

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

Indikátory holé orné půdy založené na datech Sentinel-2  
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Bakalant: Vojtěch Kašička

2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtěch Kašička

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

**Indikátory holé orné půdy založené na datech Sentinel-2**

Název anglicky

**Indicators of bare arable land based on Sentinel-2 data**

---

### Cíle práce

Holá orná půda představuje vzhledem ke své náchylnosti k erozi problematický jev v krajině. V ČR zatím nejsou pro její identifikaci běžně využívány nástroje dálkového průzkumu Země (DPZ), ač mají nepochybný potenciál pro praxi. Hlavním cílem práce je otestovat jednoduché indikátory založené na volně dostupných datech družic Sentinel-2, které by bylo možné v praxi používat k rychlému vyhodnocení doby, po kterou je na modelových lokalitách v ČR orná půda bez vegetačního pokryvu. Formulace dílčích cílů je úkolem studenta.

### Metodika

Na základě literární rešerše autor zvolí vegetační indexy vhodné k rozpoznání holé půdy. K výpočtu indexů použije data družic Sentinel-2 za několik posledních let, přičemž sledované měsíce budou reflektovat agrotechnické lhůty hlavních zemědělských plodin ČR. Na modelové lokalitě (například jedné scéně Sentinel-2) pak na základě dat LPIS náhodně vybere cca 150 půdních bloků (polí) tak, aby byly rovnoměrně pokryty tři kategorie sklonitosti (téměř rovina, svah a prudký svah nad 7 stupňů sklonu). Na základě literatury, časových změn indexů ve sledovaném období a vizuální interpretace vhodných barevných kompozitů Sentinel stanoví nejvhodnější prahové hodnoty indexů pro určení polí bez vegetačního pokryvu, tj. holé orné půdy. Výsledky bude prezentovat slovně a pomocí jednoduchých explorativních analýz (boxplot grafy apod.).

## Doporučený rozsah práce

40 – 60 stran

## Klíčová slova

formulace klíčových slov je úkolem autora

---

## Doporučené zdroje informací

- Castaldi, F. 2021. Sentinel-2 and Landsat-8 multi-temporal series to estimate topsoil properties on croplands. *Remote Sensing* 13.
- Filizzola, C., R. Corrado, A. Falconieri, M. Faruolo, N. Genzano, M. Lisi, G. Mazzeo, R. Paciello, N. Pergola, and V. Tramutoli. 2018. On the use of temporal vegetation indices in support of eligibility controls for EU aids in agriculture. *International Journal of Remote Sensing* 39:4572–4598.
- Sklenicka, P., K. J. Molnarova, M. Salek, P. Simova, J. Vlasak, P. Sekac, and V. Janovska. 2015. Owner or tenant: Who adopts better soil conservation practices? *Land Use Policy* 47:253–261.
- Šarapatka, B., and M. Bednář. 2021. Agricultural production on erosion-affected land from the perspective of remote sensing. *Agronomy* 11.
- Xu, H., X. Hu, H. Guan, B. Zhang, M. Wang, S. Chen, and M. Chen. 2019. A remote sensing based method to detect soil erosion in forests. *Remote Sensing* 11.
- Zepp, S., M. Jilge, A. Metz-Marconcini, and U. Heiden. 2021. The influence of vegetation index thresholding on EO-based assessments of exposed soil masks in Germany between 1984 and 2019. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 178:366–381.

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

## Vedoucí práce

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

**doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 21. 03. 2022

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Indikátory holé orné půdy založené na datech Sentinel-2 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 bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

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

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

V Koněprusech dne .....

.....

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Petře Šimové, Ph.D. za vedení mé práce a ochotu poradit, kdykoliv jsem potřeboval. Dále bych rád poděkoval kolegům studentům, jmenovitě Václavu Žákovi, Jakubu Férovi, Jakubu Voskovi a také své rodině za psychickou podporu. Bakalářská práce byla řešena v rámci projektu TAČR SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu (DivLand).

**Abstrakt:** Dálkový průzkum Země skrývá obrovský potenciál zkoumat určité jevy v krajině s vysokou přesností díky velkému množství dostupných dat. Poměrně nová družice Sentinel-2 díky své vysoké frekvenci přeletů nad stejným územím a vysokým rozlišením pořízených snímků povrchu nabízí možnosti zkoumání i komplexních a problematických jevů v krajině, jako je například eroze. Náchylnost půdy k erozi je dobré předvídat dopředu a toho lze dosáhnout například na základě znalosti o délce doby, po kterou jsou půdní bloky bez vegetačního pokryvu. V této práci jsem analyzoval dva vegetační indexy na území o rozloze jedné snímkové dlaždice Sentinelu-2 v ČR za účelem budoucí možnosti rychlé detekce holé orné půdy a také předpovědi míry náchylnosti půdních bloků k erozi. Porovnávány byly indexy NDVI a SAVI a do výpočtů vstupovala pásma o rozlišení 10 metrů. Nejdříve byly porovnány prahové hodnoty obou indexů, které byly dohledatelné v literatuře. Index NDVI prokázal schopnost klasifikovat holou ornou půdu až na nepatrné odchylky poměrně přesně, ale threshold SAVI musel být dále upraven, neboť vykazoval příliš velké odchylky od reality v klasifikacích. Z provedených vizuálních analýz prahových hodnot pro SAVI a následným dalším porovnáním s indexem NDVI vyšlo najevo, že nejlepším klasifikátorem holé orné půdy a vegetace je z těchto dvou indexů SAVI s nastavenou prahovou hodnotou 0,15 i na územích, kde se může lišit barevnost holých půdních bloků. Nutno podotknout, že s lišící se celkovou hustotou vegetace a tím pádem i s použitým korekčním faktorem L na zkoumaném území se správnost prahové hodnoty pro SAVI může lišit. Dále byla zjištěna poměrně silná závislost míry holosti orné půdy na sklonu půdních bloků v kategorii svažitosti nad 7°. Tyto půdní bloky totiž vykazovaly nejmenší holost. Zbylé dvě testované kategorie sklonitosti se od sebe navzájem příliš významně neliší. Index SAVI lze v případě, že bude dodržen stejný korekční faktor  $L=0,5$  doporučit pro hledání holé orné půdy na územích s podobnou celkovou hustotou vegetace s vysokou přesností.

**Klíčová slova:** Dálkový průzkum Země, NDVI, SAVI, eroze

**Abstract:** Remote sensing has great potential to investigate certain phenomena in the landscape with high precision thanks to the large amount of data available. The relatively new Sentinel-2 satellite, with its high frequency of overflights over the same area and the high resolution of the surface images taken, offers the possibility to investigate even complex and problematic landscape phenomena such as erosion. The susceptibility of soil to erosion can be predicted in advance and this can be achieved, for example, by knowing the length of time that soil blocks are without vegetation cover. In this study, two vegetation indices were analysed over an area of one Sentinel-2 image tile in the Czech Republic to enable future rapid detection of bare arable land and also to predict the degree of susceptibility of soil blocks to erosion. The NDVI and SAVI indices were compared and 10 m resolution bands were used in the calculations. First, the threshold values of the two indices were compared, which were found in the literature. Although the NDVI demonstrated the ability to classify bare arable land fairly accurately except for slight deviations, the SAVI threshold had to be further adjusted as it showed too large deviations from reality in the classifications. Visual analyses of the SAVI thresholds and subsequent further comparison with the NDVI index showed that the SAVI was the better classifier of bare arable land and vegetation of the two indices, with a threshold set at 0.15, even in areas where the colour of bare soil blocks may vary. It should be noted that as the overall density of vegetation varies, and therefore the L correction factor applied in the study area, the accuracy of the SAVI threshold may vary. Furthermore, a relatively strong dependence of the degree of arable land bareness on the slope of soil blocks in the slope category above 7° was found. These soil blocks showed the lowest bareness. The other two slope categories tested did not differ significantly from each other. The SAVI index can be recommended for finding bare arable land in areas with similar overall vegetation density with high accuracy if the same correction factor  $L=0.5$  is maintained.

**Key words:** Remote sensing, NDVI, SAVI, erosion

## Obsah

1.	Úvod a cíle práce .....	1
2.	Literární rešerše .....	2
2.1.	Dálkový průzkum Země .....	2
2.2.	Sentinel .....	2
2.2.1.	Jednotlivé mise Sentinel .....	2
2.3.	Orná půda .....	3
2.3.1.	Orná půda z hlediska DPZ .....	3
2.4.	Eroze půdy .....	4
2.5.	Vegetační indexy .....	5
2.5.1.	NDVI .....	5
2.6.	Faktory ovlivňující vegetační indexy .....	6
2.6.1.	Světlost půdy .....	6
2.6.2.	Barva půdy .....	9
2.6.3.	Vliv atmosféry .....	10
2.7.	Spektrální podobnosti holé orné půdy .....	10
3.	Metodika .....	11
3.1.	Zájmové území .....	11
3.2.	Použitá data a preprocessing .....	12
3.3.	Tvorba rastrů NDVI a SAVI .....	16
3.4.	Odmaskování oblačnosti .....	16
3.5.	Výpočty hodnot rastrů NDVI a SAVI na modelových polích .....	17
4.	Výsledky .....	18
4.1.	Předpokládané výsledky .....	18
4.2.	Vizualizace trvání holé půdy podle NDVI .....	18
4.3.	Vizualizace trvání holé půdy podle SAVI .....	21
4.4.	Porovnání thresholdů NDVI (0.24) a SAVI (0.21) s RGB kompozitem ....	23
4.5.	Vizualizace trvání holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI .....	27
4.6.	Znázornění celkové rozlohy holé orné půdy podle SAVI .....	29
4.7.	Vedlejší výsledky .....	32
5.	Diskuse .....	33
6.	Závěr .....	35
7.	Seznam použitých zdrojů .....	36
8.	Seznam obrázků .....	41



9. Přílohy.....	42
9.1. Příloha č.1.....	42

## 1. Úvod a cíle práce

Dálkový průzkum Země má velmi dobrý potenciál z hlediska zkoumání různých přírodních jevů ve větších časových obdobích. S velkým množstvím dostupných dat z velkého množství družic a senzorů, které se postupem času neustále inovují a zlepšují, přichází možnost zkoumat stále více komplexní jevy, než bylo možné před několika lety. Metody získávání dat dálkového průzkumu Země mají jednu velkou výhodu, a to schopnost pořídit velmi rychle snímky velkých území v rozlišeních lišících se především podle druhu družice a typu senzoru. Pro mou práci byly použity snímky z družice Sentinel-2 pro jejich velmi vysoké rozlišení v rámci jednoho pixelu, konkrétně 10x10 metrů. Častá frekvence snímání stejného území opakující se v řádu dnů byla rovněž pro potřeby této práce více než dostačující, jelikož jednotlivé rozestupy mezi použitými snímky činí ve většině případů cca měsíc ( $\pm$  několik dní).

Jedním z důležitých jevů v krajině, které by se neměly brát na lehkou váhu je nepochybně eroze půdy. Jedná se jednoduše o jev, při kterém dochází k poškozování půdy od jejích svrchních vrstev vlivy vnějších faktorů, jako např. mrazem, větrem, vodou, antropogenními činnostmi atd. Ačkoliv tomu tak zatím v praxi moc není, data dálkového průzkumu Země mají velký potenciál odhalovat holou ornou půdu a určit tak celkovou rozlohu půdy v určité oblasti, která je bez vegetačního pokryvu, a tím pádem i náchylnější k erozi. Hlavním cílem této práce je otestovat schopnost vegetačních indexů NDVI a SAVI odlišovat holou ornou půdu od vegetace a na základě vizuálních porovnání určit, který je v klasifikování přesnější. První prahové hodnoty (thresholdy) pro rozlišování holé orné půdy a vegetace jednotlivých indexů byly převzaty z literatury. Následně byly porovnány mezi sebou a vizuálně s RGB kompozity, aby se dala určit jejich přesnost a v případě prokázání jejich nepřesnosti dojde k reklasifikaci vegetace podle nových thresholdů, dokud nebude objeven ten nejideálnější. Ten byl následně použit k určení celkové rozlohy holé orné půdy v modelové oblasti.

