

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra prostorových věd

**Detekce mořského odpadu multispektrálními  
družicovými senzory s vysokým rozlišením**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Autor diplomové práce: Bc. David Lískovec

**2023**

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. David Lískovec

Prostorové vědy v životním prostředí

Název práce

**Detekce mořského odpadu multispektrálními družicovými senzory s vysokým rozlišením**

Název anglicky

**Detection of marine litter using multispectral satellite sensors with high resolution**

## Cíle práce

Cílem diplomové práce je detekovat mořský odpad pomocí multispektrálních senzorů s vysokým rozlišením družic PlanetScope a Sentinel-2.

Dílčí cíle práce souvisí s následujícími výzkumnými otázkami:

- Jsou data pořízená družicemi PlanetScope vhodná k mapování mořského odpadu?
- Jak se liší přesnost detekce odpadu provedená pomocí komerčních multispektrálních dat z družic PlanetScope oproti volně dostupným datům Sentinel-2?
- Lze k detekci mořského odpadu využít standardní klasifikační postupy?
- Jaké se nabízí další možnosti detekce mořského odpadu? Jaké jsou jejich výhody a nevýhody (např. z hlediska přesnosti, nákladů na pořízení vstupních dat a času zpracování)?

## Metodika

Rámcovou metodickou náplní práce bude:

- Volba zájmové lokality s výskytem mořského odpadu;
- Získání vhodných dat PlanetScope a Sentinel-2;
- Pre-processing vstupních dat;
- Detekce mořského odpadu pomocí metod klasifikace obrazu;
- Výpočet a analýza využitelnosti spektrálních indexů (NDVI, Floating Debris Index, ...);
- Vyhodnocení přesnosti použitých detekčních přístupů;
- Zodpovězení výše uvedených výzkumných otázek.

**Doporučený rozsah práce**

40-60 stran

**Klíčová slova**

Dálkový průzkum Země, Sentinel-2, PlanetScope, plasty, čistota vody

**Doporučené zdroje informací**

- Basu, B., Sannigrahi, S., Basu, A. S., & Pilla, F. (2021). Development of novel classification algorithms for detection of floating plastic debris in coastal waterbodies using multispectral Sentinel-2 remote sensing imagery. *Remote Sensing*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/rs13081598>
- Ciappa, A.C. (2022). Marine Litter Detection by Sentinel-2: A Case Study in North Adriatic (Summer 2020). *Remote Sensing*, 14, 2409. <https://doi.org/10.3390/rs14102409>
- Hu, C. (2021). Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: Challenges and potentials. *Remote Sensing of Environment*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112414>
- Kikaki, K., Kakogeorgiou, I., Mikeli, P., Raitzos, D. E., Karantzas, K. (2022). MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data. *PLoS ONE*, 17(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262247>
- Kremezi, M., Kristollari, V., Karathanassi, V., Topouzelis, K., Kolokoussis, P., Taggio, N., Aiello, A., Ceriola, G., Barbone, E., Corradi, P. (2022). Increasing the Sentinel-2 potential for marine plastic litter monitoring through image fusion techniques. *Marine Pollution Bulletin*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113974>
- Martínez-Vicente, V.; Clark, J.R.; Corradi, P.; Aliani, S.; Arias, M.; Bochow, M.; Bonnery, G.; Cole, M.; Cózar, A.; Donnelly, R.; Echevarría, F.; Galgani, F.; Garaba, S.P.; Goddijn-Murphy, L.; Lebreton, L.; Leslie, H.A.; Lindeque, P.K.; Maximenko, N.; Martin-Lauzer, F.-R.; Moller, D.; Murphy, P.; Palombi, L.; Raimondi, V.; Reisser, J.; Romero, L.; Simis, S.G.H.; Sterckx, S.; Thompson, R.C.; Topouzelis, K.N.; van Sebille, E.; Veiga, J.M.; Vethaak, A.D. (2019). Measuring Marine Plastic Debris from Space: Initial Assessment of Observation Requirements. *Remote Sensing*, 11, 2443. <https://doi.org/10.3390/rs11202443>
- Salgado-Hernanz, P. M., Bauza, J., Alomar, C., Compa, M., Romero, L., Deudero, S. (2021). Assessment of marine litter through remote sensing: recent approaches and future goals. *Marine Pollution Bulletin*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112347>

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2023

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2023

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 06. 03. 2023

Prohlašuji, že jsem diplomovou/závěrečnou práci na téma Detekce mořského odpadu multispektrálními družicovými senzory s vysokým rozlišením vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Praze dne: 31.03.2023

.....

Podpis autora

#### Poděkování:

Chtěl bych poděkovat zejména vedoucímu práce Ing. Tomáši Kloučkovi, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost a poskytnutí cenných rad klíčových při zpracování této práce. Také bych rád poděkoval svým nejbližším, kterým jsem vděčný za podporu, kterou mi věnovali nejen během celého studia.

**Abstrakt:** Diplomová práce se zabývá možností detekce mořského odpadu za pomoci multispektrálních satelitních snímků s vysokým prostorovým rozlišením pořízených senzory nesenými družicemi PlanetScope a Sentinel-2. V rešeršní části je práce zaměřena především na rozdělení mořského odpadu z hlediska jeho typů a přibližuje jeho vliv na životní prostředí. Také jsou zde předloženy různé současné metody mapování odpadkových skvrn v mořích a aktuální stav využití dálkového průzkumu Země v této problematice. Metodická část popisuje způsoby detekce odpadu pomocí družicových systémů Sentinel-2 a PlanetScope a na základě vlastních validačních dat hodnotí přesnost jednotlivých klasifikačních metod a porovnává jejich úspěšnost. Bylo provedeno celkem pět klasifikačních metod, přičemž nejpřesnějších výsledků dosáhly klasifikace pomocí všech dostupných spektrálních pásem dat PlanetScope (93,5 %) a pomocí indexu NDVI vytvořeného pomocí dat Sentinel-2 (91,3 %). Oproti tomu nejhorších výsledků dosáhla klasifikace na základě indexu NDVI vytvořeného pomocí dat PlanetScope (50 %) a to především kvůli spektrální anomálii, která ovlivnila výsledné hodnoty indexu. Z výsledků závěrečné práce je patrné, že využití multispektrálních dat s vysokým rozlišením přináší vysoký potenciál pro detekci a mapování mořského odpadu a jeho zdrojů. I přes nižší spektrální rozlišení dosahují klasifikace PlanetScope velice přesných, a proto slibných výsledků, čímž dokazují svou případnou využitelnost v této problematice.

**Klíčová slova:** Dálkový průzkum Země, Sentinel-2, PlanetScope, plasty, čistota vody

### **Detection of marine litter using multispectral satellite sensors with high resolution**

**Abstract:** The diploma thesis aims at the possibility of marine debris detection using multispectral satellite images with a high spatial resolution taken by sensors carried by PlanetScope and Sentinel-2 satellites. In the research part, the thesis is mainly focused on the distribution of marine debris in terms of its types and its impact on the environment. Various current methods of mapping marine debris patches in the seas and the current state of use of remote sensing in this issue are also presented here. The methodological part describes methods of waste detection using the Sentinel-2 and PlanetScope satellite systems and, based on our validation data, evaluates the accuracy of individual classification methods and compares their success. A total of five

classification methods were performed, with the classification using all available spectral bands of PlanetScope data (93.5%) and the NDVI index created using Sentinel-2 data (91.3%) achieving the most accurate results. In contrast, the classification based on the NDVI index created using PlanetScope data (50%) achieved the worst results, mainly due to the spectral anomaly that affected the resulting index values. The results of the final thesis show that using high-resolution multispectral data brings a high potential for detecting and mapping marine debris and its sources. Despite the lower spectral resolution, the PlanetScope classifications achieve very accurate and therefore promising results, thus proving their eventual applicability in this issue.

**Key words:** Remote sensing, Sentinel-2, PlanetScope, plastics, water purity

# Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíl práce .....	11
3	Rešeršní část.....	12
3.1	Mořský odpad.....	12
3.1.1	Typy mořského odpadu.....	12
3.1.2	Zdroje odpadu .....	15
3.1.3	Vliv mořského odpadu na okolí .....	18
3.2	Metody detekce mořského odpadu.....	22
3.2.1	Tradiční metody .....	22
3.2.2	Využití leteckého DPZ a UAV .....	24
3.2.3	Využití multispektrálních satelitních snímků .....	25
3.3	Současný stav využití DPZ pro detekci mořského odpadu .....	29
4	Metodika práce.....	31
4.1	Potřebná data .....	31
4.1.1	Volba lokality.....	31
4.1.2	Charakteristiky studijního území .....	32
4.1.3	Použitá data .....	33
4.1.4	Pre-processing dat .....	35
4.2	Tvorba spektrálních křivek.....	36
4.2.1	Detekce odpadu pomocí NDVI.....	39
4.2.2	Detekce odpadu pomocí Floating Debris Index (FDI).....	41
4.3	Využití klasifikačních metod.....	42
4.3.1	Validace klasifikovaných snímků .....	46
5	Výsledky práce.....	48
6	Diskuse.....	53



7	Závěr a přínos práce .....	57
8	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	58

# 1 Úvod

Odpad v mořích představuje závažné environmentální riziko, které postihuje moře a oceány po celém světě. Jedním z řešených témat této problematiky je obtížné odhalování a sledování mořského odpadu na velkých územích. Tradiční metody detekce mořského odpadu často zahrnují člověkem prováděné průzkumy, které jsou časově náročné, drahé a mají omezený rozsah. Nedávný pokrok v technologii dálkového průzkumu Země proto nabízí nové možnosti jeho využití v celé řadě environmentálních aplikací. Velký potenciál mají zejména multispektrální satelitní senzory s vysokým prostorovým rozlišením umožňující precizně zachycovat údaje o vlastnostech pevniny a oceánů, a to v celé řadě vlnových délek, včetně viditelného a infračerveného elektromagnetického záření. Nabízí se tak jejich aplikace v úlohách zaměřených na detekci a sledování mořského odpadu či k rozlišení jeho různých druhů. Tato technologie rovněž umožňuje monitoring velkých území za relativně krátkou dobu a má tak v budoucnu potenciál doplnit, případně kompletně nahradit pracné a nákladné člověkem prováděné terénní mise. Úspěšná detekce mořského odpadu může pomoci s identifikací potenciálních zdrojů znečištění a následně může být využita k zamezení, či alespoň omezení, samotné kontaminace životního prostředí.

Diplomová práce je proto zaměřena na posouzení využitelnosti komerčních (PlanetScope) a volně dostupných multispektrálních (Sentinel-2) družicových dat s vysokým prostorovým rozlišením, které jsou v dnešní době standardem pro monitoring jiných aspektů životního prostředí, než je detekce mořského odpadu. Ač jsou obě družice často zařazovány do stejné kategorie satelitů, tak se významně liší svým prostorovým, spektrálním i časovým rozlišením, které může mít zásadní vliv na přesnost a věrohodnost prováděné analýzy. V současnosti již bylo publikováno několik prací prokazujících využitelnost těchto technologií, nicméně žádná z nich nebyla doposud zaměřena na vzájemné porovnání několika odlišných družicových dat.

Základní struktura diplomové práce je rozdělena na řešeršní část, ve které je shrnuta problematika mořského odpadu, jeho spektrálních vlastností a současných možností dálkového průzkumu Země. V praktické části je dále představeno vlastní metodické řešení využívající pro detekci mořského odpadu jak snímky z družic PlanetScope, tak Sentinel-2. Následují výsledky práce a jejich zasazení do kontextu doposud publikované vědecké literatury.

## 2 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je prozkoumat možnosti detekce mořského odpadu pomocí multispektrálních družicových snímků s vysokým prostorovým rozlišením pořízených senzory nesenými družicemi PlanetScope a Sentinel-2. Dílčí cíle závěrečné práce souvisí s těmito výzkumnými otázkami:

- a) Jsou data pořízená družicemi PlanetScope vhodná k mapování mořského odpadu?
- b) Jak se liší přesnost detekce odpadu provedená pomocí komerčních multispektrálních dat z družic PlanetScope oproti volně dostupným datům Sentinel-2?
- c) Lze k detekci mořského odpadu využít standardní klasifikační postupy?
- d) Jaké se nabízí další možnosti detekce mořského odpadu? Jaké jsou jejich výhody a nevýhody (např. z hlediska přesnosti, nákladů na pořízení vstupních dat a času zpracování)?

## **3 Rešeršní část**

### **3.1 Mořský odpad**

Termín „mořský odpad“ se vztahuje k jakémukoliv odpadu vytvořenému člověkem, který byl vypuštěn do pobřežních nebo mořských oblastí a je obvykle vedlejším efektem jak pozemních, tak mořských aktivit (Löhr et al., 2017). Jedná se o závažný environmentální problém, který ohrožuje zdraví oceánů a dalších vodních ploch po celém světě (Werner et al., 2016). Tato kapitola se zaměřuje právě na problematiku mořského odpadu a přibližuje jeho jednotlivé typy, zdroje a vliv na okolní prostředí.

#### **3.1.1 Typy mořského odpadu**

Odpadu ve světových mořích přibývá (Barnes et al., 2009) a lze jej rozdělit do několika základních kategorií dle materiálu, který jej tvoří. Odpad je tak běžně tvořen plasty, sklem, kovy, polystyrenem, gumou, zanechaným rybářským náčiním nebo opuštěnými plavidly. Tyto druhy se často seskupují do větších odpadkových skvrn, přičemž převažujícím materiálem je plast (Pawar et al., 2016).

#### **Plastový odpad**

Plast je syntetický materiál vyrobený pomocí polymerizace molekul monomerů – materiálů, které se získávají z uhlí, ropy nebo zemního plynu (Selukar et al., 2014). V současnosti se jedná o jeden z nejvíce využívaných materiálů v průmyslu, lékařství nebo obchodu a jeho produkce neustále stoupá (Gourmelon, 2015). Pro okolí nepříznivou vlastností plastu je jeho dlouhý čas rozkladu. Odhadovaná doba rozkladu u některých plastů se pohybuje v řádech stovek let (Whiting, 2018). Kvůli tomu je plastový odpad jedním z nejběžnějších druhů odpadů, se kterým se v mořích můžeme setkat (Löhr et al., 2017). Až 80 % veškerého mořského odpadu se řadí právě do této kategorie, kam patří především tvarované a měkké plasty (jako například PET láhve), pěnové plasty, sítě, lana nebo bóje (Gregory & Ryan, 1997; Pawar et al., 2016).

Část plastového odpadu tvoří mikroplasty. Jedná se o velmi malé částice plastového materiálu, jejichž velikost nepřesahuje 5 milimetrů. Takové částice vznikají rozpadem větších plastů, případně jsou v takové velikosti záměrně vyráběny (Hale et al., 2020). Autoři studie „A global inventory of small floating plastic debris“ odhadli, že počet mikroplastových částic se v roce 2014 pohyboval v rozmezí 15 až 51 bilionů částic o hmotnosti 93 až 236 tisíc tun. Přičemž se jedná pouze o 1 % celosvětového

plastového odpadu, který se dostal do oceánu v roce 2010. I takové množství však výrazně ovlivňuje životní prostředí (Van Sebille et al., 2015). Mikroplasty se například často nachází ve vnitřnostech vodních živočichů. Při výzkumu lovu ryb v jižním Pacifiku bylo prokázáno, že až u 25 % vylovených ryb byla zjištěna přítomnost mikroplastů (Science Learning Hub, 2019). Na obrázku č. 1 lze vidět 18 částic mikroplastů v těle kranase duhového.



*Obrázek 1: Množství mikroplastů v rybích vnitřnostech (Science Learning Hub, 2019)*

### **Odpad tabákového průmyslu**

Konzumace tabáku a tabákových výrobků se datuje až 18 000 let do minulosti, kdy došlo k prvnímu osídlení amerického kontinentu. Tento zvyk se následně rozšířil i do zbytku světa po objevení Ameriky Kryštofem Kolumbem (Musk & de Klerk, 2003). V současnosti patří tabákový průmysl k jednomu z největších průmyslových odvětví na světě (Bialous & Peeters, 2012). S tím se však pojí i vysoký podíl vyprodukovaného odpadu. Kromě vzniklého odpadu při samotné produkci tabákových výrobků dochází ke znečišťování okolí cigaretovými nedopalky nebo jednorázovými zapalovači (Pawar et al., 2016).

## **Kovový odpad**

Mezi kovový odpad, který můžeme nalézt v mořích se řadí především plechovky nebo uzávěry lahví, ale také například opuštěné a potopené lodě (Pawar et al., 2016). Podobně jako u plastového odpadu i u toho kovového nedochází k biologickému rozkladu a kvůli tomu může v mořích zůstat i stovky let (Ansari et al., 2004).

## **Skleněný odpad**

Sklo je pevný materiál, který se obvykle vyrábí zahříváním směsi oxidu křemičitého, uhličitanu sodného a vápna na velmi vysokou teplotu, dokud se neroztaví a nespojí. Samotné složení se může lišit v závislosti na typu vyráběného skla a jeho použití (Seward, 2003). V mořích se s ním můžeme setkat především ve formě skleněných lahví, žárovek nebo rozbitého skla z přepravy (Pawar et al., 2016). Výhoda skleněných lahví je jejich opakované využití, a tedy menší podíl v odpadu. Nicméně pokud se ze skleněných lahví stane odpad, tak doba potřebná k jejich rozkladu je oproti plastovým mnohem delší (Stefanini et al., 2021).

## **Dřevěný odpad**

Dřevěný mořský odpad se skládá především z vyhozených nebo ztracených dřevěných materiálů, jako je dřevo z lodních a rybářských plavidel, dřevo ze staveb a demolic nebo naplavené dřevo z pobřeží. Může se také jednat o části stromů či jiné vegetace vyplavené v důsledku přírodních událostí, jako jsou bouře, záplavy nebo sesuvy půdy (Mantelatto et al., 2020; Pawar et al., 2016). Na rozdíl od předchozích materiálů, u dřeva z velké části dochází k biologickému rozkladu (převážně kvůli vlivu bakterií nebo korálů) a k úplnému rozkladu může dojít už během několika jednotek let (Mantelatto et al., 2020; Ulyshen, 2016).

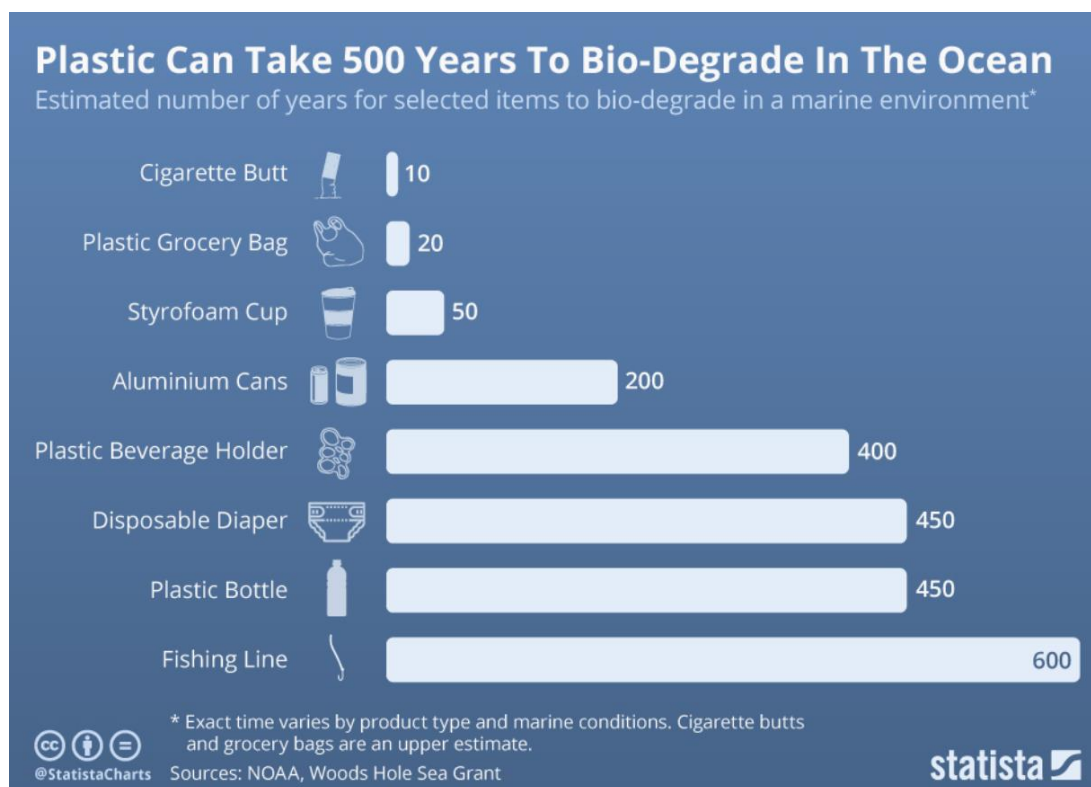
## **Gumový odpad**

Dalším typem odpadu je guma, a řadí se do něj například pneumatiky, gumové rukavice, balónky a další gumové předměty (Pawar et al., 2016). Guma (neboli kaučuk) je přirozeně se vyskytující polymer, který je vytvářen z mízy některých stromů, jako třeba kaučukovníku. Tato míza je známá jako latex a obsahuje dlouhé řetězce molekul, které lze zpracovat na různé gumové výrobky (Abraham et al., 2016). Gumové výrobky se mohou ve volném prostředí rozkládat až stovky let, například odhadovaný čas rozkladu pneumatik je až 2 000 let (Batista, 2022).

