.1155/2018/6745629. ISSN 1687-725X. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/js/2018/6745629/>

BACCINI, A., M. A. FRIEDL, C. E. WOODCOCK a R. WARBINGTON. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophysical Research Letters* [online]. 2004, **31**(10), n/a-n/a [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1029/2004GL019782. ISSN 00948276. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL019782>

BARET, F., B. ANDRIEU a G. GUYOT. A Simple Model for Leaf Optical Properties in Visible and Near-Infrared: Application to the Analysis of Spectral Shifts Determinism. LICHTENTHALER, Hartmut K., ed. *Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988, 1988, s. 345-351 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1007/978-94-009-2823-7_43. ISBN 978-94-010-7771-2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-2823-7_43

BARRETTE, J. & August, P. & Golet, F.. (2000). Accuracy assessment of wetland boundary delineation using aerial photography and digital orthophotography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 66. 409-416.

BOTTALICO, Francesca, Gherardo CHIRICI, Francesca GIANNETTI, et al. Air Pollution Removal by Green Infrastructures and Urban Forests in the City of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* [online]. 2016, **8**, 243-251 [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.099. ISSN 22107843. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210784316300997>

BOX, Elgene O., Brent N. HOLBEN a Virginia KALB. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio* [online]. 1989, **80**(2), 71-89 [cit. 2019-06-19]. DOI: 10.1007/BF00048034. ISSN 0042-3106. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00048034>

Copernicus ČR [online]. 2016 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: <http://copernicus.gov.cz/druzice-sentinel>

COSTANZA, Robert, Ralph D'ARGE, Rudolf DE GROOT, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* [online]. 1997, 387(6630), 253-260 [cit. 2019-06-19]. DOI: 10.1038/387253a0. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/387253a0>

CSC MISSION MANAGEMENT TEAM. Sentinel High Level Operation Plan (HLOP) [online]. 2018 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685154/Sentinel_High_Level_Operations_Plan

Cudlín, O., Pechanec, V., Purkyt, J., Chobot, K., Salvati, L., Cudlín, P. Are Valuable and Representative Natural Habitats Sufficiently Protected? Application of Marxan model in the Czech Republic. *Sustainability* 2020, 12(1)

Český kosmický portál [online]. 2017 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/4-sekce/pozorovani-zeme/copernicus/>

DAILY, Gretchen C. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC: Island Press, c1997. ISBN 1-55963-475-8.

DARVISHZADEH, Roshanak, Andrew SKIDMORE, Martin SCHLERF a Clement ATZBERGER. Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2008, **112**(5), 2592-2604 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.003. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425707004968>

DE GROOT, Rudolf S, Matthew A WILSON a Roelof M.J BOUMANS. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* [online]. 2002, 41(3), 393-408 [cit. 2019-06-19]. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7. ISSN 09218009. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800902000897>

DE JONG, Steven M. Derivation of vegetative variables from a landsat tm image for modelling soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* [online]. 1994, **19**(2), 165-178 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1002/esp.3290190207. ISSN 01979337. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.3290190207>

DE ZAN, F. a A. MONTI GUARNIERI. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2006, 44(9), 2352-2360 [cit. 2019-06-18]. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873853. ISSN 0196-2892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1677745/>

DELBART, Nicolas, Laurent KERGOAT, Thuy LE TOAN, Julien LHERMITTE a Ghislain PICARD. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2005, **97**(1), 26-38 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425705001288>

Delegido J, Verrelst J, Alonso L, Moreno J. Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors*. 2011; 11(7):7063-7081.

Dong, J. R., Kaufmann, R. K., Myneni, R. B., Tucker, C. J., Kauppi, P. E., Liski, J., ... Hughes, M. K. (2003). Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 393-410.

DRAGICEVIC, Slavoljub & KOSTADINOV, Stanimir & DRAGOVIC, Nada. (2011). Assessment of soil erosion potential by the USLE method: Case study, Republic of Srpska - BiH. *Fresenius Environmental Bulletin*. 20. 1910-1917.

DURIGON, V.L., D.F. CARVALHO, M.A.H. ANTUNES, P.T.S. OLIVEIRA a M.M. FERNANDES. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2014, **35**(2), 441-453 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1080/01431161.2013.871081. ISSN 0143-1161. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2013.871081>

ESA: Sentinel Online [online]. 2018 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>

European Commission [online]. 2019 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/copernicus_en

FAZAKAS, Z., NILSSON, M., & OLSSON, H. (1999). Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, 417-425.

FILIPPONI, Federico. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings* [online]. 2019, 18(1) [cit. 2020-04-23]. DOI: 10.3390/ECRS-3-06201. ISSN 2504-3900. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2504-3900/18/1/11>

FOODY, Giles M., Mark E. CUTLER, Julia MCMORROW, Dieter PELZ, Hamzah TANGKI, Doreen S. BOYD a Ian DOUGLAS. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography* [online]. 2001, **10**(4), 379-387 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x. ISSN 1466-822X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x>

FORSTER, RR. Planning for man and nature in national parks: reconciling perpetuation and us. IUCN Publications, 1973.