Vedlejším cílem této práce bylo pak zjistit, zda existuje jakákoliv spojitost mezi rozlohou holé orné půdy a svažitostí jednotlivých polí. Takové zjištění nám pomůže odhalit informaci o tom, s jakou důsledností se na jak svažitých polích hospodaří tak, aby na nich holá orná půda v průběhu roku byla co nejméně.

## 2. Literární rešerše

### 2.1. Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (dále jen DPZ) je metoda získávání dat o objektech a jevech na Zemi bez přímého kontaktu s těmito objekty nebo jevy. Nejběžnějším způsobem získávání kvalitativních a kvantitativních dat pro DPZ je převážně užívání výhod leteckého a družicového snímání a postupně data projdou fází sběru, úpravy, analýzy a v posledním bodě interpretace (Lillesand et al., 2004). DPZ pro získávání dat využívá dvou metod snímání. Prvním typem je tzv. aktivní snímání, jenž spočívá ve vyslání paprsku přístrojem a následném zaznamenání odraženého záření jednotlivými typy povrchů. Dalším způsobem získávání dat je snímání pasivní, které funguje na principu přijímání čistě záření emitovaného různými druhy povrchu bez potřeby přístroje, který by nejdříve paprsek musel vyslat (Dobrovolný, 1998). Způsobů „dělení“ DPZ ale rozlišujeme více. Můžeme se bavit ještě například o konvenční a nekonvenční metodě tvorby finálního produktu snímání. Při konvenční metodě dochází k vytvoření snímku v jeden daný moment a okamžitě, kdežto při nekonvenční metodě dochází k dlouhodobé tvorbě obrazového záznamu pixel po pixelu. Oproti konvenční metodě kvalita výsledku vytvořeného nekonvenčně méně závisí na podmínkách počasí, má velké spektrální rozlišení a v takových případech se pro zaznamenávání používají skenery (Dobrovolný, 1998).

Existuje hned několik „rodin“ družic zabývajících se snímáním povrchu Země. Jedná se například o americkou rodinu Landsat nebo evropskou skupinu družic Sentinel.

### 2.2. Sentinel

European Space Agency (ESA) vyvíjí novou skupinu misí nazvanou Sentinel speciálně pro potřeby programu Copernicus. Každá mise Sentinel je založena na konstelaci dvou družic, které splňují požadavky na pokrytí a poskytují velké množství dat ve formě družicových snímků. Tyto mise nesou řadu technologií, jako jsou radarové a multispektrální zobrazovací přístroje pro monitorování pevniny, oceánů a atmosféry (ESA, nedatováno).

#### 2.2.1. Jednotlivé mise Sentinel

Sentinel-1 je radarová mise na polární oběžné dráze, která pracuje za každého počasí, ve dne i v noci a slouží pro pozorování pozemních a oceánských jevů (ESA, nedatováno).

Sentinel-2 obíhá rovněž na polární orbitě, jedná se o multispektrální mise s vysokým rozlišením pro monitorování pevniny, která poskytuje například snímky vegetace, půdy a vodního pokryvu, vnitrozemských vodních cest a pobřežních oblastí (ESA, nedatováno).

Sentinel-3 slouží pro měření topografie mořské hladiny, teploty mořské a pevninské hladiny, barvy oceánu a barvy pevniny s vysokou přesností a spolehlivostí (ESA, nedatováno).

Sentinel-4 je mise věnovaná monitorování atmosféry, která bude umístěna na družici Meteosat třetí generace (MTG-S) na geostacionární dráze (ESA, nedatováno).

Sentinel-5 je mise, která bude monitorovat atmosféru z polární dráhy na palubě družice MetOp druhé generace (ESA, nedatováno).

Sentinel-5P (zkratka pro prekurzor) je mise vyvíjená s cílem snížit datové mezery mezi Envisatem a vypuštěním Sentinelu-5 (ESA, nedatováno).

Sentinel-6 nese radarový výškoměr pro měření globální výšky mořského povrchu, především pro potřeby operativní oceánografie a klimatických studií (ESA, nedatováno).

### 2.3. Orná půda

Orná půda je takový typ zemědělské půdy, na které se v určitý časových intervalech po různě dlouhá časová období pěstují zemědělské plodiny. Orná půda dosahuje 38 % z celkové rozlohy ČR (pozemkyafarmy.cz, 2014). Pokud není orná půda oseta, označujeme jí za holou ornou půdu. V takovém případě může docházet ke ztrátám živin a proto se např. v zimních obdobích, kdy půda není oseta zemědělskými plodinami osívá plodinami krycími (Český statistický úřad, 2010).

#### 2.3.1. Orná půda z hlediska DPZ

Odrazivost holé orné půdy se může lišit na základě její drsnosti. Pokud vezmeme v potaz například krátkovlnné záření, uhlazená orná půda odrazí více tohoto záření než holá orná půda, která je čerstvě zoraná. To stejné můžeme říct o holé orné půdě ve srovnání s ornou půdou osetou, jelikož větší množství zemědělských plodin na zkoumané ploše snižuje její odrazivost (Cierniewski et al., 2021). Dálkový průzkum holé půdy může potenciálně kvantifikovat informace o půdě pomocí záznamu elektromagnetické energie odražené od povrchu půdy. Podíl energie odražené určitým povrchem je částečně dán fyzikálním složením povrchu (Avery et al., 1992). Vizuální barevné variace pozorované na holém povrchu půdy jsou ovlivněny půdními

vlastnostmi, jako jsou například organická hmota, struktura půdy a její vlhkost (Hoffer, 1978). Získávání informací o půdě pomocí dálkového průzkumu je pro aplikace v zemědělství výhodné, protože získaná data jsou v digitálním formátu, jsou georeferencovaná a poskytují kompletní pokrytí celého pole. Z těchto důvodů lze data dálkového průzkumu snadno vložit do geografického informačního systému (dále jen GIS) a kombinovat je s dalšími vrstvami GIS nebo je statisticky modelovat. Pro plné využití užitečnosti snímků holé půdy pro zemědělství by bylo výhodné určit vlastnosti půdy, které mají největší vliv na odrazivost snímků holé půdy (Mzuku et al., 2015).

Užívání metod DPZ pro zkoumání charakteristik půd na základě jejich vlastností je výhodné hlavně z důvodu jejich neinvazivnosti. To se nedá říct například o metodě odebrání půdních vzorků, které povrch půdy rozrušují poměrně značně. V několika studiích bylo prokázáno, že odrazivost půdy významně koreluje s půdní organickou hmotou (Stoner et al., 1980). Bylo také prokázáno, že obsah vlhkosti v půdě významně ovlivňuje spektrální odrazivost ve vlnové délce 400 až 1100 nm, a také ve vlnové délce 1100 až 2500 nm (Lobell a Asner, 2002).

#### 2.4. Eroze půdy

Eroze půdy má škodlivý vliv na globální půdní zdroje, udržitelnost půdy a zabezpečení obživy (Amundson et al., 2015). Za posledních 40 let byla vlivem eroze ztracena téměř třetina světové orné půdy (Pimentel et al., 1995). V Evropě je přibližně třetina půdy rovněž vystavena vysokému až velmi vysokému riziku vodní eroze (van den Born et al., 2000). Několik studií popisuje vliv zemědělské činnosti na erozní procesy (např. Kosmas et al., 2002) a tato půdní eroze pak přímo ovlivňuje kvalitu zemědělství, například ztrátou úrodné půdy a úbytkem půdních zdrojů (Colombo et al., 2005). Dochází ke snížení výnosů, ztrátě živin, zmenšení dostupné osevni plochy atd. (Telles et al., 2011). Eroze nejen mění vlastnosti půdy a odstraňuje živiny, ale také významně ovlivňuje výnosy z pěstování plodin (např. Tengberg et al., 1998). S rozvojem technických možností jsou nástroje dálkového průzkumu Země (DPZ) v souvislosti s odhadem výnosů z pěstování plodin stále častěji využívány při hledání vhodných indexů pro rozlišení jednotlivých plodin. Jedním z nejvýznamnějších nejčastěji zmiňovaných indexů týkajících se výnosu plodin a odlišování holé půdy od vegetace je např. tzv. Normalized difference vegetation index (dále jen NDVI) a Soil adjusted vegetation index (dále jen SAVI) (např. Kogan et al., 2012). Oba tyto indexy proberu dopodrobna dále ve své práci.

Dálkový průzkum lze také úspěšně využít k získání informací o rozloze holé půdy (Demattê et al., 2018), stejně jako k určení míry eroze, zejména na černozemních půdách (Netopil et al., 2021). Z tohoto pohledu jsou metody

dálkového průzkumu Země s vysokým rozlišením ideální možností, jak zkoumat např. již zmíněnou erozi půdy.

## 2.5. Vegetační indexy

Index je číslo charakterizující intenzitu jevu, který je příliš složitý na to, aby se dal rozložit na více známých parametrů. Ačkoli je možné určit podíl vlivu mnoha faktorů v dobře zdokumentovaném prostředí, je obecně obtížné tento rozklad provést na snímcích dálkového průzkumu Země. Vegetační indexy jsou dobře přizpůsobeny pro klasifikaci vegetace na velkých plochách, např. na území oblastí pokrývajících mnoho pixelů snímku (Bannari et al., 1995).

Různé vegetační pokryvy lze rozlišit podle jejich jedinečných spektrálních způsobů chování (Tucker, 1979). Viditelné záření v červené barvě (630-690 nm) je absorbováno chlorofylem, zatímco záření v blízké infračervené oblasti (760-900 nm) je silně odraženo buněčnými strukturami listů.

Při zkoumání obecné křivky odrazivosti vegetace představuje odchylka mezi červenou a blízkou infračervenou oblastí proměnnou citlivou na přítomnost zelené vegetace. Spektrální odezva vegetace v červené barvě silně koreluje s koncentrací chlorofylu, zatímco v blízké infračervené oblasti je ovlivňována indexem listové plochy LAI (Leaf Area Index) a hustotou zelené vegetace (Major et al., 1990). Kombinace těchto dvou spektrálních oblastí umožňuje odlišit vegetaci od půdy a určit fotosynteticky aktivní povrch prostřednictvím hustoty vegetačního pokryvu (Deering et al., 1975).

### 2.5.1. NDVI

Vegetační index je hodnota, která číselně vyjadřuje charakteristiky vegetace. Využívají se pro mapování kvalitativních a kvantitativních ukazatelů vegetace, především množství biomasy v ploše pixelu. Pro potřeby mé práce je dobrým příkladem index NDVI (Normalized difference vegetation index), který určuje odrazivost vegetace na základě vztahů mezi oblastmi červeného viditelného záření (RED) a blízkého infračerveného záření (NIR). Vypočítá se pomocí tohoto vzorce:

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

Index je citlivý na přítomnost zelené vegetace (Sellers, 1985), umožňuje predikci zemědělských plodin (Tucker a Sellers, 1986) a srážek v polosuchých oblastech (Kerr et al., 1989). V souladu s tím se používá v regionálním i globálním měřítku pro studium stavu vegetace (Prince a Tucker, 1986). Úspěch NDVI jako deskriptoru změn vegetace navzdory atmosférickým vlivům (Kaufman 1984) a

radiometrické degradaci v červeném a blízkém infračerveném pásmu spočívá v normalizaci, kterou umožňuje. Normalizace snižuje vliv kalibrace senzoru přibližně o 6 % celkové hodnoty indexu (Holben et al., 1990). Je třeba také poznamenat, že představuje nevýhodu v nadhodnocení procenta vegetačního krytu na začátku vegetační sezóny a podhodnocuje ho na konci sezóny (Cyr, 1993).