## Textilní odpad

Posledním typem odpadu, který stojí za zmínění je textil. Do této kategorie se z většiny řadí použité, ztracené a nevyužité oblečení, výbava domácností, jako ručníky, povlečení a závěsy nebo ostatní zbytky látek a textilu (Pawar et al., 2016).

Na obrázku číslo 2 je zobrazen odhad rozkladu některých z výše zmíněných druhů odpadu.



Obrázek 2: Odhadovaný čas rozkladu materiálů – cigaretové nedopalky se mohou rozložit do 10 let, přičemž rybářské vlasce mohou v moři ležet až 600 let (Whiting, 2018)

### 3.1.2 Zdroje odpadu

Abychom mohli zabránit šíření a akumulaci odpadů v mořích a oceánech, je zásadní pochopit řadu souvislostí, mezi které patří právě zdroje plovoucího odpadu. Ty lze rozdělit do dvou základních kategorií. Jsou jimi zdroje suchozemské a oceánské a liší se podle toho, kde došlo k vypuštění odpadu do vody (Galgani et al., 2015). Suchozemským zdrojům je přisuzováno až 80 % veškerého mořského odpadu. Pouze zbylých 20 % má svůj původ v mořích a oceánech (Pawar et al., 2016).

Suchozemský odpad má svůj původ, jak již název napovídá, na pevnině. Tento odpad je do moří zanesen větrem, spláchnut vodou, případně je do moře přímo vyhozen

(Sheavly, 2005). Mezi suchozemské zdroje patří například vypouštění srážkových vod, přetečení kombinované kanalizace, littering, likvidace pevného odpadu, skládky a průmyslová činnost.

### **Vypouštění srážkových vod**

Srážkové vody jsou na pevnině zachycovány a odváděny dešťovou kanalizací. Tyto odpadní vody jsou často odváděny přímo do blízkých toků nebo oceánu. Společně s dešťovou vodou se do kanalizací dostává i odpad z ulic, který je následně vypouštěn do vodních toků, ze kterých se může dostat až do moří a oceánů (Pawar et al., 2016).

### **Přetečení kombinované kanalizace**

Kombinovaná kanalizace přenáší dešťové i splaškové vody. Během přívalových dešťů může dojít k překročení manipulační kapacity čistírny a následnému vypouštění splaškové vody společně s dešťovou přímo do vodních toků (Pawar et al., 2016). Tímto způsobem se do životního prostředí může dostávat odpad jako tampony, injekční stříkačky a pouliční odpadky (Sheavly, 2005).

### **Littering**

Výraz littering označuje činnost, při níž je odpad (neboli anglicky *litter*) ponechán nebo pohozen na místě, které k tomu není určeno, a to buď v přírodě, nebo na veřejném prostranství (Vološinová et al., 2021). Často k němu dochází na plážích, kde turisté zanechávají odpadky v podobě obalů od potravin a nápojů, nedopalků cigaret a plastových plážových hraček. Odpadky z pevniny se často mohou stát mořským odpadem, pokud se dostanou do potoků a řek. Stejným způsobem může vzniknout mořský odpad z odpadků po pracovnících z lesnictví, zemědělství, stavebnictví a těžby (Pawar et al., 2016; Sheavly, 2005).

### **Likvidace pevného odpadu a skládky**

Skládky nacházející se v blízkosti pobřeží nebo řek mohou vypouštět svůj odpad do mořského prostředí. Mořský odpad může také vznikat ztrátou odpadků během jejich přepravy nebo sběru ze skládek. Dalším zdrojem může být nezákonné vypouštění průmyslového nebo domácího odpadu do mořských a pobřežních vod (Pawar et al., 2016; Sheavly, 2005). Jen v Evropě bylo v roce 2022 nahlášeno přes 30 000 nelegálních skládek (Tiseo, 2023).



## **Průmyslová činnost**

Posledním suchozemským zdrojem, který stojí za zmínění je průmyslová činnost. Průmyslové produkty se mohou stát mořským odpadem, pokud jsou nesprávně uloženy na pevnině, případně pokud se ztratí během přepravy nebo nakládky/vykládky v přístavních zařízeních (Pawar et al., 2016). Surovinou pro výrobu plastových výrobků jsou malé plastové pelety z pryskyřice, které mají obvykle průměr 2-6 mm (Derraik, 2002). Tyto pelety se při výrobě či přepravě dostávají do mořského prostředí, což vede k jejich přítomnosti v oceánských vodách, sedimentech na plážích, a je známo, že je požívají mořští živočichové (Redford et al., 1997).

Kromě suchozemského odpadu existuje ještě ten s původem přímo v oceánech a mořích. Všechny druhy plavidel a průmyslových plošin na moři jsou potenciálními zdroji mořského odpadu. Tyto odpadky mohou pocházet z náhodných ztrát, odhazování běžných odpadků, či nelegální likvidace. Oceánské a mořské zdroje odpadu mohou být spojeny i s nevhodným ukládáním odpadu v minulosti (Pawar et al., 2016; Sheavly, 2005). Stejně jako suchozemský, i tento odpad můžeme rozdělit do několika kategorií.

## **Komerční rybolov a rekreační plavby**

Je poměrně časté, že po komerčním rybolovu zůstává v lokalitě množství použitého rybářského náčiní, případně odpadků, který za sebou rybáři vědomě, či nevědomě zanechávají. Mezi odpad vznikající při komerčním rybolovu patří rybářské sítě, vlasce a lana, vázací pásky, krabice s návnadami, pytle, plováky z tenatových či vlečných sítí a také odpad z kuchyní a jiné odpadky domácností (Morishige et al., 2007; Pichel et al., 2007). Plavby na soukromých lodích a jachtách představují také zvýšené riziko výskytu odpadu. Mezi takový odpad se řadí především igelitové sáčky, obaly od potravin, případně rybářské náčiní. Také může dojít ke ztrátě textilií, jako například oblečení či součástí nábytku (Sheavly, 2005). Počet lidí cestujících ve vlastních lodích každoročně stoupá. Velikost globálního trhu s jachtami vzrostla oproti minulému roku o 7,1 % na necelých 9 miliard dolarů, přičemž předpokládaná velikost pro rok 2027 přesahuje 11 miliard (*Yacht Market Size, Trends and Global Forecast To 2032*, 2023).

## **Obchodní, vojenské a výzkumné plavby**

Odpad z plavidel může být náhodně vypuštěn do vody, případně může být úmyslně vyhozen přes palubu. Velká plavidla s mnoha členy posádky denně produkují velké množství pevného odpadu, který může skončit jako mořský odpad, pokud není řádně zajištěn a uskladněn (Pawar et al., 2016; Sheavly, 2005).

## **Ropné a plynové plošiny na moři a podmořský průzkum**

Při činnostech na ropných a plynových plošinách mohou vznikat předměty, které se záměrně nebo náhodně uvolňují do mořského prostředí, včetně ochranných helem, rukavic, skladovacích sudů, průzkumných materiálů a osobního odpadu. Ke vzniku odpadu v mořích přispívá i podmořský průzkum a těžba dalších nerostných surovin (Pawar et al., 2016; Sheavly, 2005).

### **3.1.3 Vliv mořského odpadu na okolí**

Mořská prostředí jsou znehodnocena odpadem vytvořeným člověkem, a to jak od pólů až po rovník, tak od pobřeží, ústí řek a mořské hladiny až po hlubiny oceánů (Thompson et al., 2009). Přítomnost odpadu v oceánech představuje vysoké riziko nejen pro tamní organismy, ale také pro lidské zdraví, transport a často narušuje estetické vlastnosti moří, čímž ovlivňuje socioekonomické aspekty různých přímořských států (Gall & Thompson, 2015; Gaylor et al., 2012; Gregory, 2009). Vliv mořského odpadu na mořské živočichy je obzvláště znepokojivý, a jeho dopady mohou být rozsáhlé. Na obrázku č. 3 lze vidět 5 různých negativních dopadů toho, jak odpad ovlivňuje mořský život (Gall & Thompson, 2015).



Obrázek 3: (A) Odpad na pobřeží korálového útesu, Ta'u, Americká Samoa. (B) Odpad vyjmutý z mrtvoly mláděte albatrose laysanského, atol Kure, Havaj. (C) Odpad v hnízdě buřňáka severního, Grasholm, Spojené království. (D) Mořský odpad a opuštěné rybářské náčiní mezi hnízdy albatrosů, Midway, Havajské ostrovy. (E) Želva zamotaná do plastového lana, Karibik (Gall & Thompson, 2015)

### Vliv na mořské organismy

Nejvíce ohroženou skupinou mořským odpadem jsou mořské organismy, a to včetně drobného planktonu až velkých mořských savců. Účinky odpadu mohou být přímé, jako je zapletení nebo požití, nebo nepřímé, jako je destrukce nebo změna habitatu. Nejčastějším typem odpadu jak při zapletení, tak požití je plast, který může až za 92 % veškerých incidentů (Gall & Thompson, 2015).

Požření odpadu je do značné míry spjato s potravními strategiemi a typy kořisti. Například zhruba třetina všech mořských želv někdy pozřela odpad. Z 371 pitev se ukázalo, že 37,2 % z nich mělo v trávicím traktu plast (Mrosovsky et al., 2009). Mezi plastové předměty, které jsou často želvami požity patří například igelitové sáčky, které vypadají jako medúzy (Bugoni et al., 2001). Požití odpadu těmto zvířatům způsobuje například hnisavé rány, snížení reprodukční schopnosti, snížení schopnosti

přijímat potravu v důsledku nahromadění odpadu v trávicím systému, případně jeho kompletní ucpání či snížení rychlosti růstu (Pawar et al., 2016).

Další ohroženou skupinou živočichů, u které dochází k negativním efektům v důsledku pozření mořského odpadu, jsou ptáci. Téměř polovina všech druhů mořských ptáků na celém světě pravděpodobně pozřela odpad, a v průběhu let dokonce došlo u některých druhů k tzv. plastikóze neboli zjizvení žaludku na základě pozřené umělé hmoty. Tato nemoc může vést ke zhoršené schopnosti trávit potravu, případně mohou být ptáci náchylnější vůči infekcím a parazitům (Charlton-Howard et al., 2023; Pawar et al., 2016). Mezi další důsledky pozření odpadu patří například snížení tělesné hmotnosti, snížení reprodukční schopnosti nebo snížení kapacity žaludku (Pawar et al., 2016; Spear et al., 1995).

Ohroženými organismy jsou i ryby. Případy ryb, které požírají plasty jsou v současnosti velice dobře zdokumentované a existuje nepřehledné množství důkazů, že k tomu dochází (Sigler, 2014). Většina pozřené odpadu je modrá, bílá nebo průsvitná, což jsou také barvy planktonu, hlavního zdroje obživy ryb (Boerger et al., 2010). Odpadem zasažené ryby se pak často stávají potravou pro větší mořské živočichy, jako jsou například tuleni, čímž se odpad přesune přímo do jejich trávicího traktu (Eriksson & Burton, 2003). Naopak je tomu v případě kytovců, pro které je zejména kvůli jejich výskytu daleko od pobřeží, dostupné pouze omezené množství dat sledujících požívání mořského odpadu (Sigler, 2014). K požití nejspíše opět dochází smícháním s běžnou potravou. V roce 2008 byli u pobřeží Kalifornie nalezeni dva vorvani s velkým množstvím rybářského náčiní v trávicím traktu (Jacobsen et al., 2010). Nicméně dle výsledků současných studií nelze prokázat, že pozřený odpad je hlavní příčinou úmrtí přispívající k úbytku kytovců (Baulch & Perry, 2014).

Kromě pozření hrozí mořským živočichům také zapletení, které vede k omezení, případně úplnému zabránění pohybu. Zapletením trpí přes 250 druhů živočichů, mezi které patří například želvy, tučňáci, mořští a pobřežní ptáci, delfíni, velryby nebo různí korýši (Gregory, 2009). Jednou z největších hrozeb pro tyto živočichy je zanechané rybářské náčiní, které většinou zahrnuje vlasce a sítě. Do těch se pak zachytávají volně žijící organismy a následkem zamotání je většinou jejich smrt, či vážné zranění (Pawar et al., 2016).

## **Vliv na člověka**

Mořský odpad neovlivňuje pouze organismy žijící v jeho přímé blízkosti, ale také ovlivňuje člověka, a to jak přímo, tak nepřímo. Tento vliv se negativně projevuje například na zdraví nebo ekonomice (Sheavly & Register, 2007). Mezi zdravotní rizika mořského odpadu můžeme zařadit následující faktory.

- Vystavení nebezpečným materiálům

Mořský odpad může obsahovat řadu nebezpečných materiálů, včetně chemických látek, těžkých kovů a patogenů. Pokud se tyto materiály po nesprávné manipulaci dostanou do vodních zdrojů, mohou představovat zdravotní riziko pro lidi, kteří vodu konzumují nebo s ní přijdou do přímého či nepřímého kontaktu (Leite et al., 2014; Pawar et al., 2016). Takto kontaminovaná voda samozřejmě ovlivňuje i ostatní organismy v jejím okolí.

- Požití kontaminovaných mořských plodů

Mořský odpad může také kontaminovat mořské plody, které jsou pro mnoho lidí na celém světě hlavním zdrojem bílkovin. Až u 3 miliard lidí na světě tvoří mořské plody přes 15 % veškerého přísunu živočišných bílkovin. V případě některých ostrovních a západoafrických zemí dosahuje tato hodnota až 50 % (Smith et al., 2010). Pokud tyto mořské organismy pozřou odpad obsahující nebezpečné látky, případně přijdou do kontaktu s kontaminovanou vodou, může se tato kontaminace skrz jejich tkáň přenést přímo na člověka (Pawar et al., 2016).

- Přímé poranění

Mořský odpad vyplavený na pláži může představovat vážné zdravotní riziko při kontaktu s lidskou tkání. Například rozbité sklo, kov nebo rybářské náčiní mohou působit řezné nebo bodné rány, zatímco toxické chemické látky mohou způsobit popáleniny nebo jiné podráždění kůže. Opuštěné rybářské sítě a náčiní v blízkosti potápěčských oblastí také mohou způsobit řezné rány, případně může dojít k zaplétání (Pawar et al., 2016).

Kromě zdravotních komplikací může mořský odpad způsobit také komplikace ekonomické, a to především pro státy, které jsou na mořích a oceánech závislé z hlediska cestovního ruchu a rybolovu. V případě, kdy jsou pláže zaneseny odpadem, klesá zájem turistů o návštěvu lokality, což může vést ke snížení příjmů lokálních

podniků, které jsou na turismu závislé (Krelling et al., 2017). Podobný dopad může mít odpad v moři na rybářský průmysl. Rybářské sítě se mohou zamotat mezi odpadky a poškodit se, což může vést k nižší úspěšnosti při lovu, případně se odpad může dostat do lodních šroubů a poškodit tak loď (Pawar et al., 2016). Samotné odklizení odpadu pak zvyšuje výdaje daného státu a může významně zasáhnout do státního rozpočtu (Burt et al., 2020).

### **Pozitivní efekt odpadu**

Je obtížné jmenovat pozitivní účinky mořského odpadu, jelikož se jedná o závažný problém, který má z většiny pouze škodlivé dopady na mořský život, ekosystémy a lidské zdraví. Existují však případy, kdy mořský odpad může mít na životní prostředí pozitivní vliv. Například se jedná o vytvoření umělých útesů. V některých případech mohou potopené lodě, auta a další velký odpad vytvářet umělé útesy, které poskytují útočiště pro mořské živočichy. Tyto konstrukce mohou být prospěšné v oblastech, kde byly přírodní útesy poškozeny nebo zničeny (NOAA, 2023). Tento a další podobné pozitivní efekty však nedokážou vyvážit, natož převýšit ty negativní, a proto bychom stále měli usilovat o zamezení vypouštění odpadu do moří, případně jeho odstranění (Sheavly & Register, 2007).

## **3.2 Metody detekce mořského odpadu**

Abychom mohli úspěšně odstranit veškerý odpad z našich moří a oceánů, je nutné ho správně a rychle detekovat a lokalizovat. Samotná lokalizace může být poměrně náročná, a to jak časově, tak finančně. Proto vzniklo několik metod vyhledávání odpadu v oceánech, které se v současnosti využívají a napomáhají k čištění světových vod.

### **3.2.1 Tradiční metody**

Tradiční metody detekce odpadu se obvykle opírají o vizuální pozorování lidmi na lodích, případně v letadlech. Běžně se jedná o skenování vodní hladiny a vyhledávání plovoucího odpadu, jako jsou plastové láhve nebo rybářská výbava. Tato část práce se zaměřuje pouze na čtyři základní metody detekce pomocí lodí a letadel, které jsou v současnosti běžně využívány pro mapování a odklizení odpadu z oceánů.

### **Průzkum velkého odpadu z lodní paluby nebo letadla**

Tento způsob průzkumu obvykle probíhá sledováním vodní hladiny z vyvýšené pozice na pohybující se lodi, případě z letadla. Loď v tomto případě proplouvá sledovanou oblast několika rovnoběžnými trasami, které jsou od sebe vzdáleny 100 a více metrů v závislosti na velikosti sledovaného odpadu. V případě leteckého průzkumu se letadlo pohybuje ve výšce zhruba 300 m. Během této metody jsou běžně využívány pomůcky, jakými jsou například dalekohledy (Pichel et al., 2007; Ribic et al., 1992).

Studie „*Marine debris collects within the North Pacific Subtropical Convergence Zone*“ využívala právě letecké mapování. Jednalo se celkem o čtyři mapovací lety v okolí Honolulu na Havaji. Letadlo prolétalo ve výšce 300 m rychlostí 100 m/s a veškeré nálezy byly hlášeny koordinátorovi, který hodnoty zapisoval. Na základě pozorování byla vytvořena pravděpodobnostní mapa odpadu v blízkosti havajských ostrovů (Pichel et al., 2007).

### **Průzkum malého odpadu za pomoci vlečných sítí**

Průzkum za pomoci sběru vlečnými sítěmi je využíván především pro mapování drobnějších částic, které by mohly být přehlédnuty předchozí metodou. Nejmenší velikost sbíraného odpadu závisí na velikosti ok použité sítě a největší na velikosti jejího ústí. Na základě sesbíraného odpadu je vypočtena jeho hustota a druh. Tato metoda je často spojována s monitoringem ryb a planktonu (Ribic et al., 1992).

Tuto metodu využila například studie „*A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre*“, která sesbírala jedenáct vzorků na území severního Pacifiku. Pro sběr vzorků byla využita takzvaná *manta* (viz obr. 4), jejíž ústí dosahuje rozměrů 0,9x0,15 m<sup>2</sup> a vleče za sebou 3,5 m dlouhou síť. Pomocí sítí bylo sesbíráno přes 27 tisíc plastových částic a přes 150 tisíc planktonních organismů (Moore et al., 2001).



