

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**ANALÝZA A HODNOCENÍ OBSAHU ZELENÉ
HMOTY NA VYBRANÝCH VODNÍCH PLOCHÁCH
V ČESKU**

Bakalářská práce

Tomáš NEDVĚD

Vedoucí práce RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2025

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analýzu a hodnocení obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v České republice za využití metod dálkového průzkumu Země. Cílem práce je provést časovou a prostorovou analýzu výskytu zelené hmoty v období let 2018–2024 a ověřit možnosti využití vegetačních indexů NDVI a NDCI pro monitorování eutrofizace vod.

K analýze byly využity družicové snímky Sentinel-2 (L2A) a referenční data Státního zdravotního ústavu. Výpočet indexů NDVI a NDCI byl proveden pomocí vlastního skriptu v prostředí ArcGIS Pro, přičemž hodnoty byly následně korelovány s ukazateli kvality vody. Prostorová analýza byla dále rozšířena o zhodnocení vlivu hloubky vodního sloupce a vzdálenosti od břehu, přičemž pro modelování hloubky byl využit digitální model reliéfu vytvořený z historických výškopisných map.

Výsledky prokázaly sezónní i meziroční rozdíly v obsahu zelené hmoty, s nejvyššími koncentracemi v letních měsících. Byla potvrzena středně silná korelace mezi indexem NDCI a obsahem chlorofylu-a, což potvrzuje jeho vhodnost pro sledování eutrofizace. Součástí práce je také webová mapová aplikace vytvořená v prostředí ArcGIS Online, která umožňuje intuitivní vizualizaci výsledků a může sloužit jako nástroj pro podporu environmentálního managementu vodních ploch.

KLÍČOVÁ SLOVA

dálkový průzkum Země; Sentinel-2; zelená hmota; kvalita vody; NDCI

Počet stran práce: 42

Počet příloh: 11 (z toho 6 volné a 5 elektronické)

ANNOTATION

This bachelor thesis focuses on the analysis and assessment of green matter content in selected water bodies in the Czech Republic using remote sensing methods. The aim of the thesis is to perform a temporal and spatial analysis of green matter abundance in the period 2018-2024 and to verify the possibility of using vegetation indices NDVI and NDCI for monitoring water eutrophication.

Sentinel-2 (L2A) satellite imagery and reference data from the National Institute of Health were used for the analysis. Calculation of the NDVI and NDCI indices was performed using a custom script in ArcGIS Pro, and the values were then correlated with water quality indicators. The spatial analysis was further extended to evaluate the influence of water column depth and distance from the shoreline, using a digital elevation model created from historical elevation maps to model depth.

Results showed seasonal and inter-annual variations in green matter content, with highest concentrations in the summer months. A moderately strong correlation between the NDCI and chlorophyll-a content was confirmed, confirming its suitability for monitoring eutrophication. The work also includes a web-based mapping application developed in ArcGIS Online, which allows intuitive visualization of the results and can serve as a tool to support environmental management of water bodies.

KEYWORDS

remote sensing; Sentinel-2; green mass; water quality; NDCI

Number of pages 42

Number of appendixes 11

Prohlašuji, že

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

- jsem si vědom(a), že na moji bakalářskou/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, bakalářskou/diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

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

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

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

Simply Lovely

Flying Dutchman

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce, RNDr. Jakubu Miřijovskému, Ph.D., za odborné vedení, cenné konzultace, věcné připomínky a podporu během celého řešení této práce.

Velké díky patří také Mgr. Petru Pumannovi ze Státního zdravotního ústavu za vstřícnost a poskytnutí datových podkladů, které sehrály klíčovou roli při zpracování analytické části.

Také velmi děkuji prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D., za umožnění využití katederního ArcGIS serveru, díky němuž bylo možné realizovat webovou mapovou aplikaci jako doplňkový výstup této práce.

Upřímně děkuji mé rodině za trvalou podporu, motivaci a pochopení, která mi pomáhala nejen při tvorbě této práce, ale i během celého studia.

Poděkování patří rovněž mému kamarádovi Vojtěchovi Havlinovi, který mi byl velkou oporou po celou dobu studia a aktivně mi pomáhal i při řešení praktických částí této práce.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Tomáš NEDVĚD
Osobní číslo: R22604
Studijní program: B0532A330011 Geoinformatika a kartografie
Téma práce: Analýza a hodnocení obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v Česku
Zadávací katedra: Katedra geoinformatiky

Zásady pro vypracování

Cílem práce je provést časovou analýzu a hodnocení obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v rámci České republiky. Student si ve spolupráci s vedoucím práce vybere několik vodních ploch, na kterých bude provádět analýzu. Jako datové sady použije družicové snímky Sentinel případně Landsat. Variantně zváží použití dronu s multispektrální kamerou. Hodnotit bude zejména přítomnost zelené hmoty ve vodě a změny rozsahu v čase. Výsledky bude vhodným způsobem prezentovat v podobě grafických a tabelárních výstupů. Autor si zvolí minimálně tři případové studie. Text práce student zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku a poster. Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá student v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG student odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky student odevzdá pouze přílohy určené vedoucím práce.

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran
Rozsah grafických prací: dle potřeby
Forma zpracování bakalářské práce: elektronická

Seznam doporučené literatury:

ZEMEK, František. Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, 2014.
LILLESAND, T., KIEFER, R., CHIPMAN, J. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc., New York, 756 s., 2008.
CAMPBELL, J., B., WYNNE, R. H. Introduction to Remote Sensing. 5th ed. Guilford Press, New York, 667 s., 2011.
Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.
Katedra geoinformatiky

Datum zadání bakalářské práce: 3. května 2024
Termín odevzdání bakalářské práce: 7. května 2025

L.S.

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan



prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.
vedoucí katedry

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 CÍLE PRÁCE	11
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	12
2.1 Metody měření kvality vody	12
2.2 Využití dálkového průzkumu Země pro monitorování kvality vody	13
2.3 Vegetační a další indexy pro analýzu vodních ploch	14
2.4 Prostorová a časová analýza výskytu zelené hmoty na vodních plochách	15
3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	17
3.1 Vstupní data	17
3.2 Použité softwarové nástroje	18
3.3 Metodologie výpočtů a analýz	19
4 PŘÍPRAVA A ZPRACOVÁNÍ DAT	21
4.1 Ustanovení výzkumného místa a období	21
4.2 Výběr, hodnocení a stahování snímků Sentinel-2	23
4.3 Vytvoření masek přehrad	25
4.4 Skript pro automatizaci analýz NDVI/NDCI	26
4.5 Spojení dat indexů s referenčními daty SZÚ	30
4.6 Model dna přehrady Jesenice	31
4.7 Skript pro přípravu dat na analýzy	34
5 KORELACE A ANALÝZY	36
5.1 Korelace NDVI/NDCI s ukazateli kvality vody	36
5.2 Prostorové analýzy	40
5.2.1 Vzdálenost od břehu	40
5.2.2 Hloubka vodního sloupce	42
5.3 Časové analýzy	44
6 WEBOVÁ APLIKACE	47
7 VÝSLEDKY	48
7.1 Automatizační skript	48
7.2 Výsledky korelace s ukazateli kvality vody	48
7.3 Časové a prostorové analýzy výskytu zelené hmoty	48
7.4 Webová aplikace jako nástroj vizualizace výsledků	49
8 DISKUZE	50
9 ZÁVĚR	52
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	53
PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
AI	Artificial Intelligence
ČR	Česká republika
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
DPZ	Dálkový průzkum Země
EPSG	Geodetic Parameter Set
GIS	Geografické informační systémy
JU	Jihočeská univerzita
LPKX	Layer Package
MCI	Maximum Chlorophyll Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MS	Microsoft
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDCI	Normalized Difference Chlorophyll Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
pH	Potential of Hydrogen
RGB	Red Green Blue
Sb.	Sbírka zákonů
SHP	Shapefile
SZÚ	Státní zdravotní ústav
TIF	Tag Image File
UTM	Universal Transverse Mercator
VN	Vodní nádrž
WGS	World Geodetic System

ÚVOD

Změny v kvalitě povrchových vod představují významný environmentální problém, který ovlivňuje nejen fungování vodních ekosystémů, ale i rekreační využití přehrad a zásobování obyvatelstva vodou. V posledních letech se v České republice (ČR) i ve světě stále častěji objevují případy masivního rozvoje zelené hmoty ve vodních nádržích, spojené především s přemnožením sinic a vodního květu. Tento jev je často důsledkem nadměrného přísunu živin do vodních ekosystémů, a proto je vnímán jako jeden z projevů eutrofizace. Monitoring těchto změn je důležitý pro včasnou identifikaci rizik a efektivní správu vodních ploch.

Tradiční metody sledování kvality vody jsou založeny zejména na přímém vzorkování a laboratorním rozboru. Přestože jsou tyto postupy přesné, jsou časově i finančně náročné a často poskytují pouze bodové informace bez prostorového kontextu. Moderní technologie dálkového průzkumu Země (DPZ), především využití satelitních snímků, nabízejí nový přístup k monitoringu vodních ploch, který umožňuje sledování rozsahu zelené hmoty ve vysokém časovém i prostorovém rozlišení.

Cílem této bakalářské práce je provést časovou a prostorovou analýzu obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v rámci ČR pomocí indexů NDVI a NDCI vypočtených ze satelitních dat Sentinel-2. Práce navazuje na dřívější výzkumy zaměřené na využití DPZ v hodnocení eutrofizace a zároveň rozvíjí metodiku testováním korelací mezi satelitními indexy a referenčními daty kvality vody poskytovanými Státním zdravotním ústavem. Výsledky mají potenciál přispět k efektivnějšímu sledování vodních nádrží a mohou být využity i v kontextu praktické vodohospodářské správy.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je provést časovou analýzu a hodnocení obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v ČR. Tento cíl bude dosažen prostřednictvím několika dílčích kroků, které se zaměřují na analýzu satelitních snímků a prostorové zpracování dat.

Prvním dílčím cílem je korelace získaných dat se skutečně naměřenými hodnotami. Porovnání hodnot vegetačních indexů s referenčními daty Státního zdravotního ústavu umožní vyhodnocení přesnosti DPZ při monitoringu kvality vody. Druhým dílčím cílem je stanovení změn v množství zelené hmoty v čase, a to na základě zpracování satelitních snímků Sentinel-2 v období 2018–2024 za měsíce červen až září. Zpracování dat bude zahrnovat výpočet vegetačních indexů, které umožní klasifikaci sledovaných jevů. Třetím dílčím cílem je prostorová analýza distribuce zelené hmoty v rámci jednotlivých vodních ploch. Tato analýza se zaměří na hodnocení výskytu zelené hmoty v různých hloubkových pásmech a v závislosti na vzdálenosti od břehu. Posledním dílčím cílem je vizualizace výsledků ve formě kartografických výstupů a jejich publikace prostřednictvím webového aplikace v prostředí ArcGIS Enterprise.

Výstupy této práce poskytnou podklady pro efektivnější monitorování kvality vody na vybraných vodních plochách a přispějí k rozšíření možností využití satelitních dat při hodnocení ekologického stavu vodních ekosystémů v ČR.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Metody měření kvality vody

Hodnocení kvality vody je nezbytné pro pochopení ekosystémových procesů a monitorování znečištění vodních ploch. Existuje několik přístupů k měření kvality vody, přičemž nejpreciznější a nejčastěji používané metody zahrnují in-situ senzory a laboratorní analýzy. Tyto metody umožňují přesné stanovení chemického, fyzikálního a biologického složení vody, což je klíčové pro hodnocení její kvality a změn v čase (Brown, 2016).

In-situ metody měření kvality vody

In-situ měření kvality vody probíhá přímo v terénu, což umožňuje okamžitou analýzu bez nutnosti transportu vzorků do laboratoře. Mezi nejčastěji používané senzory patří:

- Multiparametrické sondy – současné měření více parametrů (pH, teplota, vodivost, rozpuštěný kyslík) v reálném čase (Martinez, 2020).
- Optické senzory – využívají absorpci a fluorescenci pro stanovení chlorofylu-a a organických látek ve vodě (Fischer et al., 2019).
- Biosenzory – využívají biologické složky (např. enzymy) pro detekci specifických kontaminantů, jako jsou těžké kovy nebo pesticidy (Patel et al., 2020).

Výhodou in-situ metod je rychlost získání dat, možnost automatizovaného sběru informací a nižší provozní náklady oproti laboratorním analýzám. Nevýhodou je nutnost pravidelné kalibrace a potenciální ovlivnění senzorů prostředím (Chen, 2021).

Laboratorní metody analýzy kvality vody

Laboratorní metody poskytují nejpreciznější údaje o chemickém složení vody, protože využívají standardizované analytické postupy. Mezi hlavní měřené parametry patří:

- Koncentrace živin (dusík, fosfor) – ovlivňují eutrofizaci vodních ploch.
- Chlorofyl-a – indikátor množství zelené hmoty ve vodě (Baudišová, 2020).
- Mikrobiální analýza – zahrnuje detekci fekálních koliformních bakterií, které indikují kontaminaci odpadními vodami.

Laboratorní analýzy umožňují validaci in-situ měření, avšak jejich nevýhodou je časová a finanční náročnost, stejně jako omezené prostorové pokrytí oproti metodám založeným na senzorové síti (Taylor, 2023).

Metodika sběru dat v této práci

Při realizaci této studie byla využita data poskytnutá Státním zdravotním ústavem (SZÚ), zahrnující výsledky laboratorních analýz, přičemž postup odběru vzorků byl založen na metodice popsané v Metodickém návodu na vzorkování, terénní a laboratorní vyšetřování a hodnocení přírodních koupališť a dalších povrchových vod ke koupání (SZÚ, 2023).

Odběry probíhaly v souladu s normou ČSN EN ISO 19458, která stanovuje přesný postup pro mikrobiologické analýzy vody. Pro stanovení chlorofylu-a a sinic byla použita metoda dle ČSN 75 7717. Vzorky byly odebírány v předem stanovených hloubkových intervalech, což umožnilo standardizaci měření napříč různými lokalitami (SZÚ, 2023).

2.2 Využití dálkového průzkumu Země pro monitorování kvality vody

DPZ představuje efektivní nástroj pro monitorování kvality vody ve velkých vodních plochách. DPZ umožňuje plošné sledování parametrů kvality vody, jako jsou koncentrace chlorofylu-a, suspendovaných látek, rozpuštěných organických látek či teplota vody. Při porovnání s tradičními metodami, jako jsou in-situ měření a laboratorní analýzy, přináší DPZ výhody v podobě časové a prostorové flexibility, nižších nákladů a možnosti zpětné analýzy archivních snímků (Gholizadeh, 2016). Tato podkapitola shrnuje hlavní přínosy a omezení DPZ v monitorování kvality vody, přehled studií využívajících DPZ na globální úrovni a aplikaci této metody v ČR.

Výhody a omezení DPZ oproti tradičním metodám

Tradiční metody hodnocení kvality vody zahrnují odběr vzorků, laboratorní analýzy a in-situ měření, které poskytují vysoce přesné údaje o chemickém a biologickém složení vody. Nicméně, tyto metody mají značná omezení – jsou časově a finančně náročné, prostorově omezené a vyžadují manuální odběr vzorků (Odermatt, 2012).

Naopak, DPZ umožňuje:

- Plošné pokrytí velkých vodních ploch – lze monitorovat rozsáhlé oblasti, což je užitečné pro vodní nádrže, řeky a pobřežní vody (Matthews, 2011).
- Dlouhodobé sledování trendů – díky archivním satelitním datům lze analyzovat historický vývoj kvality vody (Tyler, 2006).
- Rychlou reakci na ekologické katastrofy – např. sledování ropných skvrn, eutrofizace nebo havárií v průmyslových provozech (Koponen, 2007).

Přestože DPZ nabízí mnoho výhod, má také určitá omezení:

- Nižší přesnost oproti laboratorním analýzám – odhady kvality vody na základě satelitních snímků mají nižší rozlišovací schopnost a jsou ovlivněny atmosférickými podmínkami (Palmer, 2015).
- Závislost na optických vlastnostech vody – přítomnost kalných vod, sedimentů nebo velkého množství rozpuštěných organických látek může ovlivnit přesnost satelitních měření (Hadjimitsis, 2010).
- Nutnost validace dat – satelitní snímky musí být porovnávány s fyzickým měřením, aby byla zajištěna jejich správná interpretace (Kutser., 2005).

DPZ v hodnocení kvality vody ve světě

V posledních desetiletích se DPZ stalo klíčovým nástrojem pro monitorování kvality vody na globální úrovni. Studie využívající DPZ se zaměřují na sledování chlorofylu-a, zákalu, eutrofizace a přítomnosti suspendovaných částic na vodních ekosystémech (Van der Woerd, 2014).

- USA – Záliv Chesapeake: V této oblasti byly hyperspektrální senzory využity k analýze chlorofylu-a a detekci zvýšené produkce zelené hmoty (Mishra, 2005).
- Mexický záliv: DPZ se zde osvědčilo při monitorování ropných skvrn a eutrofizace po ekologických haváriích (Hu, 2003).
- Evropa – Jaderské moře: Výzkum využívající Sentinel-2 ukázal, že DPZ je efektivní pro sledování sezónních změn v kvalitě vody a predikci eutrofizace (Giardino, 2010).
- Čína – Tři soutěsky: DPZ bylo použito pro dlouhodobé sledování kvality vody v přehradní nádrži, s důrazem na změny koncentrace živin (Zhang, 2014).

DPZ v monitorování kvality vody v České republice

V ČR je DPZ stále více využíváno pro sledování kvality vodních ploch, zejména v přehradních nádržích a rekreačních oblastech. Metodika Jihočeské univerzity (JU) se zaměřuje na monitorování sinic a řas na vodních nádržích pomocí multispektrálních a hyperspektrálních dat (Metodika JU, 2022).

Vodní nádrže Orlík a Lipno: DPZ bylo využito k detekci sezónních změn v koncentraci chlorofylu-a a výskytu vodního květu (Kopáček, 2017).

Koupací vody v ČR: V rámci projektu SZÚ byly testovány možnosti DPZ pro monitorování kvality koupacích vod s cílem predikovat výskyt sinic (Hladík, 2021).

Řeka Ohře: DPZ bylo využito k hodnocení vlivu krajinného pokryvu na koncentraci sedimentů a živin ve vodním toku (Křížek, 2020).

Výsledky těchto studií ukazují, že DPZ může významně přispět ke zlepšení monitorování kvality vody v ČR, avšak jeho praktické využití vyžaduje kombinaci se standardními terénními měřeními.

2.3 Vegetační a další indexy pro analýzu vodních ploch

Využití vegetačních a dalších indexů v DPZ umožňuje hodnocení kvality vody prostřednictvím analýzy optických vlastností vodních ploch. Tyto indexy pomáhají odhadnout koncentraci chlorofylu-a, množství suspendovaných látek, přítomnost sinic a celkovou úroveň eutrofizace. V posledních letech se zvýšil zájem o využití satelitních dat, zejména z družic Sentinel a Landsat, k monitorování změn kvality vody v různých typech vodních ekosystémů (Matthews, 2011). Tato podkapitola poskytuje přehled nejčastěji používaných vegetačních a vodních indexů ve vědeckých pracích, jejich výhod a omezení a hodnocení jejich korelaci s fyzicky naměřenými parametry kvality vody.

Vegetační a vodní indexy v analýze vodních ploch

Vegetační indexy byly původně vyvinuty pro monitorování vegetace, avšak některé z nich se ukázaly jako vhodné i pro analýzu kvality vody. Také existují indexy speciálně navržené pro sledování obsahu chlorofylu-a, sinic a rozpuštěných organických látek ve vodních ekosystémech (Kutser, 2009). Mezi nejpoužívanější patří:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – Původně navržený pro sledování vegetace, ale v některých studiích byl použit i pro analýzu vodních ploch, kde pomáhá identifikovat rozsah vodní vegetace a přítomnost planktonu (Gao, 1996).
- NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) – Index speciálně určený k detekci chlorofylu-a na vodě. Byl úspěšně použit v řadě studií sledujících kvalitu vody v jezerech a pobřežních ekosystémech (Oliver et al., 2015).
- MCI (Maximum Chlorophyll Index) – Používá se pro detekci vysokých koncentrací chlorofylu-a a přítomnosti sinic na vodě (Matthews, 2011).
- NDWI (Normalized Difference Water Index) – Pomáhá při odlišení vody od vegetace a je využíván pro sledování změn vodních ploch a vlhkosti v krajině (Gao, 1996).

Tyto indexy využívají odrazivost vody v různých spektrálních pásmech, přičemž čím vyšší je koncentrace chlorofylu-a nebo sinic, tím výrazněji se mění spektrální odezva vody v zelené a infračervené oblasti spektra.

Korelace vegetačních indexů s reálnými daty kvality vody

Aby byly indexy využitelné pro hodnocení kvality vody, musí vykazovat silnou korelaci s fyzicky naměřenými hodnotami z in-situ měření. Studie ukázaly, že NDCI a MCI mají vysokou korelaci s koncentrací chlorofylu-a, zatímco NDVI a NDWI jsou méně citlivé na změny v kvalitě vody (Oliver et al., 2015).

Například studie provedená v Anglii na jezerech pomocí Sentinel-2 prokázala, že NDCI může být spolehlivě využit k odhadu hladin chlorofylu-a, přičemž korelace s laboratorními měřeními dosahovala hodnot $R^2 = 0,85$ (Oliver et al., 2015). V jiném výzkumu se MCI ukázal jako vhodný indikátor pro detekci masivního rozvoje sinic v pobřežních vodách (Matthews, 2011).

V bakalářské práci (Hanoušek, 2020) byla testována korelace NDVI a NDCI a dalších indexů s koncentrací chlorofylu-a a dalších ukazatelů na Brněnské vodní nádrži. Výsledky potvrdily, že NDCI poskytuje přesnější výsledky při sledování fytoplanktonu než NDVI, který je ovlivněn i přítomností vodní vegetace u břehů.

Aplikace indexů v monitorování vodních ekosystémů

Využití vegetačních a vodních indexů umožňuje efektivní sledování změn kvality vody v různých typech ekosystémů. Mezi hlavní aplikace patří:

- Sledování eutrofizace – Pomocí NDCI a MCI lze sledovat sezónní změny v koncentraci chlorofylu-a a odhadovat míru eutrofizace jezer a přehrad (Kutser, 2009).
- Detekce sinic a fytoplanktonu – V oblastech s častým výskytem sinic lze pomocí MCI a hyperspektrálních metod identifikovat jejich masivní rozvoj (Matthews, 2011).
- Dopad zemědělského odtoku na kvalitu vody – Studie využívající NDVI a NDCI v zemědělských oblastech ukázaly, že DPZ indexy mohou pomoci určit vliv hnojiv a eroze na vodní ekosystémy (Gao, 1996).