## 2.6. Faktory ovlivňující vegetační indexy

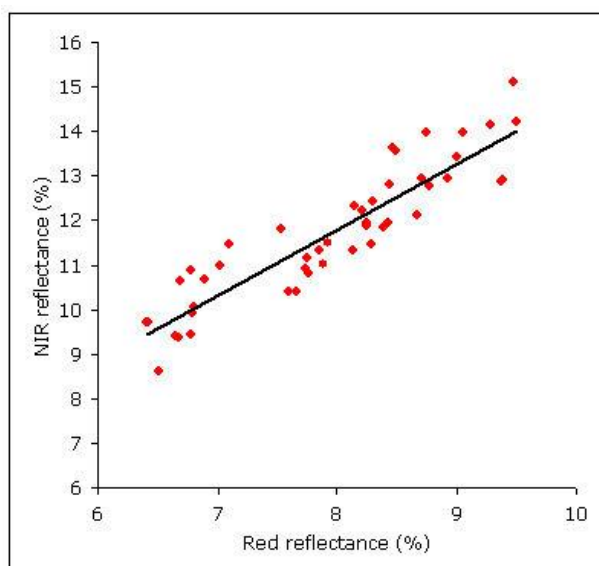
Mnoho výzkumníků se zaměřilo na faktory ovlivňující vegetační indexy. Tyto faktory patří do dvou různých, ale vzájemně se doplňujících oblastí, a to biologické a fyzikální (Baret, 1986).

Bavíme-li se o oblasti pokryté vegetací, její optické vlastnosti se vyvíjejí v čase v závislosti na různých faktorech, které charakterizují stav vegetačního krytu, jako je obsah vody, stáří, nedostatek minerálních látek, napadení parazity (Guyot, 1989), geometrií porostu a rozložením listů v porostu (Chance, 1981). Tyto biologické faktory ovlivňují odrazivost vegetace a tím pádem i vegetační index. K těmto je třeba přičíst rušivé vlivy fyzikálního řádu, které jsou způsobovány atmosférou a které závisí na vlnové délce (Slater, 1980), rozdílech ve vlastnostech půdy, jasu a zbarvení (Huete, 1985), geometrií slunečního osvětlení a pozorovacími podmínkami senzoru (Huete, 1987). K řešení těchto problémů bylo vyvinuto mnoho dalších indexů.

### 2.6.1. Světlost půdy

Světlost půdy je jedním z aspektů, který má značný vliv na výpočty hodnot vegetačních indexů. Tento vliv je analyzován v mnoha studiích, které používají poměrové indexy RVI nebo NDVI. Index RVI je citlivý na atmosférické vlivy a jeho diskriminační schopnost je slabá, pokud je vegetační pokryv méně hustý (méně než 50 %), zatímco nejlepší je, když je vegetační pokryv více hustý (Jackson et al., 1983). O indexu NDVI jsme se již bavili výše. Bylo však vyvinuto mnoho vegetačních indexů pro kontrolu spektrální variability připisované vegetaci, která je ale způsobena půdním pozadím (Huete, 1984). Odrazivost půdního pozadí a prostředí se prostorově liší v závislosti na struktuře, textuře, barvě, materiálech a také vlhkosti půdy (Huete et al., 1984). Navzdory této velké rozmanitosti půd se vegetační indexy často aplikují na radiometrická data obecným způsobem nezávisle na všech těchto vnějších faktorech. Podle Tuckera (1979), poměrové indexy vykazují nedostatek detailní analýzy a trpí více než ortogonální indexy vnějšími rušivými vlivy. Když je vegetační kryt rozptýlen, dochází k výraznému nárůstu záření v červeném pásmu kvůli vlivu povrchu země (Huete et al., 1984). Když je však vegetace méně hustá, nejsou poměrové ani ortogonální indexy schopny poskytnout odpovídající popis spektrálního chování vegetace (Huete, 1988).

Pro správné pochopení problematiky následujícího vegetačního indexu bude potřeba rozebrat pojem „půdní linie“. Půda má zvláštní spektrální charakteristiku, která ji odlišuje od ostatních typů krajinného pokryvu. Ve viditelné a blízké infračervené oblasti se odrazivost zvyšuje úměrně s nárůstem vlnové délky. Rychlost nárůstu je však ovlivněna mnoha faktory. Textura a struktura půdy určují, jak moc půda odráží záření. Půdní vlhkost a organická hmota zvyšují absorpční schopnost půdy a vedou k celkově nižší odrazivosti půdy. Vztah mezi červenou a blízkou infračervenou odrazivostí však zůstává relativně konstantní pro určitý typ půdy s konkrétními vlastnostmi. Pokud bychom shromáždili mnoho spektrálních měření stejné půdy za různých podmínek vlhkosti a pak pro každé měření vynesli do grafu červenou barvu v porovnání s odrazivostí v blízké infračervené oblasti, dostali bychom něco jako následující obrázek:



Obrázek 1 - příklad půdní linie ([https://seos-project.eu/agriculture/images/soil\\_line.jpg](https://seos-project.eu/agriculture/images/soil_line.jpg), nedatováno)

Odrazivost mezi červenou a blízkou infračervenou barvou kolísá úměrně. Při změně vlhkosti jsou tyto dvě hodnoty korelované a mají lineární vztah. To znamená, že kdykoli se změní jedna z nich, změní se i druhá podle vztahu, který je váže. Čára, která tento vztah popisuje, je známá jako půdní linie, která je pro každou půdu jedinečná (SEOS, nedatováno).

Základním konceptem takzvaného kolmého vegetačního indexu (Perpendicular vegetation index, dále PVI) je zohlednění vlivu holé půdy. Index PVI se liší od poměrového indexu v tom, že izolinie stejné "zelenosti" se neshlíhají v počátku, ale zůstávají rovnoběžné s hlavní osou spektrální variability půdy, tj. s půdní linií. Je vypočten vektor zelenosti, který je kolmý na linii půdy a zahrnuje maximum zelených signálů vegetace při zachování půdního pozadí. Projekce



složených spekter na tento vektor se následně použije jako míra vegetace. Index PVI je rozdílem mezi odrazivostí holé půdy a vegetace v odpovídajícím spektrálním pásmu (červené a blízké infračervené) (Bannari et al., 1995). PVI používá červené a blízké infračervené pásmo k výpočtu kolmé vzdálenosti mezi vegetačním bodem na rozptylové ploše blízkého infračerveného záření a půdní linií. Protože vegetace má vyšší odrazivost v blízkém infračerveném pásmu a nižší červenou odrazivost než půda pod ní, bude se vegetační bod nacházet v levém horním rohu rozptylové tabulky. S rostoucí hustotou vegetace se skvrna vegetace bude posouvat směrem k levému hornímu rohu, tedy dále od linie půdy. Slabinou PVI je předpoklad, že pod vegetací se nachází pouze jeden typ půdy. To však neplatí vždy, protože existují prostředí, kde se na velmi malé ploše vyskytuje směs půdních typů (například směs půdy a hornin).

Huete (1988) navrhl pro řešení tohoto problému index SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index). SAVI je hybridem mezi poměrovým indexem (NDVI) a kolmým indexem (PVI). Byl představen vzorcem:

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR-Red)}{(NIR+Red+L)}$$

L je korekční faktor a jeho hodnota závisí na vegetačním krytu. Pro celkový vegetační pokryv má nulovou hodnotu, čímž se SAVI fakticky mění na NDVI. Pro velmi nízký vegetační pokryv dostává hodnotu 1. Huete (1988) navrhl, aby se v případě neznámého vegetačního pokryvu použila hodnota 0,5, protože 0,5 představuje střední vegetační pokryv. Další indexy, jako je Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (dále jen TSAVI) a Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (dále jen MSAVI), se řídily podobným odůvodněním, ale navrhly jiné korekční faktory, které se v určitých případech ukázaly být lepší než SAVI. Kromě toho byly v minulosti navrženy specifické vegetační indexy využívající data s vysokým spektrálním rozlišením (úzká pásma) a zaměřené konkrétně na chlorofyl a vitalitu rostlin (SEOS, nedatováno).

Baret a kol. (1989) definovali "Transformed Soil Adjusted Vegetation Index" (dále jen TSAVI), který je transformací indexu SAVI. TSAVI se určuje ve vztahu k půdní linii. Parametry půdní linie (sklon a počátek) jsou zavedeny do výpočtu tohoto indexu. První verze indexu TSAVI (Baret et al., 1989) byla upravena, aby se minimalizoval vliv světlosti půdy. Obvykle v případě holé půdy nabývá hodnot kolem 0 a blíží se hodnotě 0,70 v případě velmi hustých lesních porostů. SAVI a TSAVI mají tu výhodu, že popisují jak změny ve vegetačním krytu, tak v půdním pozadí a jsou nezávislé na typu použitého senzoru. V souvislosti s tvorbou mapy

využití půdy pro studium eroze v povodí v polosuché oblasti se TSAVI ukázal jako vyhovující pro lokalizaci vegetace vyznačující se nízkým pokryvem (Anys, 1991). Vzhledem k tomu, že bere v úvahu linii holé půdy, je TSAVI lepším indikátorem pro nízký vegetační kryt, než NDVI a je citlivější na přítomnost stárnoucí vegetace (Cyr, 1993).

### 2.6.2. Barva půdy

Dalším faktorem ovlivňujícím vegetační indexy je kromě světlosti půdy také její barva. Koncepce vegetačních indexů předpokládá, že variace indexů jsou funkcí výhradně vegetace. Ve skutečnosti mnoho studií prokázalo, že tato hypotéza není vždy ověřena a že hodnoty vegetačních indexů, získané na holých půdách nebo půdách s nízkou hustotou vegetace, se často odchyľují od tohoto teoretického předpokladu (Escadafal a kol., 1990). Tyto sekundární půdní (barevné) odchylky dodávají "šířku" půdní linii a v závislosti na osách vlnových délek může půdní linie připomínat elipsoid nebo rovinu. Barva představuje šum, který brání detekci vegetačních pokryvů s nízkou hustotou (Huete, 1984; Huete et al., 1985, Bannari et al., 1995). Tento šum je spojen se zvýšením vegetačního indexu v důsledku variací ve spektrálních vlastnostech půdy, nikoliv se zvýšením míry vegetačního krytu. Huete a kol. (1984) zdůraznili, že barva půdy má významný vliv na odrazivost porostů s nízkou hustotou vegetace a že tuto skutečnost je třeba zohlednit při výpočtu vegetačních indexů v suchém prostředí. Autoři naznačují, že šum způsobený půdami souvisí s jejich barvou. Pro řešení tohoto problému vytvořili Escadafal a Huete (1991) index zbarvení neboli "index červenosti" (RI), který je korekčním faktorem pro vliv barvy půdy na vegetační indexy. Podle těchto dvou výzkumníků odchylky způsobené barvou půdy značně ztěžují detekci nízkých vegetačních krytů. Tento faktor je na druhém místě za jasnou půdu. Index zbarvení půdy je tedy korekcí umožňující zdvojnásobit citlivost vegetačních indexů (Escadafal a Huete, 1991). Analogicky k NDVI je tento index definován následující rovnicí:

$$RI = \frac{R-G}{R+G}$$

kde R je průměrná odrazivost v červeném kanálu, G je průměrná odrazivost v zeleném kanálu.