Obrázek 4: Vlečná síť Manta (Village Bayfield, 2015)

### Podvodní průzkum

Pro mapování ponořeného odpadu se využívají podvodní průzkumy, které se většinou zaměřují na střední až velké objekty. Průzkum je určen ke klasifikaci, počítání a v některých případech také sběru předmětů potopených na dně. Tímto způsobem je možné mapovat pouze menší oblasti, jejichž vlastnosti mohou být následně extrapolované na větší území (Ribic et al., 1992). V současnosti se používá šest základních podmořských metod: pomocí vlečné sítě na dně, pomocí sonaru, ponorkou/podvodním vozidlem, šnorchlováním, potápěním a vlečením manty, přičemž nejčastější metodou je právě první z nich (Spengler & Costa, 2008).

#### 3.2.2 Využití leteckého DPZ a UAV

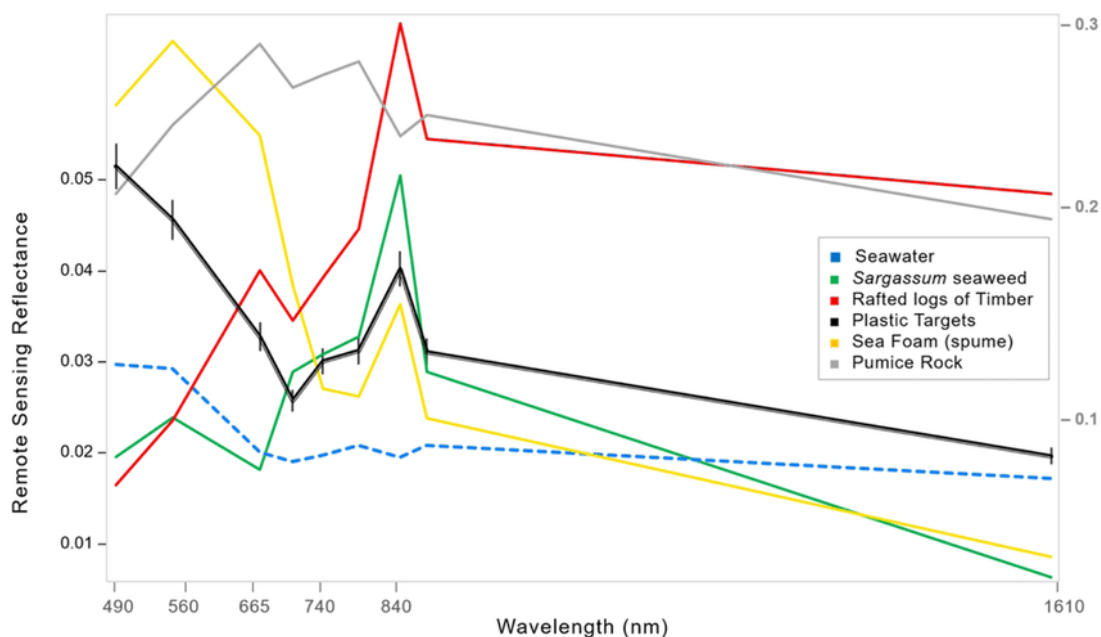
Jelikož jsou terénní mise často velice časově náročné a dokáží pokrýt menší území, čím dál více se v současnosti využívají družicové, letecké a UAV (*Unmanned Aerial Vehicle* neboli bezpilotní prostředky) metody. Tyto prostředky mohou nést různé aktivní i pasivní senzory na snímání zemského povrchu (Lebreton et al., 2018; López & Mulero-Pázmány, 2019). Pasivní senzory využívají sluneční energii, která se odráží, případně je vyzařována objekty k zaznamenání obrazu lokality. Řadí se mezi ně například videosenzory nebo multispektrální a hyperspektrální kamery. Aktivní senzory oproti tomu využívají svůj vlastní zdroj energie, kterým ozařují objekty a sbírají hodnotu jejich odrazu. Mezi tyto systémy se řadí lidarové (*Light Detection and Ranging*) a radarové senzory (Veenstra & Churnside, 2012). Například systémy SAR jsou využívány jak při leteckém, tak satelitním DPZ pro zachycení hrubosti terénu. Výhodou těchto systémů je jejich použitelnost v každém počasí a jejich schopnost pronikat skrz oblačnost. Změny terénu, v tomto případě ve smyslu hladiny, mohou obsahovat užitečné informace o přítomnosti mořského odpadu (Liu & Wu, 2001).



### 3.2.3 Využití multispektrálních satelitních snímků

Není tomu dlouho, kdy se v problematice detekce mořského odpadu začaly využívat také satelitní systémy. Ty dokážou oproti terénním a leteckým misím pokrýt velká území za poměrně krátký čas. K takovému mapování se v současné době využívá několik základních metod, které s sebou přináší vysoký potenciál. Mezi tyto metody se řadí radar, lidar, pasivní mikrovlnné snímání a multispektrální/hyperspektrální snímání (Salgado-Hernanz et al., 2021). Jelikož práce využívá data multispektrální, tak se tato kapitola zaměřuje přímo na ně.

Multispektrální senzory snímají povrch v několika různých pásmech vlnových délek, obvykle ve viditelné (~400–700 nm), blízké infračervené (~700–2500 nm) a infračervené (~2500 nm – 1 mm) části elektromagnetického spektra. Každé z těchto pásem může odhalit jiné informace o sledovaném prostředí (Campbell & Wynne, 2011). V případě detekce mořského odpadu například u plastu či dřeva dochází k vysokému odrazu v blízkém infračerveném pásmu, přičemž voda téměř veškeré vlny v tomto pásmu absorbuje (viz obr. 5) (Biermann et al., 2020).



Obrázek 5: Spektrální odrazivost materiálů v moři; voda zobrazena modře, odpad černě/červeně (Biermann et al., 2020)

## Mise Sentinel

Družicová mise Sentinel je série misí pro pozorování Země, které provádí Evropská kosmická agentura (ESA) v rámci programu Copernicus. Cíl programu Copernicus je nepřetržitý monitoring životního prostředí Země s vysokým prostorovým rozlišením, který nalézá uplatnění při podpoře široké škály aplikací souvisejících se změnou klimatu, využíváním půdy, přírodními katastrofami a dalšími problémy životního prostředí. V současné době je v provozu šest misí Sentinel, každá s vlastním souborem přístrojů a cílů. Například Sentinel-1 je radarová mise, která slouží ke snímkování povrchu pevniny a moře, oproti tomu mise Sentinel-5 je zaměřena na sledování složení zemské atmosféry (*Missions - Sentinel Online*, 2023).

Klíčovou misí pro tuto práci je Copernicus Sentinel-2. Cílem této mise je poskytnout multispektrální snímky zemského povrchu s vysokým rozlišením (*Missions - Sentinel Online*, 2023). Tato data jsou získávána pomocí dvou družic (Sentinel-2A a Sentinel-2B), které byly vypuštěny v roce 2015, respektive v roce 2017. Obě družice nesou multispektrální senzor se 13 spektrálními pásmy od viditelných po infračervená pásma elektromagnetického spektra (viz tab. 1). Družice obíhají kolem Země na polární heliosynchronní dráze, což jim umožňuje snímat povrch vždy ve stejnou denní dobu při každém oběhu. Mise pokryje celý zemský povrch každých 5 dní, přičemž doba opakovaného záběru v rovníkových oblastech je 2-3 dny. Data poskytovaná družicemi Sentinel-2 jsou volně dostupná veřejnosti a umožňují výzkumným pracovníkům, vládám nebo podnikatelům sledovat změny ve využívání půdy, stavu vegetace a přírodních zdrojů, případně dalších krajinných metrik (*Sentinel-2*, 2023; *Sentinel-2 - Mission Objectives*, 2023).

*Tabulka 1: Spektrální pásma družice Sentinel-2A (Spectral - Sentinel Online, 2023)*

Spektrální pásmo	Vlnová délka (nm)	Prostorové rozlišení (m)
Band 1 - Coastal aerosol	442,7	60
Band 2 - Blue	492,7	10
Band 3 - Green	559,8	10
Band 4 - Red	664,6	10
Band 5 - Vegetation red-edge	704,1	20
Band 6 - Vegetation red-edge	740,5	20
Band 7 - Vegetation red-edge	782,8	20
Band 8 – NIR	832,8	10
Band 8A - Vegetation red-edge	864,7	20
Band 9 - Water vapour	945,1	60
Band 11 - SWIR	1613,7	20
Band 12 - SWIR	2202,4	20

I přes svůj původní účel monitoringu pevniny je díky své dostupnosti mise Sentinel-2 často využívána také právě k detekci mořského odpadu. Tyto snímky nabízí vysoký potenciál díky svým 13 spektrálním pásmům a také díky svému prostorovému rozlišení, které dosahuje až 10 m (viz tab. 1). Právě toto rozlišení umožňuje sledovat větší odpadkové skvrny v mořích (Ciappa, 2022).

### Mise PlanetScope

Družicová mise PlanetScope je provozována soukromou společností Planet Labs a zahrnuje konstelaci malých družic, které mají za cíl poskytnout snímky zemského povrchu s vysokým prostorovým a časovým rozlišením. Mise je jedinečná tím, že využívá malé, lehké družice, které jsou levnější a snadněji se vypouští než tradiční velké družice pro pozorování Země. Tyto družice dosahují rozměrů 10x10x30 cm, což umožňuje jejich vypouštění ve skupinách najednou (Makuno & Eliot, 2023). Aktuálně nejnovější verze družic (tzv. SuperDove) snímají celkem v 8 spektrálních pásmech viditelného a infračerveného pásma, přičemž dosahují prostorového rozlišení 3 m (viz tab. 2) (*Understanding PlanetScope Instruments*, 2023). Takové rozlišení s sebou přináší vysoký potenciál při detekci mořského odpadu a na rozdíl od mise Sentinel-2 může PlanetScope detekovat i mnohem menší odpadkové skvrny.

*Tabulka 2: Spektrální pásma PlanetScope SuperDove (PlanetScope, 2023; Understanding PlanetScope Instruments, 2023)*

Spektrální pásmo	Vlnová délka (nm)	Prostorové rozlišení (m)
Band 1 - Coastal Blue	443	3
Band 2 - Blue	490	3
Band 3 - Green I	531	3
Band 4 - Green	565	3
Band 5 - Yellow	610	3
Band 6 - Red	665	3
Band 7 – Red-edge	705	3
Band 8 - NIR	865	3

### Využití spektrálních indexů při mapování mořského odpadu

Multispektrální snímky nabízí řadu možností, jak odlišit různé materiály na zemském povrchu. Jednou z účinných metod je využití spektrálních indexů. V dálkovém průzkumu Země jsou spektrální indexy matematické vzorce, které kombinují dvě nebo více pásem elektromagnetického záření a poskytují informace o konkrétním prvku

nebo parametru na zemském povrchu. Tyto indexy se používají ke zvýšení viditelnosti určitých prvků nebo k odhadu biofyzikálních parametrů, jako je vegetační pokryv, vlhkost půdy a teplota povrchu (Verstraete & Pinty, 1996). V případě detekce mořského odpadu nejčastěji dochází k využití indexu NDVI (Biermann et al., 2020).

NDVI je zkratka pro *Normalized Difference Vegetation Index* (Normalizovaný rozdílový vegetační index). Jedná se o jednoduchý matematický vzorec, který se využívá především k analýze měření zdraví vegetace dálkovým průzkumem Země (Xue & Su, 2017). Tento index se vypočítává z hodnot spektrální odrazivosti dvou vlnových délek světla, a to obvykle červené a blízké infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Na obrázku č. 6 je zapsán základní vzorec indexu, který nabývá hodnot od -1 do 1, přičemž hodnoty blízké 1 znamenají zdravou a hustou vegetaci, zatímco hodnoty blízké -1 znamenají nezdravou, případně žádnou vegetaci (Pettorelli, 2013).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Obrázek 6: Základní vzorec pro výpočet NDVI

Jelikož tento index využívá právě blízké infračervené pásmo, lze ho úspěšně aplikovat i pro detekci odpadu v moři, který toto pásmo odráží. Tento index je však vyvinut právě pro detekci vegetace a monitoring jejího zdraví. Oproti tomu index FDI je vyvíjen právě pro detekci mořského odpadu (Biermann et al., 2020).

FDI je zkratka pro *Floating Debris Index* (Index plovoucího odpadu). Tento index byl vyvinut pro lepší detekci plovoucího odpadu v mořích a je založen na indexu využívaném pro detekci mořských řas – *Floating Algae Index* (FAI). FDI využívá kromě červeného pásma pásmo red-edge a další drobné úpravy (Biermann et al., 2020) (viz obr. 7 a 8).

$$FAI = R_{NIR} - R'_{NIR}$$

$$R'_{NIR} = R_{RED} + (R_{SWIR1} - R_{RED}) \times \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED}}$$

Obrázek 7: Vzorec pro výpočet indexu FAI

$$FDI = R_{NIR} - R'_{NIR}$$

$$R'_{NIR} = R_{RED} + (R_{SWIR1} - R_{RED}) \times \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}}{\lambda_{SWIR1} - \lambda_{RED}} \times 10$$

Obrázek 8: Vzorec pro výpočet indexu FDI

Hodnoty  $R_{NIR}$ ,  $R_{RED}$ ,  $R_{RED}$  a  $R_{SWIR1}$  odkazují na odrazivost v pásmech NIR (~830 nm), red (~665 nm), red-edge 2 (~740 nm) a SWIR1 (~1610 nm). Hodnoty  $\lambda_{NIR}$ ,  $\lambda_{RED}$  a  $\lambda_{SWIR1}$  jsou následně nahrazeny centrální vlnovou délkou v daných pásmech satelitu v nanometrech (Basu et al., 2021). Využití těchto indexů přináší vysoký potenciál při detekci mořského odpadu a mohou být následně využity pro řízené i neřízené klasifikace obrazu. Výhodou těchto metod je i potenciální automatizace celého procesu a následná rychlá a levná detekce odpadu, který znečišťuje světové oceány (Biermann et al., 2020).

### 3.3 Současný stav využití DPZ pro detekci mořského odpadu

Odborné publikace zkoumající využití dálkového průzkumu Země při detekci mořského odpadu se začínají objevovat od roku 2007 do současnosti, přičemž většina studií byla zveřejněna od roku 2018, což poukazuje na nárůst zájmu o výzkum v této oblasti. V těchto studiích bylo nejvíce využíváno leteckého a družicového DPZ, pouze výjimečně bylo využito metod UAV. Tyto nosiče byly osazeny jak aktivními, tak pasivními DPZ senzory (Salgado-Hernanz et al., 2021).

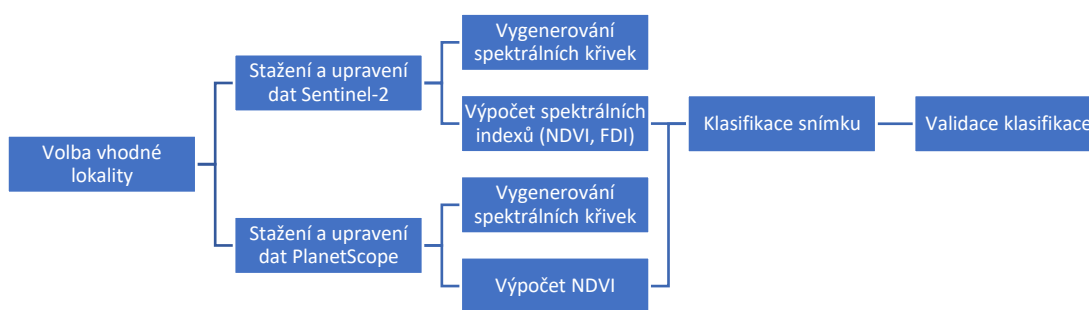
Pro monitoring mořského odpadu bylo využito několik multispektrálních senzorů, mezi které patří například družice Sentinel-2 (Biermann et al., 2020) nebo WorldView-2/3 (Aoyama, 2016). V případě dat Sentinel-2 byla využívána především jeho infračervená pásma včetně blízkých (NIR) i krátkovlnných (SWIR) pásem, a to prostřednictvím indexu NDVI a nově vytvořeného indexu FDI (Basu et al., 2021; Ciappa, 2022). Družice WorldView snímají pouze v jednom, případně dvou blízkých infračervených pásmech. Tyto pásma však v případě mapování mořského odpadu skýtají největší potenciál (Hu, 2021; Martínez-Vicente et al., 2019). Většina doposud publikovaných studií využívajících multispektrální družicová data, se zaměřuje převážně na monitoring pobřežních oblastí (Salgado-Hernanz et al., 2021). Hlavní výhodou družic WorldView oproti družicím Sentinel-2 je jejich vysoké prostorové rozlišení, které většinou dosahuje 1–4 m. Na druhou stranu jsou oproti Sentinel-2 omezeny rozsahem svých spektrálních pásem. Z toho důvodu například vznikla studie

zkoumající proces možného vylepšení prostorového rozlišení snímků Sentinel-2 pomocí dat WorldView-2/3. Tato studie tak zkoumá potenciál multispektrálních snímků s velkým množstvím spektrálních pásem a zároveň dosahujících vysokého prostorového rozlišení (Kremezi et al., 2022).

Lepšího prostorového rozlišení lze také docílit využitím dat nasnímaných pomocí leteckého snímání. Využití letadel je v případě pořizování dat pro detekci mořského odpadu v současnosti mnohem častější, než v případě UAV (Salgado-Hernanz et al., 2021). Senzory často dosahují velmi vysokého rozlišení (~10–120 cm), nicméně pořízení těchto dat je poměrně časově i finančně náročné. Tyto systémy jsou však velice přesné a na základě jejich dat lze úspěšně detekovat množství, lokalitu a případně zdroje mořského odpadu (Pichel et al., 2012). Bezpilotní prostředky mohou často dosáhnout podobných výsledků, nicméně oproti leteckým i družicovým systémům pokryjí daty za stejný čas menší plochu (Topouzelis et al., 2019).

## 4 Metodika práce

Metodická část práce se zaměřuje na data družic Sentinel-2 a PlanetScope, jejich zpracování, analýzu a vyhodnocení využitelnosti při detekci odpadu v moři. Největší důraz je v této kapitole kladen především na aplikaci různých metod detekce mořského odpadu a porovnání využitelnosti obou výše zmíněných družicových systémů v této problematice. Pro zpracování dat bylo využito několik softwarů jako například Sentinel Application Platform (SNAP) od Evropské kosmické agentury (ESA) nebo open-source aplikace QGIS. Metodická část diplomové práce postupovala dle schématu na obrázku č. 9.



Obrázek 9: Schéma metodického postupu práce

### 4.1 Potřebná data

Prvním metodickým krokem této práce bylo získání vhodných družicových snímků PlanetScope a Sentinel-2, které sloužily jako vstupní data pro další analýzy. Bylo nutné zvolit vhodnou studijní lokalitu s dostatečnou zásobou mořského odpadu a vhodnými povětrnostními podmínkami, které by mohly ovlivnit kvalitu pořízených snímků. Jedněmi z požadovaných kritérií pro vhodný snímek bylo minimum oblačnosti a minimální výskyt vln.

#### 4.1.1 Volba lokality

Jelikož se práce zabývá detekcí odpadu v moři, bylo nutné sehnat taková data, na kterých se odpad nachází. Proces identifikace vhodné lokality pro provedení detekce mořského odpadu se ukázal jako poměrně náročný. Po průzkumu dostupných družicových snímků několika lokalit, které jsou na základě dostupné literatury

objektivně zasažené přítomností mořského odpadu, byl výběr zúžen na několik potenciálně vhodných, z nichž byla nakonec vybrána jedna finální lokalita s dostatečným množstvím na snímcích viditelného odpadu. Tato lokalita byla zvolena především díky italské studii „*Marine Litter Detection by Sentinel-2: A Case Study in North Adriatic (Summer 2020)*“, která zde úspěšně detekovala velké odpadkové skvrny (Ciappa, 2022). Pro tuto lokalitu byly navíc dostupné bezoblačné snímky jak z družic PlanetScope, tak Sentinel-2.