Výzkumy naznačují, že kombinace několika indexů a jejich kalibrace s terénními měřeními může významně zlepšit přesnost odhadů kvality vody (Oliver et al., 2015).

2.4 Prostorová a časová analýza výskytu zelené hmoty na vodních plochách

Analýza prostorového a časového rozložení zelené hmoty na vodních plochách je zásadní pro hodnocení stavu vodních ekosystémů, predikci eutrofizace a identifikaci škodlivých vodních květů. Moderní metody DPZ umožňují kvantifikaci rozložení chlorofylu-a a dalších fytoplanktonních pigmentů na základě multispektrálních a hyperspektrálních dat (Mishra a Lioubimtseva, 2016). Prostorová analýza zajišťuje mapování rozložení zelené hmoty, zatímco časová analýza umožňuje sledování sezónních a dlouhodobých změn, což je klíčové pro řízení kvality vody a její ochranu (Matthews, 2011).

Metody prostorové a časové analýzy zelené hmoty na vodních plochách

Prostorová analýza vychází z různých přístupů DPZ a GIS (Geografické informační systémy) analýz, které umožňují přesné kvantifikování a vizualizaci distribuce zelené hmoty v čase a prostoru. Nejčastěji používané metody zahrnují:

- Multispektrální a hyperspektrální snímání – DPZ senzory, jako Sentinel-2 a Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), poskytují spektrální informace v různých pásmech, což umožňuje detekci chlorofylu-a a jiných pigmentů fytoplanktonu (Oliver et al., 2015).

- Spektrální indexy – Mezi nejpoužívanější patří NDCI a MCI, které umožňují přesné odhady koncentrace chlorofylu-a na vodních plochách (Kutser, 2009).
- Časové řady satelitních dat – Analýza dlouhodobých časových řad umožňuje sledování sezónních trendů a meziroční variability výskytu fytoplanktonu, což je důležité pro řízení vodních ekosystémů (Gao, 1996).

Modelování prostorových vztahů – Kombinace DPZ dat s environmentálními faktory, jako je teplota vody a přísun živin, umožňuje predikci rozvoje vodních květů a změn v kvalitě vody (Hanousek, 2020).

Aplikace prostorové a časové analýzy při monitorování vodních ploch

Využití těchto metod je klíčové v různých oblastech vodohospodářství a ochrany životního prostředí. Mezi nejvýznamnější aplikace patří:

- Monitorování eutrofizace ve velkých jezerech – Studie využívající Sentinel-2 a Landsat-8 ukázaly, že prostorová analýza umožňuje detekci sezónních změn chlorofylu-a a predikci eutrofizace na základě satelitních snímků (Matthews, 2011).
- Detekce a predikce výskytu sinic – Kombinace časových řad DPZ dat s fyzikálními a chemickými měřeními umožňuje včasnou identifikaci vodních květů a jejich růstových trendů (Hladík et al., 2021).
- Analýza vlivu krajinného pokryvu na kvalitu vody – Výzkumy ukázaly, že intenzivní zemědělská činnost a odtoky hnojiv přímo ovlivňují rozvoj fytoplanktonu, což lze efektivně prostorově modelovat pomocí DPZ (Křížek, 2020).

Výsledky těchto studií ukazují, že propojení prostorových a časových analýz umožňuje přesnější pochopení ekosystémových změn ve vodních plochách, což vede k efektivnějšímu řízení vodních zdrojů.

Výhody a omezení prostorové a časové analýzy pomocí DPZ

Stejně jako jiné metody DPZ má i prostorová a časová analýza své výhody a omezení.

Výhody:

- Široké prostorové pokrytí – DPZ umožňuje monitorování rozsáhlých vodních ploch, což je tradičními metodami obtížné (Mishra a Lioubimtseva, 2016).
- Dlouhodobé sledování změn – Historická data z družic umožňují analýzu trendů ve vývoji zelené hmoty a predikci budoucího vývoje (Oliver et al., 2015).
- Možnost integrace s GIS a hydrologickými modely – Kombinace DPZ dat s jinými environmentálními faktory umožňuje komplexní analýzu (Kutser, 2009).

Omezení:

- Atmosférické podmínky ovlivňují kvalitu dat – Oblačnost, mlha a další faktory mohou snižovat přesnost získaných snímků (Hanousek, 2020).
- Hloubkové omezení – Optické senzory zachycují pouze povrchové vrstvy vody, což komplikuje analýzu hlubších vodních těles (Matthews, 2011).
- Potřeba kalibrace s terénními daty – Validace DPZ dat s fyzickými vzorky vody je nezbytná pro zvýšení přesnosti analýz (Gao, 1996).

3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Pro dosažení stanovených cílů byly v rámci této bakalářské práce využity různé analytické přístupy, kombinující metody DPZ, statistické vyhodnocení a prostorovou analýzu. Klíčovou úlohu sehrála práce se satelitními snímky Sentinel-2, jejichž vybraná spektrální pásma umožnila sledování změn obsahu zelené hmoty na vodních plochách. Pro validaci výsledků byla použita referenční data o kvalitě vody poskytnutá SZÚ.

Kapitola shrnuje použité datové zdroje, softwarové nástroje a metodické postupy. Popisuje jak přípravu a zpracování dat, tak konkrétní výpočty indexů, prostorové analýzy a statistické korelace. Nedílnou součástí řešení byla také optimalizace skriptů a jazyková úprava textu s využitím modelu ChatGPT-4o, který přispěl k efektivnějšímu průběhu automatizace a vyšší stylistické úrovni výsledného textu.



Obr. 1 Vývojový diagram

3.1 Vstupní data

Pro analýzu obsahu zelené hmoty byly použity tři hlavní typy vstupních dat: satelitní snímky Sentinel-2, referenční data SZÚ a doplňková data, zahrnující mapy pro tvorbu digitální model dna přehrady Jesenice.

Satelitní snímky Sentinel-2

Satelitní snímky byly získány prostřednictvím platformy [browser.copernicus](https://browser.copernicus.eu) v časovém rozmezí let 2018–2024. Pro analýzu byly vybírány snímky odpovídající letnímu období (červen–září), kdy se očekává nejvyšší výskyt zelené hmoty ve vodních plochách.

Při výběru snímků byl kladen důraz na jejich kvalitu, zejména na minimalizaci vlivu oblačnosti. Použity byly pouze snímky odpovídající úrovni zpracování L2A (korekce na povrchovou odrazivost). Kvalita snímků byla hodnocena podle vlastní škály A–F. Do analýzy byly zahrnuty pouze snímky s hodnocením A–E. Celkově bylo využito 255 snímků pokrývajících pět vybraných vodních ploch.

V práci byly využity následující spektrální pásma:

- B2, B3, B4 – RGB vizualizace
- B4 a B8 – Výpočet NDVI
- B4 a B5 – Výpočet NDCI

Referenční data SZÚ

Referenční data o kvalitě vody poskytl SZÚ. Měření probíhala nepravidelně, avšak vždy v období od konce května do začátku září. Data byla dodána ve formátu Excel tabulky a obsahovala ukazatele, pro kvalitu vody. V práci byly vybrány tyto ukazatelé:

- Sinice buňky
- Vodní květ
- Chlorofyl-A
- Průhlednost
- Index kvality vody

Měření byla bodová, prováděná na pevných stanovištích, převážně v rekreačních oblastech (koupaliště). Pro statistické analýzy a prostorovou analýzu byly použity pouze hodnoty, které odpovídaly měřením provedeným v okolí 1 dne od pořízení snímku.

Doplňková data

Dále byla využita doplňková data v podobě digitálního modelu dna přehrady Jesenice, vytvořeného z vojenských výškopisných map z 50. let. Vrstevnice byly digitalizovány a interpolovány pomocí nástroje Topo to Raster v ArcGIS Pro, který využívá splajnovou interpolaci optimalizovanou pro hydrologické modelování. Tento model byl použit výhradně pro prostorovou analýzu výskytu zelené hmoty ve vztahu k hloubce vody.

3.2 Použité softwarové nástroje

Pro zpracování a analýzu dat bylo využito několik specializovaných softwarových nástrojů, které umožnily efektivní zpracování satelitních snímků, výpočet indexů, statistické korelace a vizualizaci výsledků.

ArcGIS Pro 3.1.3

ArcGIS Pro sloužil jako hlavní nástroj pro analýzu geodat, výpočet vegetačních indexů a prostorovou analýzu.

ArcGIS Enterprise

Webové výstupy byly publikovány prostřednictvím webových mapových nástrojů v prostředí ArcGIS Online. K nahrání rastrových dat byl využit ArcGIS Server poskytnutý Katedrou geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci. Vizualizace zahrnují klasifikované rastry indexů a RGB kompozice pro vybrané snímky.

Microsoft Excel pro Microsoft 365 (Version 2503)

Excel byl využit jako databázový nástroj pro organizaci informací o snímcích, výsledcích vegetačních indexů a referenčních datech SZÚ. Data byla v Excelu dále zpracovávána pro statistické korelace a časoprostorové analýzy.

RStudio 2022.12.0+353

RStudio bylo použito k provádění statistických analýz a korelací mezi indexy NDVI, NDCI a referenčními daty SZÚ. Pro analýzu a vizualizaci dat byly využity následující balíčky:

- tidyverse, ggplot2, dplyr – manipulace s daty a vizualizace
- sf, rgdal, sp – práce s prostorovými daty
- gstat – geostatistické analýzy a interpole

Python (ArcPy)

Programovací jazyk Python v kombinaci s knihovnou ArcPy byl využíván v prostředí PyScripter 4.3.4.0. Slouží k automatizaci procesů a hromadnému zpracování dat. V rámci této práce vznikly dva hlavní skripty:

Automatizační skript (automatizace_4.py) – příloha bakalářské práce

Skript sloužil k hromadnému zpracování satelitních snímků, výpočtu vegetačních indexů, extrakci bodových hodnot a exportu výsledků do tabulkových formátů. Využité geoprocessingové funkce:

- Zpracování a extrakce dat: arcpy.GetParameterAsText, arcpy.AddMessage, arcpy.env.workspace, arcpy.env.overwriteOutput
- Výpočet indexů a analýza: arcpy.sa.ExtractValuesToPoints
- Tabulkové operace: arcpy.management.AddField, arcpy.management.CalculateField, arcpy.management.CopyRows, arcpy.management.JoinField
- Export dat: arcpy.conversion.TableToExcel, arcpy.conversion.TableToTable

Geostatistický skript (Geostatistika.py) – pouze interní analýzy

Tento skript byl využit pro interní geostatistické analýzy NDVI a NDCI v závislosti na vzdálenosti od břehu a hloubce vody. Tento skript nebude součástí příloh bakalářské práce. Využité geoprocessingové funkce:

- Prostorová analýza: arcpy.FeatureToLine_management, arcpy.MultipleRingBuffer_analysis
- Statistické analýzy: arcpy.gp.ZonalStatisticsAsTable_sa
- Manipulace s rastrovými daty: arcpy.gp.RasterCalculator_sa, arcpy.gp.Reclassify_sa
- Správa souborů: arcpy.Exists, arcpy.Delete_management

Tato kombinace softwarových nástrojů umožnila efektivní zpracování a vyhodnocení satelitních snímků a referenčních dat, přičemž automatizace pomocí Pythonu značně urychlila celý proces analýzy.

ChatGPT-4o

Při návrhu a ladění automatizačních skriptů byl využit jazykový model ChatGPT-4o, který pomohl s optimalizací výpočetních kroků, kontrolou syntaxe a zvýšením efektivity skriptů. Model byl rovněž použit ke stylistickým úpravám textu bakalářské práce.

3.3 Metodologie výpočtů a analýz

Tato kapitola popisuje metodologii použitou při výpočtech vegetačních indexů, prostorové a časové analýze a korelaci s referenčními daty.

Výpočet vegetačních indexů

Pro hodnocení obsahu zelené hmoty na vodních plochách byly vypočítány indexy NDVI a NDCI ze satelitních snímků Sentinel-2.

Klasifikace NDVI a NDCI byla nastavena na základě předchozích studií (Hanoušek, 2019) a byla rozdělena do následujících kategorií:

- -1 až -0,1 -> čistá voda
- -0,1 až 0 -> znečištěná voda
- 0 až 0,1 -> vegetační zákal vody
- 0,1 až 0,2 -> vodní květ
- 0,2 až 0,3 -> silný vodní květ
- 0,3 až 1 -> masivní vodní květ

Toto rozdělení reflektuje standardní interpretaci NDVI a NDCI hodnot, kde nižší hodnoty odpovídají vodním plochám a oblastem bez vegetace, zatímco vyšší hodnoty indikují přítomnost zelené hmoty.

Korelace s referenčními daty

Pro ověření spolehlivosti vegetačních indexů byly provedeny korelační analýzy mezi hodnotami NDVI/NDCI a referenčními daty získanými od SZÚ. Korelace byly provedeny pomocí statistických metod v prostředí RStudio, přičemž byly použity pouze referenční hodnoty, které odpovídaly měřením provedeným v okolí 1 dne od pořízení snímku. Byla vytvořena korelační matice a následně provedeny regresní analýzy.

Tato metodologie umožnila komplexní hodnocení obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v ČR a poskytla podklady pro další analýzy a interpretace.

Prostorová analýza

Prostorová analýza se zaměřila na vztah mezi hodnotami NDVI a NDCI a jejich polohou vzhledem k břehu a hloubce vody.

- Vzdálenost od břehu: Byly vytvořeny zóny v intervalech po 20 metrech od břehu do vzdálenosti 400 metrů. Průměrné hodnoty NDVI a NDCI byly vypočítány pro každou zónu. Pro analýzu byla použita hranice břehu přehrady Jesenice z polygonové vrstvy DIBAVOD.
- Hloubka vody: S využitím modelu dna byly stanoveny hloubkové kategorie: 0–1 m, 1–2 m, 2–3 m, 3–4 m, 4–5 m, 5–7 m, 7–10 m, 10–15 m a 15–20 m. Pro každou kategorii byly vypočítány průměrné hodnoty NDVI a NDCI.

Časová analýza

Časová analýza sledovala změny hodnot NDVI a NDCI v průběhu let 2018–2024 během měsíců červen až září za výzkumných vodních plochách. Byly identifikovány trendy a sezónní variace v obsahu zelené hmoty ve vodních plochách.

4 PŘÍPRAVA A ZPRACOVÁNÍ DAT

Kvalitní a systematická příprava vstupních dat je základním předpokladem pro spolehlivé vyhodnocení prostorové a časové dynamiky výskytu zelené hmoty na sledovaných vodních plochách. Tato kapitola popisuje všechny klíčové kroky, které byly provedeny před samotnou analytickou fází. Postupně je zde představen proces výběru, hodnocení a stažení družicových snímků Sentinel-2, tvorba polygonových masek přehrad, automatizovaný výpočet vegetačních indexů NDVI a NDCI a jejich spojení s referenčními daty SZÚ.

Součástí kapitoly je rovněž vytvoření modelu dna přehrady Jesenice na základě historických topografických map a jeho využití pro prostorovou analýzu výskytu zelené hmoty ve vztahu k hloubce vodního sloupce. Na závěr jsou popsány skripty určené k automatizaci zpracování a přípravě dat pro statistické a prostorové vyhodnocení. Celý proces byl navržen tak, aby zajistil vysokou míru konzistence, reprodukovatelnosti a efektivity při práci s rozsáhlým množstvím vstupních dat.

4.1 Ustanovení výzkumného místa a období

Provedení analýzy obsahu zelené hmoty vyžadovalo pečlivé stanovení výzkumného období, které by umožnilo efektivní vyhodnocení časových trendů a prostorového rozložení znečištění. Při stanovení období byly zohledněny faktory jako dostupnost satelitních snímků, frekvence a kvalita referenčních měření SZÚ a sezónní dynamika rozvoje sinic ve vodních plochách.

Období pro analýzu bylo stanoveno na roky 2018 až 2024, přičemž bylo vymezeno pouze na letní měsíce červen až září. Toto rozhodnutí vychází ze dvou klíčových faktorů: jednak z hlediska vegetačního období sinic, kdy se v teplých měsících vyskytují v nejvyšších koncentracích, a dále z faktu, že právě v tomto období jsou prováděna referenční měření SZÚ. Výběr tohoto období tedy umožňuje efektivní propojení satelitních dat s terénními měřeními a poskytuje konzistentní dataset pro další analýzy.

Výběr let 2018 až 2024 byl motivován především dostupností dat. Sentinel-2 poskytuje snímky v dostatečné časové frekvenci, která umožňuje sledování meziročních změn, a referenční data SZÚ jsou pro toto období rovněž k dispozici. Starší snímky Sentinel-2 by sice mohly být využity, nicméně pro potřeby této práce by jejich zpracování bylo příliš časově náročné. Data z mise Landsat nebyla zahrnuta z důvodu nižšího prostorového rozlišení, což by mohlo negativně ovlivnit přesnost analýzy.

Letní sezónní vymezení odpovídá hlavnímu vegetativnímu období sinic, kdy dochází k nejvyšší míře eutrofizace vodních ploch. Také podle zdroje Sinice.cz je vrchol výskytu sinic zaznamenáván v srpnu a září, což se shoduje s obdobím, pro které byla analýza prováděna. Tato sezónní dynamika byla potvrzena i v průběhu analýzy, kde hodnoty indexů NDVI a NDCI dosahovaly nejvyšších hodnot právě v těchto měsících. Současně s tím referenční měření SZÚ probíhají od konce května do začátku září, což zajišťuje dostatečný překryv mezi dostupnými terénními a satelitními daty.

V rámci analýzy bylo zahrnuto pět přehrad, které byly vybrány s ohledem na jejich různé fyzikálně-geografické vlastnosti, rozlohu, využití a historický výskyt sinic. Jednotlivé přehrady jsou rozmístěny po celé ČR, což umožňuje studium rozdílů mezi regiony. Přehled vybraných přehrad je uveden v tabulce 1 a jejich rozmístění v rámci ČR je znázorněno na mapě (Obr. 2).

Tabulka 1 Seznam analyzovaných přehrad

Přehrada	Geografická oblast	Rozloha (ha)	Charakteristika
Skalka	Západní Čechy	286	Malá přehrada, silně ovlivněná zemědělským odtokem
Jesenice	Západní Čechy	760	Větší vodní nádrž, silně ovlivněná zemědělským odtokem
Orlík	Střední Čechy	2732	Největší přehrada v analýze, Rekreační využití
Brněnská	Jižní Morava	259	Silná eutrofizace, časté problémy s vodním květem sinic
Plumlov	Střední Morava	66	Malá přehrada, extrémní výskyt sinic

Každá z přehrad byla vybrána nejen na základě dostupnosti dat, ale také s ohledem na specifické charakteristiky. Například vodní nádrž (VN) Skalka a VN Jesenice jsou menší přehrady, které však trpí významnými ekologickými problémy spojenými s nadměrným výskytem sinic. Orlík jako největší přehrada v analýze slouží k rekreaci i energetice, zatímco Brněnská přehrada je známá svou silnou eutrofizací. Plumlov, ačkoliv nejmenší z analyzovaných nádrží, vykazuje extrémní náchylnost k přemnožení sinic v letních měsících.

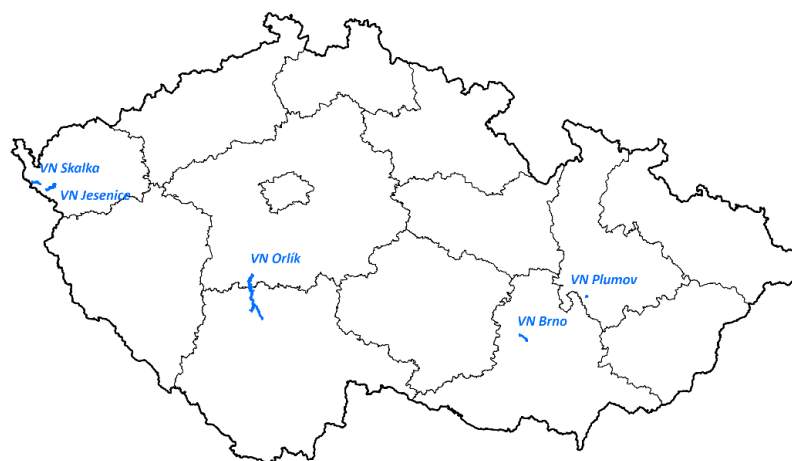
Počet použitelných snímků se mezi jednotlivými přehradami liší v závislosti na průletové frekvenci družice a atmosférickým podmínkám. Celkový přehled dostupných snímků Sentinel-2 pro jednotlivé přehrady je uveden v tabulce 3.

Z uvedených hodnot vyplývá, že největší počet snímků byl dostupný pro Brněnskou přehradu a Plumlov, zatímco nejmenší množství dat bylo k dispozici pro Jesenici a Skalku. To je způsobeno zejména vyšší oblačností v některých regionech, která v některých letech omezila využitelnost dostupných snímků.

Podobně se mezi přehradami liší i počet měřicích stanic, kde největší počet stanovišť je na Orlíku a Brněnské přehradě, zatímco Skalka a Plumlov mají pouze jedno měřicí místo. Přehled počtu stanovišť je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2 Počet měřicích stanic na analyzovaných přehradách

Přehrada	Počet měřicích stanic
Skalka	1
Jesenice	3
Orlík	6
Brněnská	5
Plumlov	1



Obr. 2 Poloha analyzovaných přehrad

Stanovené období a vybrané přehrady vytvářejí robustní základ pro prostorové a časové analýzy NDVI/NDCI. Díky pečlivé selekci dat je možné efektivně hodnotit vztahy mezi kvalitou vody a změnami v obsahu zelené hmoty, a to jak z hlediska jednotlivých přehrad, tak i v rámci dlouhodobých trendů mezi lety 2018–2024.

4.2 Výběr, hodnocení a stahování snímků Sentinel-2

V rámci této studie byly využity družicové snímky Sentinel-2, které poskytují vysoké prostorové a spektrální rozlišení vhodné pro monitorování změn vegetace a vodních ekosystémů. Proces výběru, hodnocení a stahování snímků byl klíčovým krokem pro následnou analýzu, neboť umožnil eliminaci dat, která by mohla být ovlivněna atmosférickými vlivy, jako je oblačnost či mlha, a zajistil dostatečnou kvalitu výsledků. Veškerá data byla omezena na letní měsíce, konkrétně období od června do září, které odpovídá maximálnímu rozvoji sinic a zároveň zajišťuje odpovídající překryv se sběrem referenčních dat SZÚ.