Byla navržena jednoduchá metoda pro korekci vegetačních indexů a vlivů "šumu" spojeného s barvou půdy. Využívá informace poskytované zeleným kanálem. Metoda používá sklon "k" lineární korelace mezi RI a vegetačním indexem (dále jen VI) pro získání opraveného vegetačního indexu (VI\*):

$$VI^* = VI - kRI$$

Korekce vegetačních indexů NDVI a SAVI z "šumu" spojeného s barvou půdy zdvojnásobuje citlivost těchto indexů (Escadafal a Huete, 1991).

### 2.6.3. Vliv atmosféry

Změny způsobené atmosférickými vlivy, absorpcí a rozptylem mohou značně snížit přesnost interpretace snímků dálkového průzkumu Země, zejména při zjišťování dynamiky vegetace na zemském povrchu. Záření měřené družicovými nebo leteckými senzory ve viditelné a blízké infračervené oblasti elektromagnetického spektra je silně ovlivněno atmosférickými změnami. Atmosféra ovlivňuje vegetační indexy následujícím způsobem: pro rovnoměrný povrch má atmosféra bez mraků za následek, že světlý povrch, jako například písek je v NIR renderován tmavě a tmavý povrch, jako například voda ve viditelném spektru je renderována světle. Protože půdní pozadí silně ovlivňuje celkový jas částečně porostlých korun, atmosférická modifikace záření odražených korunami stromů bude silně záviset na optických vlastnostech půdy (Kaufman, 1988 a Huete, 1989). Kaufman a Tanre (1992) vyvinuli nový vegetační index, tzv. "Atmospherically Resistant Vegetation Index" (dále jen ARVI), který je novou verzí vegetačního indexu NDVI. Odolnost indexu ARVI vůči atmosférickým vlivům je ve srovnání s indexem NDVI dosaženo procesem samoopravy atmosférického vlivu na červeném kanále. Rozdíl v zářivosti mezi modrým a červeným kanálem tvoří nový červenomodrý kanál (RB). Tato kombinace minimalizuje vliv atmosférického rozptylu záření způsobeného aerosoly v červeném kanálu. Simulace pomocí výpočtů přenosu záření na simulovaném a přírodním povrchu pro různé atmosférické podmínky ukazují, že ARVI má dynamické vlastnosti podobný rozsah jako NDVI, ale je čtyřikrát méně citlivý na atmosférické vlivy než NDVI (Kaufman a Tanre, 1992). Podobně jako u NDVI je ARVI definován takto:

$$ARVI = \frac{(NIR - RB)}{(NIR + RB)}$$

### 2.7. Spektrální podobnosti holé orné půdy

Pro potřeby mého výzkumu byl charakterizován pojem „holá orná půda“, a to následovně: jedná se o takové zemědělské půdní bloky (pole), jejichž povrch není pokryt žádným typem vegetace, nanejvýš velmi nízkou trávou nebo posklizňovými zbytky, které nejsou na RGB kompozitech zřetelně odlišitelné od holé půdy a které jsou podle validační hodnoty thresholdu 0.24 pro odlišování holé půdy a vegetace pro NDVI pod touto hranicí, tj. klasifikovány jako holá půda.

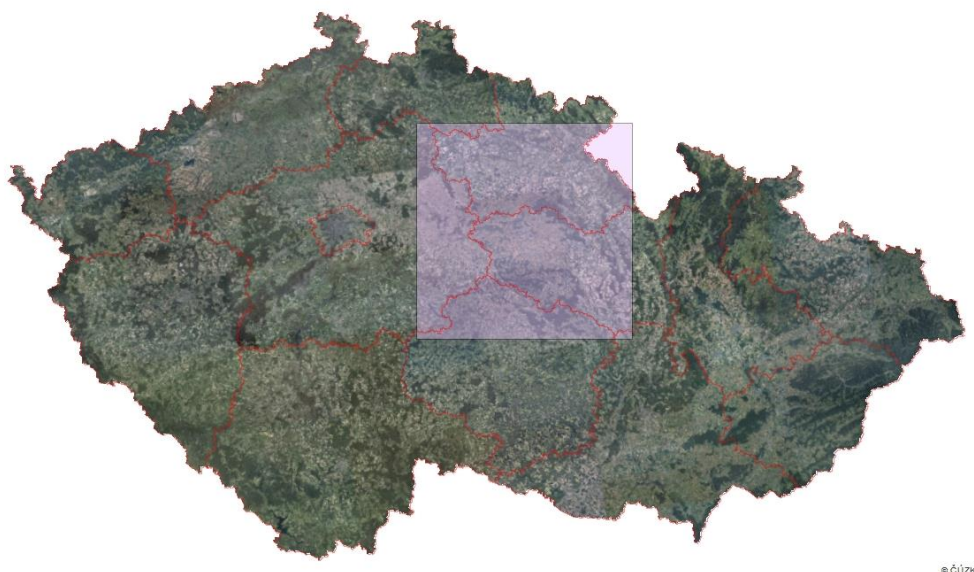
Holá orná půda v příměstských a venkovských oblastech se obtížně klasifikuje. Částečně je to proto, že holá půda a městské oblasti mají relativně podobné spektrální charakteristiky (Gamba et al., 2003). Holá půda je často nesprávně klasifikována jako zastavěná plocha a naopak. To může být problém v oboru územního plánování, protože nesprávně klasifikované městské oblasti jsou ve skutečnosti holou půdou. V důsledku toho může být míra rozvoje měst chybně vyhodnocena již v prvním kroku územního plánování. Jakmile je holá půda efektivně odlišena od zastavěných pozemků, dojde tím ke zlepšení hodnocení rozšiřování měst a pomůže to přispět k dalšímu rozvoji zemědělství (Nguyen et al., 2021).

### 3. Metodika

#### 3.1. Zájmové území

Tato práce se nevztahuje k žádnému konkrétnímu předem danému území, to znamená, že výběr byl jedním z úkolů předcházejících dalším krokům. Výběr takového území, aby bylo pro zkoumání daného problému perfektní, je poměrně složitý, jelikož ne vždy jsou dostupné takové snímky, které by pokryly celou časovou linii mého výzkumu, která se vztahuje k rokům 2018-2021. Hlavním problémem při výběru území je nevhodné rozkouskování území jednotlivými snímkovými dlaždicemi družice Sentinel-2 a poměrně vysoká oblačnost ve zkoumaných měsících ve Středočeském kraji, který jsem si předběžně vybral jako své zájmové území. Vzhledem k těmto skutečnostem jsem upravil výběr zájmového území ve prospěch eliminace alespoň jednoho ze dvou výše zmíněných problémů, a to způsobem vztahování zájmového území k pouze jedné snímkové dlaždici, nesoucí kód R122\_T33UWR. Došlo tedy k eliminaci nutnosti stahování velkého množství dlaždic a následné tvorbě mozaiky z nich. Problém poměrně vysoké oblačnosti tak zůstal zachován a došlo tak ke krokům nezbytným pro upravení dalších pracovních postupů, jako je například odmaskování mraků. Tím automaticky přijdeme o část dat, jelikož některá pole byla v době pořízení snímku zakrytá oblačností a tím pádem odstraněna z výpočtů.

Plocha zájmového území, tedy snímkové dlaždice R122\_T33UWR činí cca 12 044km<sup>2</sup> a pokrývá velkou část Královéhradeckého a Pardubického kraje, menší část Středočeského kraje a kraje Vysočina a pravý horní cíp dlaždice zasahuje mimo území ČR, tudíž nás pro potřeby práce nebude zajímat. Umístění zájmového území v České republice je vyobrazeno na obrázku níže:

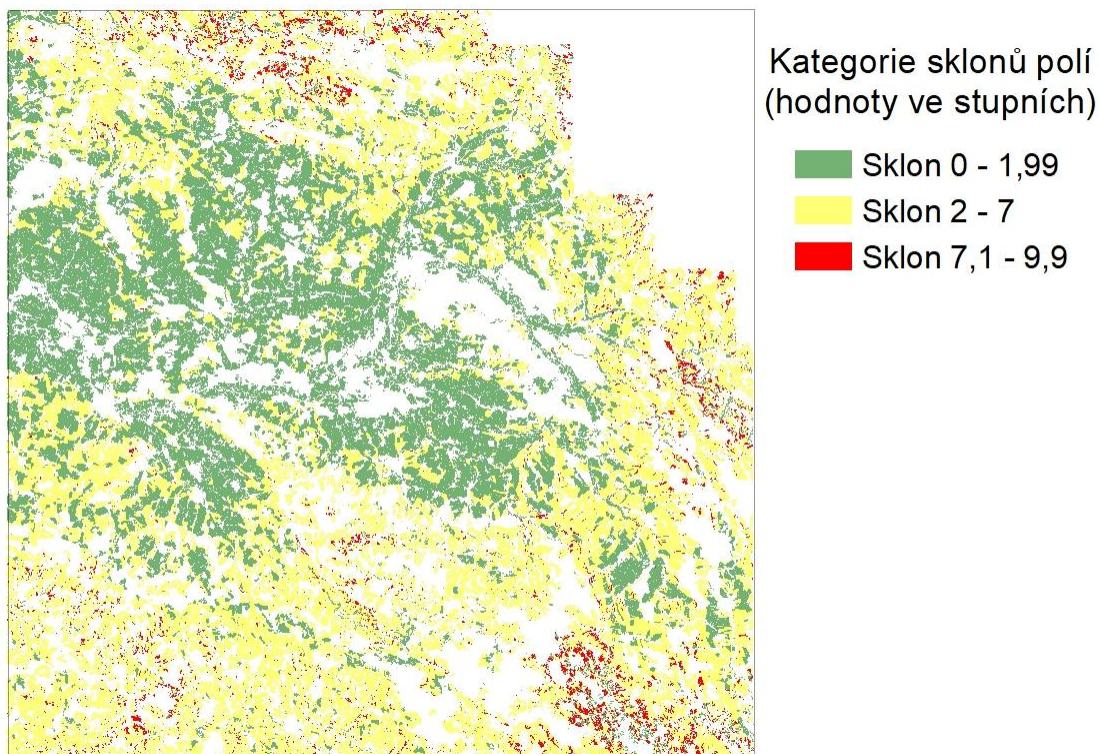


Obrázek 2 - umístění zájmového území v ČR

### 3.2. Použitá data a preprocessing

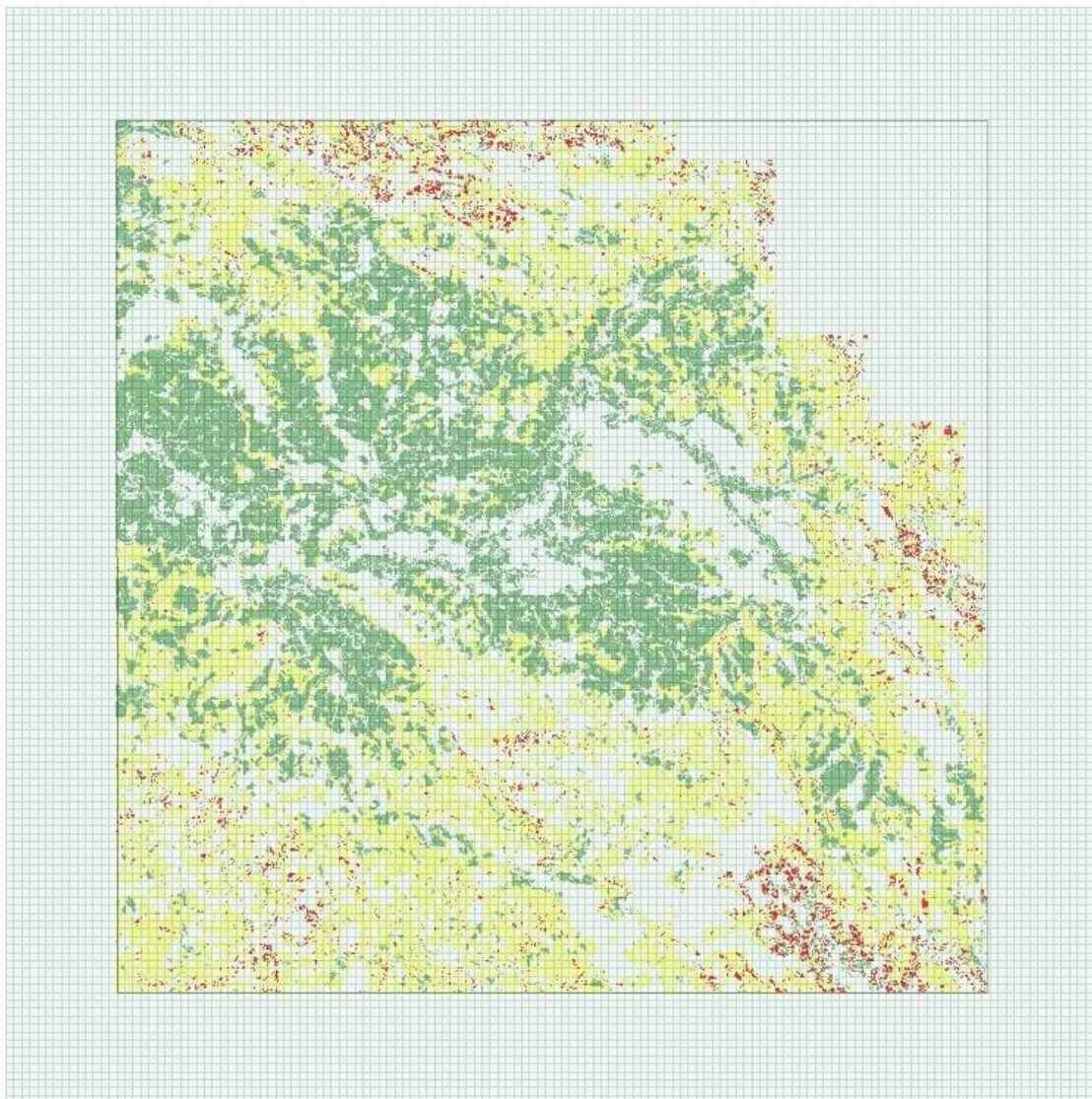
Veškeré snímkové dlaždice družice Sentinel-2 použité pro analýzy byly stažené v RAW formátu z webu <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Z důvodu šetření místa na disku jsem zvolil zkoumané období pouze pro roky 2018-2021 a pouze některé měsíce, které pro zkoumání daného problému mají největší smysl. Nejvíce snímků s nejmenšími rozestupy mezi sebou pro každý daný rok pochází vždy z období, kdy je očekávána největší změna statusů jednotlivých půdních bloků. Zde jsou uvažovány rozestupy mezi snímky cca jeden měsíc. Další z potřebných vrstev je polygonová vrstva polí z veřejného registru půdy, která mi byla poskytnuta vedoucí této práce. Tato vrstva obsahuje veškeré půdní bloky pro ČR pro rok 2015 a spoustu atributů, z nichž pro další práci použiji právě informace o sklonu a rozloze.

Použitá polygonová vrstva polí z veřejného registru půdy vztažená k roku 2015 byla následně klasifikována do třech kategorií svažitosti. Jedním z dílčích cílů této práce je otestovat závislost trvání holé orné půdy na dalších aspektech a jedním z nich je právě svažitost. Kategorie svažitostí byly vytvořeny s ohledem na dotace poskytované státem a vztažené k polím se sklonem větším než  $7^\circ$ . Sklon do  $7^\circ$  pak představuje kategorii středně sklonitých svahů bez dotací a pole se sklonem do  $2^\circ$  reprezentují rovinu, které jsou taktéž bez dotací. Tyto kategorie jsou vyobrazeny na obrázku 3.



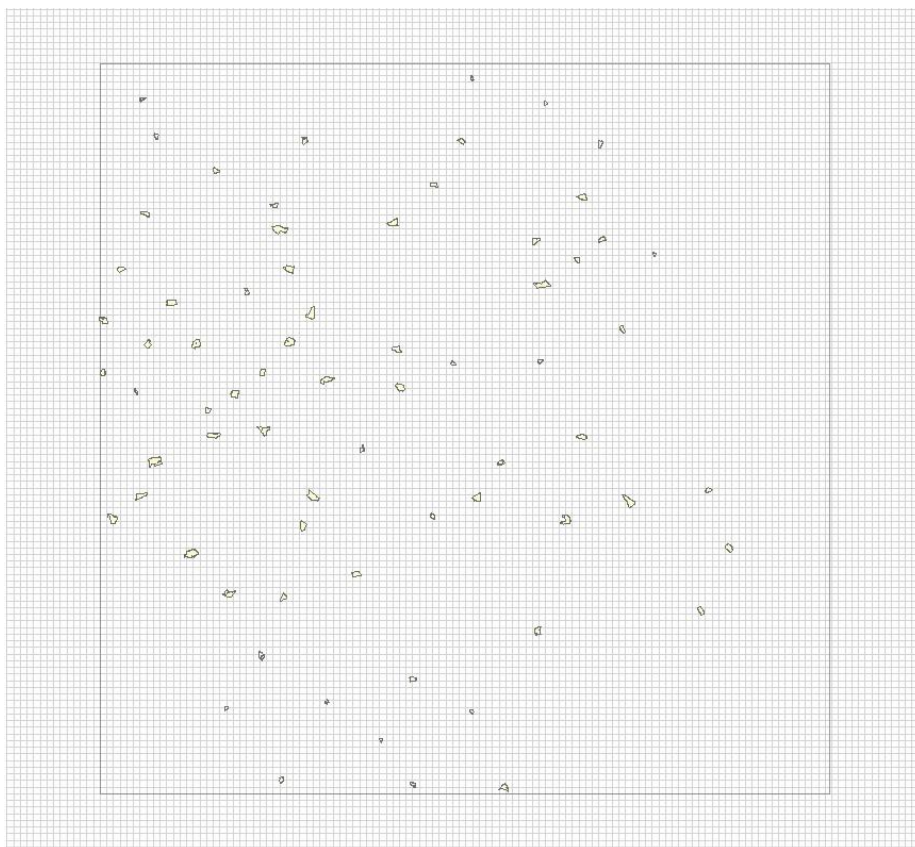
Obrázek 3 - kategorie sklonů polí v zájmovém území

Práce se všemi polygony polí by byla velmi náročná a víceméně i zbytečná. Pro zkoumání daného problému bylo vybráno náhodně 70 polygonů polí pro každou kategorii, což je více než dostačující. Je však nutné zvolit si určité minimální rozestupy, aby náhodným výběrem nedošlo k vybrání takových polí, která by byla hned vedle sebe a pokrývala tak pouze malou část zájmového území. Toho lze docílit vytvořením čtvercové sítě se čtverci o velikosti stran 1x1 kilometrů a vytvořením pravidla, že mezi jednotlivými poli musí být minimálně jeden čtverec rozestup. Toto pravidlo je vizualizováno na obrázku 4.

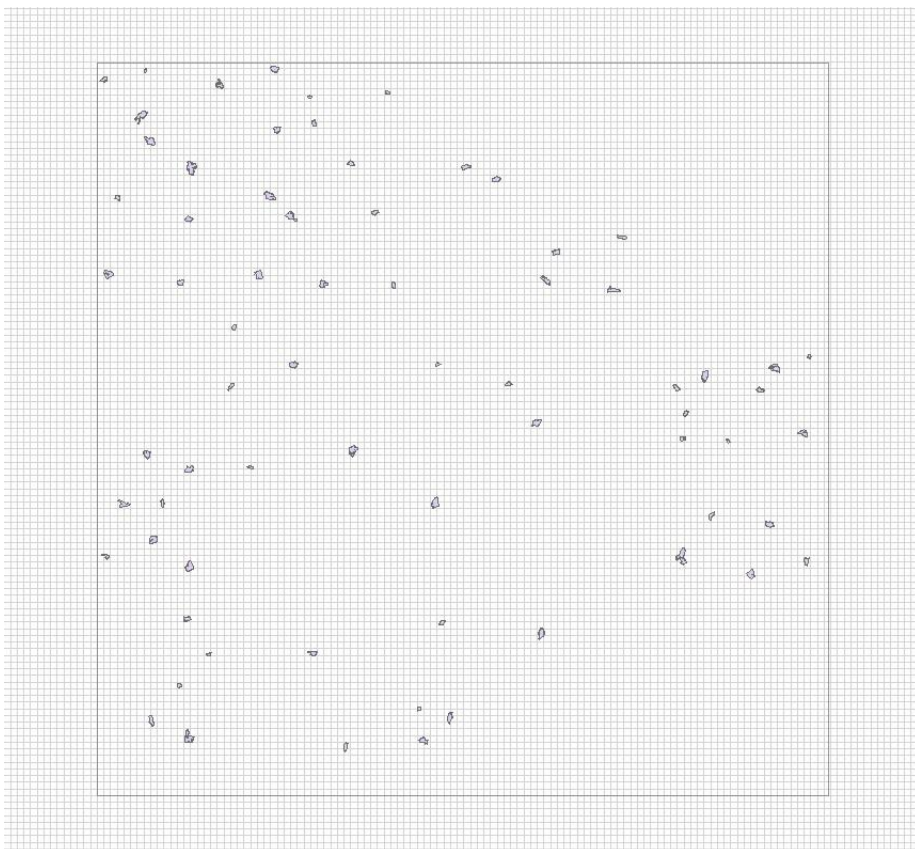


*Obrázek 4 - fishnet 1x1km*

Následující obrázky 5-7 vizualizují náhodný výběr polí ve 3 kategoriích sklonů podle výše uvedeného pravidla kilometrových rozestupů:

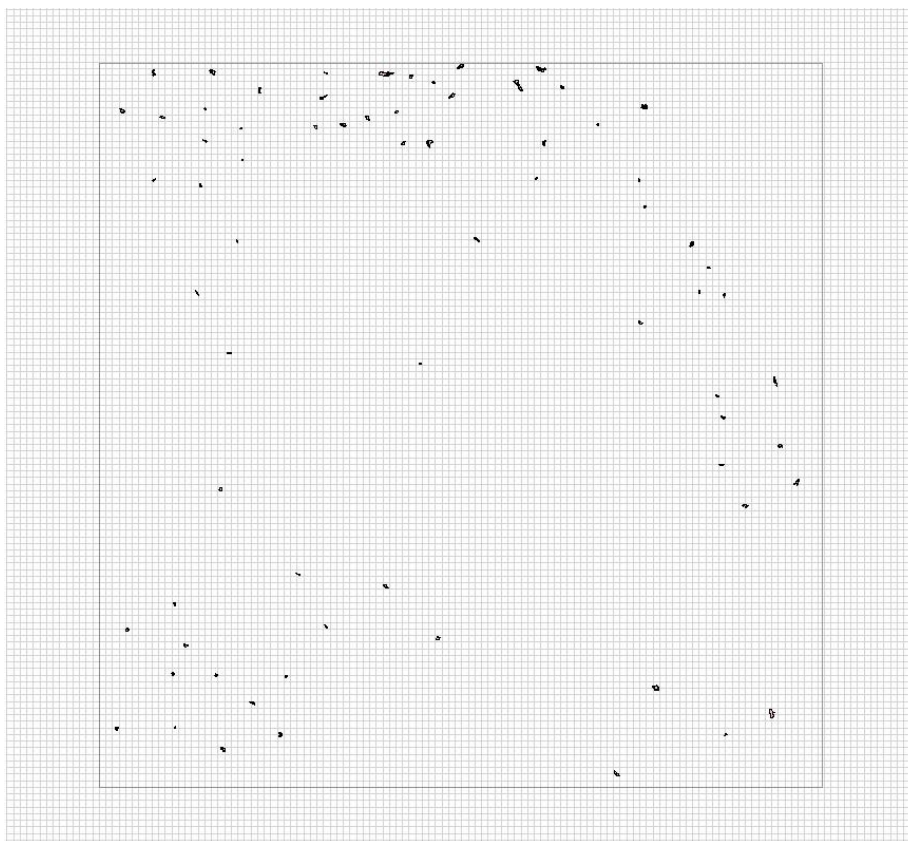


Obrázek 5 - vizualizace náhodně vybraných polí z kategorie sklonu do 1,99 stupňů



Obrázek 6 – vizualizace náhodně vybraných polí z kategorie sklonu od 2 do 7 stupňů





Obrázek 7 - vizualizace náhodně vybraných polí z kategorie sklonu od 7,1 do 9,9 stupňů

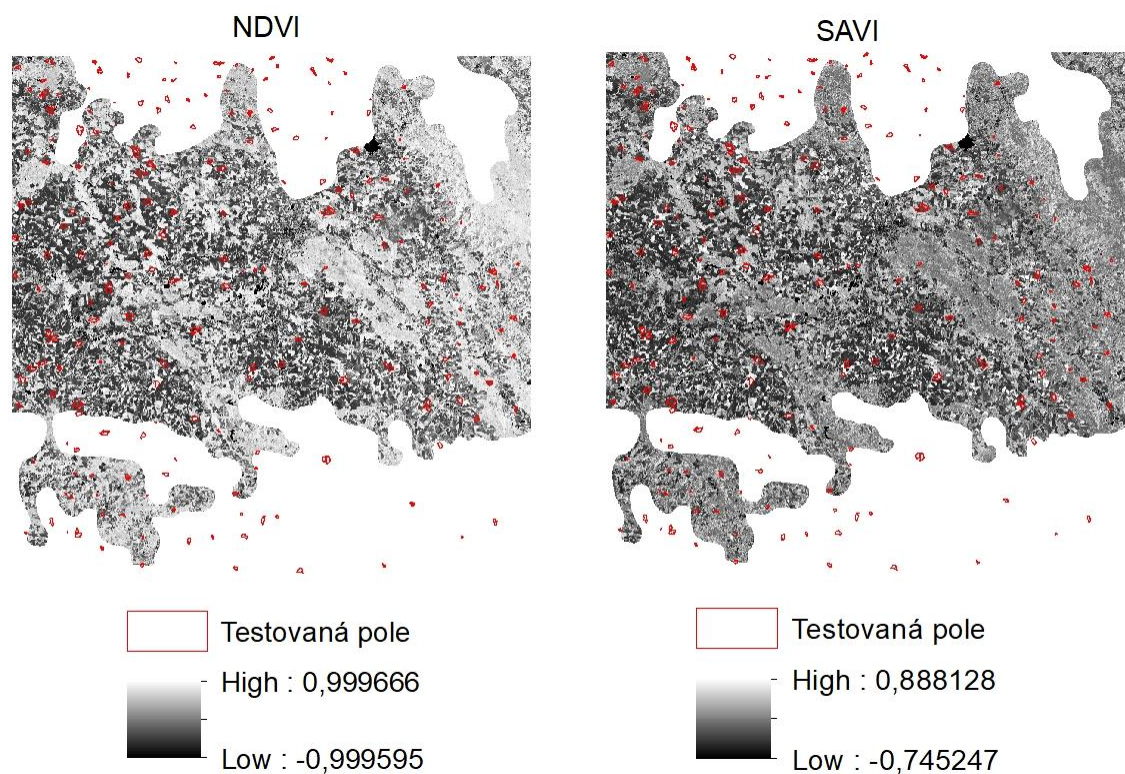
### 3.3. Tvorba rastrů NDVI a SAVI

Pro zjištění odpovědí na hlavní a vedlejší otázky této práce byly vybrány indexy NDVI a SAVI. S dalším důležitým krokem nám pomůže program SNAP. Z každého staženého snímku Sentinel-2 je potřeba vypočítat hodnoty rastrů nejdříve podle vzorce NDVI a následně podle vzorce SAVI. Oba vzorce jsou zmíněny výše v rešerši této práce. Vrozená automatizovaná funkce pro výpočty některých vegetačních indexů v programu SNAP nám umožní provést potřebné výpočty bez obav ohledně nesprávného zadání vzorce, vždy je potřeba v případě obou indexů pouze nastavit pásmo NIR=B8 a pásmo Red=B4. Hodnota korekčního faktoru L v případě vegetačního indexu SAVI byla nastavena na defaultní hodnotu 0.5 a podle toho byly také uvažovány základní testované hodnoty thresholdů pro přelom mezi odlišením holé půdy a vegetace pro oba indexy (NDVI=0.24 a SAVI=0.21 podle Huete, 1988). V rámci této práce vždy platí, že hodnoty rastru pod hranicí thresholdu jsou klasifikovány jako holá orná půda a hodnoty nad thresholdem jsou klasifikovány jako vegetace.

### 3.4. Odmaskování oblačnosti

Dalším důležitým krokem potřebným pro co možná nejmenší ovlivnění výsledků oblačností bylo vytvořit polygony kolem neprůhledných mraků a manuálně je

odstranit pomocí programu ArcMap. Původní předpoklad a plán mraky odstranit vrozenou funkcí programu SNAP nakonec nepřipadalo v úvahu, jelikož by jednak bylo nutné převzorkování všech snímků, což by zvětšilo objem dat zhruba na pětinasobek, a navíc funkce odstraňuje pouze „nejsvětlejší“ pixely mraků a jejich okraje tak ponechá ve snímku. Nicméně i tyto okraje mraků značně mohou pozdější výpočty vegetačních indexů na polích ovlivnit, proto byla potřeba je odstranit ručně, jak bylo zmíněno na začátku této podkapitoly. Postup ruční tvorby masek je poměrně časově náročný a definitivně tím ztratíme data pro některá z náhodně vybraných testovaných polí, ale je potřeba tento postup zvolit, pokud chceme na zbylých testovaných polích co nejméně ovlivněné výsledky indexů. Tento postup odmaskování byl zopakován jak na rastrech s vypočteným NDVI, tak na rastrech s vypočteným SAVI. Na obrázku níže můžeme vidět klasický případ, kdy nám z dalších výpočtů kvůli odmaskování oblačnosti několik polí vypadlo. Jedná se o ta mimo rastr v bílém prostoru na obrázku 8.



Obrázek 8 - ilustrační vizualizace odmaskovaných rastrů (červenec 2018)

### 3.5. Výpočty hodnot rastrů NDVI a SAVI na modelových polích

Pro samotné zjištění hodnot indexů na jednotlivých polích bylo potřeba vrstvu se všemi 210 poli použít jako vstupní vrstvu funkce Zonal Statistics v programu ArcMap na odmaskovaných rastrech NDVI a SAVI. Postupně pro všechny snímky s odmaskovanými mraky byly provedeny Zonal Statistics zvlášť pro NDVI a zvlášť

pro SAVI a průměrné hodnoty indexů na jednotlivých polích spolu s informací o sklonu a o rozloze byly uloženy do tabulek. Ty byly následně převedeny do formátu .csv pro umožnění další práce a vyhodnocování sledovaných jevů v programu RStudio.

## 4. Výsledky

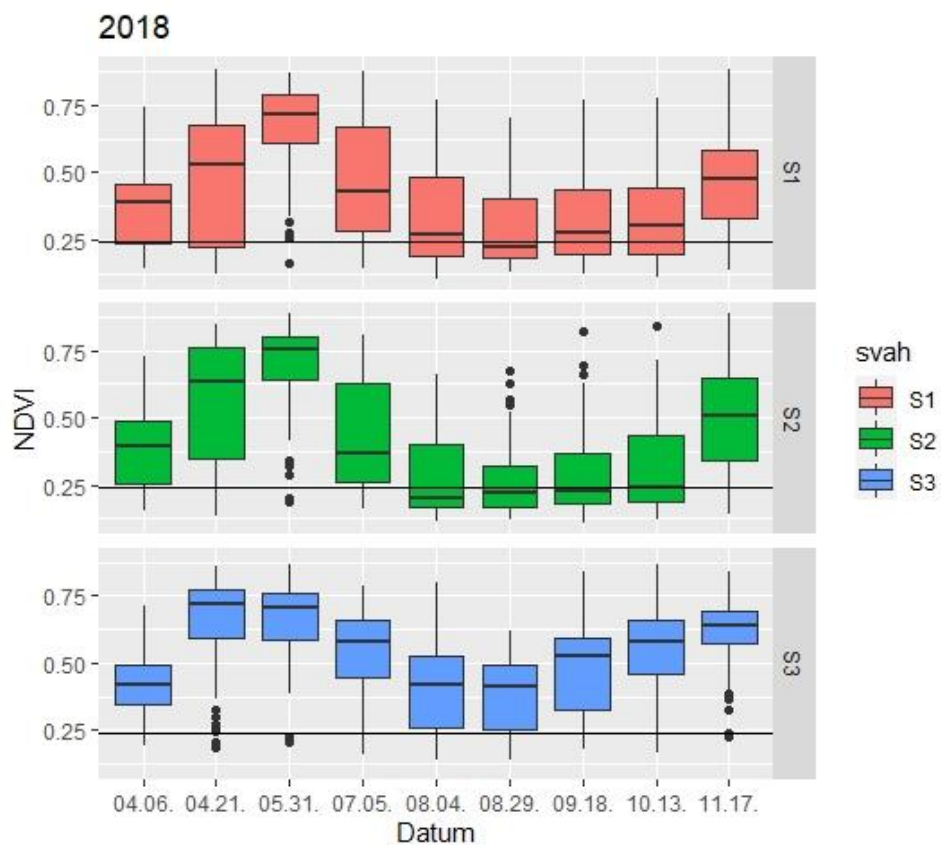
### 4.1. Předpokládané výsledky

Je předpokládáno, že NDVI jakožto jeden z nejjednodušších a nejpoužívanějších indexů má prahovou hodnotu odlišování holé půdy od vegetace nastavenou ideálně a v průběhu výpočtů se s ní nehýbalo. Zároveň kontrola klasifikace holé orné půdy a vegetace v porovnání s RGB kompozity prokázala, že tato hranice je až na zanedbatelné odchylky poměrně přesná, a proto je tato hodnota (NDVI=0.24) považována zároveň i za porovnávací podklad, tzn. jestliže ekvivalentní hodnota pro SAVI v našich podmínkách na naší lokalitě (SAVI=0.21) vykazuje odlišnosti od NDVI, je potřeba jí dále upravit pro ideálnější a přesnější odlišování holé půdy a vegetace. Dále je předpokládáno, že jsou pole obhospodařována tak, aby na nich holá půda téměř nebyla. Je také potřeba zjistit, jestli se trvání holé orné půdy nějak významně liší v rámci jednotlivých sklonových kategoriích. Vše výše zmíněné bylo zjištěno pomocí programu RStudio.