#### **4.1.2 Charakteristiky studijního území**

Zvolená lokalita je součástí Benátského zálivu v severní části Jaderského moře (viz obr. 10). Severní Jaderské moře je mělká pánev v nejsevernější oblasti Středozemního moře. Ze západu je ohraničeno Apeninským poloostrovem, z východu pak poloostrovem Balkánským. V studované oblasti nedosahuje hloubka moře více než 40 m (Poulain et al., 2001). Tato pánev se nachází v hustě osídlené, průmyslově využívané a intenzivně obdělávané oblasti a je obklopena mnoha ústími řek (např. Pád, Tagliamento, Dragonja nebo Piava) a dvěma lagunami (Benátskou a Maranskou) (Ciappa, 2022). Severní Jaderské moře v současnosti plní několik zásadních funkcí najednou: je důležitou oblastí pro rekreaci a trávení volného času, je jednou z nejdůležitějších oblastí pro přímé nebo nepřímé odstraňování odpadů, je jednou z nejdůležitějších zásobáren biologických zdrojů ve Středomoří, je velmi důležitou oblastí pro akvakulturu, je tranzitním koridorem pro neustále více houstnoucí plavební trasy, je vhodnou oblastí pro využívání podzemních zdrojů a je stále strategickým prostorem z geopolitického hlediska (Zanetto & Soriani, 1996). Všechny tyto funkce jen přispívají k vyšší akumulaci potenciálního odpadu v oblasti.





Obrázek 10: Zvolená lokalita v kontextu okolních států (Mapy Google, 2023)

### 4.1.3 Použitá data

Pro analýzu dat Sentinel-2 byl zvolen snímek z data 21. 8. 2021 pořízený družicí Sentinel-2A. Konkrétně se jedná o dlaždici s označením T33TUL. Na snímku se vyskytuje pouze malé množství oblačnosti, a to mimo zájmovou lokalitu. Snímek obsahuje celkem 12 spektrálních pásem s rozdílným prostorovým rozlišením (viz tab. 1 v kapitole 3.2.3). Snímek byl pořízen z webové aplikace *The Copernicus Open Access Hub*, která poskytuje data družic Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 a Sentinel-5P kompletně zdarma a bez omezení. Jedná se o aplikaci vesmírného programu Copernicus, fungujícího pod záštitou Evropské Unie (*Copernicus Data Space Ecosystem*, 2023; *Open Access Hub*, 2023). Na obrázku č. 11 můžete vidět zvolený snímek družice Sentinel-2 v kompozici RGB.



*Obrázek 11: Snímek Sentinel-2A zájmové lokality*

Pro analýzu dat PlanetScope byl zvolen snímek z podobného časového období jako snímek předešlý. Byl pořízen 24. 8. 2021 družicí SuperDove (PSB.SD) a neobsahuje žádnou oblačnost. Jeho prostorové rozlišení dosahuje 3 metrů a obsahuje celkem 8 spektrálních pásem (viz tab. 2 v kapitole 3.2.3). Snímek byl pořízen pomocí aplikace *Planet Explorer* v rámci vzdělávacího a výzkumného programu Planet. Tento program poskytuje limitovaný přístup k datům PlanetScope a RapidEye pro nekomerční výzkumné a vzdělávací účely (Planet, 2023). Na obrázku č. 12 můžete vidět zvolený snímek PlanetScope v kompozici RGB.



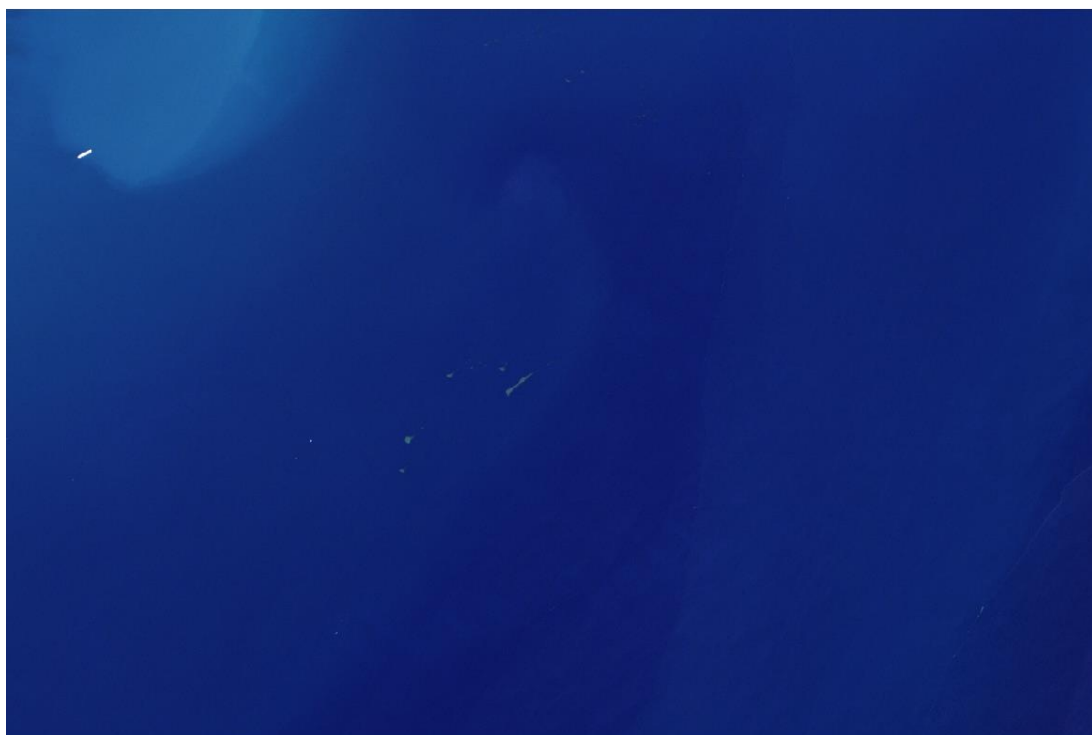
Obrázek 12: Snímek PlanetScope PSB.SD zájmové lokality

#### 4.1.4 Pre-processing dat

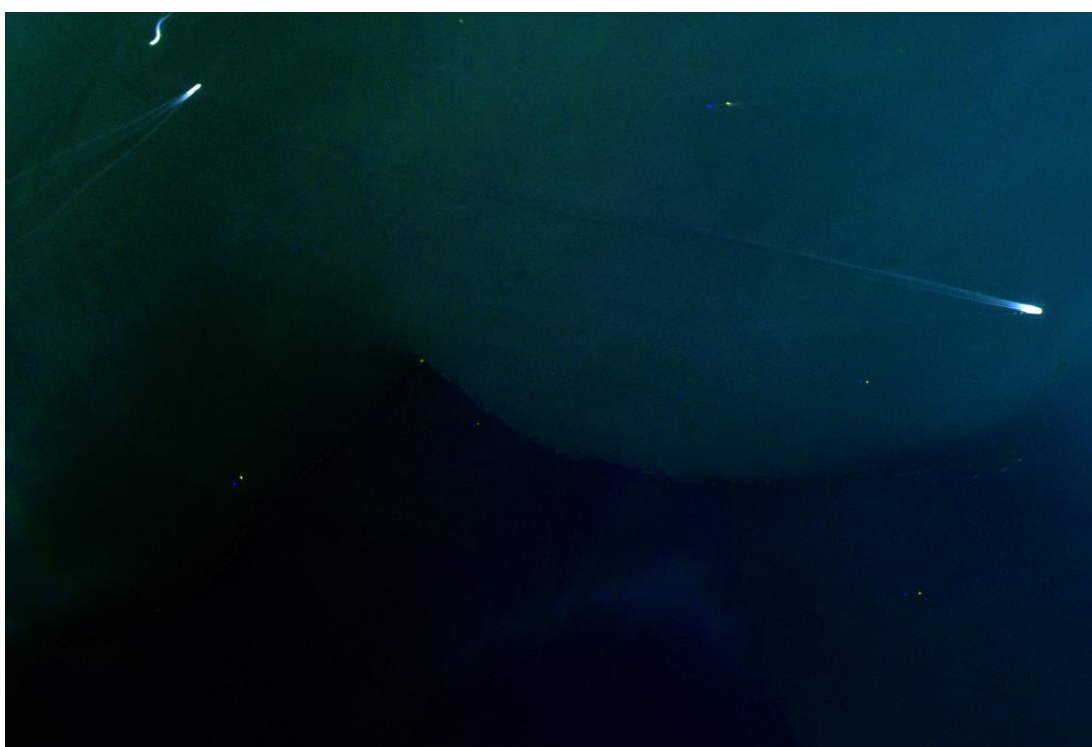
Pre-processing neboli předzpracování dat se týká počátečních kroků, které se provádějí za účelem přípravy nezpracovaných družicových snímků pro použití v následných analýzách. Tyto kroky obvykle zahrnují řadu standardních postupů, které se aplikují na surová data s cílem opravit různé zdroje chyb a zlepšit celkovou kvalitu a využitelnost snímků. Jedná se například o atmosférické korekce, které mají za úkol odstranit na snímcích vliv atmosféry a z tzv. dat TOA (Top Of Atmosphere) vytvořit data BOA (Bottom Of Atmosphere) (Young et al., 2017). Jelikož obě služby (Sentinel i Planet) nabízí již předzpracovaná data, byla zvolena práce právě s nimi. V případě družic Sentinel-2 se jedná o data úrovně 2A, v případě družic PlanetScope o data úrovně 3B.

Na obou snímcích bylo vybráno pouze území s vyšší koncentrací odpadu, které bylo pomocí funkce *Subset* v softwaru SNAP vyříznuto z původních družicových snímků (PlanetScope i Sentinel-2). Vznikly tak dva výřezy snímků, na kterých se spolu s odpadem nachází i další umělé objekty, jakými jsou např. lodě (viz obr. 13 a 14).





*Obrázek 13: Oblast s odpadem (Sentinel-2)*



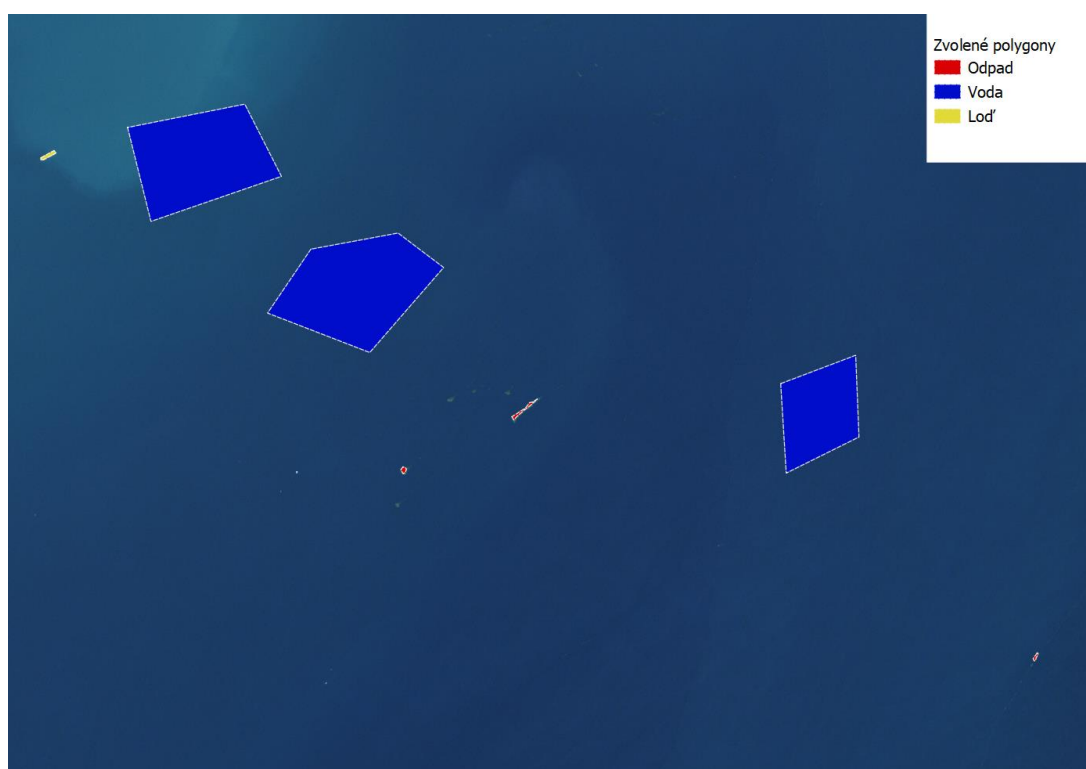
*Obrázek 14: Oblast s odpadem (PlanetScope)*

## **4.2 Tvorba spektrálních křivek**

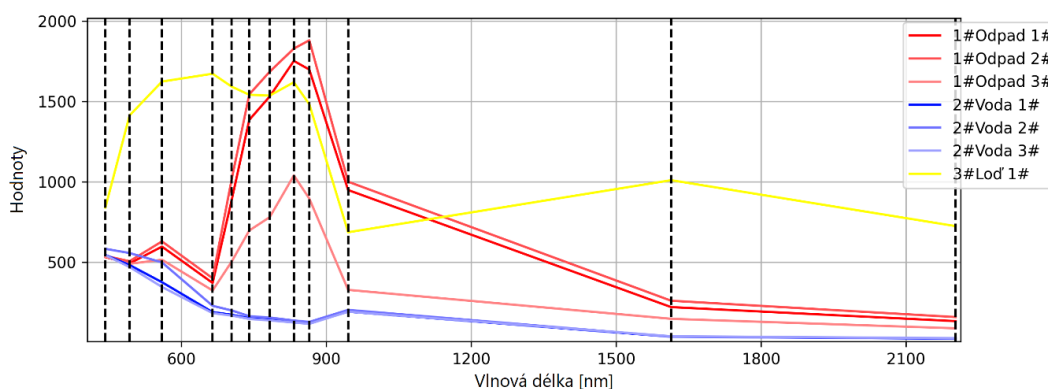
Prvním metodickým krokem před samotným výpočtem spektrálních indexů byla tvorba spektrálních křivek odrazivosti, které umožní lepší pochopení rozdílné

odrazivosti odpadu přítomného ve zvolené lokalitě od odrazivosti „čistého“ moře a lodí. K vygenerování křivek byl využit software QGIS, konkrétně jeho doplněk *Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)*.

Na snímku Sentinel-2 byly umístěny tři polygony reprezentující odpad, tři polygony reprezentující vodu a jeden reprezentující loď (viz obr. 15). Polygony byly voleny tak, aby zaujaly co největší souvislé oblasti s daným typem a zároveň byly rozprostřeny na více lokalitách. Pro každý z těchto polygonů došlo následně k výpočtu jejich průměrné spektrální odrazivosti (viz obr. 16).

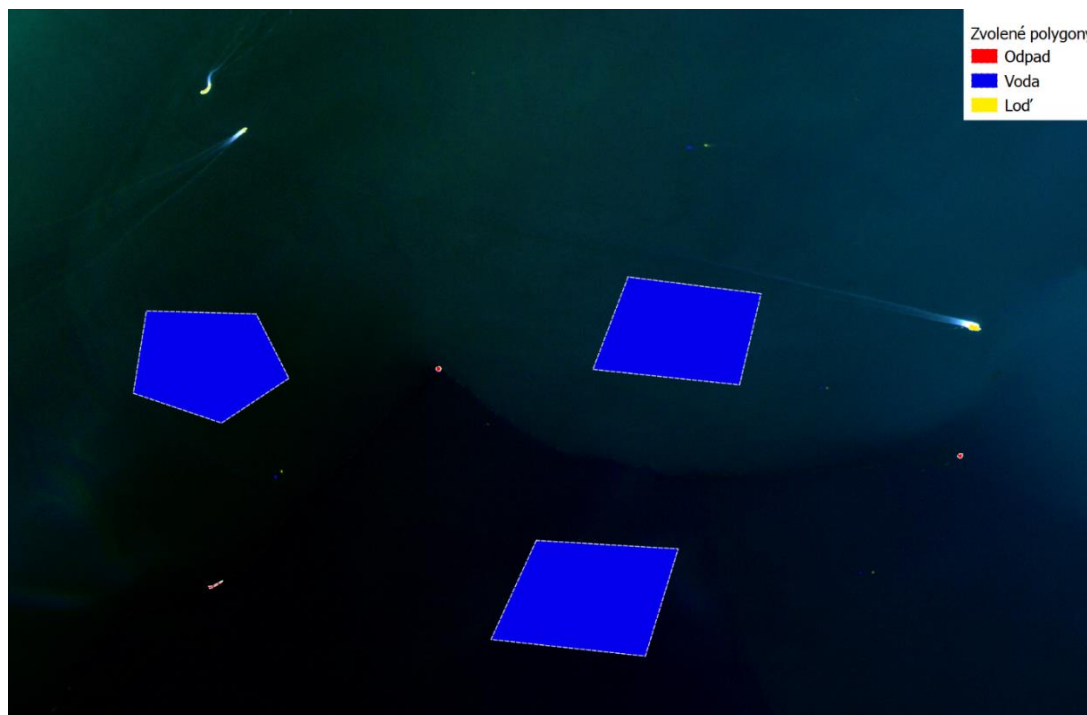


Obrázek 15: Zvolené polygony pro snímek Sentinel-2

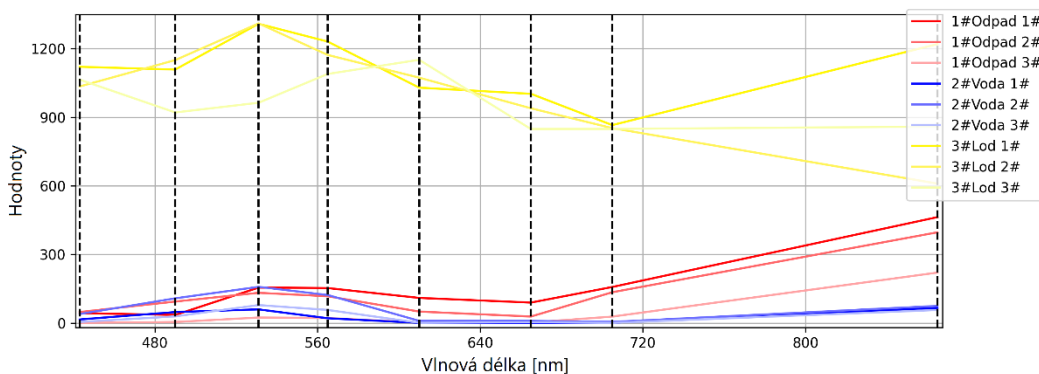


Obrázek 16: Spektrální křivky zvolených polygonů ze snímku Sentinel-2

Na snímku PlanetScope byl proveden podobný postup. Byly zvoleny tři polygony pro odpad, další tři pro vodu a jeden pro loď (viz obr. 17). Na základě těchto polygonů byla vypočtena spektrální křivka každého z polygonů reprezentujícího jednu z kategorií (viz obr. 18).



Obrázek 17: Zvolené polygony na snímku PlanetScope



Obrázek 18: Spektrální křivky zvolených polygonů ze snímku PlanetScope

Na obou obrázcích spektrálních křivek (viz obr. 16 a 18) můžeme vidět tři hlavní prvky, které se v mořích nachází, přičemž každá z tlustých čárkovaných čar symbolizuje jednotlivé spektrální kanály daného družicového systému. Dle vlastností křivek lze následně uzpůsobit výběr spektrálních indexů. Odrazivost vody je dle očekávání nízká ve všech pásmech u obou snímků. U spektrální křivky odpadu lze pozorovat vyšší odrazivost v blízkém infračerveném pásmu (NIR), a to především

u snímku z družice Sentinel-2. Odrazivost lodí u obou snímků nabývá vyšších hodnot v téměř všech pásmech. Proto byly pro samotnou detekci zvoleny právě spektrální indexy NDVI a FDI.

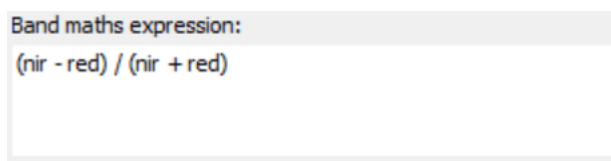
#### 4.2.1 Detekce odpadu pomocí NDVI

Pro výpočet indexu NDVI byl využit software ESA SNAP a jeho funkce *Band Maths*. Tato funkce umožňuje vytváření nových pásem na základě zadaného matematického vzorce. Zde byla využita rovnice pro výpočet tohoto indexu (viz obr. 19 a 20). Pro každý ze snímků (Sentinel-2 a PlanetScope) tak bylo vypočítáno nové pásmo NDVI, kde jsou hodnoty blížíící se -1 zobrazeny černě a hodnoty blížíící se k 1 bíle (viz obr. 21 a 22).