Použity byly výhradně snímky Sentinel-2 ve verzi L2A, tedy atmosféricky korigované, které umožňují přesnější analýzu vegetačních indexů. Pro eliminaci nežádoucích vlivů byly snímky hodnoceny podle kvalitativní škály A–F, přičemž do analýzy byly zařazeny pouze snímky klasifikované jako A–E. Snímky kategorie F byly zcela vyřazeny, neboť obsahovaly příliš vysoký podíl zakrytí oblačností či jinými atmosférickými artefakty. Proces hodnocení probíhal jak vizuálně, tak i pomocí SCL (Scene Classification Map masky), která umožňuje detailní klasifikaci pixelů na základě jejich optických vlastností. Tato metodika zajistila, že v analýze byly využity pouze snímky, které poskytují dostatečně spolehlivé výsledky.

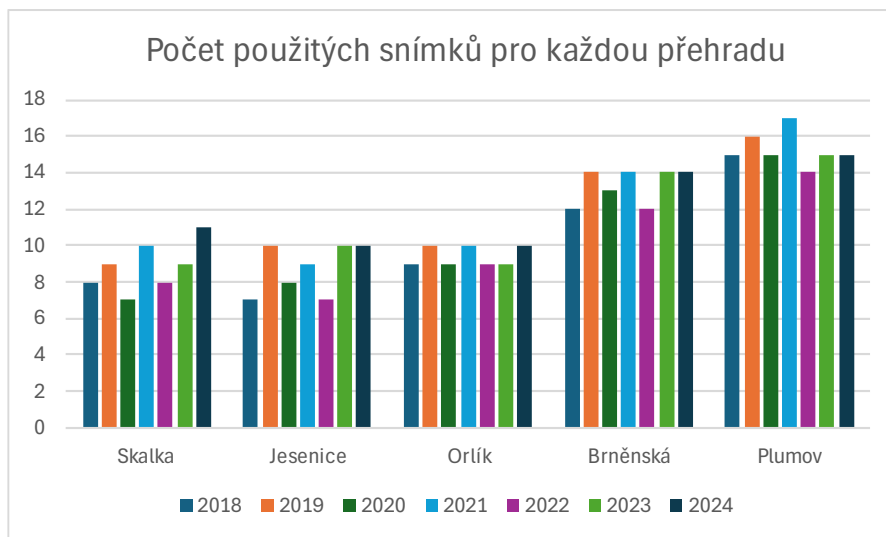
Stahování snímků bylo prováděno dvěma hlavními způsoby. Většina snímků byla stažena ručně prostřednictvím platformy browser.dataspace.copernicus.eu, která umožňuje přímý přístup k datům Sentinel-2, zatímco menší část byla získána pomocí SentinelHub API. Tento přístup kombinoval manuální kontrolu výběru dat s možností automatizovaného stahování v případě potřeby. Stažené snímky byly následně systematicky organizovány v adresářové struktuře na OneDrive, kde byly tříděny podle přehrady, roku a data pořízení. Tímto způsobem bylo zajištěno efektivní řízení dat a snadná orientace v datasetu během zpracování.

Hlavním omezením při výběru snímků byla přítomnost oblačnosti, která výrazně ovlivnila dostupnost snímků v některých obdobích. Zatímco některé roky poskytovaly dostatek vhodných dat, v jiných sezónách byl výběr omezen nepříznivými meteorologickými podmínkami. Z tohoto důvodu se počet využitelných snímků mezi jednotlivými přehradami lišil. Největší počet použitelných snímků byl zaznamenán pro Plumlov a Brněnskou přehradu, zatímco nejméně kvalitních snímků bylo dostupných pro Jesenici a Skalku, což odpovídá regionálním rozdílům v klimatických podmínkách. Celkový počet dostupných snímků, počet využitých snímků a počet snímků vyřazených kvůli atmosférickým vlivům je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3 Počet celkových, použitých a nevyužitých snímků pro jednotlivé přehrady

Přehrada	Celkem snímků	Užito	Neužito
Skalka	196	62	134
Jesenice	196	61	135
Orlík	204	66	138
Brněnská	340	93	247
Plumov	340	107	233

Vývoj dostupnosti snímků v jednotlivých letech je znázorněn v obrázku 3, který ukazuje rozdíly mezi jednotlivými sezónami a zvýrazňuje roky s nižší využitelností dat. Tento graf reflektuje variabilitu meteorologických podmínek a potvrzuje, že některé sezóny byly pro analýzu vhodnější než jiné.



Obr. 3 Počet použitých snímků za roky

Celý proces výběru a hodnocení snímků Sentinel-2 byl navržen tak, aby minimalizoval vliv atmosférických artefaktů a zajistil dostatečně kvalitní data pro následné analýzy. Kombinace manuálního hodnocení a automatizovaného přístupu umožnila efektivní selekci snímků a zajistila, že výsledný dataset je dostatečně robustní pro prostorové i časové analýzy.

4.3 Vytvoření masek přehrad

Vytvoření přesných polygonových masek jednotlivých přehrad představovalo zásadní krok při přípravě dat pro další analýzy. Cílem této fáze bylo stanovit co nejvěrnější hranice vodní plochy na základě kombinace vizuální interpretace a spektrálních charakteristik družicových snímků Sentinel-2. Proces probíhal výhradně ručně v prostředí ArcGIS Pro, bez využití automatizovaných funkcí, jako je „snapping“ nebo „trace“, s cílem zachovat maximální kontrolu nad tvarem a přesností masky. Tento přístup, byť časově náročnější, umožnil zachytit i jemné morfologické odlišnosti jednotlivých nádrží, které by mohly být při použití automatizovaných metod snadno ztraceny.

Pro každou přehradu byl vybrán jeden referenční snímek, u kterého byla hladina vody nejnížší za celé analyzované období. Tyto snímky posloužily jako podklad pro digitalizaci hranic vodní plochy. Primárním vizuálním podkladem byla RGB kompozice sestavená z pásem B4 (red), B3 (green) a B2 (blue). Zároveň byly využívány i výstupní rastry indexů NDVI a zejména NDCI, které pomáhaly vizuálně potvrdit vodní plochy a odlišit je od okolní vegetace, sedimentů či antropogenních struktur.

Masky byly digitalizovány ve měřítku odpovídajícím prostorovému rozlišení 20 m, tedy v souladu se spektrálními pásmy využívanými pro výpočet indexů. Každá maska byla vytvořena jako samostatná vrstva a uložena ve formátech Shapefile (shp) a Layer Package (lpx) v souřadnicovém systému WGS 84 / UTM zóna 33N (EPSG:32633) (World Geodetic System, Universal Transverse Mercator). Tato jednotná struktura umožnila snadnou integraci masek do všech následných procesů.

V menší části případů byla pro přehradu vytvořena jedna polygonová maska. Naopak přehrady Jesenice, Orlík a Brněnská, kde složitější členitost vodního tělesa nebo přítomnost mostních konstrukcí vyžadovala tvorbu více polygonů. Naopak menší a tvarově jednodušší nádrže, jako jsou Skalka a Plumlov, si vystačily s jednou souvislou maskou. Každá polygonová maska byla vytvořena zcela volnou rukou („freehand“), bez využití nástrojů pro generalizaci nebo napojování geometrie, a to s důrazem na respektování tvaru jednotlivých pixelů.

Proces tvorby masek probíhal v úvodní fázi praktické části práce, ihned po stažení prvních satelitních snímků a jejich ověření. Výsledné masky následně sloužily jako základní prostorové omezení pro výpočet indexů, extrakci hodnot pro korelace i pro prostorové analýzy vzdálenosti od břehu a hloubky. Přestože podrobnosti o těchto aplikacích budou rozvedeny až v dalších podkapitolách, je nutné podtrhnout, že bez předchozí pečlivé tvorby masek by nebylo možné dosáhnout relevantních výsledků.

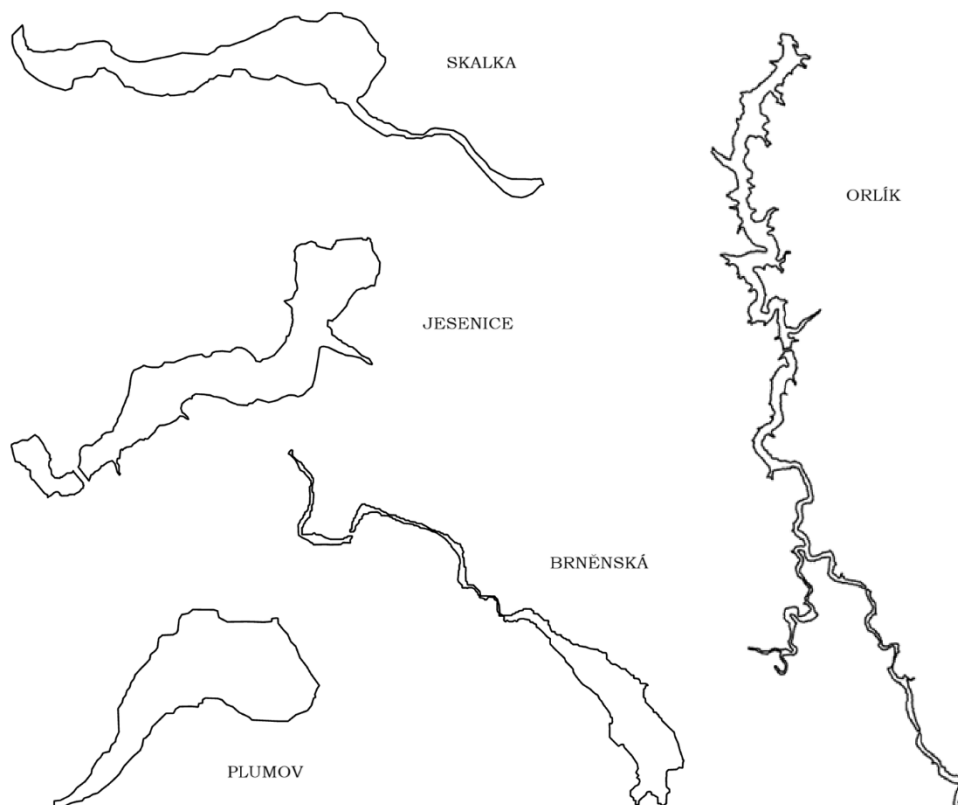
Ačkoliv ruční tvorba masek s sebou nese určitou míru subjektivity, vzhledem k rozlišení použitých dat a rozsahu vodních ploch je dosažená přesnost zcela dostatečná. Automatizované metody, jako například detekce na základě indexu NDWI nebo klasifikace Scene Classification Layer, nebyly zvoleny právě kvůli častým chybám a nepřesnostem při aplikaci na české nádrže, které často leží v blízkosti městské zástavby či ve vegetačně složitých oblastech. Ruční přístup tak představuje optimální kompromis mezi přesností, časovou náročností a interpretovatelností výsledků.

Obrázek 4 představuje ukázkou části masky přehrady Jesenice překryté nad RGB snímkem Sentinel-2. Je zde patrné, jak byla hranice kreslena s ohledem na viditelné spektrální rozdíly mezi vodní a suchozemskou částí.



Obr. 4 Ukázka ručně vytvořené masky přehrady Jesenice překryté nad RGB snímkem Sentinel-2

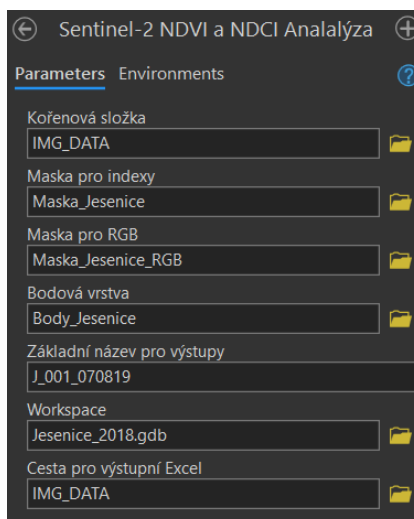
Na Obrázku 5 jsou znázorněny všechny vytvořené masky přehrad – Skalka, Jesenice, Orlík, Brněnská, Plumov. Pro účely této vizualizace nebylo zachováno skutečné měřítko ani proporce jednotlivých objektů. Cílem obrázku je pouze názorně ukázat tvarovou různorodost a členitost vodních ploch.



Obr. 5 Ilustrace všech pěti vytvořených masek přehrad (bez zachování měřítka)

4.4 Skript pro automatizaci analýz NDVI/NDCI

Na základě vytvořených polygonových masek přehrad a předem vybraných satelitních snímků bylo nezbytné navrhnout nástroj, který umožní efektivní a konzistentní zpracování velkého objemu dat. Ruční výpočty vegetačních indexů, jejich klasifikace a extrakce hodnot by byly v rozsahu této práce prakticky neproveditelné, a proto byl vytvořen skript sloužící k automatizaci celého procesu. Tento skript, připravený jako nástroj v prostředí ArcGIS Pro, je uživatelsky dostupný ve formě přehledného toolboxového rozhraní (obrázek 6).



Obr. 6 Uživatelské rozhraní skriptu v prostředí ArcGIS Pro – zadání vstupních parametrů

Vstupem skriptu je složka IMG_DATA, která odpovídá standardnímu výstupu při stahování dat Sentinel-2. Obsahuje jednotlivé spektrální vrstvy ve formátu .jp2, rozdělené podle prostorového rozlišení (např. složky R10m, R20m). Dále skript pracuje s polygonovou maskou přehrady (ve dvou variantách – pro indexové výpočty a RGB vizualizaci), bodovou vrstvou, například měřicích stanic SZÚ a pracovním prostředím (workspace), definovaným jako výstupní geodatabáze. Parametrem je také název výstupních souborů a cesta k výslednému Excel dokumentu.

Samotný výpočet vegetačních indexů probíhá na základě standardizovaných vzorců používaných pro multispektrální snímky Sentinel-2. Pro výpočet NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) je použit vztah:

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (1)$$

kde B8 označuje blízké infračervené pásmo a B4 červené pásmo. Pro výpočet NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) slouží podobný vztah využívající červený okraj (red-edge) v pásmu B5:

$$NDCI = (B5 - B4) / (B5 + B4) \quad (2)$$

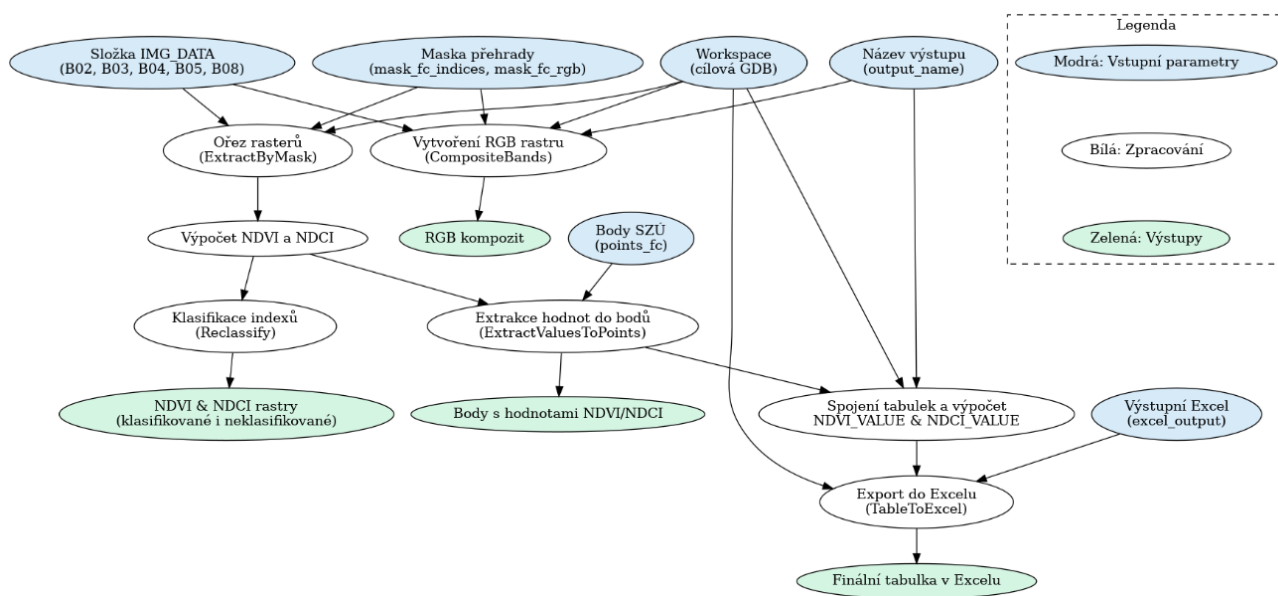
Logika výpočtu indexů a jejich klasifikace je implementována přímo ve skriptu pomocí výpočetních funkcí ArcPy. Ukázka příslušné části skriptu (obrázek 7):

```
# Výpočet NDVI a NDCI
log_message("Výpočet NDVI a NDCI...")
ndvi = (raster_b8_clip - raster_b4_clip) / (raster_b8_clip + raster_b4_clip)
ndci = (raster_b5_clip - raster_b4_clip) / (raster_b5_clip + raster_b4_clip)

# Klasifikace NDVI a NDCI
log_message("Klasifikace NDVI a NDCI...")
ndvi_reclass = Reclassify(ndvi, "VALUE", "-1 -0.1 1; -0.1 0 2; 0 0.1 3; 0.1 0.2 4; 0.2 0.3 5; 0.3 1 6")
ndci_reclass = Reclassify(ndci, "VALUE", "-1 -0.1 1; -0.1 0 2; 0 0.1 3; 0.1 0.2 4; 0.2 0.3 5; 0.3 1 6")
```

Obr. 7 Ukázka výpočtu indexů NDVI a NDCI v jazyce Python (ArcPy)

Průběh celého automatizovaného zpracování je znázorněn na schématu obrázku 8. V první fázi jsou načteny spektrální vrstvy potřebné pro výpočet indexů, které jsou následně oříznuty pomocí polygonové masky dané přehrady. Po výpočtu NDVI a NDCI dochází k jejich klasifikaci na základě šesti kategorií. Výsledné rastry – jak neklasifikované, tak klasifikované – jsou uloženy do výstupní geodatabáze.



Obr. 8 Schéma automatizovaného zpracování indexů NDVI a NDCI (využit ChatGPT-4o)

Paralelně s výpočtem indexů dochází také k vytvoření RGB kompozitu ze spektrálních pásem B4 (červená), B3 (zelená) a B2 (modrá), který slouží především pro vizuální kontrolu výsledků a orientaci v prostoru. RGB výstup je rovněž ukládán do pracovního prostředí.

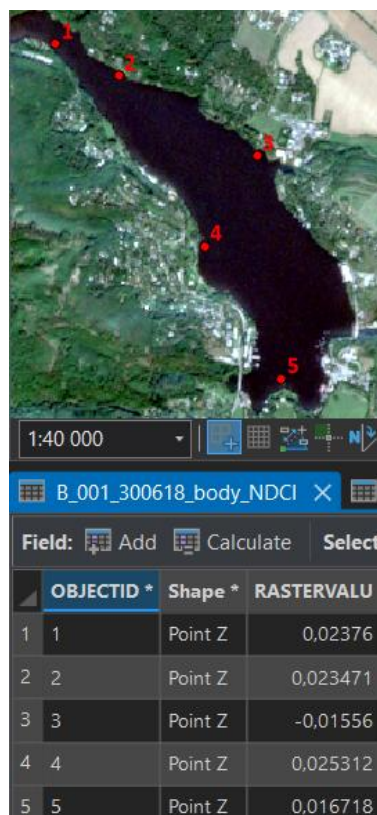
V další fázi jsou pomocí nástroje ExtractValuesToPoints extrahovány hodnoty NDVI a NDCI do jednotlivých bodů, které v této práci odpovídají měřicím stanicím SZÚ. Vzniklé bodové vrstvy jsou následně převedeny do tabulkového formátu, kde jsou pomocí nástroje JoinField a výpočtů v poli (CalculateField) přidány sloupce NDVI_VALUE a NDCI_VALUE. Tyto hodnoty odpovídají výstupům z neklasifikovaných rastrů a slouží jako podklad pro korelační analýzy a další statistické výpočty.

Celý proces je zakončen exportem finální tabulky do formátu Microsoft (MS) Excel, který obsahuje hodnoty obou indexů pro každý měřicí bod a snímek. Tento výstup tvoří jeden z klíčových pilířů datového zázemí celé práce a byl dále využit při analýze vztahu mezi satelitními indexy a referenčními ukazateli kvality vody. Ukázka této tabulky je uvedena v tabulce 4.

Tabulka 4 Ukázka upravené výstupní tabulky s hodnotami NDVI a NDCI na měřicích bodech SZÚ

OBJECTID	NDCI_VALUE	NDVI_VALUE
1	-0,304347813	-0,25
2	0,050193049	-0,153526977
3	-0,021276595	-0,416308999

Ukázka extrahovaných bodových hodnot v prostředí ArcGIS Pro je zobrazena na obrázku 9. V tomto případě se jedná o Brněnskou přehradu, kde je patrné rozmístění jednotlivých bodů včetně přidružených hodnot indexů.



Obr. 9 Ukázka extrahovaných hodnot NDVI a NDCI ve vrstvě měřicích bodů SZÚ (Brněnská přehrada)

Kromě surových hodnot byly v rámci skriptu generovány také klasifikované rastry, které slouží k vizuální reprezentaci intenzity výskytu zelené hmoty. Hodnoty NDVI a NDCI byly podle odborných zdrojů rozděleny do šesti kategorií: čistá voda (-1 až -0,1), znečištěná voda (-0,1 až 0), vegetační zákal vody (0 až 0,1), vodní květ (0,1 až 0,2), silný vodní květ (0,2 až 0,3) a masivní vodní květ (0,3 až 1). Výsledný vzhled těchto rastrových výstupů je ilustrován na obrázku 10.



Obr. 10 Ukázka klasifikovaného rastru NDVI pro přehradu Skalka (září 2023)

Vývoj skriptu a jeho následná optimalizace probíhala iterativně za využití pokročilých nástrojů umělé inteligence, konkrétně prostřednictvím AI jazykového modelu ChatGPT-4o. Tímto způsobem byla zajištěna nejen funkčnost, ale i optimalizace jednotlivých kroků, kontrola syntaxe a implementace automatických kontrolních mechanismů. Díky této automatizaci bylo možné efektivně zpracovat všech 389 satelitních snímků napříč pěti analyzovanými lokalitami, přičemž bylo dosaženo vysoké míry konzistence výstupů a minimalizace chyb vznikajících ručním zpracováním.