GAO, Bo-cai. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* [online]. 1996, **58**(3), 257-266 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425796000673>

GCOS. *Global Climate Observing System* [online]. 2020 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://gcos.wmo.int>

GOODENOUGH David G, Hao CHEN, Andrew DYK, Tian Hanand JINGYANG LI. Multisensor data fusion for aboveground carbon estimation [online]. 2005 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.517.2733&rep=rep1&type=pdf>

Goward, S. N., Huemmrich, K. F., & Waring, R. H. (1994). Visible-Near-Infrared Spectral Reflectance of Landscape Components in Western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 47(2), 190e203

HAINES-YOUNG, ROY a MARION POTSCHIN. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. RAFFAELLI, D. G a Chris FRID. *Ecosystem Ecology: a new synthesis* [online]. New York: Cambridge University Press, 2010 [cit. 2019-06-19]. ISBN 0521735033.

HATFIELD, J. L., A. A. GITELSON, J. S. SCHEPERS a C. L. WALTHALL. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agronomy Journal* [online]. 2008, **100**, S-117-S-131 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.2134/agronj2006.0370c. ISSN 00021962. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.2134/agronj2006.0370c>

Hatfield, J. L., Asrar, G., & Kanemasu, E. T. (1984). Inter-cepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 14(1-3), 65e75.

HERRMANN, M., S. SOMOT, S. CALMANTI, C. DUBOIS a F. SEVAULT. Representation of spatial and temporal variability of daily wind speed and of intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: impact of the regional climate model configuration. *Natural Hazards and Earth System Science* [online]. 2011, **11**(7), 1983-2001 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.5194/nhess-11-1983-2011. ISSN 1684-9981. Dostupné z: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1983/2011/>

HESSLEROVA, Petra a Jan POKORNÝ. The synergy of solar radiation, plant biomass and humidity as an indicator of ecological functions of the landscape: a case study from Central Europe. *Integrated Environmental Assessment and Management* [online]. 2007, **preprint**(2010), IEAM_2009-058 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1897/IEAM_2009-058.1. ISSN 1551-3777. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1897/IEAM_2009-058.1

Index Database [online]. 2019 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: www.indexdatabase.de

JACKSON, T. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2004, **92**(4), 475-482 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.021. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703003353>

JANEČEK, Miloslav, Tomáš DOSTÁL, Jana KOZLOVSKY DUFKOVÁ, et al. Ochrana zemědělské půdy před erozí. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.

JORDAN, Carl F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology* [online]. 1969, **50**(4), 663-666 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.2307/1936256. ISSN 00129658. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.2307/1936256>

KARABURUN, Ahmet. *Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed*. 2010. ISSN 1943-2429.

KAUTH, R. J. a G. S. THOMAS. *The Tasselled Cap -- A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT*. 1976.

KOMIYAMA, A., ONG, J. E., & POUNGPARN, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89, 128-137.

LANORTE, Antonio, Giuseppe CILLIS, Giuseppe CALAMITA, Gabriele NOLE, Angela PILOGALLO, Biagio TUCCI a Fortunato DE SANTIS. Integrated approach of RUSLE, GIS and ESA Sentinel-2 satellite data for post-fire soil erosion assessment in Basilicata region (Southern Italy). *Geomatics, Natural Hazards and Risk* [online]. 2019, **10**(1), 1563-1595 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1080/19475705.2019.1578271. ISSN 1947-5705. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2019.1578271>

LIANG, Shunlin, Xiaowen LI a Jindi WANG. Advanced remote sensing. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2012. ISBN 9780123859549.

LIU, Hui Qing a Alfredo HUETE. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 1995, **33**(2), 457-465 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027. ISSN 0196-2892. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8746027/>

LUKEŠ, Petr. Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí satelitních dat Sentinel-2. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, 2018. ISBN 978-80-88184-21-8.

MACEDO, Fabrício L., Adélia M. O. SOUSA, Ana Cristina GONÇALVES, José R. MARQUES DA SILVA, Paulo A. MESQUITA a Ricardo A. F. RODRIGUES. Above-ground biomass estimation for *Quercus rotundifolia* using vegetation indices derived from high spatial resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing* [online]. 2018, **51**(1), 932-944 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.1080/22797254.2018.1521250. ISSN 2279-7254.

Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, c2005. ISBN 1-59726-040-1

MUUKKONEN, P., & HEISKANEN, J. (2007). Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107, 617-624.