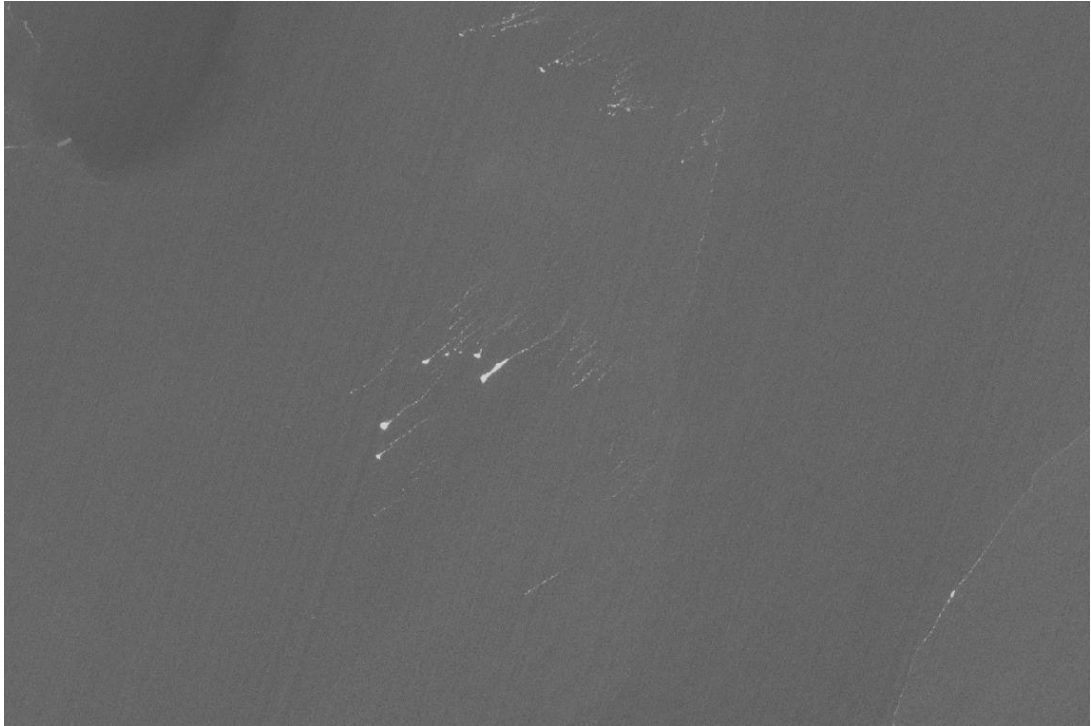
Band maths expression:  
 $(B8 - B4) / (B8 + B4)$

Obrázek 19: Vzorec pro výpočet NDVI (Sentinel-2)



Band maths expression:  
 $(nir - red) / (nir + red)$

Obrázek 20: Vzorec pro výpočet NDVI (PlanetScope)



*Obrázek 21: Index NDVI pro snímek Sentinel-2*



*Obrázek 22: Index NDVI pro snímek PlanetScope*



Na obrázku č. 22 je patrná jistá anomálie ve výsledku indexu NDVI, při které byla hlubším oblastem moře přidělena vysoká hodnota. Kvůli tomu je v této oblasti index velmi nevěrohodný.

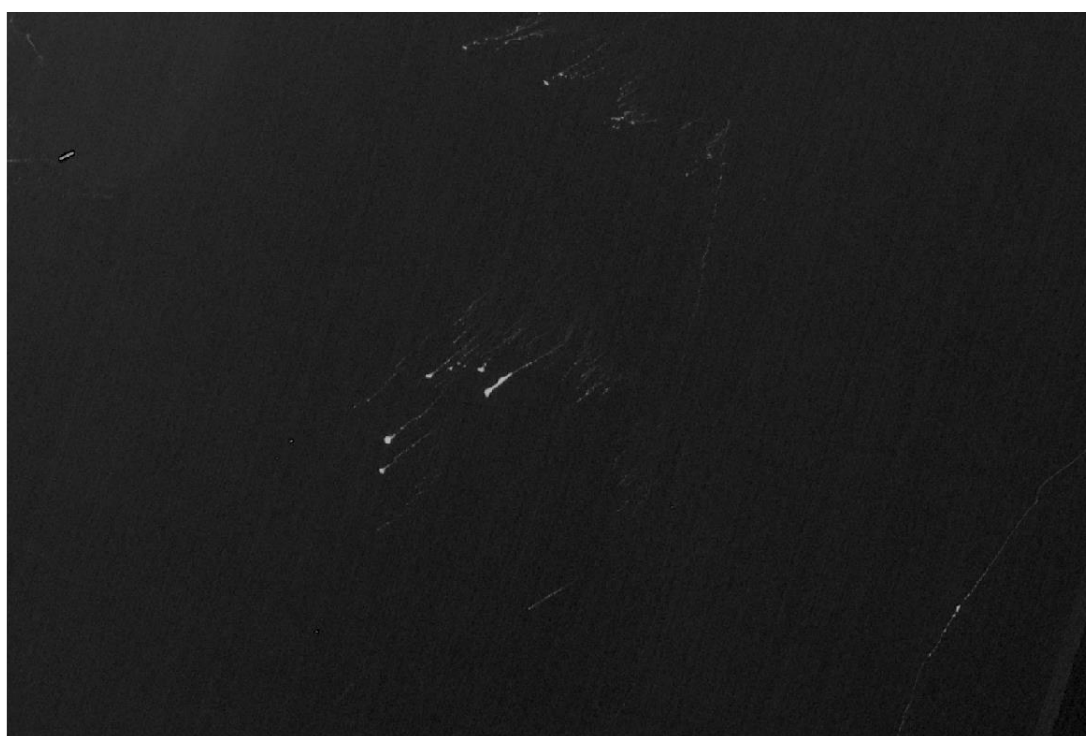
#### 4.2.2 Detekce odpadu pomocí Floating Debris Index (FDI)

Jelikož mají senzory PlanetScope možnost snímat pouze ve viditelném a blízkém infračerveném spektru, nemohl na ně být tento index aplikován. Proto byl vypočítán pouze pro data družice Sentinel-2. Opět byl zvolen postup přes funkci *Band Maths*, kam byl vložen jeho vzorec (viz obr. 23).

```
Band maths expression:  
B8 - (B6 + (B11 - B6) * ((832.8 - 664.6)/(1613.7 - 664.6)) * 10)
```

Obrázek 23: Vzorec pro výpočet FDI

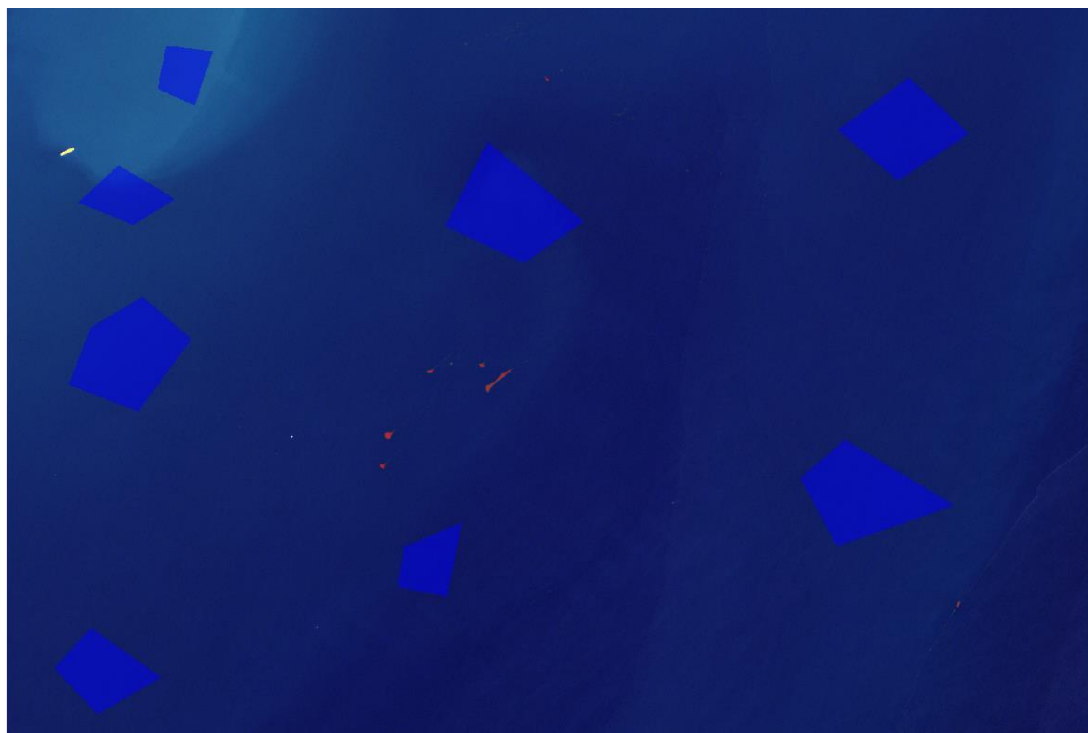
Index plovoucího odpadu nabývá hodnot od 0 do 1. Na obrázku číslo 24 můžete vidět výsledný rastr, kde hodnoty blížíící se k 0 reprezentuje černá barva a hodnoty blížíící se k 1 barva bílá. Právě bílé hodnoty představují mořský odpad.



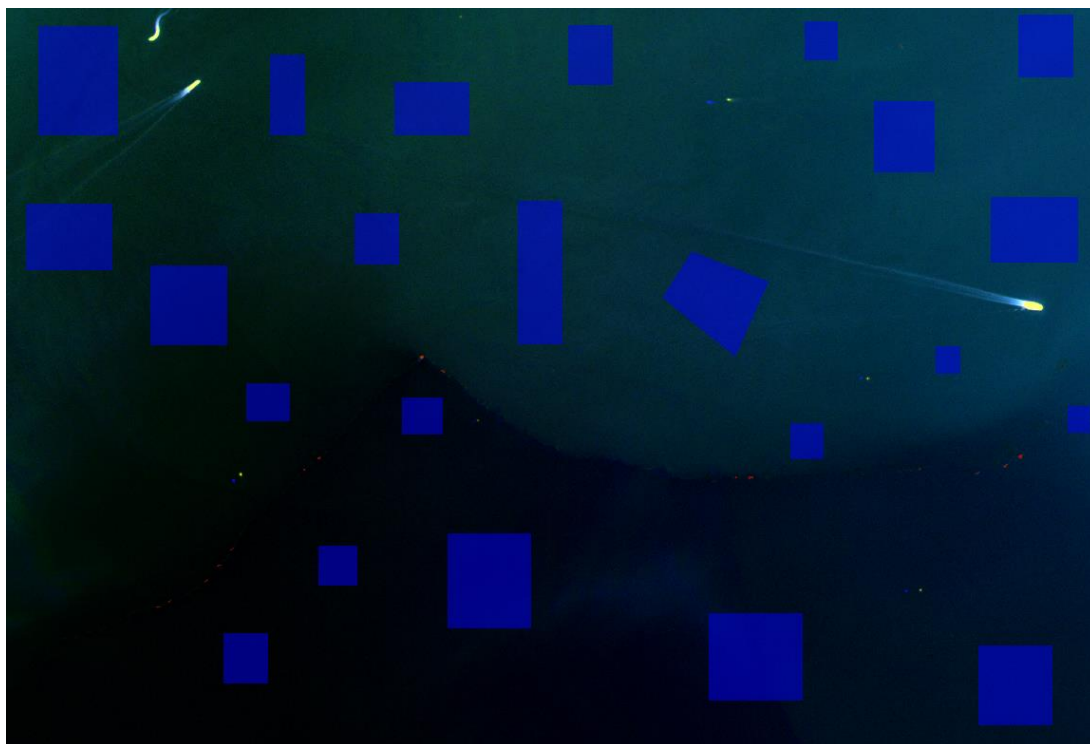
Obrázek 24: Index FDI pro snímek Sentinel-2

### 4.3 Využití klasifikačních metod

Pro zpracování výřezů byl opět využit software SNAP, který nabízí několik různých algoritmů pro klasifikaci obrazu. Pro účely této práce byla zvolena metoda řízené klasifikace pomocí klasifikátoru *Random Forest*, který se prokázal jako slibný při detekci mořského odpadu (Freitas et al., 2021). Klasifikátor *Random Forest* se ve výše zmíněném softwaru SNAP nachází pod záložkou *Raster > Classification > Supervised Classification > Random Forest Classifier*. Do této funkce byla zadána vstupní data společně s vlastnoručně vytvořenými vektorovými trénovacími daty, které byly pomocí spektrálních křivek a vizuálního porovnání zařazeny do jedné ze tří kategorií – *Odpad*, *Voda* a *Lod'* (viz obr. 25 a 26).

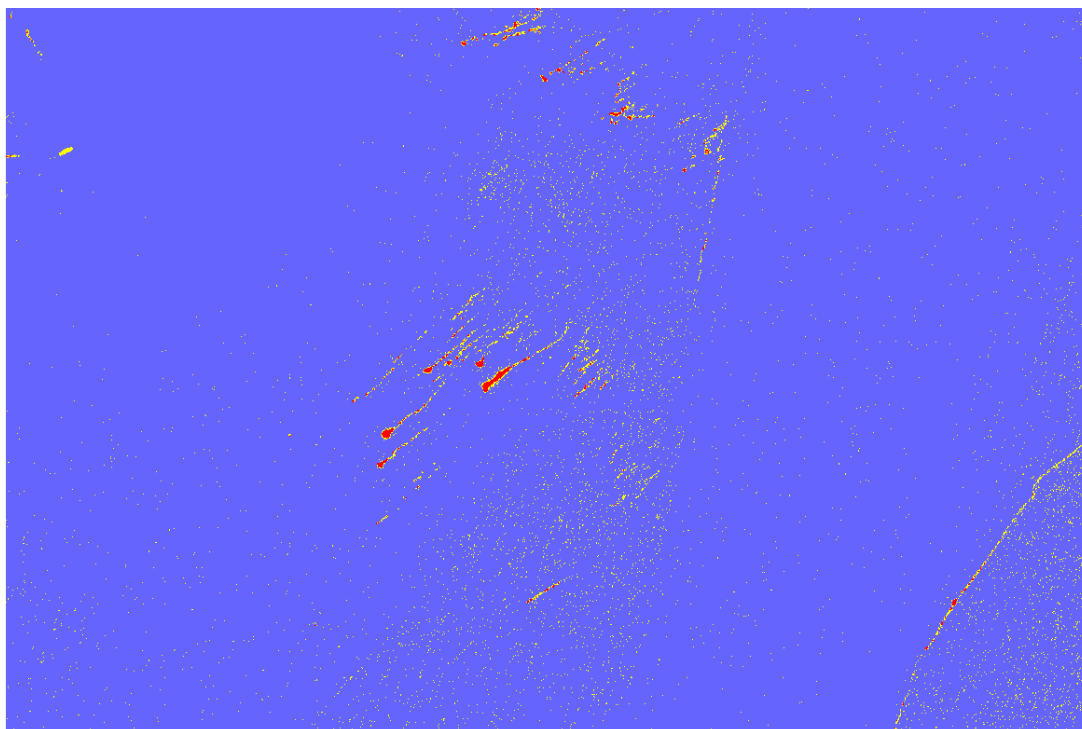


Obrázek 25: Trénovací data pro snímek Sentinel-2 (odpad – červeně, voda – modře, lod' – žlutě)

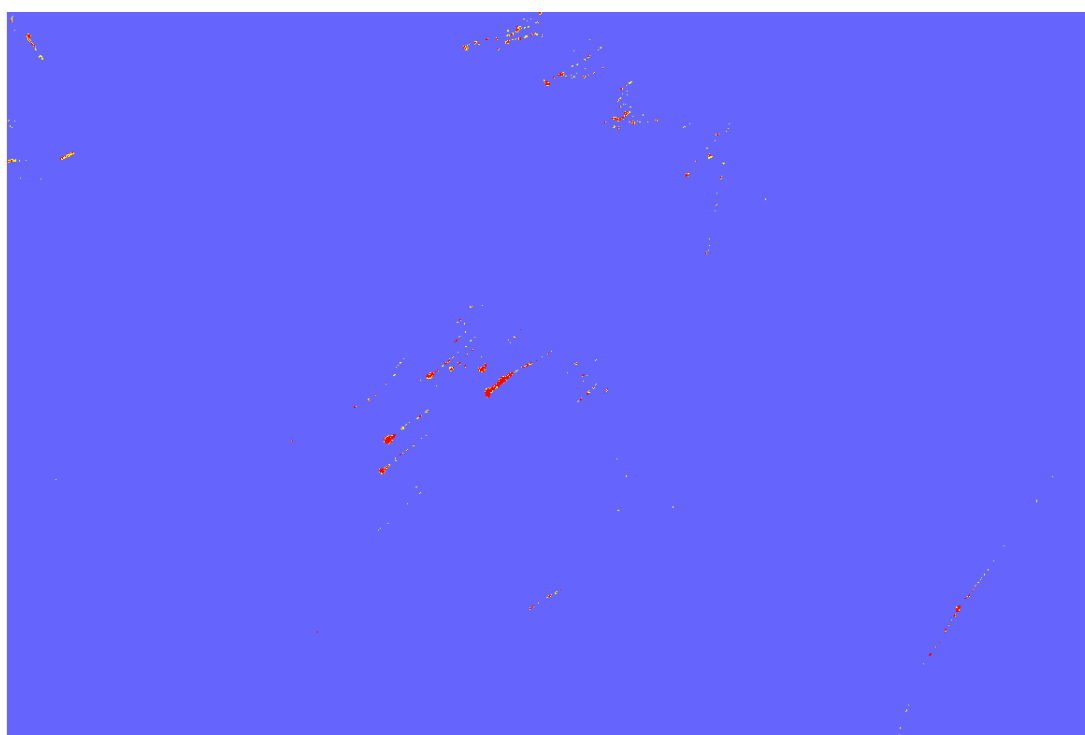


*Obrázek 26: Trénovací data pro snímek PlanetScope (odpad – červeně, voda – modře, lod' – žlutě)*

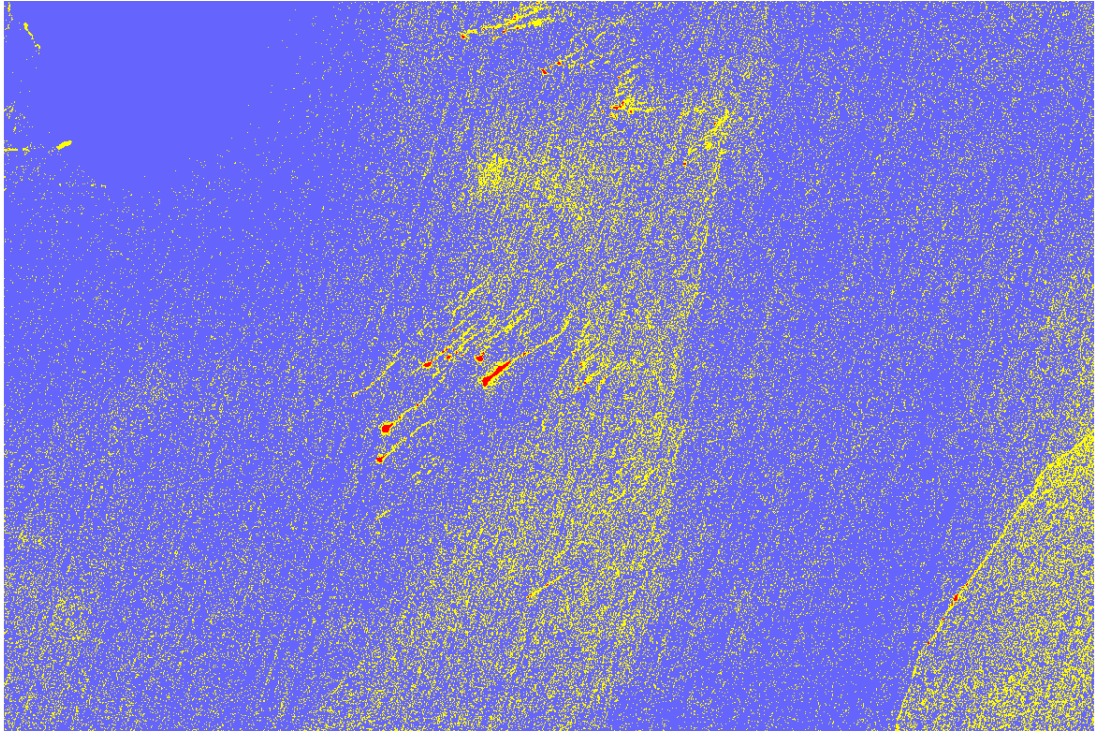
Tato trénovací data byla následně využita pro klasifikaci výřezů, přičemž na obrázku č. 27 můžete vidět výsledný klasifikovaný výřez ze snímku Sentinel-2 pomocí indexu NDVI a na obrázku č. 28 byl využit index FDI. Na obrázku č. 29 byly následně využity oba zmíněné index najednou. Pro klasifikaci výřezu snímku PlanetScope byla využita všechna dostupná pásma (viz obr. 30) a následně pouze index NDVI (viz obr. 31). Výsledné barvy klasifikací se drží vzoru *Odpad – červeně, Voda – modře, Lod' – žlutě*.