4.5 Spojení dat indexů s referenčními daty SZÚ

Pro kvantitativní hodnocení vztahů mezi vegetačními indexy NDVI a NDCI a ukazateli kvality vody bylo nezbytné propojit výstupy z indexů s daty SZÚ. Tato data poskytují podrobný přehled o stavu koupacích vod na jednotlivých přehradách a slouží jako referenční základ pro korelační a statistické analýzy uvedené v [kapitole 5.1](#).

Podrobné hodnoty jednotlivých ukazatelů kvality vody (sinice, chlorofyl-a, průhlednost, vodní květ) byly získány od SZÚ na základě žádosti. Z veřejně dostupného portálu [koupacivody.cz](#) byl čerpán pouze finální index jakosti koupacích vod, který kombinuje jednotlivé indikátory a prezentuje výsledné hodnocení pro veřejnost. Veškerá data pokrývají letní období (červen až září) v letech 2018 až 2024, tedy časový rozsah shodný s použitými snímky Sentinel-2 pro tuto práci. Měření probíhaly obvykle v týdenních až čtrnáctidenních intervalech a zaměřovaly se na vybraná rekreační místa s dlouhodobým sledováním. Počet stanovišť se mezi jednotlivými přehradami lišil, například na Orlíku bylo zahrnuto šest odběrových míst, zatímco na přehradách Skalka a Plumlov pouze jedno.

Z každého odběrového místa byly k dispozici hodnoty několika klíčových ukazatelů: sinice (buňky/ml), chlorofyl-a ($\mu\text{g/l}$), průhlednost (m), vodní květ (stupeň 0–3) a souhrnný index kvality vody, který je výsledkem kombinace předchozích indikátorů. Tento index odpovídá klasifikačním kategoriím stanoveným vyhláškou č. 238/2011 Sb., která definuje hygienické limity pro koupací vody v ČR. Vybraná kritéria rozdělení kvality vody podle této vyhlášky jsou shrnuta v tabulce 5.

Tabulka 5 Vybraná kritéria pro hodnocení kvality koupacích vod podle vyhlášky č. 238/2011 Sb.

Kategorizace jakosti	Sinice (buňky/ml)	Chlorofyl-a ($\mu\text{g/l}$)	Průhlednost (m)	Vodní květ (stupeň)
Výborná	< 20 000	< 10	> 1	0
Dobrá	< 100 000	< 50	> 1	1
Přijatelná	< 250 000	< 100	< 1	2
Nevyhovující	$\geq 250\,000$	≥ 100	< 1	3

Pro každé měření SZÚ bylo následně přiřazeno spektrální hodnocení dané oblasti, konkrétně hodnoty NDVI a NDCI získané z výpočtů popsanych v předchozí [podkapitole](#). Párování dat probíhalo s ohledem na dvě hlavní kritéria: shodu lokace měřicího bodu a časovou blízkost snímku Sentinel-2. Vstupní dataset zahrnuje všechna měření z vymezeného období, nicméně pro statistické analýzy byly dále využity pouze ty záznamy, kde rozdíl mezi datem pořízení snímku a datem měření SZÚ nepřesáhl ± 1 den.

Celý proces párování byl proveden ručně, protože množství dat a specifická struktura měřicích bodů v jednotlivých letech neumožňovala snadné automatizované zpracování. Výsledný dataset obsahuje 280 párovaných záznamů a slouží jako základní analytická vrstva pro další části práce. Vzhledem k tomu, že některé přehrady disponovaly více měřicími stanicemi, byly do finální tabulky zahrnuty i opakované záznamy pro stejný den, lišící se lokalitou měření.

Ukázka výsledného databsetu je uvedena na obrázku 11. Pro přehlednost byla data členěna podle jednotlivých přehrad do samostatných listů a doplněna o metadata. Každý řádek reprezentuje jedno konkrétní měření a obsahuje jak hodnoty NDVI/NDCI, tak všech pět referenčních indikátorů kvality vody, včetně informace o rozdílu dnů mezi satelitním a terénním záznamem.

Přehrada Skalka										
Datum	Použitelnost	Kvalita	Koupací vody	Výsledek NDVI	Výsledek NDCI	Sinice buňky	Vodní květ	Chlorofil-A	Průhlednost	Rozdíl dní
01.06.2018	NE	F	4							
03.06.2018	NE	F	4			110000	3	143	0,8	1
08.06.2018	NE	F	4							
13.06.2018	NE	F	3							
18.06.2018	NE	F	3			86000	2	48,8	1,1	0
23.06.2018	NE	F	3							
28.06.2018	NE	F	3							
03.07.2018	ANO	A	3	-0,199	0,212	190000	2	82,1	1	1
08.07.2018	NE	F	3,5							
13.07.2018	NE	F	4							
18.07.2018	NE	F	4			280000	2	123	0,95	2
23.07.2018	NE	F	3,5							
31.07.2018	NE	F	3			69000	2	29,1	2,1	1
02.08.2018	NE	F	3,5							
07.08.2018	ANO	B	3,5	-0,205	0,212					
12.08.2018	NE	F	4			74000	3	60,7	0,76	-1
17.08.2018	ANO	B	4	0,080	0,186					
20.08.2018	ANO	A	4	-0,233	0,249					
22.8.2018	ANO	A	4	-0,176	0,232					
27.08.2018	NE	F	4			65000	3	73,3	0,65	0
01.09.2018	NE	F	-							
06.09.2018	ANO	A	-	0,012	0,329					
11.09.2018	NE	F	-							
16.09.2018	ANO	A	-	-0,001	0,123					
21.09.2018	NE	F	-							
26.09.2018	NE	F	-							

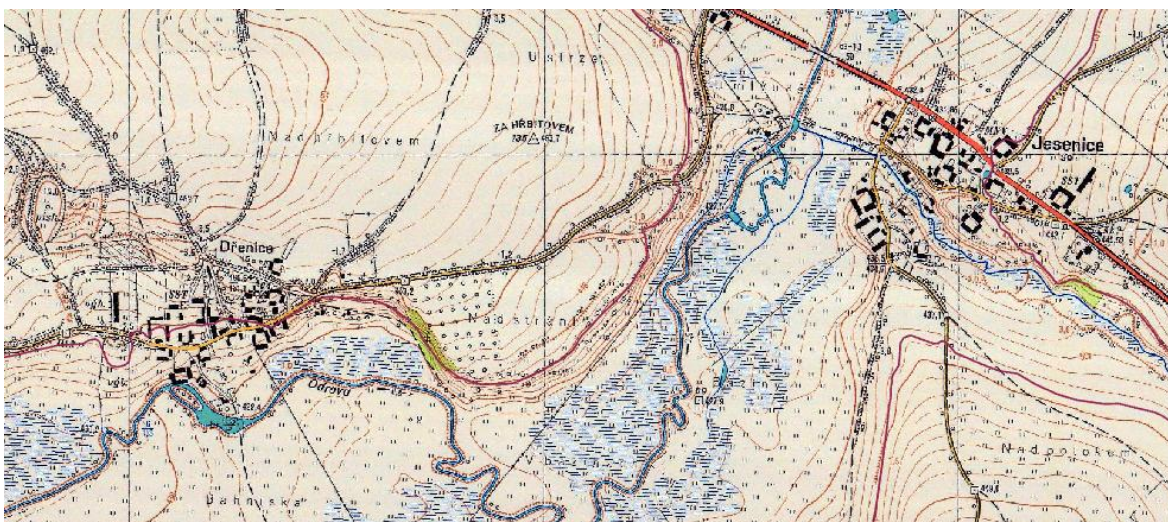
Obr. 11 Ukázka datasetu propojující vegetační indexy s daty SZÚ – přehrada Skalka

Spojením satelitních a referenčních dat vznikl konzistentní a podrobně strukturovaný soubor, který umožňuje hlubší statistické vyhodnocení souvislostí mezi stavem vodní hladiny a opticky detekovatelnými charakteristikami. Právě tento integrovaný přístup tvoří základ pro korelační analýzy, které jsou podrobně rozebrány v následující kapitole 5.1.

4.6 Model dna přehrady Jesenice

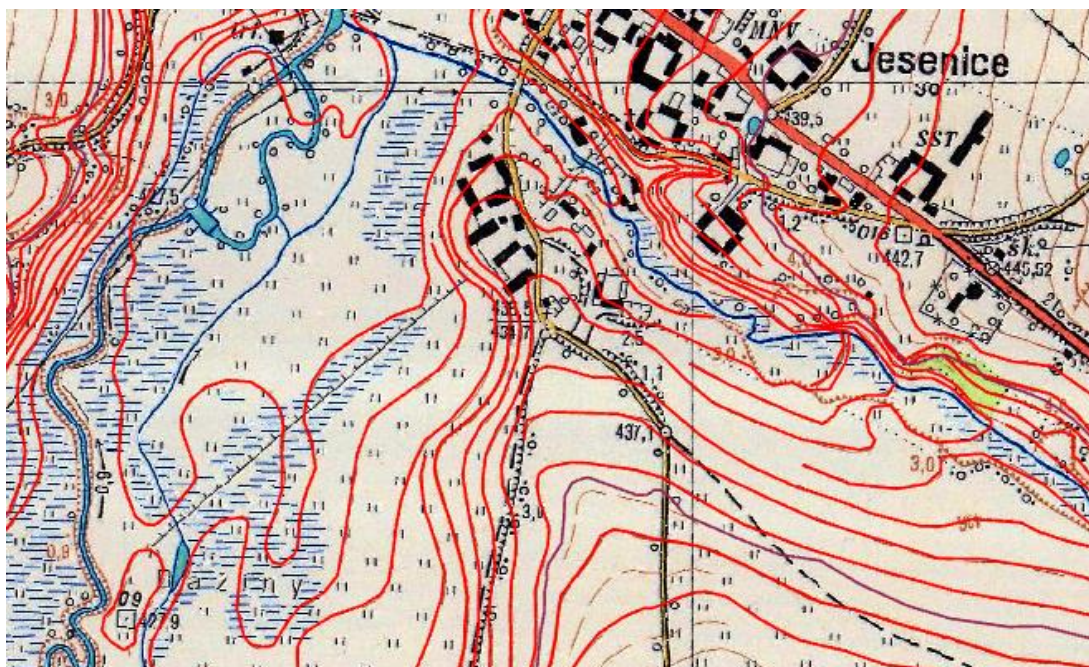
V rámci prostorových analýz byl pro přehradu Jesenice vytvořen digitální model dna, který sloužil jako podklad pro hodnocení vztahu mezi hloubkou vody a rozsahem výskytu zelené hmoty. Ačkoliv dostupnost bathymetrických dat pro české vodní nádrže bývá velmi omezená, přehrada Jesenice díky svému historickému významu a dokumentaci umožnila rekonstrukci orientačního hloubkového modelu na základě topografických map z poloviny 20. století. Tento model byl následně využit k prostorovému vyhodnocení hodnot NDVI a NDCI v závislosti na hloubce vodního sloupce.

Jako vstupní podklad byly využity topografické mapy 1 : 10 000 v souřadnicovém systému S-1952, získané prostřednictvím Geoportálu ČÚZK. Pro oblast Jesenice byly zakoupeny tři příslušné mapové listy, každý za cenu 25 Kč. Vzhledem k tomu, že šlo o historické naskenované dokumenty bez georeferenčních údajů, bylo nejprve nutné provést ruční georeferencování jednotlivých mapových výřezů. Jako referenční body (20-30 pro mapu) byly využity trvalé geodetické body, vrcholy kót a linie vodních toků, které jsou dobře identifikovatelné jak v historickém, tak současném prostoru. Výsledkem byl prostorově korektní rastr, připravený k digitální extrakci výškových dat (obr. 12).



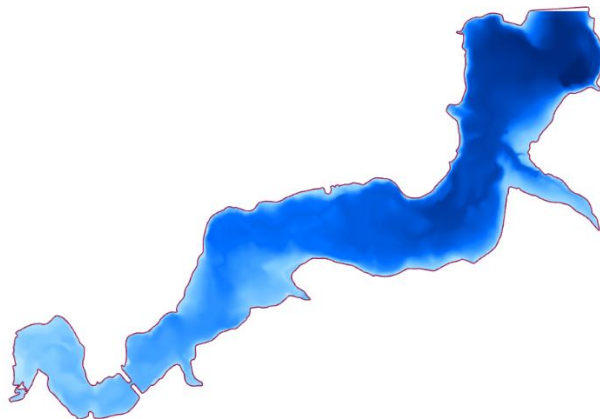
Obr. 12 Georeferencovaná topografická mapa přehrady Jesenice (S-1952)

Z takto upravených map byly následně ručně digitalizovány vrstevnice, a to s maximální možnou přesností a pečlivostí. Digitalizace probíhala ve vektorovém formátu, přičemž každé linii byla přiřazena odpovídající nadmořská výška. Tyto hodnoty vycházely z číselného značení vrstevnic přímo na mapě a reprezentovaly výšku dna nádrže nad mořem. Ukázka výsledné sady vrstevnic je zobrazena na obrázku 13, kde je patrná nejen vysoká členitost terénu, ale také obtížnost přesné interpretace, zejména v místech s výrazným sklonem břehů a nedostatečnou hustotou vrstevnic v záplavové zóně.



Obr. 13 Ukázka digitalizovaných vrstevnic z historické mapy přehrady Jesenice

Interpolace digitálního modelu byla provedena pomocí geoprocessingového nástroje Topo to Raster v prostředí ArcGIS Pro. Tento nástroj je optimalizován pro tvorbu hydrologicky korektních modelů terénu na základě vrstevnic, bodových výšek nebo linií odvodnění. V tomto případě byly využity pouze digitalizované vrstevnice jako hlavní zdroj výškových dat. Interpolace probíhala ve standardním nastavení, bez dodatečných úprav parametrů, a výsledkem byl raster s prostorovým rozlišením 1 m/pixel. Výsledný výškový model zachycuje nadmořskou výšku dna nádrže v celé ploše Jesenické přehrady (obrázek 14).



Obr. 14 Výsledný rasterový model dna přehrady Jesenice (1 m/pixel)

Pro účely následné analýzy bylo nutné výškový raster převést na hloubkový model. K tomu byla stanovena referenční hladina nádrže na hodnotu 440 m n. m., která mírně převyšuje běžně uváděnou provozní hladinu (438 m n. m.). Toto navýšení bylo zavedeno s ohledem na erozi dna, postupné zanášení sedimenty, nepřesnosti historických podkladů i vliv samotné interpolace. Výsledný hloubkový raster tedy neodpovídá přesné bathymetrii, ale představuje generalizovaný odhad relativních hloubek v rámci dostupných dat.

Je třeba zdůraznit, že model vykazuje významné nepřesnosti zejména na březích, kde často dochází ke vzniku záporných hloubek (tedy kladných nadmořských výšek) způsobených interpolací za hranicí reálného vodního tělesa. Tento jev je částečně podmíněn i absencí vrstevnic v některých oblastech nebo jejich nedostatečnou hustotou. Dále je možné, že v některých částech dna došlo od 50. let k výraznějším morfologickým změnám, například odplavením sedimentů, erozí břehů či akumulací u tělesa hráze. Přes tyto limity však model poskytuje cenné prostorové informace o hloubkovém gradientu, které bylo možné využít pro analýzy rozložení zelené hmoty.

Vzhledem k těmto omezením byl model považován za orientační a byl využit výhradně pro potřeby prostorového členění nádrže podle hloubky. Jeho výstupy nebyly použity pro přesnou bathymetrii ani pro výpočet objemu nádrže. Model rovněž nebyl klasifikován do hloubkových pásem přímo, ale jeho hodnoty sloužily jako podklad pro prostorovou analýzu výskytu NDVI a NDCI v různých hloubkových intervalech, jak bude podrobně popsáno v kapitole [5.2](#).

Z časových důvodů byl tento postup aplikován pouze na přehradu Jesenice. Pro ostatní nádrže, zejména Skalku, bylo sice zvažováno obdobné řešení, nicméně kvůli absenci podkladů a vysoké časové náročnosti nebyl proces replikován. Model dna přehrady Jesenice tak představuje unikátní případovou studii, na jejímž základě lze demonstrovat možnosti využití historických kartografických dat pro prostorovou analýzu ekologických jevů ve vodních nádržích.

4.7 Skript pro přípravu dat na analýzy

V návaznosti na výpočty indexů NDVI a NDCI a vytvořený hloubkový model přehrady Jesenice byl pro potřeby prostorových analýz vytvořen doplňkový skript, jehož cílem bylo předzpracovat výstupy do formátu vhodného pro statistické vyhodnocení. Tento nástroj umožnil agregaci hodnot indexů ve vztahu k hloubce vody a vzdálenosti od břehu, čímž se vytvořil základní podklad pro kvantitativní prostorové vyhodnocení výskytu zelené hmoty v různých částech vodního tělesa.

Skript pracuje výhradně s daty přehrady Jesenice, a to z důvodu dostupnosti hloubkového modelu, který byl vytvořen v předchozí fázi ([kapitola 4.6](#)). Vstupem jsou jednak výstupní rastry NDVI a NDCI z předchozího skriptu, dále polygon přehrady odvozený z vrstvy vodních ploch DIBAVOD, raster výšky dna a referenční výška hladiny vody, která byla stanovena na 440 m n. m. Všechny tyto komponenty byly integrovány do geoprocessingového postupu v prostředí ArcGIS Pro.

Z hlediska prostorového členění byly provedeny dvě samostatné analýzy. První z nich pracovala s vzdáleností od břehu, kdy byly pomocí nástroje Multiple Ring Buffer generovány soustředné zóny v pevném intervalu 20 metrů, od 0 do 400 metrů. Tím vznikla polygonová vrstva prstenců, která byla následně použita jako vstup pro nástroj Zonal Statistics as Table. Tento nástroj umožnil výpočet průměrných hodnot indexů NDVI a NDCI pro každý buffer zvlášť. Výsledky byly exportovány do Excel formátu a opatřeny základními popisnými atributy – datem snímku a typem indexu.

Druhá analýza pracovala s hloubkou vodního sloupce. Raster dna přehrady byl odečten od konstantní hodnoty hladiny, čímž vznikl nový raster s relativní hloubkou v metrech. Tento raster byl následně klasifikován do devíti hloubkových intervalů, jak shrnuje tabulka 6:

Tabulka 6 Rozdělení hloubkových pásem použitých při prostorové analýze

Kód pásma	Interval hloubky (m)
1	0–1
2	1–2
3	2–3
4	3–4
5	4–5
6	5–7
7	7–10
8	10–15
9	15–20

Tyto kategorie odpovídají fixnímu členění, které bylo jednotně aplikováno na všechny zpracovávané snímky v rámci přehrady Jesenice. Díky této klasifikaci bylo možné zajištění srovnatelnosti výstupů mezi jednotlivými obdobími.

Takto vzniklá zónová vrstva byla zpracována nástrojem Zonal Statistics as Table, čímž byly pro každé hloubkové pásmo určeny průměrné hodnoty obou indexů. Výstupy byly opět uloženy do Excel souboru s přidruženým datem snímku a typem indexu.

Pro každé sledované období (2018–2024) byly vytvořeny samostatné tabulky s prostorovými statistikami podle hloubky i vzdálenosti. Tyto tabulky byly následně sloučeny do dvou souhrnných dokumentů: *Komplet_hloubka.xlsx* a *Komplet_vzdalenost.xlsx*, které představují hlavní datový zdroj pro prostorové analýzy v [kapitole 5.2](#).

Struktura jednotlivých záznamů je znázorněna v tabulce 7. Každý řádek představuje kombinaci konkrétního hloubkového (nebo břehového) pásma, datumu pořízení snímku a příslušného indexu (NDVI nebo NDCI). Hodnota ve sloupci MEAN udává průměrnou intenzitu vegetace v dané zóně.

Tabulka 7 Ukázka záznamu výstupní tabulky (hloubková analýza)

Datum snímku	Index	Hloubka (m)	MEAN
03.07.2018	NDVI	0-1	-0,094641681
03.07.2018	NDVI	1-2	-0,063359845
03.07.2018	NDVI	2-3	-0,063620948
03.07.2018	NDVI	3-4	-0,173140392
03.07.2018	NDVI	4-5	-0,362441404
03.07.2018	NDVI	5-7	-0,549873108
03.07.2018	NDVI	7-10	-0,539138413
03.07.2018	NDVI	10-15	-0,591524606
03.07.2018	NDVI	15-20	-0,652814861

Výběr právě těchto dvou prostorových dimenzí, hloubky a vzdálenosti od břehu, byl zvolen z důvodu jejich ekologického významu. Hloubka zásadním způsobem ovlivňuje světelné poměry a rozložení sedimentů, zatímco vzdálenost od břehu je klíčová pro pochopení vlivu eutrofních příspěvků z okolí, jako je zemědělská činnost, splachy a urbanizace. Agregace dat v těchto dimenzích tak umožňuje interpretovat prostorové trendy zelené hmoty v přehradě Jesenice v širším kontextu.

Skript byl navržen jako jednoúčelový nástroj, optimalizovaný pro strukturu výstupů této konkrétní práce. Jeho architektura není univerzální a není snadno přizpůsobitelná jiným přehradám nebo datovým sadám bez podstatných úprav. Z tohoto důvodu nebude součástí elektronických příloh bakalářské práce, přestože představoval důležitý prvek metodického postupu. Přínos skriptu spočívá především v automatizovaném a reprodukovatelném zpracování rozsáhlých datových vstupů a jeho výstupy tvoří jeden ze základních pilířů následující analýzy prostorového rozložení vegetačních indexů.

5 KORELACE A ANALÝZY

V předchozích kapitolách byly popsány veškeré kroky související s přípravou a zpracováním vstupních dat, výpočty indexů NDVI a NDCI a prostorovou organizací datové základny. Následující část práce je zaměřena na samotné analýzy výsledků a jejich interpretaci. Cílem této kapitoly je vyhodnotit vztahy mezi spektrálními indexy a ukazateli kvality vody, zhodnotit prostorové rozložení zelené hmoty v přehradě Jesenice a identifikovat případné časové trendy.

Analytická část je rozdělena do tří tematických podkapitol. Nejprve jsou zpracovány korelace mezi indexy NDVI a NDCI a referenčními ukazateli kvality vody poskytovanými SZÚ, čímž je ověřována použitelnost satelitních dat pro nepřímé hodnocení ekologického stavu vodní plochy. V další části je pozornost věnována prostorovým analýzám, které využívají hloubkové členění a vzdálenost od břehu pro odhalení prostorových vzorců výskytu zelené hmoty. Poslední část se zabývá časovým vývojem hodnot indexů v průběhu sledovaného období let 2018–2024.