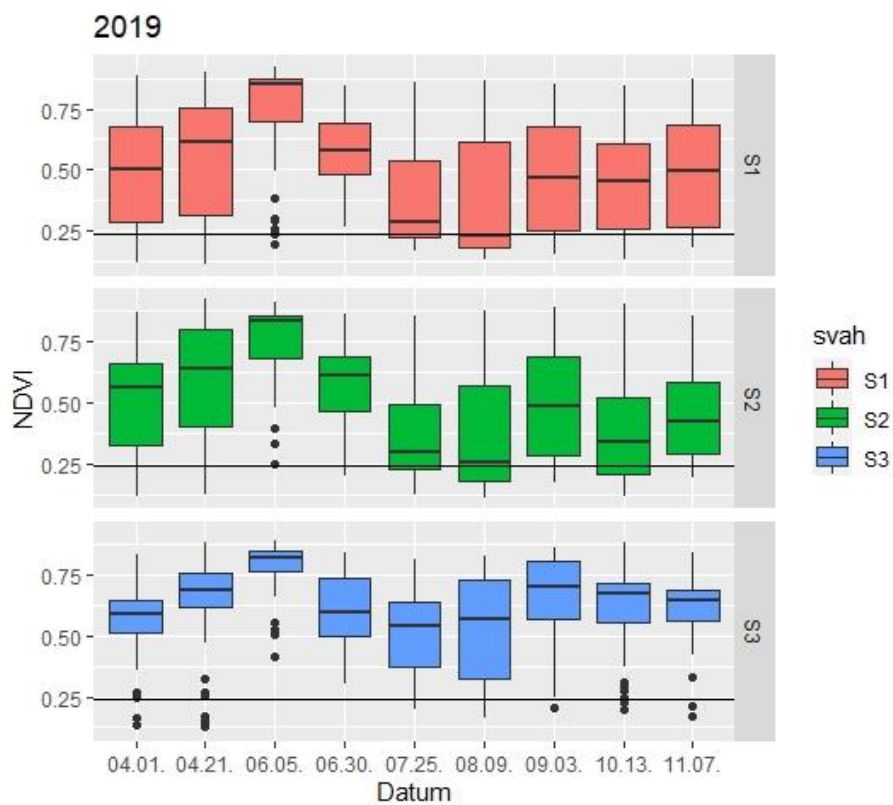
Nejprve je potřeba provést porovnání zjištěných thresholdů NDVI a SAVI z literatury mezi sebou. K tomu byl nejprve použit program RStudio pro vytvoření znázornění vztahu trvání holé půdy v čase (datumy ve formátu MM.DD.) a v různých kategoriích sklonu ( $S1 = 0^\circ-1,9^\circ$ ,  $S2 = 2^\circ-7^\circ$ ,  $S3 = 7,1^\circ-9,9^\circ$ ) pomocí boxplotů a následně hodnoty thresholdů obou indexů porovnáme ještě s RGB kompozitem.

### 4.2. Vizualizace trvání holé půdy podle NDVI

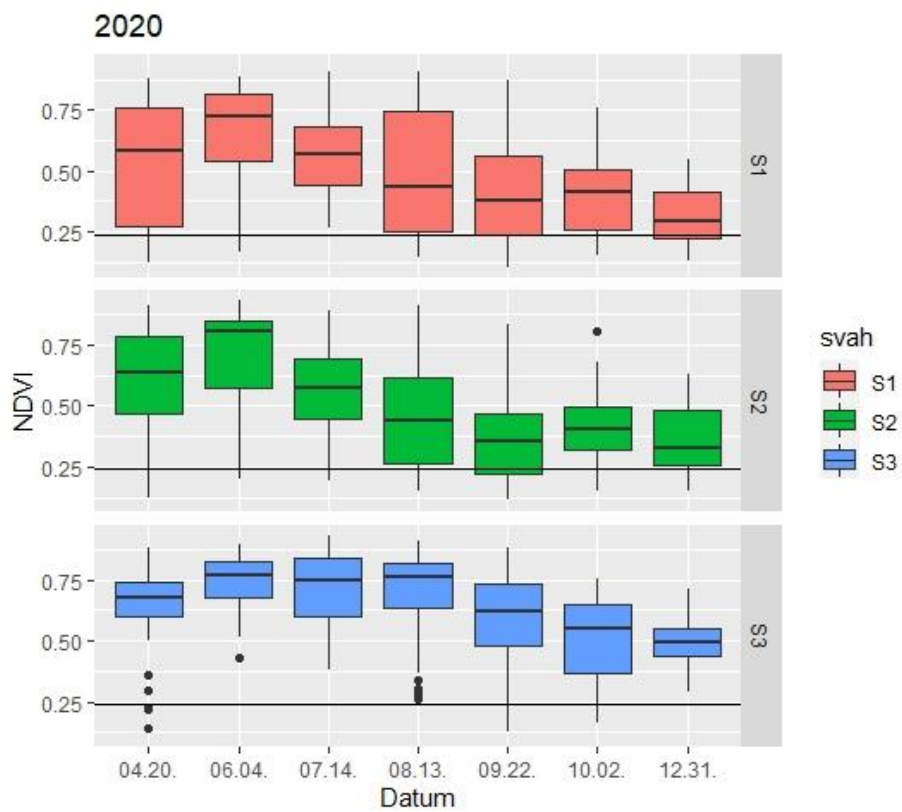
Na následujících několika obrázcích je znázorněn průběh trvání holé půdy podle NDVI v letech 2018-2021. Horizontální čára představuje hodnotu thresholdu 0.24 pro NDVI.



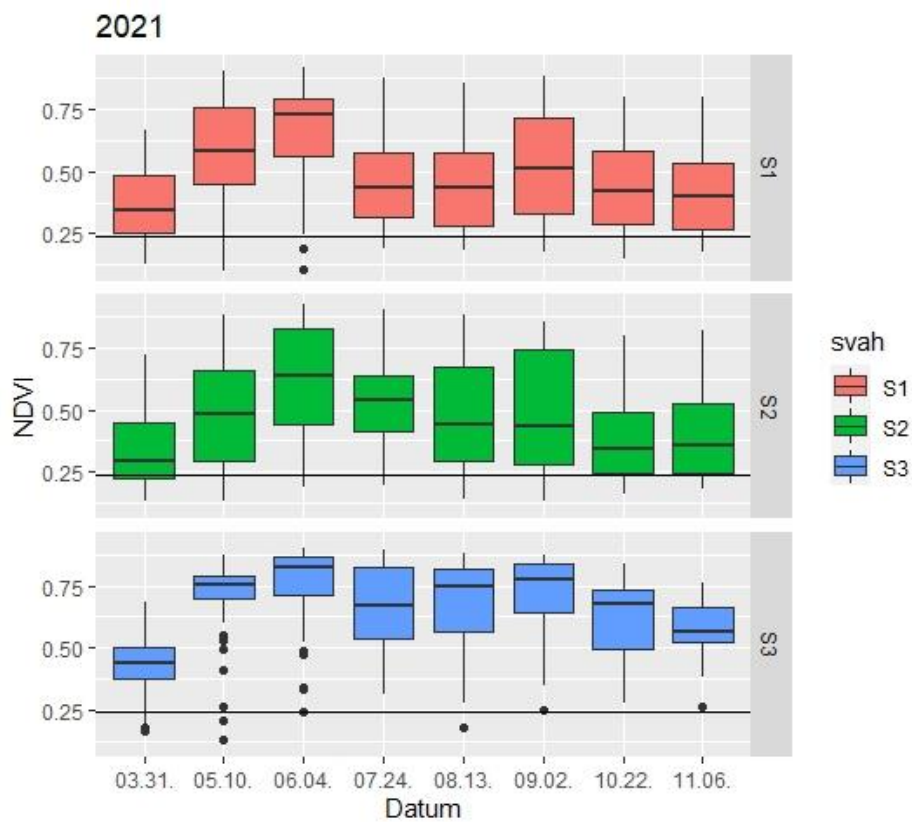
Obrázek 9 - holá orná půda podle NDVI v roce 2018



Obrázek 10 - holá orná půda podle NDVI v roce 2019



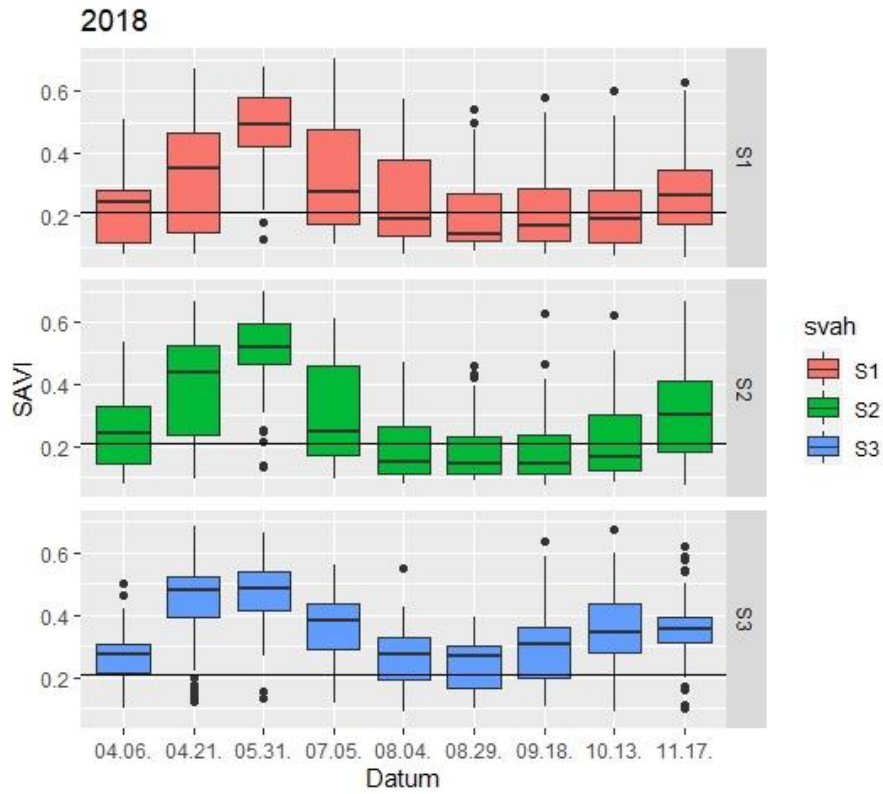
Obrázek 11 - holá orná půda podle NDVI v roce 2020