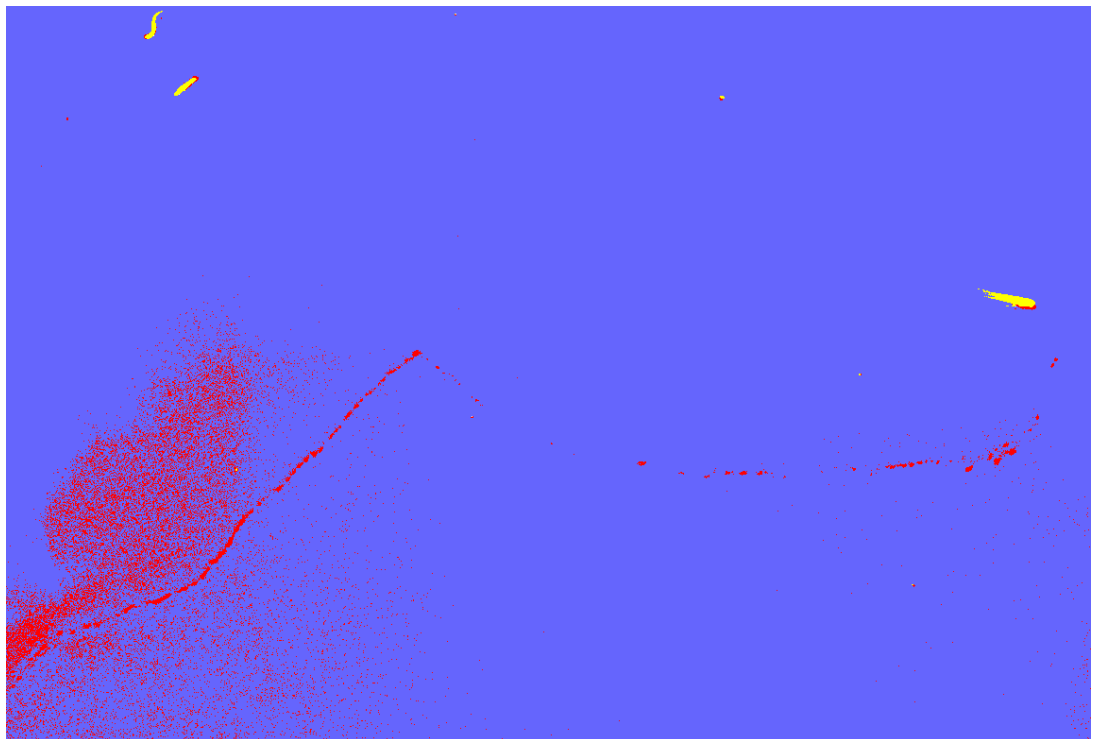
*Obrázek 27: Klasifikovaný snímek Sentinel-2 pomocí indexu NDVI*



*Obrázek 28: Klasifikovaný snímek Sentinel-2 pomocí indexu FDI*

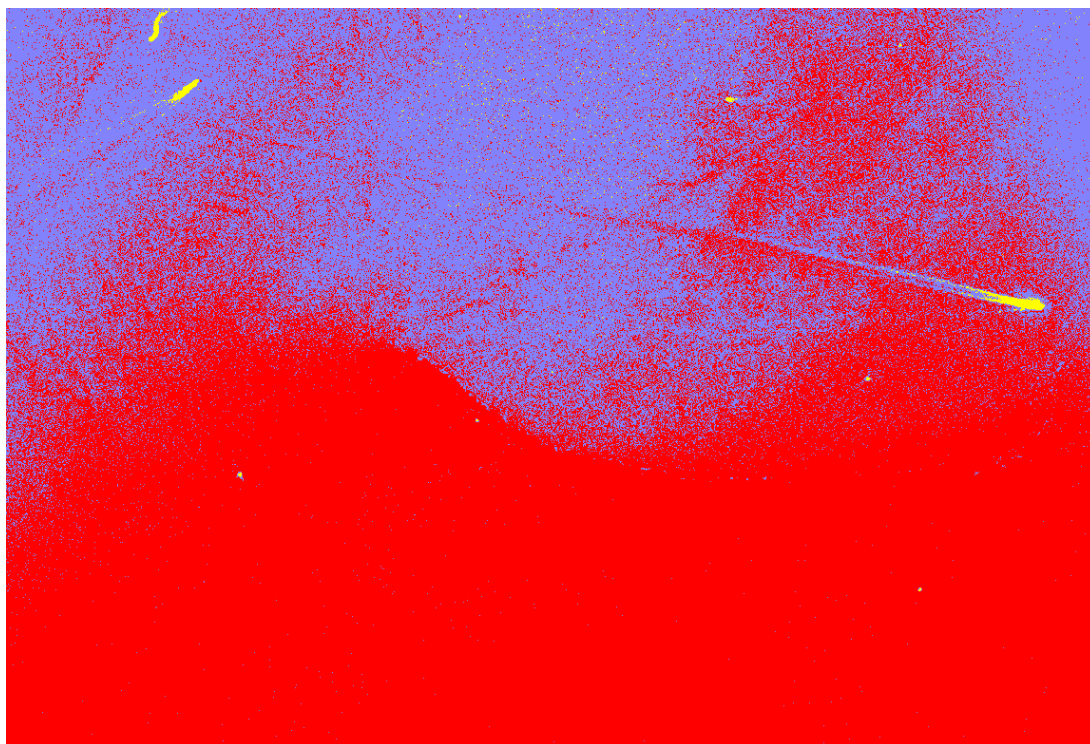


*Obrázek 29: Klasifikovaný snímek Sentinel-2 pomocí indexů NDVI a FDI*



*Obrázek 30: Klasifikovaný snímek PlanetScope pomocí všech dostupných pásem*

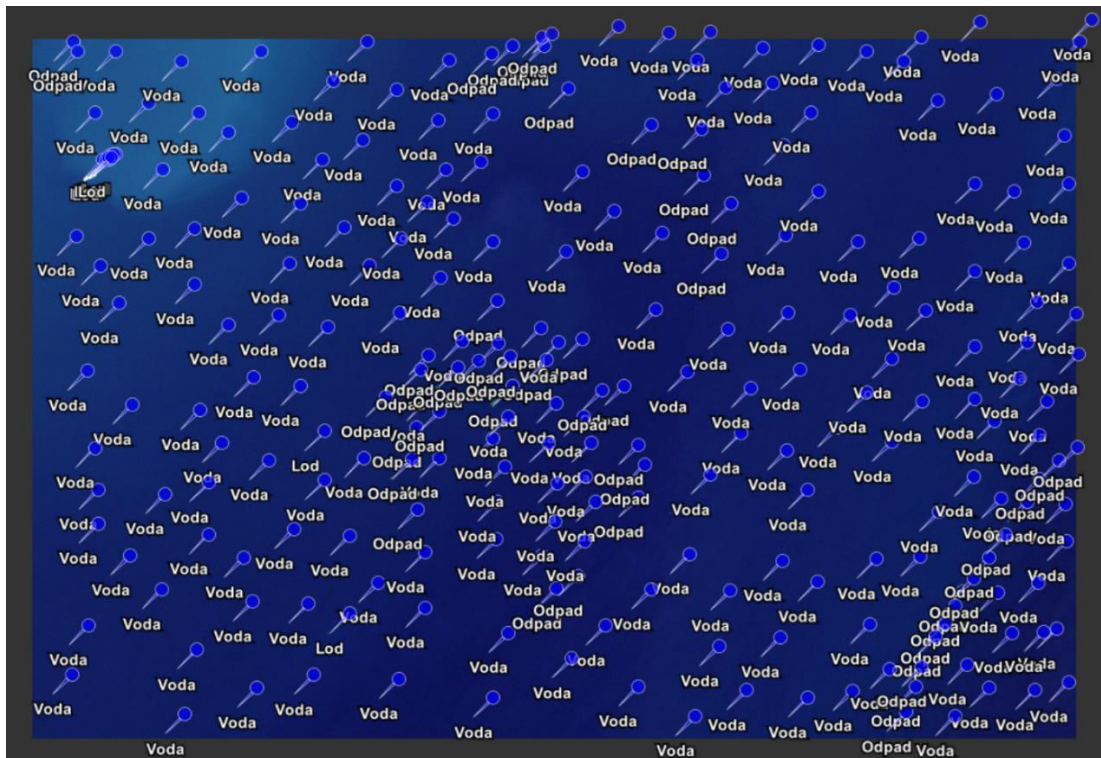




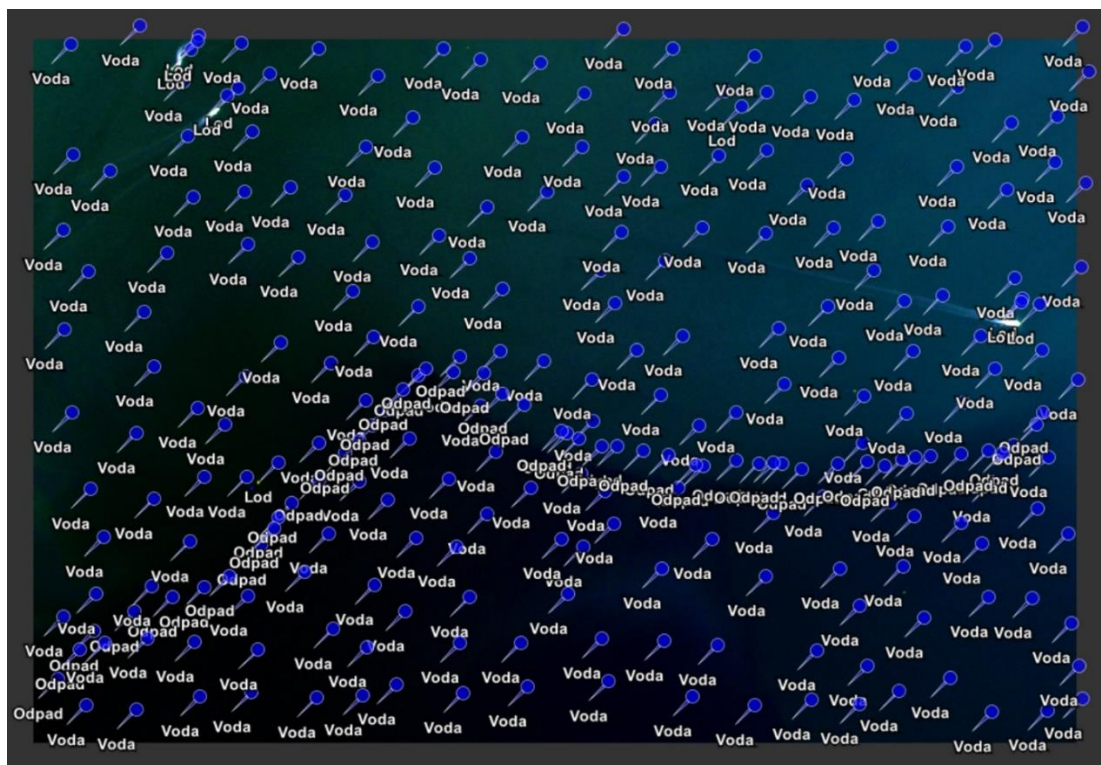
Obrázek 31: Klasifikovaný snímek PlanetScope pomocí indexu NDVI

#### 4.3.1 Validace klasifikovaných snímků

Pro ověření přesnosti klasifikovaných snímků byla využita validační data. Jedná se o náhodně zvolené body na snímku, které byly vytvořeny na základě stratifikovaného náhodného výběru. Celkem tak bylo vytvořeno 260 bodů pro validaci klasifikovaných snímků (vlastní sada bodů pro data Sentinel-2 a PlanetScope), jejichž rozdělení do jednotlivých kategorií bylo provedeno v závislosti na jejich reálném poměrném zastoupení (viz obr. 32 a 33). Celkově tak bylo 200 bodů vygenerováno pro kategorii *Voda*, 50 bodů pro kategorii *Odpad* a 10 bodů pro kategorii *Lod'*. Tyto body byly po vytvoření přesunuty do jednotlivých klasifikovaných výřezů a ke každému z nich došlo k přiřazení korespondující hodnoty ze snímku. Body byly tedy vizuálně klasifikovány na základě RGB kompozice originálního snímku a rozděleny do základních kategorií *Odpad/Voda/Lod'*. Hodnoty validačních bodů byly následně porovnány s výsledky všech klasifikací pomocí tzv. chybových matic, ve kterých byla vypočtena uživatelská a zpracovatelská přesnost, celková přesnost a kappa koeficient.



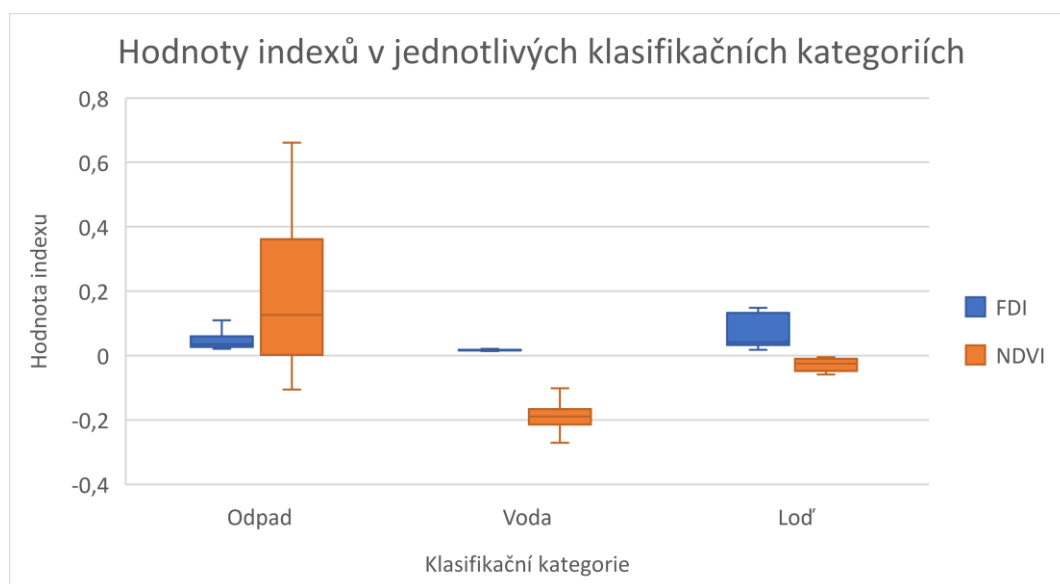
Obrázek 32: Validační body pro snímek Sentinel-2



Obrázek 33: Validační body pro snímek PlanetScope

## 5 Výsledky práce

V grafu na obrázku č. 34 lze vidět hodnoty indexů NDVI a FDI u jednotlivých klasifikačních kategorií. Hodnoty byly vygenerovány na základě validačních bodů snímku Sentinel-2 z kapitoly 4.3.1. Z grafu je patrné, že kategorie *Odpad* dosahuje v případě indexu NDVI vysokého rozptylu zejména kladných NDVI hodnot, což svědčí o její značné spektrální variabilitě. Naopak zbylé dvě kategorie jsou spektrálně mnohem stabilnější a nabývají zejména záporných hodnot. Navíc je patrné, že se překrývají hodnoty boxplotů pro kategorie *Odpad* a *Lod'*, u kterých tak lze předpokládat jejich častou záměnu v procesu klasifikace. Na základě indexu FDI lze úspěšně odlišit kategorie *Odpad* a *Lod'* od *Vody*, jelikož se všechna data řazená do kategorie *Voda* drží velice blízko hodnotě 0. Naopak pixely kategorie *Odpad* i *Lod'* dosahují vyšších hodnot, přičemž kategorie *Lod'* má větší rozpětí hodnot indexu FDI. Nicméně stejně jako v případě indexu NDVI i zde dochází k značnému překryvu hodnot kategorií *Odpad* a *Lod'*, což opět povede k záměně mezi oběma kategoriemi, která bude pravděpodobně větší než v případě využití NDVI. Vizuální interpretace obrázku č. 34, tak umožňuje vytvoření představy o potenciální využitelnosti spektrálních indexů NDVI a FDI při klasifikaci snímků.



Obrázek 34: Hodnoty indexů v jednotlivých klasifikačních kategoriích pro data Sentinel-2

Tabulka č. 3 představuje chybovou matici pro klasifikovaný výřez snímku Sentinel-2 za pomoci Normalizovaného Rozdílového Vegetačního Indexu (NDVI). Celková přesnost klasifikace dosahuje 91,2 % a její kappa koeficient je 0,77. Klasifikace



poměrně úspěšně detekovala všechny kategorie, přičemž nejnižší zpracovatelskou přesnost dosahovala u klasifikace odpadu. Z tabulky je také patrné, že uživatelská přesnost u klasifikace lodí je poměrně nízká a k největší záměně zde dochází právě s pixely odpadu.

Tabulka 3: Chybová matice pro klasifikaci snímku Sentinel-2 na základě indexu NDVI

Klasifikace	Skutečnost					Uživatelská přesnost
		Odpad	Voda	Lod'	Celkem	
Odpad		34	0	1	35	97,1 %
Voda		0	195	1	196	99,5 %
Lod'		16	5	8	29	27,6 %
Celkem		50	200	10		
Zpracovatelská přesnost		68,0 %	97,5 %	80,0 %		
Celková přesnost		91,2 %				
Kappa koeficient		0,77				

Tabulka č. 4 zobrazuje chybovou matici pro klasifikaci výřezu ze snímku Sentinel-2 pomocí Floating Debris Indexu (FDI). Celková přesnost této klasifikace dosahuje 87,3 % a její kappa koeficient je 0,62. Stejně jako u předchozí klasifikace je patrná častá záměna pixelů odpadů a lodí. U kategorie *Lod'* dosahují uživatelská i zpracovatelská přesnost nízkých hodnot.

Tabulka 4: Chybová matice pro klasifikaci snímku Sentinel-2 na základě indexu FDI

Klasifikace	Skutečnost					Uživatelská přesnost
		Odpad	Voda	Lod'	Celkem	
Odpad		25	0	6	31	80,6 %
Voda		14	200	2	216	92,6 %
Lod'		11	0	2	13	15,4 %
Celkem		50	200	10		
Zpracovatelská přesnost		50,0 %	100,0 %	20,0 %		
Celková přesnost		87,3 %				
Kappa koeficient		0,62				

Tabulka č. 5 představuje chybovou matici klasifikace snímku Sentinel-2, která je založena na základě obou indexů. Přesnost této klasifikace dosahuje 77,3 % a její kappa koeficient je 0,62. Stejně jako u předchozích metod i u této dochází k záměnám pixelů odpadu a lodí.