Každá z následujících podkapitol přináší samostatnou analytickou perspektivu a využívá výstupy předchozího zpracování pro hlubší interpretaci ekologických jevů v dané lokalitě.

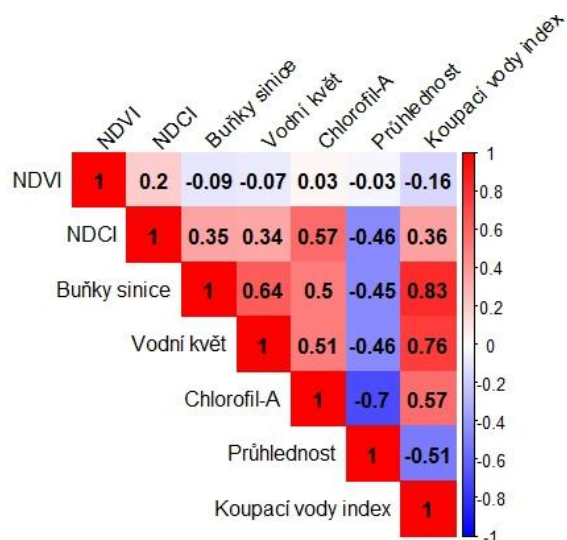
5.1 Korelace NDVI/NDCI s ukazateli kvality vody

V této podkapitole je podrobně rozebrán vztah vegetačních indexů NDVI a NDCI s vybranými ukazateli kvality vody, které byly získány z fyzických měření SZÚ. Cílem analýzy bylo ověřit vhodnost jednotlivých indexů pro detekci a hodnocení obsahu zelené hmoty ve vodních plochách, a to na základě statistické korelace mezi hodnotami indexů a fyzikálně-chemickými parametry vody.

Použité analýzy zahrnovaly pět klíčových ukazatelů kvality vody: počet buněk sinic (buněk/ml), stupeň vodního květu, koncentraci chlorofylu-A ($\mu\text{g/l}$), průhlednost vody (m) a tzv. index koupací vody, který představuje souhrnný parametr kvality podle legislativní vyhlášky č. 238/2011 Sb. Hodnoty ukazatelů byly párovány k jednotlivým satelitním snímkům Sentinel-2 s rozdílem maximálně ± 1 den. Celkem bylo do analýzy zahrnuto 280 validních záznamů.

Pro hodnocení vztahu byla zvolena Pearsonova korelace, která posuzuje lineární vztah mezi hodnotami indexů a ukazatelů. Statistická významnost byla testována na hladině $p < 0,05$. Celý proces analýzy probíhal v prostředí RStudio, kde byly použity funkce `cor()`, `cor.test()` a `lm()` ve spojení s balíčky `tidyverse` a `ggplot2`. V rámci statistického zpracování byly zároveň vizualizovány diagnostické grafy z regresních modelů.

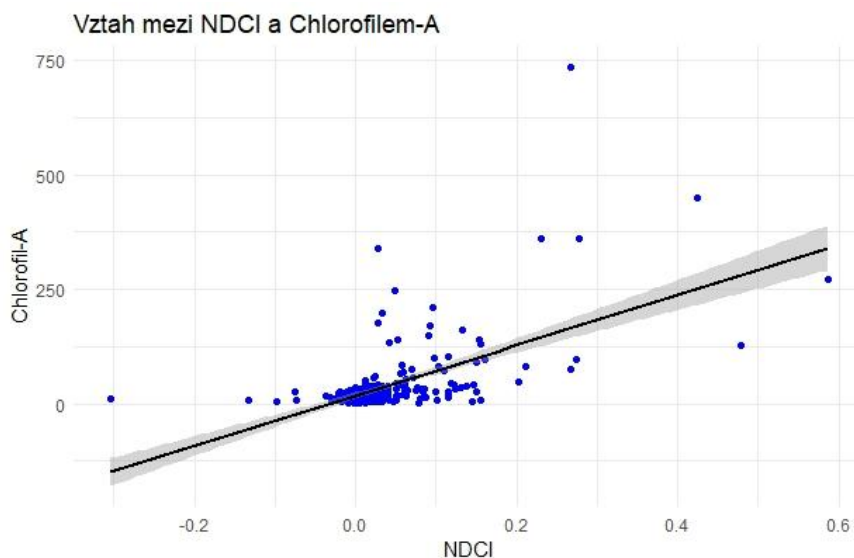
Výsledky analýzy jsou shrnuty v přehledné korelační matici (Obr. 15), která je uvedena na následujícím obrázku. Tato matice barevně znázorňuje sílu korelací mezi jednotlivými indexy a ukazateli kvality vody:



Obr. 15 Korelační matice mezi NDVI/NDCI a ukazateli kvality vody

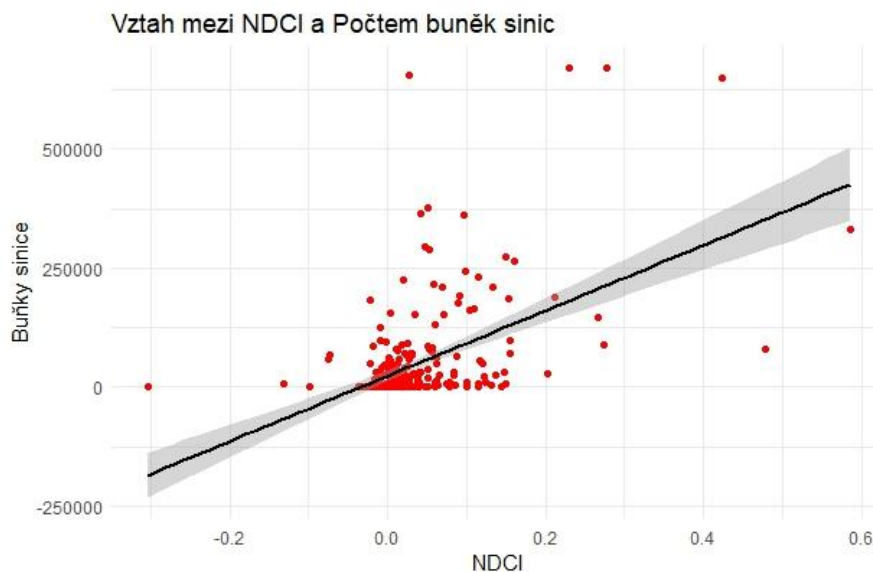
Na základě výsledků lze konstatovat, že index NDVI s většinou ukazatelů nevykazuje významné vztahy – korelační koeficienty jsou velmi nízké a p-hodnoty nenaznačují statistickou významnost. Nejvýraznější vztah NDVI vykazuje pouze s indexem koupací vody ($r = -0,144$; $p = 0,015$), i ten je však poměrně slabý a negativní. Naopak index NDCI vykazuje se všemi sledovanými ukazateli silnější a statisticky významné korelace. Nejvýraznější vztah byl potvrzen mezi NDCI a koncentrací chlorofylu-A ($r = 0,577$; $p < 0,001$), což potvrzuje jeho vhodnost pro hodnocení obsahu zelené hmoty a obecně eutrofizace vodních nádrží.

Pro ilustraci tohoto vztahu byl sestaven regresní model, jehož výstup ukazuje následující graf (Obr. 16):



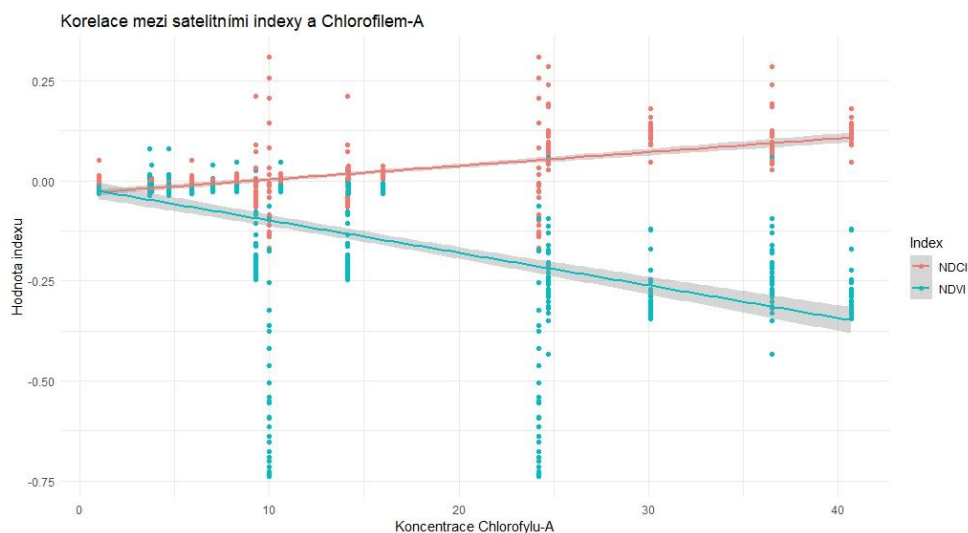
Obr. 16 Regresní vztah mezi NDCI a koncentrací chlorofylu-A

Pozitivní vztah mezi NDCI a počtem buněk sinic je patrný i z dalšího grafu, který znázorňuje bodový rozptyl a regresní přímku modelu (Obr. 17):

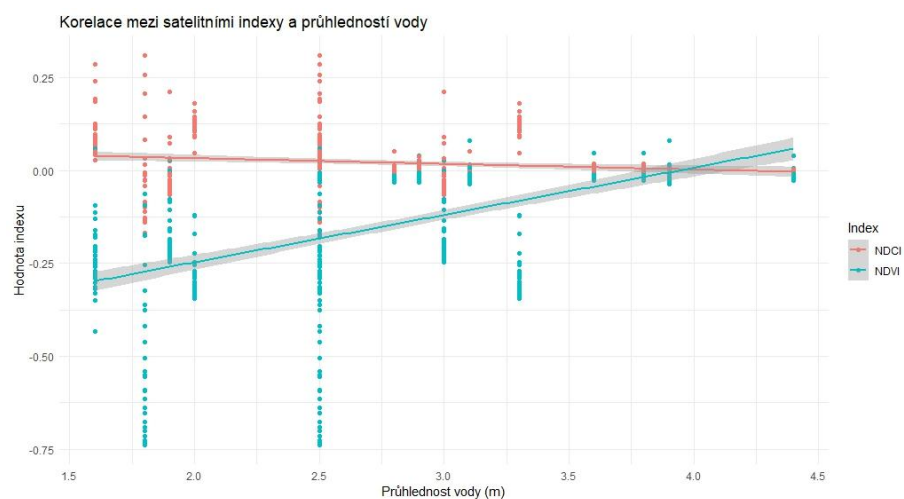


Obr. 17 Regresní vztah mezi NDCI a počtem buněk sinic

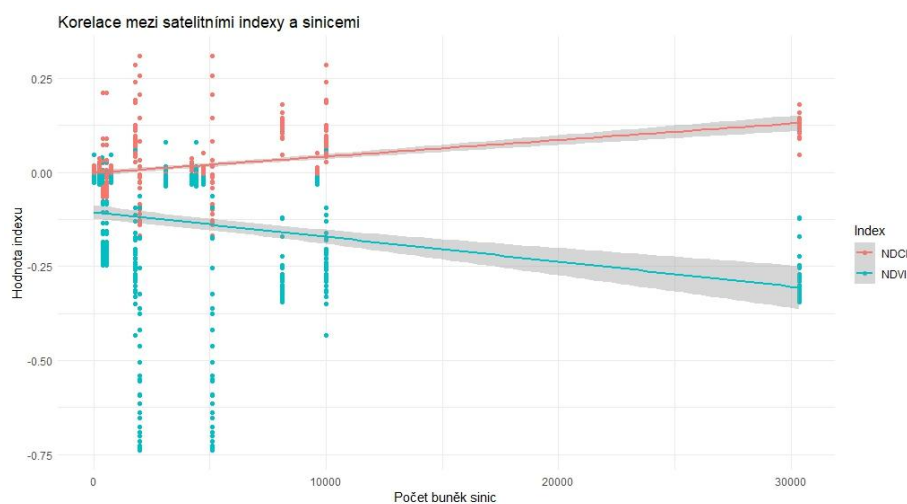
Dále byly vytvořeny srovnávací grafy, které ukazují odlišné trendy mezi NDVI a NDCI ve vztahu ke třem klíčovým parametrům: chlorofyl-A, průhlednost a sinice. Tyto grafy jsou uvedeny níže:



Obr. 18 Korelace mezi indexy a Chlorofylem-A

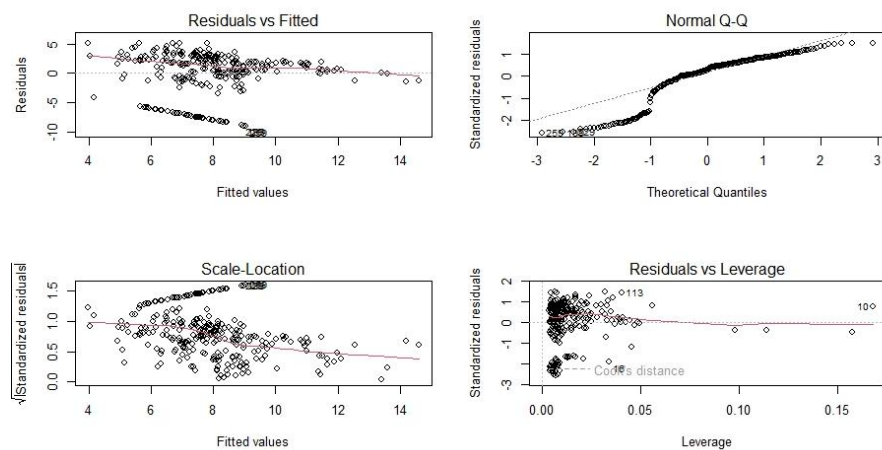


Obr. 19 Korelace mezi indexy a průhledností vody



Obr. 20 Korelace mezi indexy a počtem buněk sinic

Pro ověření předpokladů regresního modelu a kvality jeho predikce byly rovněž analyzovány diagnostické grafy reziduí:



Obr. 21 Diagnostické grafy lineárního regresního modelu (NDCI ~ Chlorofyl-a)

Na základě uvedených výsledků bylo možné rozhodnout, že index NDVI nebude dále považován za klíčový analytický nástroj. V následujících prostorových a časových analýzách se proto hlavní pozornost soustředila na index NDCI, který prokázal vyšší korelační sílu i statistickou významnost ve vztahu k vybraným parametrům kvality vody viz tabulka 8.

Tabulka 8 Korelace mezi satelitními indexy a ukazateli kvality vody (n = 280)

Parametr	Korelace s NDVI	P-hodnota (NDVI)	Korelace s NDCI	P-hodnota (NDCI)
Buňky sinice	-0,093	0,119	0,351	1,49e-09
Vodní květ	-0,062	0,301	0,349	1,64e-09
Chlorofyl-A	0,039	0,517	0,577	< 2.2e-16
Průhlednost	-0,040	0,505	-0,466	< 2.2e-16
Koupací vody index	-0,144	0,015	0,369	1,57e-10

Závěrem lze shrnout, že výsledky korelační analýzy poskytují pevný základ pro následné prostorové a časové analýzy. Index NDCI se prokázal jako robustní ukazatel, který dobře odráží přítomnost zelené hmoty ve vodních plochách. Naopak nízká výpovědní hodnota NDVI byla v této části statisticky potvrzena a podpořila rozhodnutí využít jej pouze jako doplňkový index. V následující části práce budou podrobně rozebrány prostorové vztahy mezi hodnotami indexů a parametry prostředí, jako jsou hloubka a vzdálenost od břehu.

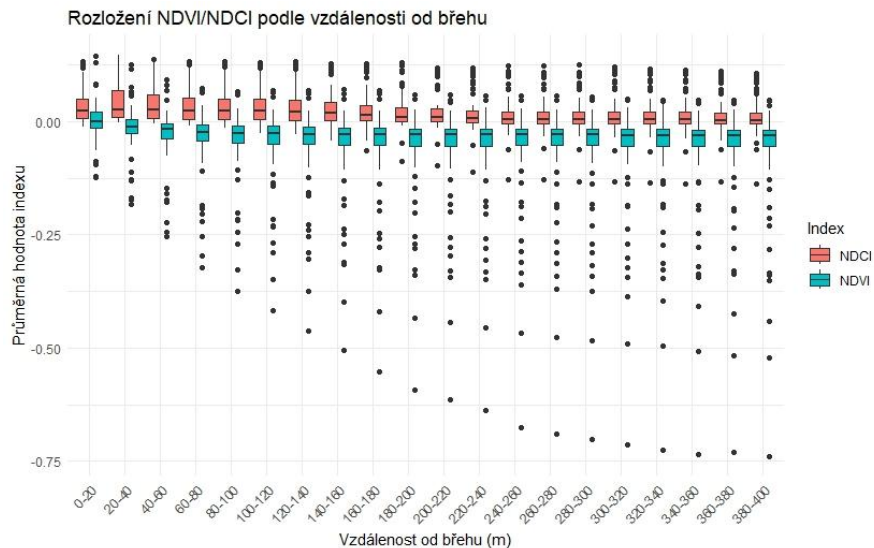
5.2 Prostorové analýzy

Analýza prostorového rozložení hodnot indexů na vodních plochách přináší důležité poznatky o výskytu zelené hmoty. V této podkapitole jsou rozebrány dva hlavní prostorové faktory: vzdálenost od břehu a hloubka vodního sloupce. Obě dimenze byly zkoumány pouze na přehradě Jesenice, jelikož pouze pro tuto lokalitu byl k dispozici digitální model dna vytvořený z historických výškopisných map ([kapitola 4.6](#)).

Data byla analyzována pomocí Spearmanovy korelace, regresních modelů, Kruskal-Wallisova testu a analýzy mezních bodů. Vstupem byly průměrné hodnoty indexů NDVI a NDCI za jednotlivé kategorie vzdálenosti a hloubky. Hlavní důraz byl kladen na index NDCI, který se dle předchozí korelační analýzy ukázal jako spolehlivější indikátor přítomnosti zelené hmoty. NDVI je do výsledků zahrnut jako doplňkový srovnávací prvek.

5.2.1 Vzdálenost od břehu

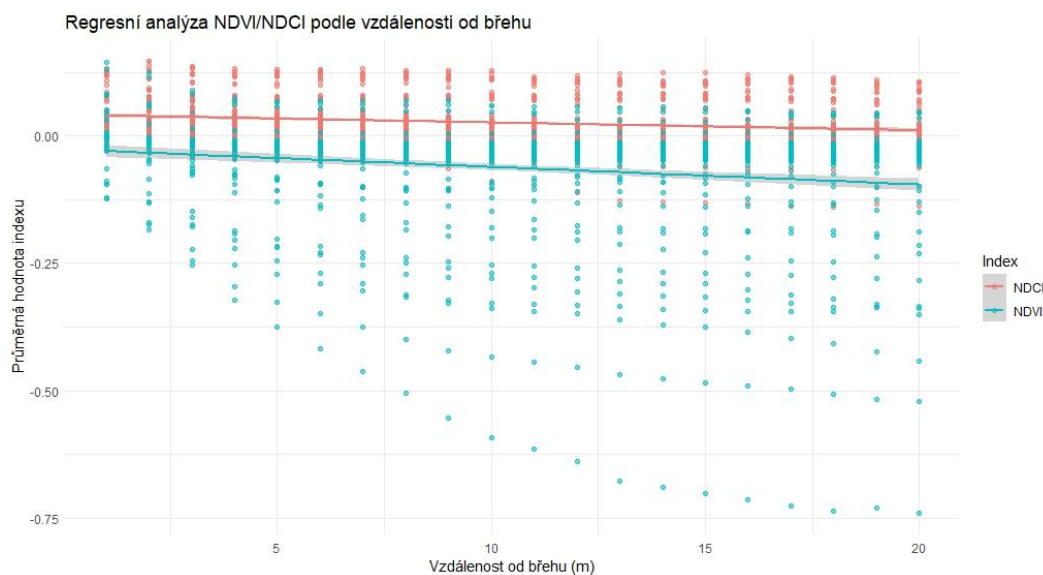
Vodní vegetace a eutrofní organismy bývají často koncentrovány v příbřežních oblastech, kde je nižší hloubka a vyšší dostupnost světla i živin. Pro zhodnocení těchto vztahů byla provedena analýza hodnot indexů v rámci pevných vzdálenostních pásem od břehu, a to s intervalem po 20 metrech od 0 do 400 m. Klasifikace byla založena na polygonu přehrady z vrstvy DIBAVOD a vypočtené pomocí geoprocessingového skriptu v ArcGIS Pro ([kapitola 4.7](#)).