MYNENI, R.B., G. ASRAR a F.G. HALL. A three-dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetated land surfaces. *Remote Sensing of Environment* [online]. 1992, **41**(2-3), 105-121 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90071-Q. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003442579290071Q>

Národní Inventarizace lesů. *NIL UHUL* [online]. 2015 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://nil.uhul.cz/>

NOROVSUREN, Bayanmunkh, Batchuluun TSEVEEN, Valentin BATOMUNKUEV a Tsolmon RENCHIN. Estimation for forest biomass and coverage using Satellite data in small scale area, Mongolia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2019, **320** [cit. 2020-02-24]. DOI: 10.1088/1755-1315/320/1/012019. ISSN 1755-1315. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/320/1/012019>

PETTORELLI, Nathalie, Henrike SCHULTE TO BÜHNE, Ayesha TULLOCH, et al. Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* [online]. 2018, 4(2), 71-93 [cit. 2020-04-20]. DOI: 10.1002/rse2.59. ISSN 20563485. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/rse2.59>

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, Y., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48, 119. doi: 10.1016/0034-4257(94)90134-1

RICHARDSON, J. R., Harris, T. T. (1995) Vegetation mapping and change detection in the Lake Okeechobee marsh ecosystem. *Archiv fur Hydrobiologie, Advances in Limnology*. 45:17–39.

ROUSE Jr, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. and DEERING, D.W., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.

ROZOS, Dimitrios, Hariklia D. SKILODIMOU, Constantinos LOUPASAKIS a George D. BATHRELLOS. Application of the revised universal soil loss equation model on landslide prevention. An example from N. Euboea (Evia) Island, Greece. *Environmental Earth Sciences* [online]. 2013, **70**(7), 3255-3266 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1007/s12665-013-2390-3. ISSN 1866-6280. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-013-2390-3>

SEJÁK, Josef a Ivan DEJMAL. *Hodnocení a oceňování biotopů České republiky*. Praha: Český ekologický ústav, 2003. ISBN 80-85087-54-5.

SEJÁK, Josef. *Hodnocení funkcí a služeb ekosystémů České republiky*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, 2010. ISBN 978-80-7414-235-2.

SENNA, Mônica C. A. Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling, and remote sensing. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2005, **110**(G1) [cit. 2020-04-25]. DOI: 10.1029/2004JG000005. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004JG000005>

SRIWONGSITANON, Nutchant, Hongkai GAO, Hubert H. G. SAVENIJE, Ekkarin MAEKAN, Sirikanya SAENGSAWANG a Sansarith THIANPOPIRUG. Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage in a lumped conceptual model. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 2016, **20**(8), 3361-3377 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.5194/hess-20-3361-2016. ISSN 1607-7938. Dostupné z: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/3361/2016/>

STRŽÍNEK, Filip. STANOVENÍ ZÁSOb UHLÍKU A JEHO SEKVESTRAce Z MATERIÁLŮ DPZ [online]. Olomouc, 2016 [cit. 2020-04-30]. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D..

TUCKER, C. J., H. E. DREGNE a W. W. NEWCOMB. Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990. *Science* [online]. 1991, 253(5017), 299-300 [cit. 2019-06-19]. DOI: 10.1126/science.253.5017.299. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.253.5017.299>

TURNER, David P., Scott V. OLLINGER a John S. KIMBALL. Integrating Remote Sensing and Ecosystem Process Models for Landscape- to Regional-Scale Analysis of the Carbon Cycle. *BioScience*. 2004, , 573-584. DOI: 10.11.670.3391.

VANDER KNIJFF, J. M., R. J. A. JONES, L. MONTANARELLA.: Soil erosion risk assessment in Europe. European Soil Bureau (European Commission) EUR 19044EN, 1999

VATANDAŞLAR, Can a Mehmet YAVUZ. Modeling cover management factor of RUSLE using very high-resolution satellite imagery in a semiarid watershed. *Environmental Earth Sciences* [online]. 2017, **76**(2) [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1007/s12665-017-6388-0. ISSN 1866-6280. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-017-6388-0>

VYSKOT, I. a kol., 2003. Kvantifikace a hodnocení funkcí lesů České republiky, MŽP ČR

WAGNER, W., Sabel, D., Doubkova, M., Bartsch, A., Pathe, C. (2009): The Potential of Sentinel-1 for Monitoring Soil Moisture with a High Spatial Resolution at Global Scale. ESA Special Publications SP-674.

WATSON, D. (1947). Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany*, 11(41), new series, 41-76. Retrieved February 10, 2020, from www.jstor.org/stable/42907002

ZHENG, Daolan, John RADEMACHER, Jiquan CHEN, Thomas CROW, Mary BRESEE, James LE MOINE a Soung-Ryoul RYU. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2004, **93**(3), 402-411 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.008. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425704002391>

ZINKE, Paul J. Forest interception studies in the United States. *Forest hydrology*, 1967, 137-161.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Volné přílohy

Příloha 1 Poster

Příloha 2 DVD

Struktura CD/DVD

Adresáře:

Text_prace

Poster

Data

WEB