*Tabulka 5: Chybová matice pro klasifikaci snímku Sentinel-2 na základě indexů FDI a NDVI*

Klasifikace	Skutečnost					Uživatelská přesnost	
		Odpad	Voda	Lod'	Celkem		
	Odpad	23	0	0	23		100,0 %
	Voda	0	169	1	170		99,4 %
	Lod'	27	31	9	67		13,4 %
Celkem	50	200	10				
Zpracovatelská přesnost	46,0 %	84,5 %	90,0 %				
Celková přesnost	77,3 %						
Kappa koeficient	0,52						

Na tabulce č. 6 můžeme vidět chybovou matici klasifikace snímku PlanetScope na základě všech jeho dostupných spektrálních pásem. Celková přesnost klasifikace dosahuje 93,5 % a kappa koeficient je 0,82. Na rozdíl od předchozích klasifikací využívajících Sentinel-2 zde dochází k vysokým přesnostem i v případě lodí. Nejmenší uživatelskou i zpracovatelskou přesnost má v tomto případě odpad, který je nejčastěji zaměňován s pixely vody.

Tabulka 6: Chybová matice pro klasifikaci snímku PlanetScope na základě dostupných spektrálních pásem snímku

		Skutečnost				Uživatelská přesnost
			Odpad	Voda	Lod'	
Klasifikace	Odpad	42	8	1	51	82,4 %
	Voda	8	192	0	200	96,0 %
	Lod'	0	0	9	9	100,0 %
	Celkem	50	200	10		
Zpracovatelská přesnost		84,0 %	96,0 %	90,0 %		
Celková přesnost		93,5 %				
Kappa koeficient		0,82				

Tabulka č. 7 představuje chybovou matici v případě klasifikace snímku PlanetScope na základě indexu NDVI. Již na základě nevěrohodného výpočtu indexu NDVI (viz kapitola 4.3) byla očekávána zhoršená celková přesnost klasifikace, která dosahuje 50 % a kappa koeficient je 0,17. Jak je patrné již z obrázku 31, více než polovina vygenerovaných pixelů vody byla nesprávně vyhodnocena jako odpad a přes 20 % vygenerovaných bodů odpadu bylo klasifikováno jako voda.

Tabulka 7: Chybová matice pro klasifikaci snímku PlanetScope na základě indexu NDVI

		Skutečnost				Uživatelská přesnost
			Odpad	Voda	Lod'	
Klasifikace	Odpad	38	116	1	155	24,5 %
	Voda	11	83	0	94	88,3 %
	Lod'	1	1	9	11	81,8 %
	Celkem	50	200	10		
Zpracovatelská přesnost		76,0 %	41,5 %	90,0 %		
Celková přesnost		50,0 %				
Kappa koeficient		0,17				

Z výše zmíněných klasifikací dvě dosáhly celkové přesnosti nad 90 %. Obě metody tak ukazují slibné výsledky. První klasifikace je založena na všech dostupných pásmech družice PlanetScope (viz tabulka 6) a má vyšší celkovou přesnost (93,5 %), což znamená, že algoritmus je schopen správně zařadit pixely do příslušných kategorií (*Odpad*, *Voda* a *Lod'*) s vysokou přesností. Tato vysoká přesnost je podpořena kappa koeficientem 0,82, který ukazuje silnou shodu mezi výsledky klasifikace a validačními daty. Uživatelská přesnost pro třídy *Voda* a *Lod'* je rovněž vysoká, a to 96 %, resp. 100 %, což naznačuje, že je algoritmus při detekci těchto tříd přesný. Uživatelská přesnost pro mořský odpad je však o něco nižší a činí 82,4 %, což znamená, že algoritmus může mít potíže s detekcí všech pixelů odpadu. Zpracovatelská přesnost pro odpad je poměrně vysoká a činí 84 %, což naznačuje, že je algoritmus schopen detekovat velkou část těchto pixelů. Celkově se zdá, že tato klasifikace funguje dobře při detekci vody a lodí, ale existuje určitý prostor pro zlepšení při detekci všech pixelů mořského odpadu.

Druhá klasifikace je založena na indexu NDVI u snímku Sentinel-2 (viz tabulka 3) a má ve srovnání s první klasifikací nižší celkovou přesnost 91,2 %. Uživatelská přesnost pro mořský odpad je však vyšší a činí 97,1 %, což svědčí o tom, že je algoritmus při detekci těchto pixelů velmi přesný. Uživatelská přesnost pro vodu je rovněž vysoká, a to 99,5 %, což naznačuje, že je algoritmus při detekci pixelů vody taktéž velmi přesný. Uživatelská přesnost pro lodě je však velmi nízká – 27,6 %, značící potíže detekce právě těchto pixelů. Zpracovatelská přesnost pro vodu je vysoká a činí 97,5 %, pro lodě je o něco nižší – 80 %. Přesnost pro mořský odpad pak dosahuje 68 %, což může znamenat vynechání některých pixelů v této kategorii.

## 6 Diskuse

Pro detekci mořského odpadu se oba senzory (Sentinel-2 i PlanetScope) ukázaly jako poměrně dobře využitelné a do budoucna by mohly přinést pokrok při lokalizaci mořských odpadkových skvrn po celém světě. Největším problémem při vyhledávání mořského odpadu je nutnost získání vhodných družicových dat splňujících potřebná kritéria umožňující jeho přesnou a věrohodnou detekci. Taková data by měla být ideálně bez veškeré oblačnosti a zároveň by měla být pořízena ve vhodných povětrnostních podmínkách. Mořské vlny totiž mohou pro detekci odpadu znamenat velkou překážku (Salgado-Hernanz et al., 2021). Tento fakt dokládá i tato závěrečná práce, jejíž jednou z největších komplikací bylo právě získání čistých dat bez vln a mraků a zároveň s dostatkem mořského odpadu.

Nespornou výhodou dat Sentinel-2 je jejich dostupnost. Data jsou volně dostupná pro veškeré analýzy a dají se jednoduše stáhnout pomocí veřejnosti přístupné aplikace *Copernicus Open Access Hub*. Data družic PlanetScope jsou komerční a pro výzkumné účely lze zadarmo získat pouze omezené množství. Nicméně cena pro běžného uživatele není nikterak závratná a projekt je navíc neustále vyvíjen a nabízí nespočet možností, a to jak v podobě nových družicových systémů, tak webových nástrojů umožňujících úpravu dat ještě před samotným stažením (oříznutí polygonem, harmonizace s ostatními systémy atd.). V současné době probíhá speciální program pro školy a výzkumná pracoviště (*Education and Research Program*), který nabízí přístup k těmto neveřejným datům. Společnost Planet tak poskytuje především studentům a výzkumným pracovníkům až 5 000 km<sup>2</sup> měsíčně pro vzdělávací a výzkumné projekty (*Education and Research Program | Planet, 2023*). Výhodou obou systémů pro běžného uživatele je poskytnutí již předzpracovaných dat, na kterých byly například provedeny atmosférické i radiometrické korekce, často obsahují masku mraků a je jim přiřazen souřadnicový systém (Planet Labs PBC, 2022; The European Space Agency, 2023).

Multispektrální družicové senzory s vysokým prostorovým rozlišením rozhodně přináší nové možnosti detekce mořského odpadu. Družice PlanetScope jsou se svým prostorovým rozlišením 3 m vhodnějším datovým vstupem při detekci menších odpadkových skvrn, nicméně se svým spektrálním rozlišením nedokážou měřit se senzory družic Sentinel-2, které kromě jednoho blízkého infračerveného pásma

disponují ještě několika dalšími pásmy až po vlnové délky 2 200 nm (SWIR, viz tabulka 1). Na druhou stranu v případě PlanetScope došlo v roce 2022 k vypuštění nových družic (tzv. SuperDove) disponujících již osmi spektrálními pásmy (viz tabulka 2) (Makuno & Eliot, 2023). Ke spektrálnímu rozlišení jednotlivých systémů se váže také možnost výpočtu spektrálních indexů. Většina indexů sledujících vodní plochy využívá především infračervená pásma, a to zejména kvůli jejich vysoké absorpci vodou (Campbell & Wynne, 2011). Kromě samotného vysokého rozlišení by v případě detekce mořského odpadu mohlo dojít také k velikému pokroku v případě využití hyperspektrálních senzorů, jako například PRISMA, EnMAP, případně připravovaný projekt CHIME Evropské kosmické agentury (Kikaki et al., 2022; Kremezi et al., 2021; Taggio et al., 2022; *THE CEOS DATABASE: MISSION SUMMARY - Sentinel CHIME-A*, 2023).

Pro detekci mořského odpadu byly v závěrečné práci využity dva spektrální indexy, kterých bylo využito již v jiných studiích zabývajících se podobnou problematikou (Basu et al., 2021; Biermann et al., 2020; Ciappa, 2022). Ucelený přehled většiny existujících indexů shrnuje projekt *Index Database* (Henrich et al., 2009). Index plovoucího odpadu (FDI) byl vyvinut z indexu pro detekci řas a vizuálně dobře detekuje plovoucí odpad (Biermann et al., 2020). Nicméně tento index nedostatečně přesně odlišuje mezi pixely plovoucího odpadu a lodí (viz obr. 34 a tabulka 4). Stejněho zjištění dosáhli i ve studii „*Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data*“ (Biermann et al., 2020). Oproti tomu věrohodnějších výsledků při odlišování lodí od samotného odpadu dosáhl vegetační index NDVI. Svůj potenciál však může ztrácet v oblastech zarostlých řasami, či jinou vegetací (Biermann et al., 2020). V případě kombinace obou indexů by mohlo být potencionálně dosaženo přesnějších klasifikačních výsledků, což se ale v rámci řešení diplomové práce v případě využití dat Sentinel-2 nepotvrdilo (viz tabulka 3 vs. tabulka 5). Kombinace spektrálních indexů NDVI a FDI dosáhla celkové přesnosti 77,3 %, přičemž algoritmus často zaměňoval pixely odpadu a vody za pixely lodí.

Jelikož senzory PlanetScope snímají v rozsahu elektromagnetického spektra končícího blízkým infračerveným zářením (NIR) a nepokrývají tak pásmo SWIR, mohl být využit pouze jeden z dvojice zvolených indexů, a to NDVI. Snímek PlanetScope navíc ve vodních oblastech vykazoval značné anomálie ve spektrálním pásmu NIR, což se projevilo nesmyslně vysokými hodnotami NDVI, zejména pak v oblastech hlubších

vodních ploch. Z toho důvodu jsou výsledky klasifikace využívající NDVI vypočtené z dat PlanetScope velmi nevěrohodné. Jedním z důvodů může být použitá atmosférická korekce (6S) distributorem dat, která nemusí zcela odpovídat potřebám aplikací zaměřených na monitoring vodních prostředí. V těchto aplikacích se často setkáváme v literatuře s využitím atmosférické korekce ACOLITE, která je uzpůsobena přímo na úpravu odrazivosti vodní hladiny (Saberioon et al., 2020).

Při detekci mořského odpadu byla u obou snímků využita řízená pixelová klasifikace pomocí klasifikátoru *Random Forest*. Cílem závěrečné práce totiž bylo porovnat a vyhodnotit využitelnost multispektrálních družicových dat s vysokým prostorovým rozlišením, ne porovnávat dostupné klasifikační metody, proto byl právě využit algoritmus *Random Forest*, který se již v této problematice osvědčil například ve studii „*Remote Hyperspectral Imaging Acquisition and Characterization for Marine Litter Detection*“ (Freitas et al., 2021).

Nejlepších výsledků dosáhly dvě klasifikace – u snímku Sentinel-2 za použití NDVI (91,2 %) a u snímku PlanetScope za použití všech dostupných spektrálních pásem (93,5 %). Rozdíly mezi oběma klasifikacemi jsou dány především jejich silnými a slabými stránkami při detekci jednotlivých tříd. Klasifikace pomocí dat PlanetScope má vysokou celkovou přesnost, což je podpořeno vysokou uživatelskou a zpracovatelskou přesností pro pixely lodí. Nižší uživatelská přesnost pro mořský odpad však naznačuje, že algoritmus může některé pixely odpadu přehlédnout, což může být v případě problematiky detekce mořského odpadu zásadní. Klasifikace pomocí NDVI vypočteného ze snímku Sentinel-2 má naopak vyšší uživatelskou přesnost pro pixely mořského odpadu a vody, což naznačuje, že je algoritmus při detekci těchto tříd přesnější. Nízká uživatelská přesnost pro pixely lodí však naznačuje, že algoritmus může mít problémy s identifikací a klasifikací právě těchto pixelů, což by ale mohlo v budoucnu vyřešit využití pokročilých algoritmů založených například na metodách hloubkového učení (Li et al., 2018). Klasifikace pomocí dat PlanetScope se však zdá být ze všech použitých metod nejvěrohodnější. Metoda detekce odpadu na základě klasifikace se projevila jako poměrně efektivní způsob pro detekci odpadu a v případě zpřesnění algoritmů a vhodných vstupních dat by mohlo v budoucnu dojít k účinnému a rychlému způsobu mapování mořského odpadu.

Potenciál družicových systémů pro mapování mořského odpadu je vysoký. V současnosti využívané metody terénního průzkumu jsou velice časově náročné

a finančně nákladné. Mapování pomocí lodních plaveb často bývá velice pomalé, nicméně může být spojeno s přímým sběrem odpadu z moří a tím je možné získat přesné údaje o množství, typu, vlastnostech a lokaci odpadu. Takové údaje jsou většinou velice detailní a spolehlivé. Nicméně při sběru a sledování odpadu může současně dojít k odchytu mořských organismů a tím vést i k částečnému narušení ekosystému. Průzkumy využívající letadla jsou oproti těm lodním o poznání rychlejší a často dokážou pokrýt velká území, a to včetně těch, kam se lodě z nějakého důvodu nedostanou. Nicméně ze sesbíraných dat nedokážeme odvodit přesné množství, typ a vlastnosti odpadu (Pichel et al., 2012; Ribic et al., 1992). Družicové systémy jsou v současné době, co se týče rychlosti snímání povrchu, bezkonkurenční. Tyto systémy dokážou za velice krátký čas nasnímat velké oblasti, a to v pravidelných intervalech, které jsou omezeny pouze oblačností, případně povětrnostními podmínkami (Salgado-Hernanz et al., 2021). Kvůli jejich nižšímu rozlišení však zatím nejsme schopni určit přesný obsah odpadkových skvrn, a dokonce může dojít ke špatné detekci těch menších, případně k jejich záměně s loděmi apod.

Družicové systémy by za předpokladu vhodného prostorového a spektrálního rozlišení mohly současné metody monitoringu odpadu doplnit, případně kompletně nahradit, a to především svou bezkonkurenční rychlostí snímání Země (Salgado-Hernanz et al., 2021). Další optimalizace detekčních algoritmů a zdokonalení snímání ve více spektrálních pásmech vhodných pro monitoring odpadu v mořích by mohly společně přinést rychlý a účinný způsob nejen jak odpad detekovat, ale vzápětí také jak jej lokalizovat a přispět k jeho následnému odklizení. Takový způsob monitoringu by vyžadoval neustálé rychlé snímání zemského povrchu a jeho následné automatické vyhodnocení vhodnými detekčními metodami. Okamžitá detekce odpadu pomocí družicových snímků by tak mohla přispět k jeho rychlému odklizení a čištění světových oceánů.



## 7 Závěr a přínos práce

Tato diplomová práce se věnovala problematice mořského odpadu a porovnání jeho detekce pomocí multispektrálních satelitních senzorů s vysokým prostorovým rozlišením. V rešeršní části byla představena problematika mořského odpadu, jeho typy, zdroje a vliv na životní prostředí včetně člověka. Kromě samotné detekce multispektrálními satelitními systémy byly představeny i alternativní způsoby, které jsou v současné době využívány. Mezi tyto metody patří zejména lodní průzkumy, které se dají spojit i se samotným sběrem odpadu, případně se sledováním mořského života a nabízí velmi detailní informace o dané lokalitě. Dalšími zmíněnými metodami byly letecké průzkumy, které dokážou zaujmout větší plochu za kratší čas, případně bezpilotní prostředky. Žádná z těchto metod se však svou rychlostí mapování nedokáže vyrovnat družicovému snímání, které by v budoucnosti mohlo doplnit, anebo zcela nahradit současné terénní metody (viz výzkumná otázka D).

Závěrečná práce v rámci metodické části porovnávala výsledky detekce mořského odpadu pomocí multispektrálních družicových dat Sentinel-2 a PlanetScope, a to jak za pomoci spektrálních indexů, tak spektrálních pásem samotných. Hlavní nevýhodou dat PlanetScope byla zmíněná spektrální anomálie, která ovlivnila hodnoty vypočteného indexu NDVI. Tento faktor by proto mohl znamenat značnou překážku při detekci mořského odpadu pomocí spektrálních indexů vypočtených z dat PlanetScope, a to proto, že se tato chyba projevovala zejména u pixelů reprezentujících vodní prostředí, a to především v oblastech s větší hloubkou vody. Proto mají v oblasti využití spektrálních indexů značnou výhodu data Sentinel-2, a to i díky většímu počtu spektrálních pásem (viz výzkumné otázky A a B).

Pro družicová data Sentinel-2 byly využity dva spektrální indexy – NDVI a FDI. Oba dosahovaly vysokých přesností, přičemž NDVI dosáhl nejvyšší celkové přesnosti (91,2 %). Kvůli nevěrohodnému výsledku NDVI u družicových dat PlanetScope, byla využita klasifikace pouze na základě osmi spektrálních pásem tohoto senzoru, jejíž přesnost dosáhla 93,5 % a jedná se tak o nejpresnější z využitých detekčních přístupů. Detekce mořského odpadu za pomoci klasifikačních metod (například *Random Forest*) využitím multispektrálních družicových snímcích s vysokým prostorovým rozlišením se ukázala jako poměrně efektivní a přesné detekční řešení, které by se mohlo stát jednou z hlavních metod mapování mořského odpadu (viz výzkumná otázka C).