Obr. 22 Rozložení hodnot indexů NDVI a NDCI podle vzdálenosti od břehu

Výsledky jednoznačně ukazují, že hodnoty obou indexů klesají se zvyšující se vzdáleností od břehu, přičemž nejvyšší koncentrace zelené hmoty je přítomna ve vzdálenostech do 40 metrů. Tento trend potvrzují jak vizuální boxploty, tak regresní modely:

Obr. 23 Regresní vztah mezi hodnotami NDCI/NDVI a vzdáleností od břehu

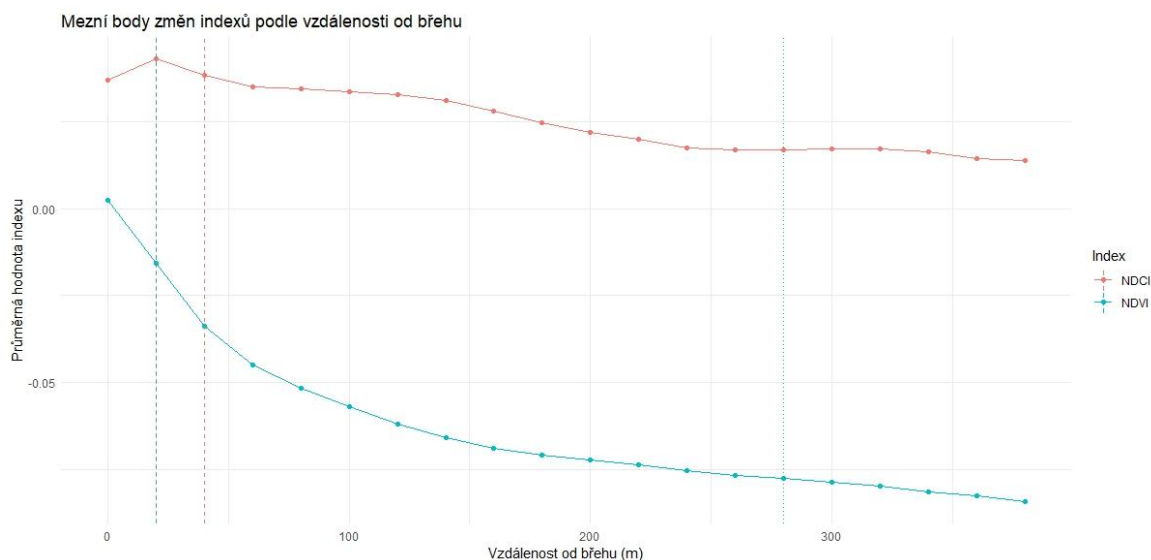


Obr. 23 Regresní vztah mezi hodnotami NDCI/NDVI a vzdáleností od břehu

Statistické testy korelace:

- NDVI: $\rho = -0,23$, $p < 0,001$
- NDCI: $\rho = -0,28$, $p < 0,001$

Rovněž Kruskal-Wallisův test potvrdil existenci významných rozdílů mezi jednotlivými kategoriemi ($p < 0,001$). Změny trendu byly vyhodnoceny pomocí analýzy mezních bodů, která identifikovala, ve kterých vzdálenostech dochází k prudkému poklesu či nárůstu hodnot indexů:



Obr. 24 Mezní body změn hodnot indexů v závislosti na vzdálenosti

Tabulka 9 Korelace a mezní body: vzdálenost od břehu

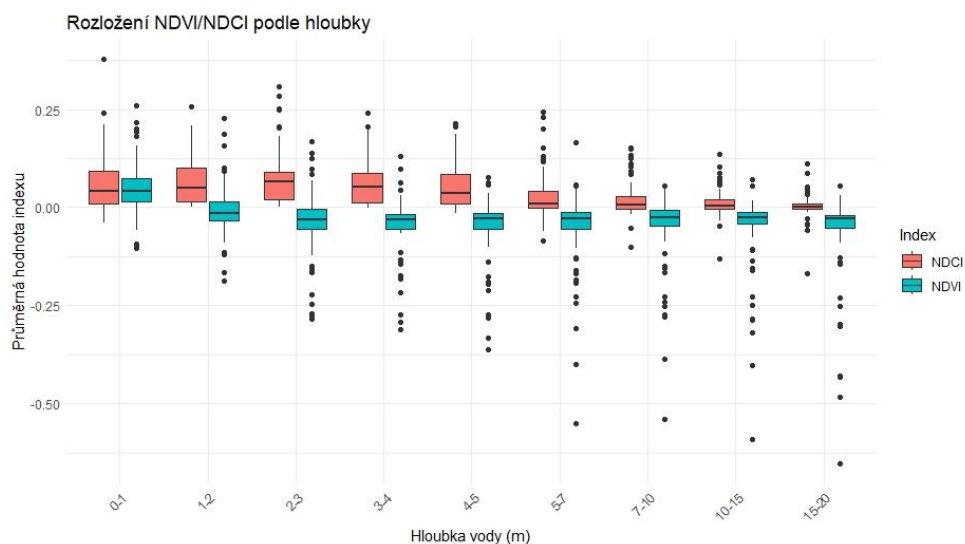
Index	Spearmanova korelace (rho)	p-hodnota	Největší pokles (m)	Největší růst (m)
NDVI	-0,23	< 0,001	20	280
NDCI	-0,28	< 0,001	40	20

Závěrem lze konstatovat, že prostorové rozložení zelené hmoty je výrazně ovlivněno vzdáleností od břehu. Nejvyšší hodnoty se koncentrují do vzdálenosti 40 metrů, což odpovídá ekologickému očekávání. Pokles hodnot s rostoucí vzdáleností reflektuje zhoršující se podmínky pro růst fytoplanktonu v centrálních částech nádrže.

5.2.2 Hloubka vodního sloupce

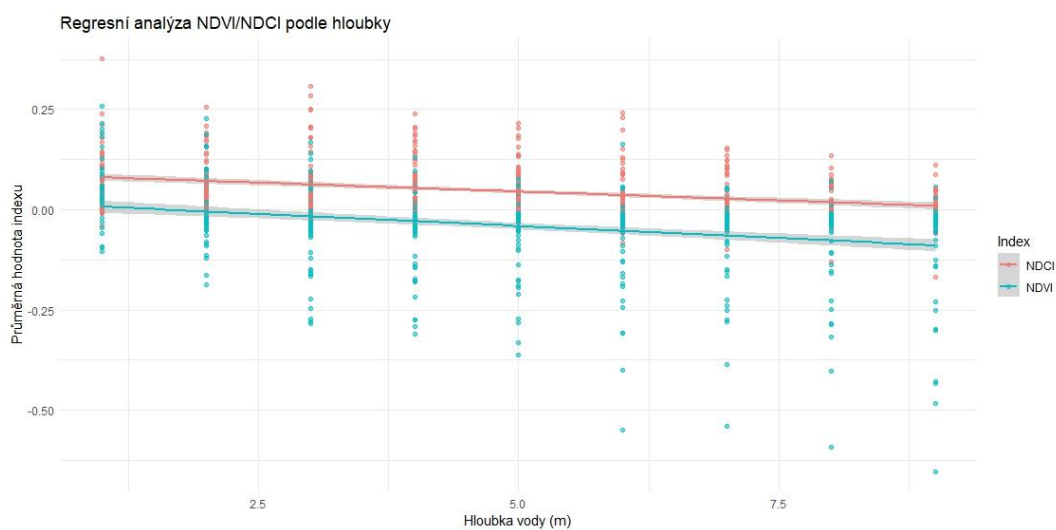
Druhou dimenzí prostorové analýzy byla hloubka vody, která zásadně ovlivňuje vertikální distribuci zelené hmoty. Předpokládá se, že nejvyšší koncentrace výskytu sinic a chlorofylu-A se nachází v horních vrstvách vodního sloupce, kde je nejvyšší dostupnost světla.

Analýza byla provedena pomocí hloubkového rastru vytvořeného na základě digitálního modelu dna přehrady Jesenice. Hloubka byla rozdělena do 9 intervalů: 0–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–7, 7–10, 10–15, 15–20 metrů. Klasifikace probíhala ve skriptu připraveném v ArcGIS Pro a následně byly výstupy převedeny do Excelu a analyzovány v RStudiosu.



Obr. 25 Rozložení hodnot indexů podle hloubkových pásem

I zde byl pozorován pokles hodnot indexů s rostoucí hloubkou, přičemž nejvyšší hodnoty byly detekovány do hloubky 3 metrů. Výsledky regresních modelů jsou zobrazeny níže:

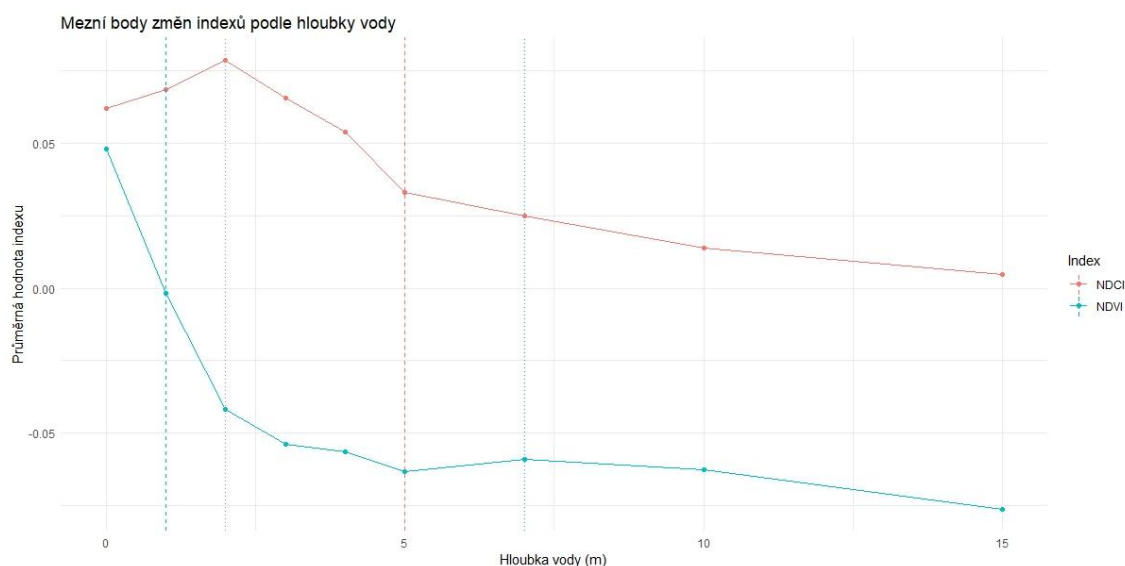


Obr. 26 Regresní model hodnot indexů podle hloubky vodního sloupce

Statistické výsledky korelace:

- NDVI: $\rho = -0,30$, $p < 0,001$
- NDCI: $\rho = -0,43$, $p < 0,001$

Rovněž Kruskal-Wallis test potvrzuje rozdíly mezi kategoriemi ($p < 0,001$). Mezní body změn jsou vizualizovány na obrázku 27:



Obr. 27 Mezní body změn hodnot indexů podle hloubky

Tabulka 10 Korelace a mezní body: hloubka vodního sloupce

Index	Spearmanova korelace (rho)	p-hodnota	Největší pokles (m)	Největší růst (m)
NDVI	-0,30	< 0,001	4	2
NDCI	-0,43	< 0,001	2	0

Ačkoli digitální model dna přehrady Jesenice nese určitou míru nepřesnosti danou historickým původem a interpolací, výsledky analýzy odpovídají očekávaným ekologickým vzorcům. Nejvyšší hodnoty zelené hmoty jsou koncentrovány v horních vrstvách vodního sloupce, kde jsou podmínky pro fotosyntézu nejpriznivější.

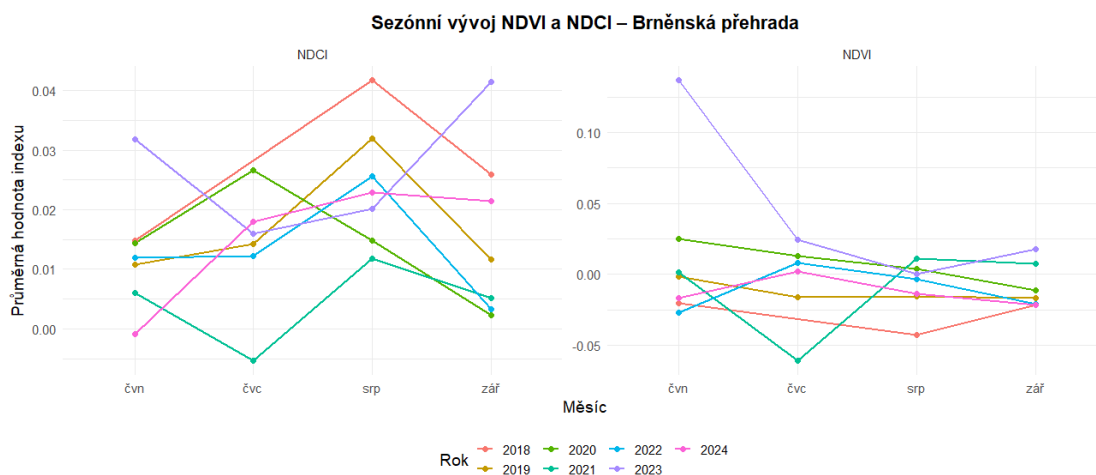
5.3 Časové analýzy

Závěrečnou součástí praktické části je analýza časových změn hodnot indexů NDCI a NDVI v období let 2018–2024. Zatímco předchozí kapitola (5.1) se zaměřovala na prostorové vztahy mezi koncentrací zelené hmoty a charakteristikami vodního prostředí, cílem této části bylo sledovat vývoj indexových hodnot napříč sezónou i jednotlivými lety. Hlavní důraz byl opět kladen na index NDCI, který se v korelačních analýzách prokázal jako vhodný indikátor přítomnosti zelené hmoty. Index NDVI byl využit pouze jako doplňkový, protože nevykazoval dostatečně silné vazby na referenční parametry kvality vody.

Na rozdíl od předchozí verze analýzy, která pracovala se sloučenými daty za všechny přehrady, byly časové změny nově vyhodnocovány samostatně pro každou z pěti sledovaných lokalit. Pro každou přehradu byly vytvořeny dva typy grafických výstupů – graf sezónního vývoje (červen–září) a graf dlouhodobého trendu v čase (2018–2024). Veškeré výpočty vycházely z průměrných hodnot indexů pro celou vodní plochu, vypočtených ze všech dostupných, kvalitativně použitelných snímků Sentinel-2. Data tedy nebyla párována s měřeními SZÚ, ale představují čistě družicovou časovou řadu.

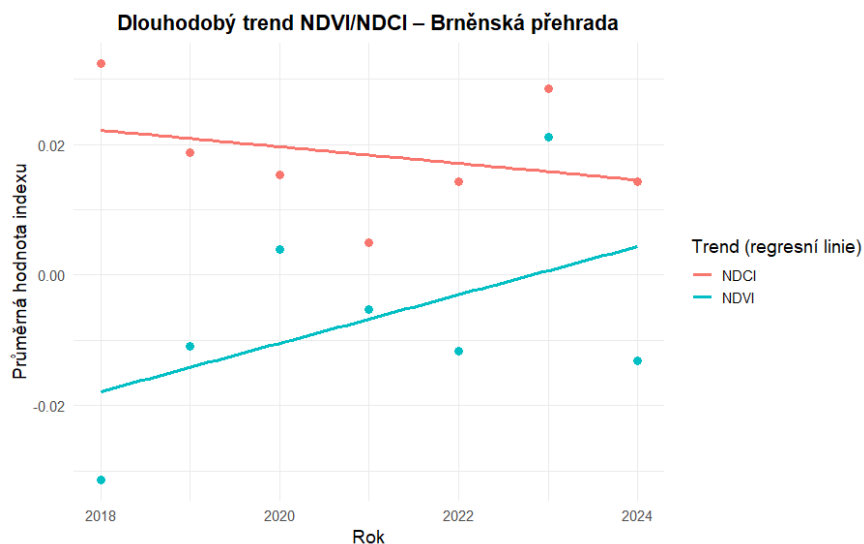
Pro názornost byly do hlavní části práce zařazeny pouze výsledky pro Brněnskou a Jesenickou přehradu, ostatní grafy jsou dostupné v příloze.

V průběhu sezóny vykazoval index NDCI na Brněnské VN (Obr. 28) poměrně stabilní vývoj s mírným nárůstem během července a srpna, následovaným poklesem v září. V některých letech (např. 2018, 2024) se projevil výraznější sezónní výkyvy, zatímco jiné roky byly poměrně vyrovnané. NDVI naopak kolísá bez jednoznačného trendu, což opět potvrzuje jeho nižší citlivost na přítomnost zelené hmoty ve vodním prostředí.



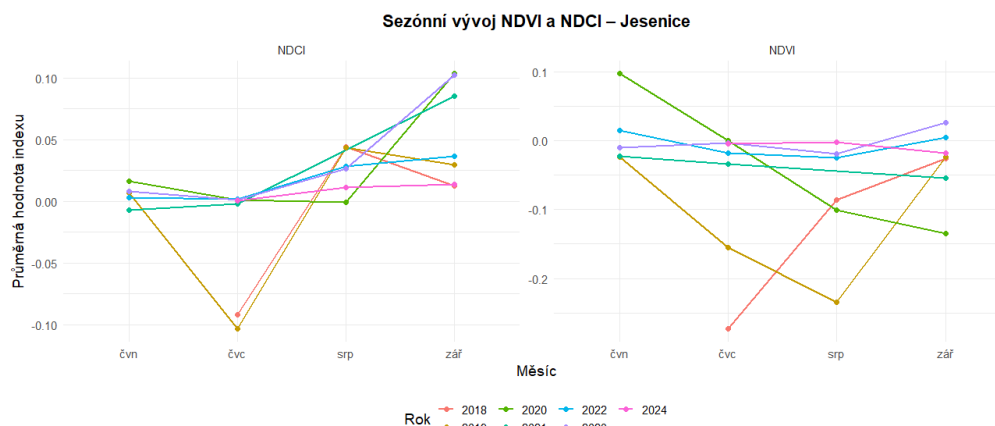
Obr. 28 Sezónní vývoj indexů NDVI a NDCI – Brněnská přehrada

Dlouhodobý trend u Brněnské VN (Obr. 29) ukázal pozvolný pokles hodnot NDCI v průběhu let, přičemž regresní linie naznačuje snižující se výskyt zelené hmoty ve sledovaném období. U NDVI byl trend mírně rostoucí, avšak vzhledem k jeho nízké výpovědní hodnotě nelze tento vývoj interpretovat jako ekologicky významný.



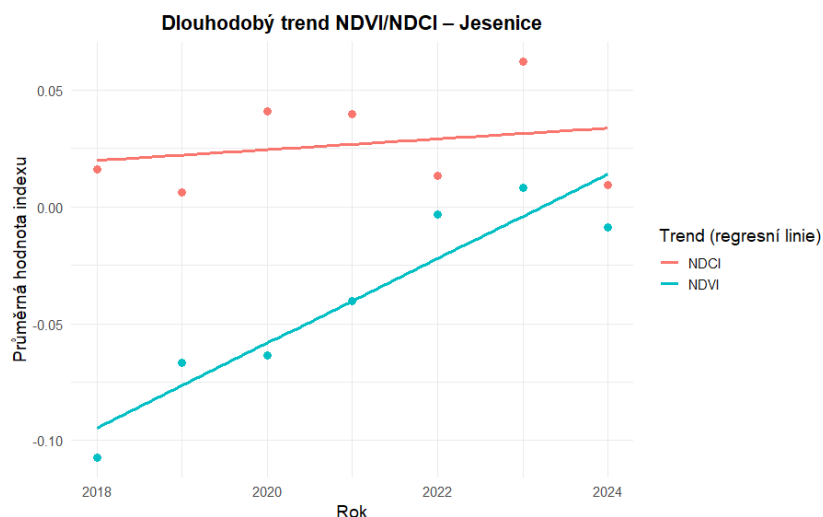
Obr. 29 Dlouhodobý trend indexů NDVI a NDCI – Brněnská přehrada

VN Jesenice (Obr. 30) vykazuje výrazný sezónní růst hodnot NDCI mezi srpnem a zářím, který je typický pro období výskytu vodního květu. Většina let potvrzuje zřetelný nárůst vegetační aktivity během letních měsíců, přičemž srpen vykazuje vrcholové hodnoty indexu. NDVI zůstává po většinu sezóny záporný a bez zřetelného sezónního rytmu.



Obr. 30 Sezónní vývoj indexů NDVI a NDCI – Jesenická přehrada

V rámci dlouhodobého trendu (Obr. 31) došlo k mírnému růstu indexu NDCI mezi lety 2018 a 2024. Tento vývoj lze interpretovat jako potenciální nárůst množství zelené hmoty, ačkoliv změny nejsou dramatické. V případě NDVI opět dochází k mírnému růstu, avšak tento vývoj může být způsoben jinými faktory než biologickou aktivitou ve vodním prostředí.



Obr. 31 Dlouhodobý trend indexů NDVI a NDCI – Jesenická přehrada

Z hlediska sezónnosti lze obecně konstatovat, že nejvyšší hodnoty NDCI byly dosaženy v letních měsících, především v červenci a srpnu. Tyto výsledky odpovídají předpokládanému výskytu vodního květu a nárůstu zelené hmoty během teplejších období. V některých případech však došlo i k výskytu vyšších hodnot v září, což může souviset s klimatickými anomáliemi nebo opožděným rozvojem fyto biomasy.

Dlouhodobé trendy se mezi přehradami výrazně lišily. Na Plumlově a Jesenici byl patrný mírný růst, zatímco Skalka a Orlík vykazovaly klesající tendenci. U Brněnské přehrady došlo k nepatrnému poklesu. Tyto rozdíly lze částečně vysvětlit rozdílnou morfologií nádrží, hydrologickým režimem či lokalizací bodových zdrojů eutrofizace.

NDVI byl na základě předchozích korelací hodnocen jako nevhodný pro sledování zelené hmoty ve vodním prostředí a jeho využití v této části analýzy bylo výhradně ilustrativní. Všechny grafy za ostatní přehrady (Orlík, Plumlov, Skalka) jsou k dispozici v příloze práce.

6 WEBOVÁ APLIKACE

Pro účely prezentace výsledků této bakalářské práce byla vytvořena veřejně dostupná webová mapová aplikace v prostředí ArcGIS StoryMap. Cílem aplikace je umožnit interaktivní vizualizaci prostorového rozložení zelené hmoty na vybraných vodních plochách v ČR z dat vytvořených skriptem z této práce, a to formou přehledného porovnání vybraných časových období. Aplikace slouží jako moderní nástroj pro přiblížení klíčových výstupů práce širokému publiku včetně odborné veřejnosti.

Zobrazovaná data byla připravena ve formátu.tif v prostředí ArcGIS Pro, a to na základě vybraných družicových snímků Sentinel-2. Výběr dvou reprezentativních datových sad (s nejvyšším a nejnižším výskytem zelené hmoty) pro každou přehradu vycházel z údajů portálu koupacivody.cz, který publikuje stav kvality vody v souladu s daty SZÚ. Pro každou z pěti analyzovaných přehrad (Skalka, Jesenice, Orlík, Brněnská a Plumlov) byly zpracovány tři výstupní rastry: RGB kompozice, klasifikovaný rastr NDVI a klasifikovaný rastr NDCI, přičemž rastry byly připraveny pro dvě různá období. Celkem bylo vytvořeno třicet rastrů.

Po zpracování dat byly výsledné vrstvy nahrány zpět na katederní ArcGIS Server, ke kterému měl autor práce vzdálený přístup přes síťové prostředí UPOL. Pomocí účtu poskytnutého prof. Vilémem Pechancem, Ph.D., byly vrstvy upraveny, doplněny o popisky a připraveny k publikaci pomocí Map Viewer. Následně byla vytvořena aplikace typu StoryMap, která je přístupná prostřednictvím veřejného odkazu: [WEBOVÁ APLIKACE](#).

Struktura webové aplikace odpovídá celkovému členění práce. Úvodní část shrnuje cíle a použitou metodiku. Následuje pět sekcí, z nichž každá je věnována jedné přehradě. Každá sekce obsahuje dvojici interaktivních map typu Swipe, které uživateli umožňují porovnat zvolená období z pohledu obou vegetačních indexů. Nalevo je vždy zobrazen klasifikovaný rastr NDCI, napravo NDVI. Podkladovou mapu tvoří RGB kompozice z odpovídajícího snímku Sentinel-2. Klasifikace obou indexů probíhá dle sjednocené stupnice se šesti kategoriemi – od čisté vody až po masivní vodní květ.

Závěr aplikace obsahuje shrnutí hlavních zjištění bakalářské práce a odkazy na webovou stránku bakalářské práce.

Webová aplikace doplňuje hlavní text práce o přehlednou vizualizaci výsledků a podporuje efektivní interpretaci prostorových rozdílů v čase. Jejím cílem je přiblížit komplexní výsledky širší odborné i laické veřejnosti a umožnit srovnání vývoje kvality vody na jednotlivých přehradách v období posledních let.



Obr. 32 Ukázka swipu VN Skalka a legenda kategorií klasifikace

7 VÝSLEDKY

Tato kapitola shrnuje hlavní výstupy bakalářské práce, které byly získány na základě zpracování a analýzy satelitních snímků Sentinel-2 a dat SZÚ. Výsledky jsou prezentovány v několika úrovních, počínaje vytvořeným skriptem pro automatizované zpracování indexů NDVI a NDCI, přes korelační analýzu s ukazateli kvality vody, až po prostorové a časové vyhodnocení výskytu zelené hmoty na pěti vybraných vodních nádržích v ČR.

Závěrečná část kapitoly je věnována webové aplikaci, která byla vytvořena pro interaktivní vizualizaci výsledků. Aplikace i skriptové nástroje jsou dostupné jako volné přílohy a představují prakticky využitelné výstupy této práce. Celkové shrnutí klíčových poznatků je uvedeno v závěrečné podkapitole.

7.1 Automatizační skript

V rámci práce byl vytvořen vlastní nástroj pro výpočet vegetačních indexů NDVI a NDCI z družicových snímků Sentinel-2. Skript umožňuje automatizované zpracování vstupních dat, včetně výpočtu indexů, jejich klasifikace, extrakce hodnot pro měřicí body a exportu do formátu Excel. Významně tak urychlil a zefektivnil zpracování rozsáhlého souboru snímků.

Pomocí tohoto nástroje byly zpracovány všechny analýzy, které se týkají prostorového rozložení indexů, jejich hodnot na měřicích bodech a statistických výstupů. Skript generuje kromě klasifikovaných i neklasifikované rastry a vytváří přehlednou databázi, která byla dále spojena s referenčními údaji o kvalitě vody.

Toolbox s názvem NDVI & NDCI Analyzer je přiložen jako volná příloha č. 6 a obsahuje samotný .atbx nástroj, automatizační Python skript a uživatelský návod. V prostředí ArcGIS Pro je skript připraven jako uživatelsky přívětivý nástroj se vstupními parametry a výstupními možnostmi.

7.2 Výsledky korelace s ukazateli kvality vody

Korelační analýza potvrdila rozdílnou výpovědní hodnotu indexů NDVI a NDCI ve vztahu k fyzicky měřeným parametrům kvality vody. Zatímco NDVI nevykazoval konzistentní vztahy k žádnému z hodnocených ukazatelů, index NDCI dosáhl středně silné až silné pozitivní korelace s obsahem chlorofylu-A ($\rho = 0,577$), vodním květem ($\rho = 0,349$) a počtem buněk sinic ($\rho = 0,351$). Naopak s průhledností vody byl vztah negativní ($\rho = -0,466$), což odpovídá předpokladu, že vyšší množství zelené hmoty snižuje optickou hloubku vody.

Na základě těchto výsledků byl v následujících částech práce (časová a prostorová analýza) index NDVI využíván pouze doplňkově. NDCI se ukázal jako stabilní a spolehlivý indikátor přítomnosti zelené hmoty ve vodním prostředí a byl proto použit jako hlavní výstup pro interpretaci prostorových a časových trendů.

7.3 Časové a prostorové analýzy výskytu zelené hmoty

V rámci prostorové analýzy byl potvrzen předpoklad, že nejvyšší výskyt zelené hmoty se nachází v příbřežních oblastech a v mělkých částech vodních nádrží. Oba indexy, zejména NDCI, vykazovaly negativní korelaci s rostoucí vzdáleností od břehu i s hloubkou vodního sloupce. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány do vzdálenosti 40 metrů od břehu a v hloubkách do 4 metrů. Významné rozdíly mezi kategoriemi byly potvrzeny pomocí Kruskal-Wallisova testu ($p < 0,001$). Analýza mezních bodů ukázala, že největší pokles hodnot indexů nastává mezi 1–4 metry hloubky a do 40 metrů od břehu.

V rámci časové analýzy nebyl pozorován jednotný sezónní vývoj napříč všemi přehradami. Zatímco některé roky a lokality (například Skalka v roce 2019 nebo Plumlov v roce 2023) vykazovaly výrazné nárůsty indexu NDCI ve vrcholných letních měsících, jiné přehrady (např. Jesenice nebo Brněnská) ukazovaly mírné sezónní rozdíly nebo dokonce opačné trendy. Obecně však lze konstatovat, že hodnoty NDCI častěji kulminovaly v srpnu a září, zatímco červnové a červencové hodnoty měly větší rozptyl. Vývoj NDVI byl značně kolísavý a nepředstavoval konzistentní sezónní dynamiku – potvrzuje se tak jeho nižší citlivost vůči výskytu zelené hmoty ve vodním prostředí.

Dlouhodobé trendy ukázaly různé vývoje mezi jednotlivými nádržemi. Zatímco na Plumlově a Jesenici byl patrný mírný nárůst hodnot NDCI v období let 2018–2024, Skalka a Orlík vykazovaly pokles. V případě Brněnské přehrady byl trend víceméně stabilní s drobným poklesem. Výsledky mohou být ovlivněny jak klimatickými podmínkami, tak specifickou morfologií nádrží a změnami ve vodním režimu nebo managementu.

Na základě výsledků byl potvrzen vhodný výběr indexu NDCI jako hlavního nástroje pro sledování změn výskytu zelené hmoty ve vodních nádržích. Výsledky prostorových a časových analýz potvrdily očekávané ekologické vzorce a zároveň ukázaly potenciál využití satelitních dat pro dlouhodobé sledování eutrofizace.

7.4 Webová aplikace jako nástroj vizualizace výsledků

Významným výstupem této bakalářské práce je také webová mapová aplikace, která umožňuje interaktivní prezentaci a interpretaci získaných dat. Aplikace byla vytvořena v prostředí ArcGIS Online pomocí nástroje StoryMap a slouží k přehledné vizualizaci prostorových dat NDVI a NDCI pro pět vybraných přehradních nádrží (Skalka, Jesenice, Orlík, Brněnská a Plumlov).

Zobrazené indexové vrstvy jsou klasifikovány do šesti kategorií, od čisté vody až po masivní vodní květ, čímž poskytují intuitivní a přehledné zhodnocení intenzity výskytu zelené hmoty.

Webová aplikace umožňuje rychlé vizuální porovnání mezi různými časovými obdobími a mezi jednotlivými indexy. Tímto způsobem slouží nejen jako výstup zpracování, ale i jako komunikační nástroj, který přibližuje výsledky i širší veřejnosti či odborníkům mimo oblast geoinformatiky.

8 DISKUZE

V rámci této bakalářské práce bylo zpracováno rozsáhlé množství satelitních dat za období sedmi let (2018–2024), přičemž analýzy se zaměřily výhradně na vegetačně aktivní měsíce červen až září. Využití pouze snímků s dostatečnou kvalitou a bez výrazné oblačnosti výrazně zredukovalo celkový počet použitelných scén, což je přirozeným omezením při práci s DPZ daty. Přesto lze množství zpracovaných dat hodnotit jako nadstandardní, zejména v kontextu bakalářského rozsahu.

Jedním z hlavních vstupů byla data SZÚ, která však vykazovala několik úskalí. Ne všechna měření obsahovala kompletní sadu parametrů, včetně chlorofylu-A nebo průhlednosti, což mírně ovlivnilo výsledky korelačních analýz. Dále nebyla měření vždy prováděna ve stejný den jako pořízení družicového snímku, ačkoli do analýzy byly zahrnuty pouze párové záznamy s časovým rozdílem maximálně ± 1 den. V některých přehradách byla měřena pouze jedna lokalita, zatímco jinde se nacházelo až šest měřících bodů, což vedlo k nerovnoměrné prostorové reprezentaci.

Navíc se jednalo výhradně o bodová měření, nikoliv o hodnoty reprezentující celou vodní plochu. Z tohoto důvodu byly hodnoty indexů NDVI a NDCI extrahovány přímo z pixelů nacházejících se ve shodných souřadnicích, jako byla měřící místa SZÚ. Korelace tak byly provedeny na úrovni jednotlivých bodů, nikoliv plošně, a právě z těchto hodnot následně vycházely i další prostorové a statistické analýzy.

Prostorová analýza hloubky vycházela z digitálního modelu dna přehrady Jesenice, který byl vytvořen z historických topografických map. Přestože model sloužil k orientačnímu zhodnocení vztahu mezi hloubkou a výskytem zelené hmoty, jeho přesnost je ovlivněna několika faktory. Největší nepřesnosti vznikají v okrajových částech nádrže, kde došlo v průběhu desetiletí k erozi břehů a akumulaci materiálu. Dále je model ovlivněn interpolací vrstevnic a stanovením výchozí hladiny, které nemohly být přesně ověřeny. Tento fakt však byl při interpretaci výsledků plně zohledněn.

Při výběru vegetačních indexů bylo postupováno na základě rešeršní části práce. Zvažováno bylo více možných indexů, přičemž pro potřeby této práce byly vybrány NDVI a NDCI. Index NDVI se však na základě výsledků analýz ukázal jako nevhodný pro sledování zelené hmoty ve vodním prostředí. Z těchto důvodů byl využit pouze doplňkově, zatímco hlavní interpretace byla založena na hodnotách NDCI.

Jednou z variantních metod, která byla zvažována, bylo využití dat z mise Landsat. Jejich výhodou je delší časová řada a pravidelná frekvence snímkování. Nicméně vzhledem k nižšímu prostorovému rozlišení (30 m oproti 10–20 m u Sentinel-2) by jejich použití vedlo ke snížení přesnosti detekce výskytu zelené hmoty, zejména u menších nádrží. I přesto je lze do budoucna uvažovat jako doplňkový datový zdroj, například pro sledování dlouhodobějších trendů.

Další zvažovanou variantou bylo využití dronu s multispektrální kamerou pro validaci výsledků. Tento přístup však nebyl zvolen z důvodu vysokých časových i technických nároků, a zejména vzhledem k omezenému rozsahu bakalářské práce. Pokud by byly splněny podmínky pro získání kvalitních UAV dat, mohla by být taková validace velmi přínosná, zejména pro kalibraci klasifikačních prahových hodnot NDVI a NDCI.

K tvorbě polygonových masek vodních ploch byla zvolena metoda ruční digitalizace, která sice vyžaduje čas a zkušenost, ale zároveň poskytuje vyšší přesnost než automatizované klasifikační přístupy (např. na základě NDWI). Tato metoda umožnila přesné oddělení vodní plochy i v případech s obtížně rozpoznatelným břehem nebo výskytem mostních konstrukcí. U rozsáhlejších projektů by bylo vhodné zvážit poloaufomatickou klasifikaci s následnou manuální korekcí.

Velkým přínosem celé práce je vytvořený skript a odpovídající toolbox pro výpočet indexů NDVI a NDCI. Nástroj byl optimalizován pro přímé použití v prostředí ArcGIS Pro a jeho struktura umožňuje využití i pro jiné vodní nádrže. Jediným požadavkem je vytvoření vlastní polygonové vrstvy s maskou dané nádrže. Skript tak může být snadno aplikován i v jiných projektech, a to jak v akademické sféře, tak v rámci vodohospodářské praxe.

Praktickým výstupem práce je také webová mapová aplikace, která slouží k prezentaci výsledků široké veřejnosti i odborníkům. Z důvodu omezeného rozsahu a technických možností byly v aplikaci vizualizovány pouze dva časové okamžiky pro každou přehradu. V případě rozsáhlejších projektů by bylo možné zobrazit větší časové série, statistiky nebo interaktivní filtry, a aplikaci tak rozšířit například o porovnání vývoje v čase. Přesto se jedná o funkční prototyp, který ukazuje možnosti publikace výstupů DPZ formou otevřené webové služby.

9 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na analýzu a hodnocení obsahu zelené hmoty na vybraných vodních plochách v ČR pomocí satelitních dat Sentinel-2. Hlavním cílem bylo zjistit, zda je možné využít vegetační indexy NDVI a NDCI k detekci a sledování změn výskytu zelené hmoty ve vodním prostředí, a ověřit jejich vhodnost prostřednictvím korelace s referenčními daty kvality vody od SZÚ. Práce zároveň směřovala k vytvoření nástroje pro automatizované zpracování dat a přehledné vizualizaci výsledků.

Analýza byla provedena na pěti přehradách různého charakteru (Skalka, Jesenice, Orlík, Brněnská a Plumlov), a to v období let 2018–2024, v měsících červen až září. Na základě rešerše i prvotních testů byly vybrány indexy NDVI a NDCI, přičemž se ukázalo, že pouze index NDCI vykazuje dostatečnou korelaci s ukazateli kvality vody, zejména s obsahem chlorofylu-A a průhledností vody. NDVI byl vyhodnocen jako nevhodný pro sledování výskytu zelené hmoty a v dalších částech práce byl použit pouze doplňkově.

Pomocí vlastního skriptu vytvořeného v jazyce Python v prostředí ArcGIS Pro byly automatizovaně zpracovány všechny snímky a extrahovány hodnoty indexů na měřicích bodech. Skript umožnil hromadné výpočty, klasifikaci hodnot, exporty do Excelu i následnou prostorovou analýzu. Byl vytvořen jako samostatný nástroj (toolbox) a je snadno použitelný i pro jiné vodní plochy.

Výsledky korelačních analýz potvrdily vhodnost indexu NDCI, který byl následně použit při prostorovém i časovém hodnocení výskytu zelené hmoty. Prostorová analýza ukázala, že nejvyšší výskyt se vyskytuje do 40 metrů od břehu a v hloubkách do 4 metrů. Časová analýza pak ukázala různé trendy, zatímco v nádržích jako Plumlov nebo Jesenice byl patrný nárůst výskytu zelené hmoty, v jiných (např. Orlík, Skalka) byl vývoj stabilní nebo klesající. Výsledky byly zpracovány do grafických výstupů a vizualizovány v rámci přehledné webové aplikace.

Webová aplikace, vytvořená v prostředí ArcGIS Online (StoryMap), umožňuje interaktivní porovnání NDVI a NDCI ve dvou časových obdobích pro každou přehradu. Slouží jako intuitivní nástroj pro prezentaci výsledků široké veřejnosti i odborníkům a doplňuje analytickou část o srozumitelnou vizualizaci.

Cíl práce byl naplněn, bylo prokázáno, že vegetační index NDCI je vhodným ukazatelem přítomnosti zelené hmoty ve vodních nádržích, a to i bez přímého párování s terénními daty. Byly vytvořeny nástroje pro efektivní zpracování a interpretaci těchto dat a zároveň byla ověřena možnost jejich využití v praxi.

Hlavním přínosem práce je spojení satelitních dat s fyzickými měřeními kvality vody, vytvoření opakovatelných nástrojů pro analýzu vodních nádrží a přenos výsledků do atraktivní webové formy. Na tuto práci je možné navázat rozšířením metodiky o další typy nádrží, využitím UAV snímání pro validaci výsledků, nebo zpřesněním hloubkových modelů. Výsledky mají potenciál sloužit nejen výzkumně, ale i prakticky. Například pro orgány státní správy, správce vodních ploch nebo veřejnost sledující kvalitu vody v letní sezóně.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

POUŽITÁ LITERATURA:

BAUDIŠOVÁ, D., 2020. Metody mikrobiologického rozboru vody [online]. Praha: ASLAB [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: https://aslab.cz/files/pdf/edicni_cinnost/publikace/baudisova_metody_mikrobiol_rozboru_vody.pdf

BROWN, Michael, Jennifer TAYLOR a Daniel WILSON, 2016. In Situ Sensors for Monitoring Water Quality: A Review. Sensors [online]. 16(8), 1298. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s16081298

CHEN, David, Sophia WANG a Robert MARTIN, 2021. Recent Developments in Optical Fiber Sensors for Environmental Monitoring. Sensors and Actuators B: Chemical [online]. ISSN 0925-4005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2019.08.057

FISCHER, Thomas, Laura GARCIA a Richard DAVIS, 2019. Recent Advances in Optical Sensors for Environmental Monitoring and Early Warning Systems. Sensors and Actuators B: Chemical [online]. ISSN 0925-4005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2019.06.031

GAO, Bo-Cai, 1996. NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. Remote Sensing of Environment [online]. 58(3), s. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3

GHOLIZADEH, Mohammad H., Mehran MISHRA a Klaus SCHEFFRAN, 2016. Remote Sensing of Water Quality: Challenges and Future Directions. Remote Sensing [online]. 10(5), 775. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10050775

GIARDINO, Claudia, Kevin C. HEGGELUND a Thomas KUHLE, 2010. Remote Sensing of Coastal Water Quality in the Adriatic Sea Using Sentinel-2 Data. Journal of Applied Remote Sensing [online]. 4(1), 043530. ISSN 1931-3195. Dostupné z: doi:10.1117/1.3463016

HADJIMITSIS, Diofantos G., Antonis R. AGAPIOU a Kyriacos THEODOSIOU, 2010. The Role of Remote Sensing in the Monitoring of Water Quality Parameters in Surface Water Bodies. Journal of Hydrology [online]. 388(1-2), 1–12. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.006

HANOUSEK, Tomáš, 2020. Sledování faktorů znečištění vodních ploch ze satelitních dat. Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/ug32x/>

HLADÍK, Milan, Jan NOVÁK a Petr SKLENÁŘ, 2021. Využití metod dálkového průzkumu Země pro detekci a monitoring kvality vody. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace [online]. 63(2), 48–57. ISSN 1211-0760. Dostupné z: doi:10.14311/vtei.2021.63.2.48

HU, Chuanmin, Zhongping LEE a Paul J. MULLER-KARGER, 2003. Satellite Remote Sensing of Suspended Sediments and Chlorophyll in Turbid Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment* [online]. 85(4), 409–420. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(02)00297-4

KOPÁČEK, Jiří, Tomáš PELC a Milan HEJZLAR, 2017. Hodnocení kvality vody vodních nádrží pomocí dat dálkového průzkumu Země. *Acta Hydrologica Slovaca* [online]. 18(1), 45–59. ISSN 1336-0865. Dostupné z: doi:10.2478/ahs-2017-0005

KOPONEN, Sami, Markku HALLIKAINEN a Jukka KALLIO, 2007. Application of Remote Sensing Techniques in Monitoring Water Quality in the Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin* [online]. 54(12), 1900–1912. ISSN 0025-326X. Dostupné z: doi:10.1016/j.marpolbul.2007.08.011

KŘÍŽEK, Marek, Jan KLIMEŠ a David ČERMÁK, 2020. Sledování vlivu krajinného pokryvu na kvalitu vody řeky Ohře pomocí metod dálkového průzkumu Země. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [online]. 68(4), 331–343. ISSN 0042-790X. Dostupné z: doi:10.2478/johh-2020-0027

KUTSER, Tiit, Lasse R. KANGAS a Jukka HOLOPAINEN, 2005. Remote Sensing of Water Quality in Boreal Lakes: Potential and Limitations. *Hydrobiologia* [online]. 545(1), 1–10. ISSN 0018-8158. Dostupné z: doi:10.1007/s10750-004-1182-6

MARTINEZ, Luis, Sarah JOHNSON, Paul ANDERSON a Emily CLARK, 2020. Electrochemical Sensors for Environmental Monitoring: A Review of Recent Technology and Applications. *Chemical Reviews* [online]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.9b00535

MATTHEWS, Richard, 2011. Remote Sensing of Water Quality Parameters: A Review. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. 184(9), 5053–5071. ISSN 0167-6369. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-011-2283-8

METODIKA JU, 2022. Hodnocení přítomnosti sinic, řas a dalších ukazatelů kvality vody pomocí metod dálkového průzkumu Země [online]. České Budějovice: Jihočeská univerzita [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/344936094_Hodnoceni_kvality_vody_vodnich_nadrzi_pomoci_dat_dalkoveho_pruzkumu_Zeme_Evaluation_of_water_quality_in_water_res

MISHRA, Deepak R., Steven M. SCHAEFFER a S. NELSON, 2005. Hyperspectral Remote Sensing of Water Quality Parameters in the Chesapeake Bay. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 26(12), 2495–2511. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431160500099426

MISHRA, Deepak R. a Igor A. LIOUBIMTSEVA, 2016. Remote Sensing of Aquatic Vegetation: Theory and Applications. Dordrecht: Springer. ISBN 978-94-017-7579-0.