## 8 Přehled literatury a použitých zdrojů

- Abraham, T., Blume, A., Gragg, F. M., Hong, S. W., Burrowes, G., Colvin, H., Datta, S., D’Cruz, B., Duddey, J. E., Evans, E. N., Gatti, L., Ignatz-Hoover, F., Luginsland, H.-D., Maschke, D., Menting, K.-H., Moneypenny, H. G., & Moser, R. (2016). *Rubber Compounding: Chemistry and Applications* (B. Rodgers, Ed.; 2nd ed., Vol. 2). [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=0MJ5CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=rubber+compounds&ots=TWvCJgrmN4&sig=saovHzXsia5PqDxB\\_OBsDvnmoQA&redir\\_esc=y#v=onepage&q=rubber%20compounds&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=0MJ5CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=rubber+compounds&ots=TWvCJgrmN4&sig=saovHzXsia5PqDxB_OBsDvnmoQA&redir_esc=y#v=onepage&q=rubber%20compounds&f=false)
- Ansari, T. M., Marr, I. L., & Tariq, N. (2004). Heavy Metals in Marine Pollution Perspective-A Mini Review. *Journal of Applied Sciences*, 4(1), 1–20. <https://doi.org/10.3923/jas.2004.1.20>
- Aoyama, T. (2016). Extraction of marine debris in the Sea of Japan using high-spatial-resolution satellite images. *Remote Sensing of the Oceans and Inland Waters: Techniques, Applications, and Challenges*, 9878, 987817. <https://doi.org/10.1117/12.2220370>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2008.0205>
- Basu, B., Sannigrahi, S., Basu, A. S., & Pilla, F. (2021). Development of Novel Classification Algorithms for Detection of Floating Plastic Debris in Coastal Waterbodies Using Multispectral Sentinel-2 Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/RS13081598>
- Batista, C. (2022, August 2). *Is Rubber Biodegradable? It Depends!* The Eco Hub. <https://theecohub.com/is-rubber-biodegradable/>
- Baulch, S., & Perry, C. (2014). Evaluating the impacts of marine debris on cetaceans. *Marine Pollution Bulletin*, 80(1–2), 210–221. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2013.12.050>

- Bialous, S. A., & Peeters, S. (2012). A brief overview of the tobacco industry in the last 20 years. *Tobacco Control*, 21(2), 92–94. <https://doi.org/10.1136/tobaccocontrol-2011-050395>
- Biermann, L., Clewley, D., Martinez-Vicente, V., & Topouzelis, K. (2020). Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z>
- Boerger, C. M., Lattin, G. L., Moore, S. L., & Moore, C. J. (2010). Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, 60(12), 2275–2278. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2010.08.007>
- Bugoni, L., Krause, L., & Petry, M. V. (2001). Marine Debris and Human Impacts on Sea Turtles in Southern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 42(12), 1330–1334. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00147-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00147-3)
- Burt, A. J., Raguain, J., Sanchez, C., Brice, J., Fleischer-Dogley, F., Goldberg, R., Talma, S., Syposz, M., Mahony, J., Letori, J., Quanz, C., Ramkalawan, S., Francourt, C., Capricieuse, I., Antao, A., Belle, K., Zillhardt, T., Moumou, J., Roseline, M., ... Turnbull, L. A. (2020). The costs of removing the unsanctioned import of marine plastic litter to small island states. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71444-6>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing. In *The Guilford Press* (5th ed.). The Guilford Press.
- Charlton-Howard, H. S., Bond, A. L., Rivers-Auty, J., & Lavers, J. L. (2023). ‘Plasticosis’: Characterising macro- and microplastic-associated fibrosis in seabird tissues. *Journal of Hazardous Materials*, 450. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131090>
- Ciappa, A. C. (2022). Marine Litter Detection by Sentinel-2: A Case Study in North Adriatic (Summer 2020). *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2409*, 14(10), 2409. <https://doi.org/10.3390/RS14102409>
- Copernicus Data Space Ecosystem.* (2023). <https://dataspace.copernicus.eu/index.html#about-copernicus>

- Derraik, J. G. B. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), 842–852. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Education and Research Program / Planet. (2023). <https://www.planet.com/markets/education-and-research/>
- Eriksson, C., & Burton, H. (2003). Origins and biological accumulation of small plastic particles in fur seals from Macquarie Island. *Ambio*, 32(6), 380–384. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.6.380>
- Freitas, S., Silva, H., & Silva, E. (2021). Remote Hyperspectral Imaging Acquisition and Characterization for Marine Litter Detection. *Remote Sensing 2021, Vol. 13, Page 2536*, 13(13), 2536. <https://doi.org/10.3390/RS13132536>
- Galgani, F., Hanke, G., & Maes, T. (2015). Global distribution, composition and abundance of marine litter. *Marine Anthropogenic Litter*, 29–56. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_2/TABLES/3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2/TABLES/3)
- Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), 170–179. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2014.12.041>
- Gaylor, M. O., Harvey, E., & Hale, R. C. (2012). House crickets can accumulate polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) directly from polyurethane foam common in consumer products. *Chemosphere*, 86(5), 500–505. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.014>
- Gourmelon, G. (2015). Global Plastic Production Rises, Recycling Lags. *Vital Signs, Worldwatch Institute*.
- Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings- entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2013–2025. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2008.0265>
- Gregory, M. R., & Ryan, P. G. (1997). *Pelagic Plastics and Other Seaborne Persistent Synthetic Debris: A Review of Southern Hemisphere Perspectives*. 49–66. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1_6)

- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *125*(1), e2018JC014719. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Henrich, V., Götze, C., Jung, A., Sandow, C., Thürkow, D., & Cornelia, G. (2009, March). *Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation.*
- Hu, C. (2021). Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: Challenges and potentials. *Remote Sensing of Environment*, *259*, 112414. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2021.112414>
- Jacobsen, J. K., Massey, L., & Gulland, F. (2010). Fatal ingestion of floating net debris by two sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Marine Pollution Bulletin*, *60*(5), 765–767. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2010.03.008>
- Kikaki, K., Kakogeorgiou, I., Mikeli, P., Raitsos, D. E., & Karantzalos, K. (2022). MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data. *PLOS ONE*, *17*(1), e0262247. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0262247>
- Krelling, A. P., Williams, A. T., & Turra, A. (2017). Differences in perception and reaction of tourist groups to beach marine debris that can influence a loss of tourism revenue in coastal areas. *Marine Policy*, *85*, 87–99. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2017.08.021>
- Kremezi, M., Kristollari, V., Karathanassi, V., Topouzelis, K., Kolokoussis, P., Taggio, N., Aiello, A., Ceriola, G., Barbone, E., & Corradi, P. (2021). Pansharpening PRISMA Data for Marine Plastic Litter Detection Using Plastic Indexes. *IEEE Access*, *9*, 61955–61971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073903>
- Kremezi, M., Kristollari, V., Karathanassi, V., Topouzelis, K., Kolokoussis, P., Taggio, N., Aiello, A., Ceriola, G., Barbone, E., & Corradi, P. (2022). Increasing the Sentinel-2 potential for marine plastic litter monitoring through image fusion techniques. *Marine Pollution Bulletin*, *182*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113974>

- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Leite, A. S., Santos, L. L., Costa, Y., & Hatje, V. (2014). Influence of proximity to an urban center in the pattern of contamination by marine debris. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1), 242–247. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2014.01.032>
- Li, Y., Zhang, H., Xue, X., Jiang, Y., & Shen, Q. (2018). Deep learning for remote sensing image classification: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(6), e1264. <https://doi.org/10.1002/WIDM.1264>
- Liu, A. K., & Wu, S. Y. (2001). Satellite Remote Sensing SAR. *Encyclopedia of Ocean Sciences: Second Edition*, 103–113. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00339-8>
- Löhr, A., Savelli, H., Beunen, R., Kalz, M., Ragas, A., & van Belleghem, F. (2017). Solutions for global marine litter pollution. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28, 90–99. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2017.08.009>
- López, J. J., & Mulero-Pázmány, M. (2019). Drones for Conservation in Protected Areas: Present and Future. *Drones 2019, Vol. 3, Page 10*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.3390/DRONES3010010>
- Makuno, J., & Eliot, K. (2023). *Planet | Insights - Our Constellations*. Planet. [https://www.planet.com/our-constellations/?utm\\_campaign=brand&utm\\_source=google&utm\\_medium=paid-search&utm\\_content=ret-unbrand-brand-brd-inq-home-0922](https://www.planet.com/our-constellations/?utm_campaign=brand&utm_source=google&utm_medium=paid-search&utm_content=ret-unbrand-brand-brd-inq-home-0922)
- Mantelatto, M. C., Póvoa, A. A., Skinner, L. F., Araujo, F. V. de, & Creed, J. C. (2020). Marine litter and wood debris as habitat and vector for the range expansion of invasive corals (*Tubastraea* spp.). *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111659. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.111659>
- Mapy Google. (2023). <https://www.google.com/maps/@50.0553417,14.4575648,14z>

- Martínez-Vicente, V., Clark, J. R., Corradi, P., Aliani, S., Arias, M., Bochow, M., Bonnery, G., Cole, M., Cózar, A., Donnelly, R., Echevarría, F., Galgani, F., Garaba, S. P., Goddijn-Murphy, L., Lebreton, L., Leslie, H. A., Lindeque, P. K., Maximenko, N., Martin-Lauzer, F. R., ... Vethaak, A. D. (2019). Measuring marine plastic debris from space: Initial assessment of observation requirements. *Remote Sensing*, *11*(20). <https://doi.org/10.3390/rs11202443>
- Missions - Sentinel Online. (2023). Sentinel Overview. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K., & Weisberg, S. B. (2001). A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, *42*(12), 1297–1300. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
- Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C., & Woolaway, C. (2007). Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990-2006. *Marine Pollution Bulletin*, *54*(8), 1162–1169. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2007.04.014>
- Mrosovsky, N., Ryan, G. D., & James, M. C. (2009). Leatherback turtles: the menace of plastic. *Marine Pollution Bulletin*, *58*(2), 287–289. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2008.10.018>
- Musk, A. W., & de Klerk, N. H. (2003). History of tobacco and health. *Respirology*, *8*(3), 286–290. <https://doi.org/10.1046/J.1440-1843.2003.00483.X>
- NOAA. (2023). *What is an artificial reef?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/artificial-reef.html>
- Open Access Hub. (2023). <https://scihub.copernicus.eu/>
- Pawar, P. R., Shirgaonkar, S. S., & Patil Authors' Affiliations, R. B. (2016). Plastic marine debris: Sources, distribution and impacts on coastal and ocean biodiversity. *PENCIL Publication of Biological Sciences*, *3*(1), 40–54. [www.pencilacademicpress.org/ppbs](http://www.pencilacademicpress.org/ppbs)
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press.

- Pichel, W. G., Churnside, J. H., Veenstra, T. S., Foley, D. G., Friedman, K. S., Brainard, R. E., Nicoll, J. B., Zheng, Q., & Clemente-Colón, P. (2007). Marine debris collects within the North Pacific Subtropical Convergence Zone. *Marine Pollution Bulletin*, *54*(8), 1207–1211. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2007.04.010>
- Pichel, W. G., Veenstra, T. S., Churnside, J. H., Arabini, E., Friedman, K. S., Foley, D. G., Brainard, R. E., Kiefer, D., Ogle, S., Clemente-Colón, P., & Li, X. (2012). GhostNet marine debris survey in the Gulf of Alaska – Satellite guidance and aircraft observations. *Marine Pollution Bulletin*, *65*(1–3), 28–41. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2011.10.009>
- Planet. (2023). Education and Research Program. <https://www.planet.com/markets/education-and-research/>
- Planet Labs PBC. (2022, May). *Planet Imagery Product Specifications*. Planet.Com. [https://assets.planet.com/docs/Planet\\_Combined\\_Imagery\\_Product\\_Specs\\_letter\\_screen.pdf](https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf)
- PlanetScope. (2023). <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/planet/planet-scope/>
- Poulain, P.-M., Kourafalou, V. H., & Cushman-Roisin, B. (2001). Northern Adriatic Sea. *Physical Oceanography of the Adriatic Sea*, 143–165. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9819-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9819-4_5)
- Redford, D. P., Trulli, H. K., & Trulli, W. R. (1997). *Sources of Plastic Pellets in the Aquatic Environment*. 335–343. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1_30)
- Ribic, C. A., Dixon, T. R., & Vining, I. (1992). *Marine Debris Survey Manual*.
- Saberioon, M., Brom, J., Nedbal, V., Souček, P., & Císař, P. (2020). Chlorophyll-a and total suspended solids retrieval and mapping using Sentinel-2A and machine learning for inland waters. *Ecological Indicators*, *113*, 106236. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.106236>
- Salgado-Hernanz, P. M., Bauzà, J., Alomar, C., Compa, M., Romero, L., & Deudero, S. (2021). Assessment of marine litter through remote sensing: recent approaches and future goals. *Marine Pollution Bulletin*, *168*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112347>



- Science Learning Hub. (2019, August 30). *How harmful are microplastics?*  
<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/2809-how-harmful-are-microplastics>
- Selukar, N. B., Lande, C. v, & Ingole, C. G. (2014). Waste Thermocol to Adhesive for Better Environment. *I Nternational Journal of I Nnovative Research in Advanced Engineering (I JI RAE)*, 1(6), 2349–2163. <http://ijirae.com>
- Sentinel-2*. (2023). Sentinel Online.  
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Sentinel-2 - Mission Objectives*. (2023). Sentinel Online.  
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/mission-objectives>
- Seward, I. T. P. (2003). *Modeling of Glass Making Processes for Improved Efficiency*.  
<https://doi.org/10.2172/809193>
- Sheavly, S. B. (2005, June 6). *Marine debris - an overview of a critical issue for our oceans*.  
[https://www.un.org/Depts/los/consultative\\_process/consultative\\_process.htm](https://www.un.org/Depts/los/consultative_process/consultative_process.htm)
- Sheavly, S. B., & Register, K. M. (2007). Marine debris & plastics: Environmental concerns, sources, impacts and solutions. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(4), 301–305. <https://doi.org/10.1007/S10924-007-0074-3/METRICS>
- Sigler, M. (2014). The effects of plastic pollution on aquatic wildlife: Current situations and future solutions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225(11), 1–9.  
<https://doi.org/10.1007/S11270-014-2184-6/METRICS>
- Smith, M. D., Roheim, C. A., Crowder, L. B., Halpern, B. S., Turnipseed, M., Anderson, J. L., Asche, F., Bourillón, L., Guttormsen, A. G., Khan, A., Liguori, L. A., McNevin, A., O’Connor, M. I., Squires, D., Tyedmers, P., Brownstein, C., Carden, K., Klinger, D. H., Sagarin, R., & Selkoe, K. A. (2010). Sustainability and global seafood. *Science*, 327(5967), 784–786.  
[https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1185345/SUPPL\\_FILE/SMITH.SOM.PDF](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1185345/SUPPL_FILE/SMITH.SOM.PDF)
- Spear, L. B., Ainley, D. G., & Ribic, C. A. (1995). Incidence of plastic in seabirds from the tropical pacific, 1984–1991: Relation with distribution of species, sex,

- age, season, year and body weight. *Marine Environmental Research*, 40(2), 123–146. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(94\)00140-K](https://doi.org/10.1016/0141-1136(94)00140-K)
- Spectral - Sentinel Online*. (2023). <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spectral>
- Spengler, A., & Costa, M. F. (2008). Methods applied in studies of benthic marine debris. *Marine Pollution Bulletin*, 56(2), 226–230. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2007.09.040>
- Stefanini, R., Borghesi, G., Ronzano, A., & Vignali, G. (2021). Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(4), 767–784. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01804-X/FIGURES/9>
- Taggio, N., Aiello, A., Ceriola, G., Kremezi, M., Kristollari, V., Kolokoussis, P., Karathanassi, V., & Barbone, E. (2022). A Combination of Machine Learning Algorithms for Marine Plastic Litter Detection Exploiting Hyperspectral PRISMA Data. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 3606*, 14(15), 3606. <https://doi.org/10.3390/RS14153606>
- THE CEOS DATABASE : MISSION SUMMARY - Sentinel CHIME-A*. (2023). <http://database.eohandbook.com/database/missionssummary.aspx?missionID=1047>
- The European Space Agency. (2023). *Sentinel-2 - Data Products - Sentinel Handbook - Sentinel Online*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products>
- Thompson, R. C., Moore, C. J., Saal, F. S. V., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2009.0053>
- Tiseo, I. (2023, February 6). *Europe: illegal dumps containing plastic waste 2022*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/990554/estimated-illegal-dumps-containing-plastic-waste-in-europe/>
- Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., & Garaba, S. P. (2019). Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018).

- International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 175–183. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.03.011>
- Ulyshen, M. D. (2016). Wood decomposition as influenced by invertebrates. *Biological Reviews*, 91(1), 70–85. <https://doi.org/10.1111/BRV.12158>
- Understanding PlanetScope Instruments*. (2023, February 24). <https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/>
- Van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., Van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
- Veenstra, T. S., & Churnside, J. H. (2012). Airborne sensors for detecting large marine debris at sea. *Marine Pollution Bulletin*, 65(1–3), 63–68. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2010.11.018>
- Verstraete, M. M., & Pinty, B. (1996). Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), 1254–1265. <https://doi.org/10.1109/36.536541>
- Village Bayfield. (2015). *Manta Trawl*. <https://www.flickr.com/photos/villageofbayfield/16983149065>
- Vološínová, D., Rohovec, D., & Čejka, E. (2021, July 2). *Littering*. VTEI. <https://www.vtei.cz/2021/07/littering/>
- Werner, S., Budziak, A., Franeker, J. van, Galgani, F., Hanke, G., Maes, T., Matiddi, M., Nilsson, P., Oosterbaan, L., Priestland, E., Thompson, R., Veiga, J., & Vlachogianni, T. (2016). *Harm caused by Marine Litter*. 89. <https://doi.org/10.2788/690366>
- Whiting, K. (2018, November 2). *This is how long everyday plastic items last in the ocean* | *World Economic Forum*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2018/11/chart-of-the-day-this-is-how-long-everyday-plastic-items-last-in-the-ocean/>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

- Yacht Market Size, Trends and Global Forecast To 2032.* (2023).  
<https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/yacht-global-market-report>
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932. <https://doi.org/10.1002/ECY.1730>
- Zanetto, G., & Soriani, S. (1996). Tourism and environmental degradation: the Northern Adriatic Sea. *Sustainable Tourism? European Experiences.*, 137–152.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Množství mikroplastů v rybích vnitřnostech (Science Learning Hub, 2019) .....	13
Obrázek 2: Odhadovaný čas rozkladu materiálů – cigaretové nedopalky se mohou rozložit do 10 let, přičemž rybářské vlasce mohou v moři ležet až 600 let (Whiting, 2018) .....	15
Obrázek 3: (A) Odpad na pobřeží korálového útesu, Ta'u, Americká Samoa. (B) Odpad vyjmutý z mrtvolý mláďete albatrose laysanského, atol Kure, Havaj. (C) Odpad v hnízdě buňňáka severního, Grasholm, Spojené království. (D) Mořský odpad a opuštěné rybářské náčiní mezi hnízdy albatrosů, Midway, Havajské ostrovy. (E) Želva zamotaná do plastového lana, Karibik (Gall & Thompson, 2015) .....	19
Obrázek 4: Vlečná síť Manta (Village Bayfield, 2015) .....	24
Obrázek 5: Spektrální odrazivost materiálů v moři; voda zobrazena modře, odpad černě/červeně (Biermann et al., 2020) .....	25
Obrázek 6: Základní vzorec pro výpočet NDVI .....	28
Obrázek 7: Vzorec pro výpočet indexu FAI .....	28
Obrázek 8: Vzorec pro výpočet indexu FDI .....	29
Obrázek 9: Schéma metodického postupu práce .....	31
Obrázek 10: Zvolená lokalita v kontextu okolních států (Mapy Google, 2023).....	33
Obrázek 11: Snímek Sentinel-2A zájmové lokality.....	34

Obrázek 12: Snímek PlanetScope PSB.SD zájmové lokality .....	35
Obrázek 13: Oblast s odpadem (Sentinel-2) .....	36
Obrázek 14: Oblast s odpadem (PlanetScope).....	36
Obrázek 15: Zvolené polygony pro snímek Sentinel-2.....	37
Obrázek 16: Spektrální křivky zvolených polygonů ze snímku Sentinel-2.....	37
Obrázek 17: Zvolené polygony na snímku PlanetScope .....	38
Obrázek 18: Spektrální křivky zvolených polygonů ze snímku PlanetScope .....	38
Obrázek 19: Vzorec pro výpočet NDVI (Sentinel-2) .....	39
Obrázek 20: Vzorec pro výpočet NDVI (PlanetScope) .....	39
Obrázek 21: Index NDVI pro snímek Sentinel-2.....	40
Obrázek 22: Index NDVI pro snímek PlanetScope .....	40
Obrázek 23: Vzorec pro výpočet FDI .....	41
Obrázek 24: Index FDI pro snímek Sentinel-2 .....	41
Obrázek 25: Trénovací data pro snímek Sentinel-2 (odpad – červeně, voda – modře, lod' – žlutě).....	42
Obrázek 26: Trénovací data pro snímek PlanetScope (odpad – červeně, voda – modře, lod' – žlutě).....	43
Obrázek 27: Klasifikovaný snímek Sentinel-2 pomocí indexu NDVI.....	44
Obrázek 28: Klasifikovaný snímek Sentinel-2 pomocí indexu FDI .....	44
Obrázek 29: Klasifikovaný snímek Sentinel-2 pomocí indexů NDVI a FDI .....	45
Obrázek 30: Klasifikovaný snímek PlanetScope pomocí všech dostupných pásem .	45
Obrázek 31: Klasifikovaný snímek PlanetScope pomocí indexu NDVI .....	46
Obrázek 32: Validační body pro snímek Sentinel-2 .....	47
Obrázek 33: Validační body pro snímek PlanetScope.....	47
Obrázek 34: Hodnoty indexů v jednotlivých klasifikačních kategoriích pro data Sentinel-2 .....	48

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Spektrální pásma družice Sentinel-2A (Spectral - Sentinel Online, 2023) .....	26
Tabulka 2: Spektrální pásma PlanetScope SuperDove (PlanetScope, 2023; Understanding PlanetScope Instruments, 2023) .....	27
Tabulka 3: Chybová matice pro klasifikaci snímku Sentinel-2 na základě indexu NDVI .....	49
Tabulka 4: Chybová matice pro klasifikaci snímku Sentinel-2 na základě indexu FDI .....	49
Tabulka 5: Chybová matice pro klasifikaci snímku Sentinel-2 na základě indexů FDI a NDVI.....	50
Tabulka 6: Chybová matice pro klasifikaci snímku PlanetScope na základě dostupných spektrálních pásem snímku .....	51
Tabulka 7: Chybová matice pro klasifikaci snímku PlanetScope na základě indexu NDVI.....	51