ODERMATT, Daniel, Anne GAUTHEY, Michael FLAHERTY a Richard MATTHEWS, 2012. Satellite-Based Monitoring of Water Quality in Inland Lakes Using MERIS Data. Remote Sensing of Environment [online]. 124, 715–725. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2012.06.005

OLIVER, S. et al., 2015. Evaluating the Potential of Sentinel-2 for Monitoring Chlorophyll-a as a Proxy for Water Quality in UK Lakes. Remote Sensing Letters [online]. 6(11), 924–933. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1088668

PALMER, Sarah C.J., Geoffrey H. JACOBSON a Christopher M. HURLEY, 2015. Remote Sensing Applications for Water Quality Assessment in Lakes and Reservoirs: Recent Advances and Future Research Needs. Environmental Reviews [online]. 23(2), 155–168. ISSN 1208-6053. Dostupné z: doi:10.1139/er-2014-0027

PATEL, Anil, Sunita RAO a Jonathan WHITE, 2020. Nanomaterial-Based Sensors for Detection of Environmental Pollutants: A Review. Sensors and Actuators B: Chemical [online]. ISSN 0925-4005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2019.07.764

STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV, 2023. Metodický návod na vzorkování, terénní a laboratorní vyšetřování a hodnocení přírodních koupališť a dalších povrchových vod ke koupání [online]. Praha: Státní zdravotní ústav [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: https://szu.gov.cz/wp-content/uploads/2023/02/Metodika_koupaci_vody.pdf

TAYLOR, George, Samuel KIM a Olivia PARKER, 2023. In Situ Water Quality Monitoring Using an Optical Multiparameter Sensor System. Sensors [online]. 23(23), 9545. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s230239545

TYLER, Andrew N., Christopher J. SPRINGER a Gary W. MITCHELL, 2006. Remote Sensing of Coastal and Estuarine Water Quality: Current Applications and Future Trends. International Journal of Remote Sensing [online]. 27(12), 2345–2365. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431160500396846

VAN DER WOERD, Hendrik J. a Mark E. HOOGLAND, 2014. Hyperspectral Remote Sensing of Water Quality Parameters in the Chesapeake Bay. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation [online]. 27, 180–190. ISSN 0303-2434. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2013.09.002

ZHANG, Yongqiang, Lijun WANG a Hong WANG, 2014. Remote Sensing of Water Quality in the Three Gorges Reservoir. Environmental Science & Technology [online]. 48(4), 2038–2046. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es404379c

INFORMAČNÍ ZDROJE:

Auravant, Vegetation indices and their interpretation: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE, and NDWI [online]. Auravant, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>

Centrum pro cyanobakterie a jejich toxiny, Vodní květ – sinice [online]. Centrum pro cyanobakterie a jejich toxiny, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <http://www.sinice.cz/index.php?pg=o-sinicich--vodni-kvet>

Copernicus Data Space Ecosystem, browser.dataspace.copernicus.eu [online]. Evropská kosmická agentura, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://browser.dataspace.copernicus.eu>

Drobné památky, Topografické mapy TOPO S-1952 [online]. Drobné památky, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.drobnepamatky.cz/topograficke-mapy-topo-s-1952>

Esri, ArcGIS Online Documentation [online]. Esri, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/>

Esri, ArcGIS Pro Documentation [online]. Esri, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/arcgis-pro.htm>

Esri, ArcPy Documentation [online]. Esri, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm>

Esri, Topo to Raster – ArcGIS Pro Documentation [online]. Esri, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/topo-to-raster.htm>

Evropská kosmická agentura, Sentinel-2 Mission Overview [online]. Evropská kosmická agentura, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

Fedrzal, M., Klasifikace pobřežní vegetace pro účely hydromorfologického monitoringu [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2016 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/fedrzal16/download/MGR_Fedrzal.pdf

Index Database, Index Database [online]. Index Database, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.indexdatabase.de/>

Ministerstvo dopravy ČR, Sentinel-2: Měření kvality vod a sledování krajiny [online]. Czech Space Portal, 2020 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://collgs.czechspaceportal.cz/wp-content/uploads/2020/08/sentinel2czfinal.pdf>

Musilová, R., Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších [online]. Univerzita Karlova, 2011 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/42415/DPTX_2011_1_11310_0_329756_0_119490.pdf?isAllowed=y&sequence=1

Pekař, J., Vegetační indexy a jejich využití v zemědělské praxi [online]. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2023 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/8zb0lb/50808870>

RStudio, RStudio Documentation [online]. Posit Software, PBC, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://posit.co/products/open-source/rstudio/>

Sentinel Hub, NDCI – Sentinel-2 Custom Scripts [online]. Sentinel Hub, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndci/>

Sentinel Hub, NDVI – Sentinel-2 Custom Scripts [online]. Sentinel Hub, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndvi/>

Státní zdravotní ústav, Kvalita vody na koupalištích [online]. Státní zdravotní ústav, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/kvalita-vody-na-koupalitech>

The R Project for Statistical Computing, CRAN Packages [online]. R Foundation, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/>

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Volné přílohy

- Příloha 1 Webová stránka BC práce – nedved25.html
- Příloha 2 Grafický poster vytvořený k prezentaci práce – Poster_BC_Nedved.pdf
- Příloha 3 Finální databset snímků, indexů a spojených dat SZÚ – Data_bc.xlsx
- Příloha 4 Webová aplikace – Interaktivní StoryMap: gislib.upol.cz/...
- Příloha 5 30 rastrů (.tif) použitých ve webové aplikaci – Data_web.zip
- Příloha 6 Masky přehrad (.shp, .lpx) – Masky.zip
- Příloha 7 Toolbox s názvem NDVI & NDCI Analyzer, obsahuje:
- NDVI & NDCI Analyzer.atbx – nástroj ArcGIS Pro
 - NDVI & NDCI Analyzer.py – automatizační skript
 - readme.txt – uživatelský návod
- Příloha 8 Data ZSÚ – na vyžádání u vedoucího práce

Vázané přílohy:

- Příloha 9 Klasifikační tabulka NDVI/NDCI
- Příloha 10 Hodnocení kvality vody podle vyhlášky
- Příloha 11 Korelační matice a tabulka NDVI/NDCI × kvalita vody
- Příloha 12 Grafy prostorové analýzy
- Příloha 13 Sezónní a trendové grafy

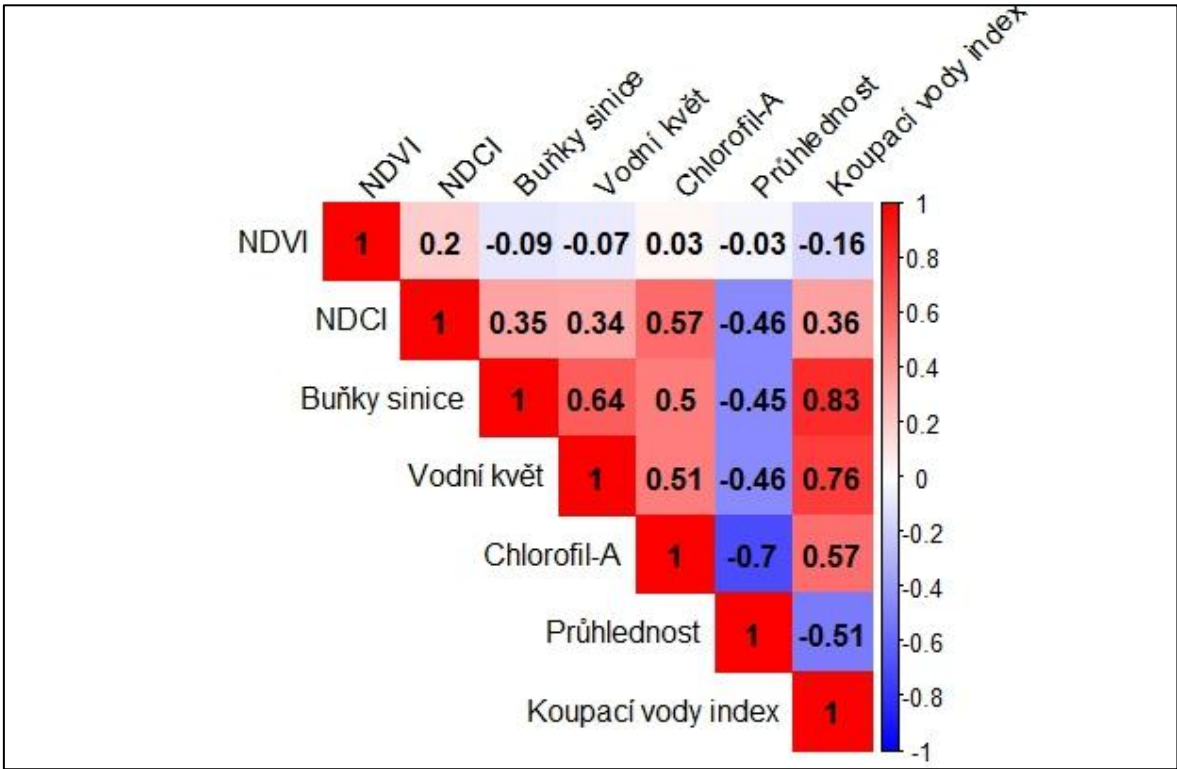
Příloha 9

Výsledek NDVI	Hodnota z výpočtu NDVI indexu
"-1 — -0,1"	Čistá voda
"-0,1 — 0"	Znečištěná voda
"0 — 0,1"	Vegetační zákal vody
"0,1 — 0,2"	Vodní květ
"0,2 — 0,3"	Silný vodní květ
"0,3 — 1"	Masivní vodní květ

Příloha 10

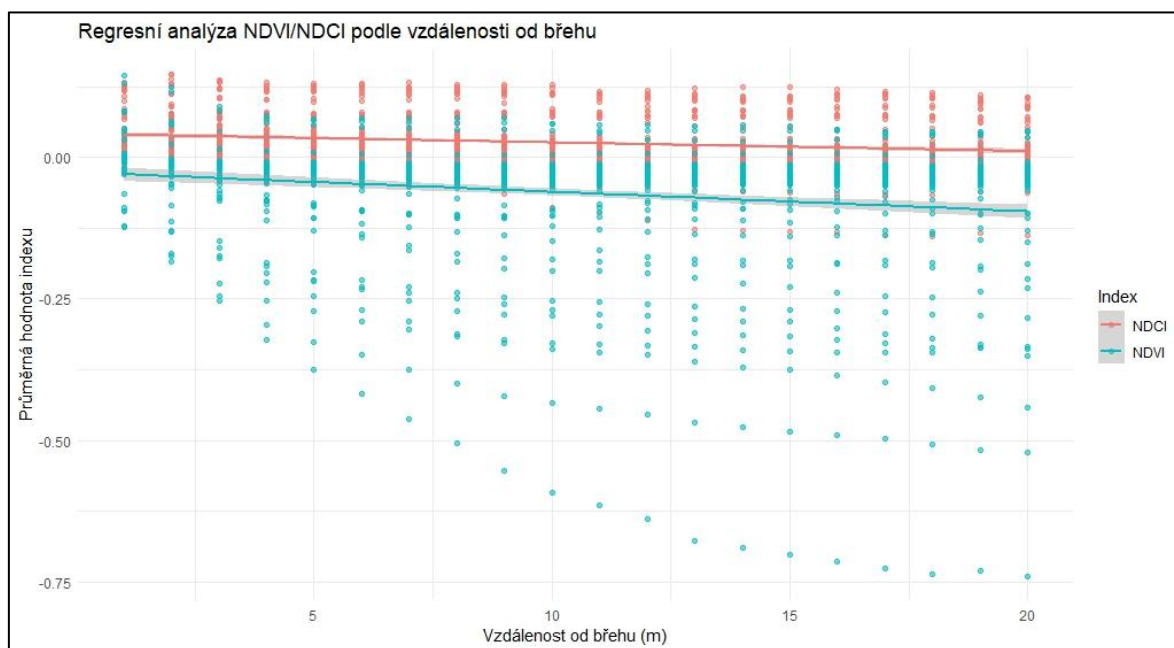
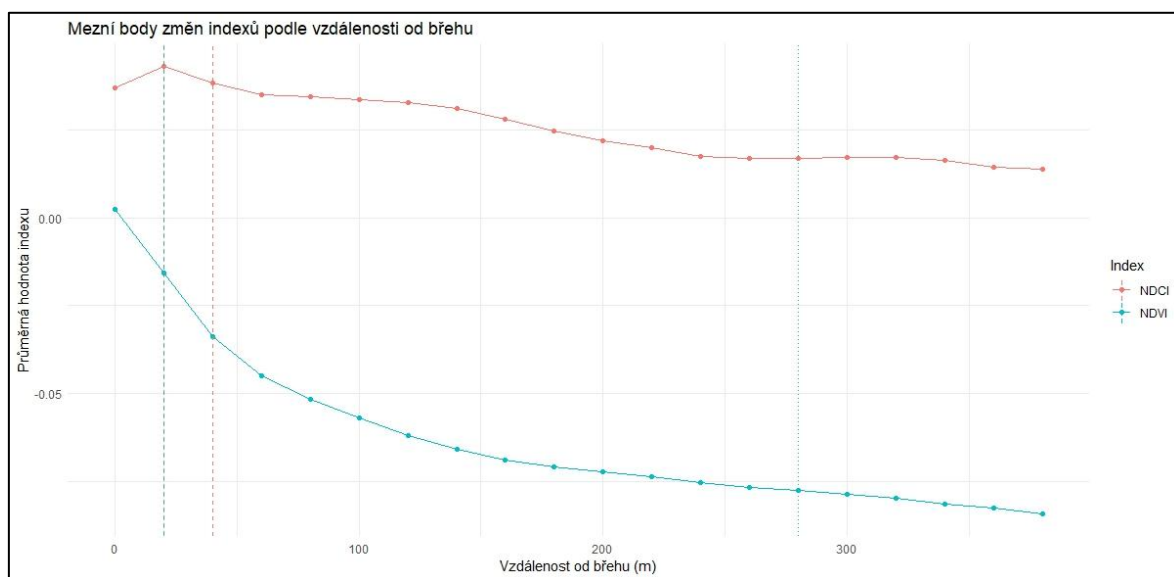
[illegible]

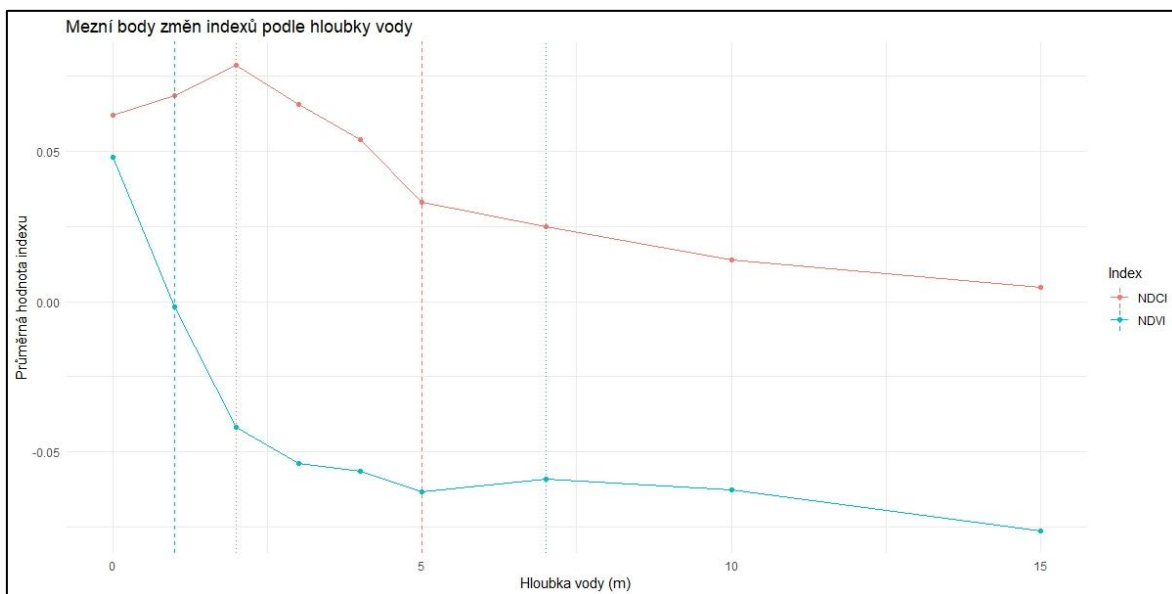
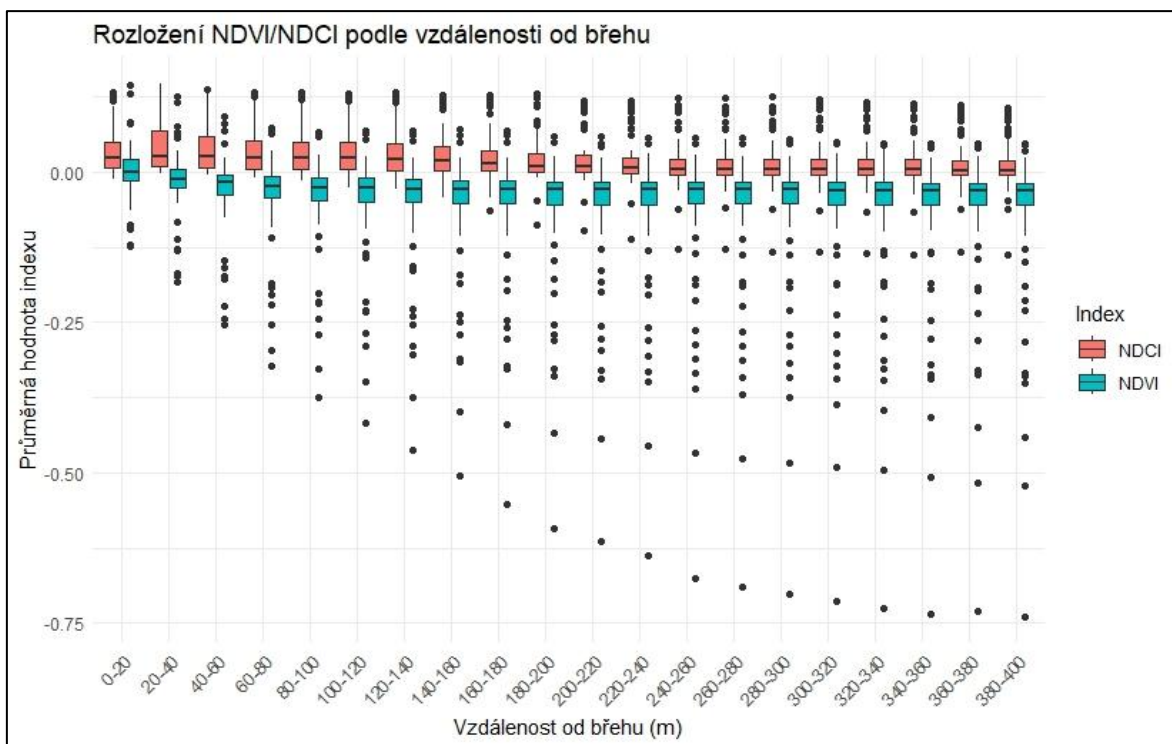
Příloha 11

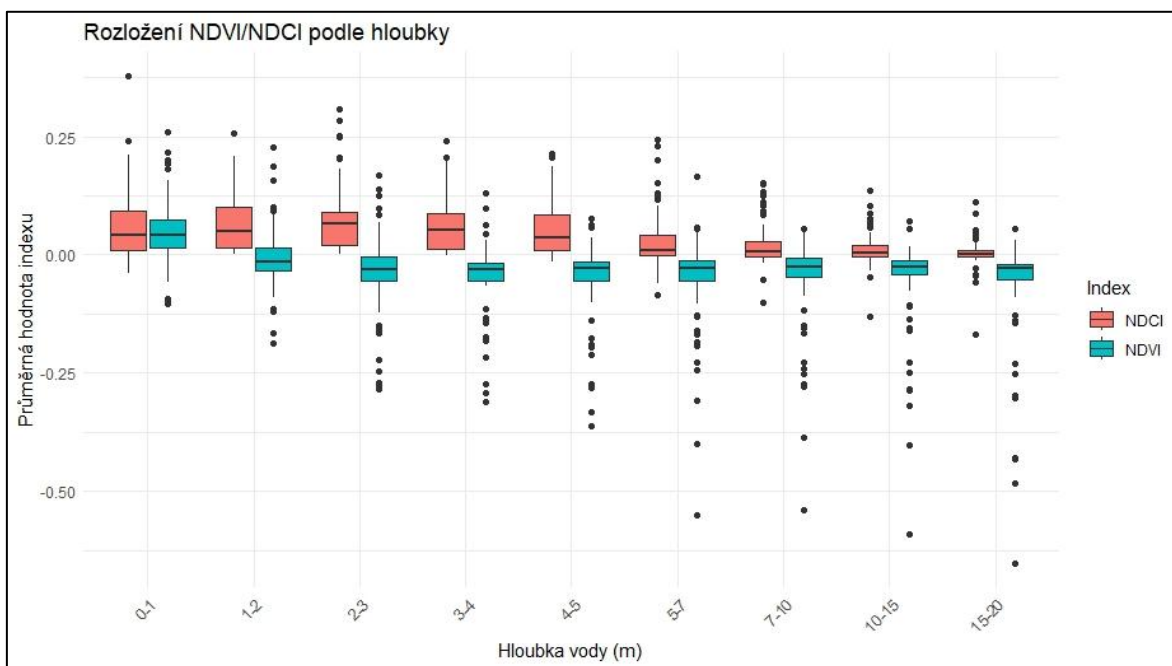
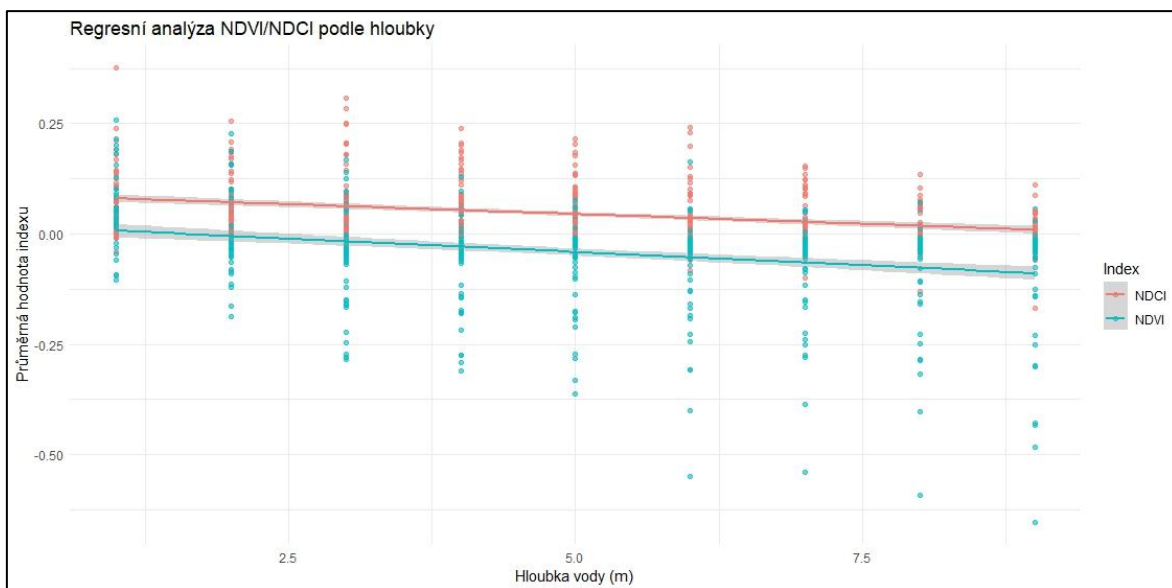


Parametr	Korelace s NDVI	P-hodnota (NDVI)	Korelace s NDCI	P-hodnota (NDCI)
Buňky sinice	-0.093	0.119	0.351	1.49e-09
Vodní květ	-0.062	0.301	0.349	1.64e-09
Chlorofil-A	0.039	0.517	0.577	< 2.2e-16
Průhlednost	-0.040	0.505	-0.466	< 2.2e-16
Koupací vody index	-0.144	0.015	0.369	1.57e-10

Příloha 12







Příloha 13