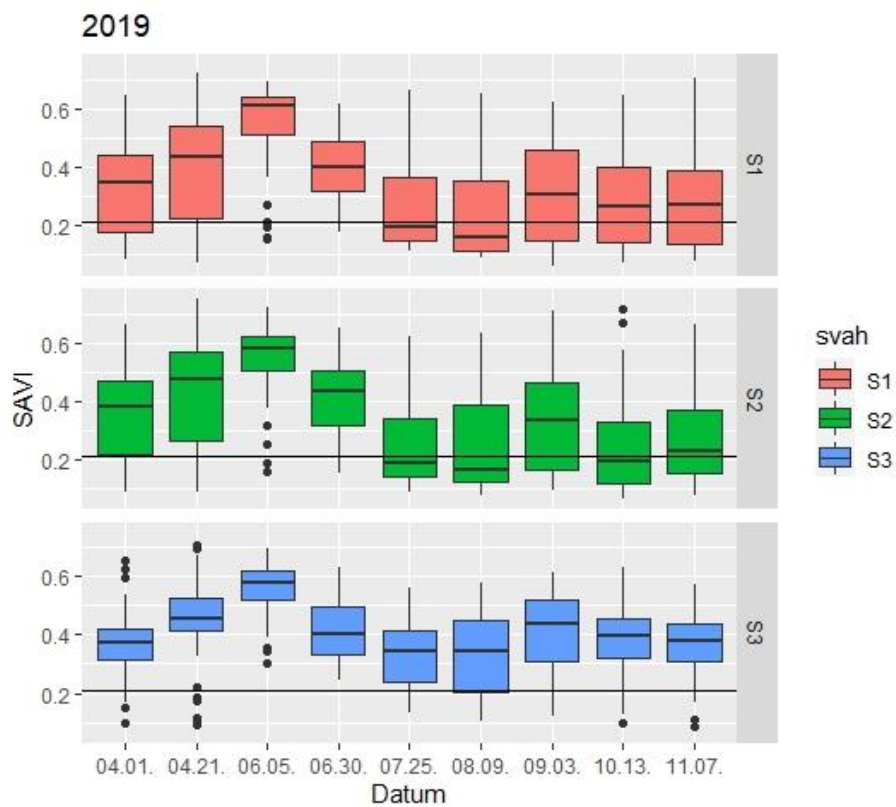
Obrázek 12 - holá orná půda podle NDVI v roce 2021

### 4.3. Vizualizace trvání holé půdy podle SAVI

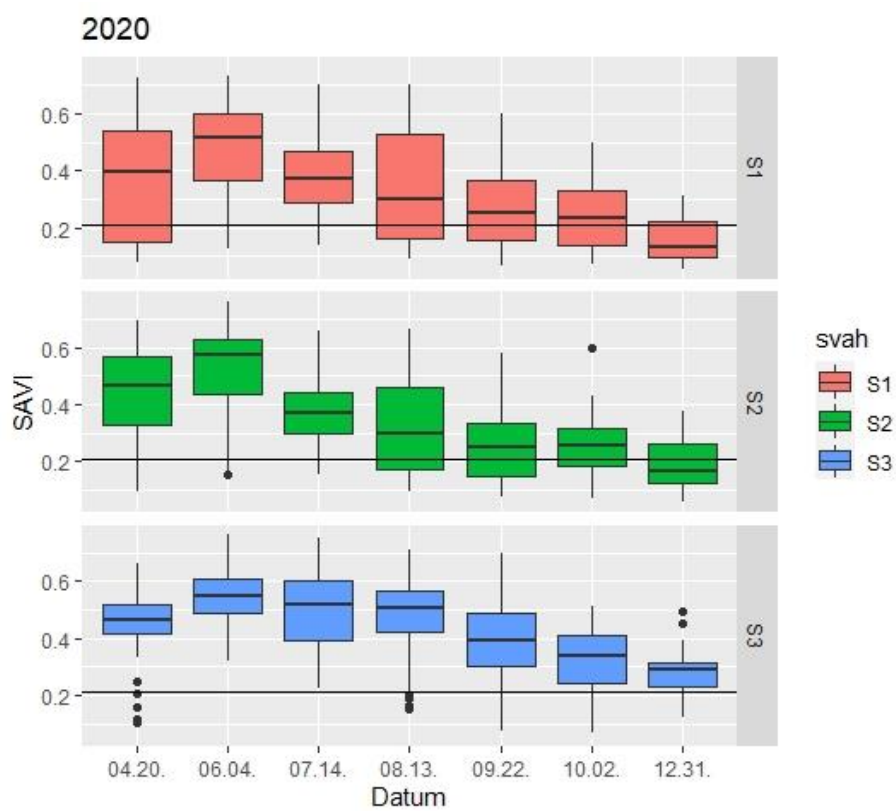
Následně byly provedeny ty samé výpočty v programu RStudio, jen z tabulek s hodnotami rastrů pro SAVI v letech 2018-2021. Hodnoty sklonů v kategoriích S1, S2 a S3 zůstaly samozřejmě stejné a horizontální čára v grafech nyní představuje hodnotu thresholdu 0.21 pro SAVI.



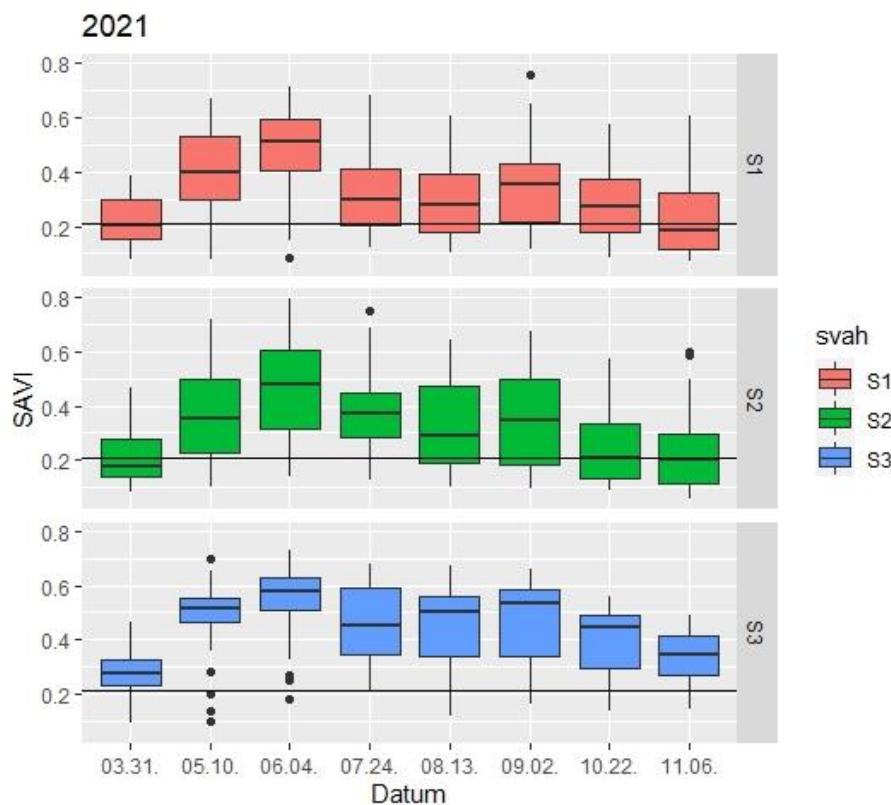
Obrázek 13 - holá orná půda podle SAVI v roce 2018



Obrázek 14 - holá orná půda podle SAVI v roce 2019



Obrázek 15 - holá orná půda podle SAVI v roce 2020



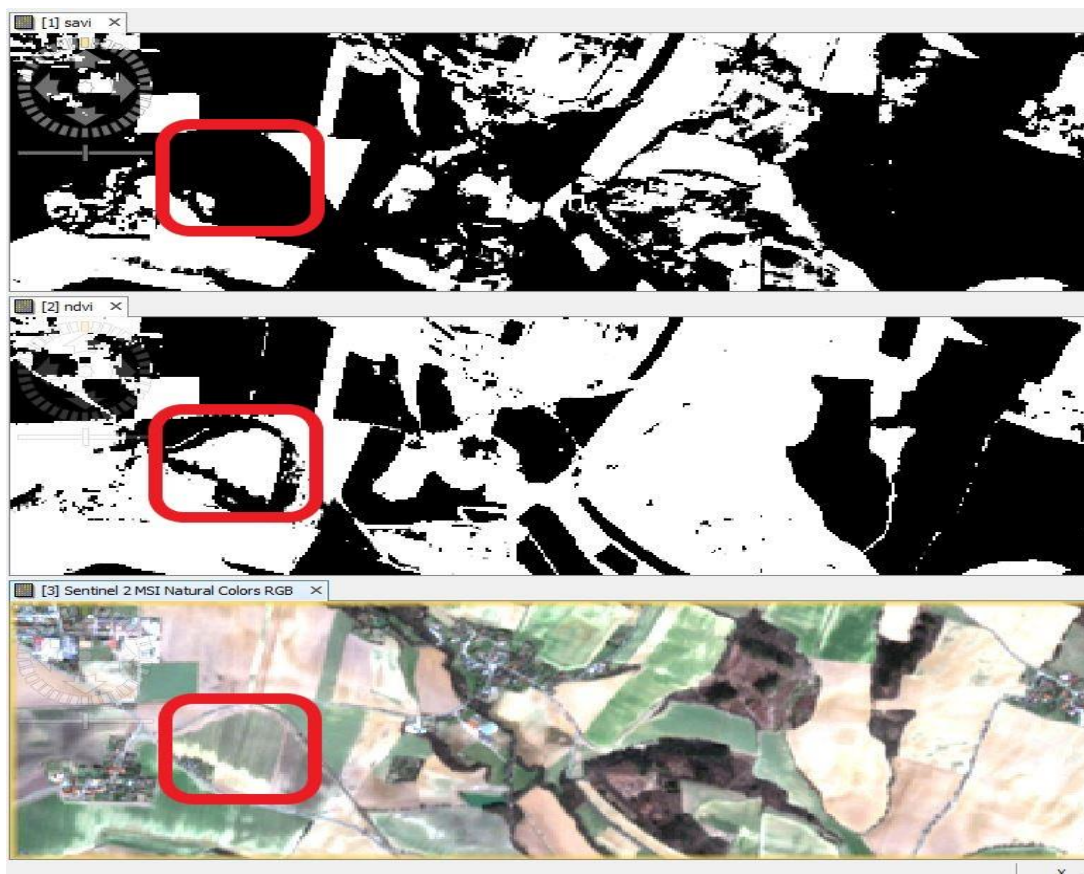
Obrázek 16 - holá orná půda podle SAVI v roce 2021

#### 4.4. Porovnání thresholdů NDVI (0.24) a SAVI (0.21) s RGB kompozitem

Na první pohled z výše zobrazených grafů pro NDVI a SAVI můžeme pozorovat několik věcí. Je zřejmé, že podle NDVI je holé půdy obecně napříč všemi testovanými měsíci skutečně poměrně málo. Nejméně holé půdy podle těchto grafů bylo zaznamenáno přibližně v měsících květen-červenec, což by dobře korespondovalo s faktem, že většina zemědělských polních plodin je právě v tomto období ve fázi růstu, nebo jsou ve fázi před sklizní. Pokud bereme v potaz jednotlivé kategorie svažitosti, nejméně holé orné půdy se nachází na polích se sklonem větším, než  $7,1^\circ$ .

Obecně je také možné si povšimnout poměrně podezřele vysokého nárůstu holé orné půdy napříč všemi měsíci i všemi kategoriemi v SAVI oproti NDVI. Dalším krokem tedy muselo být porovnání těchto dvou prahových hodnot indexů s RGB kompozitem, což je znázorněno na obrázku níže, aby bylo vidět, jestli si index SAVI holou půdu s něčím mylí, nebo ne. Černá barva na následujících snímcích znamená holou půdu, bílá znamená vegetaci. Následující vizualizace porovnávají vždy 3 snímky pochází z dubna roku 2018.





Obrázek 17 - zobrazení problémově klasifikovaného místa (nahore SAVI, uprostřed NDVI, dole RGB)

Bylo provedeno vizuální hodnocení dané lokality a porovnávání indexů NDVI a SAVI s RGB kompozitem. V horní části obrázku 17 je možné spatřit jedno z mnoha problémově klasifikovaných míst indexu SAVI. Podle RGB snímku je oblast v červeném ohraničení viditelně a zřetelně pokrytá vegetací, což ale SAVI s thresholdem 0.21 nedokázal odlišit. NDVI toto území podle svého thresholdu 0.24 klasifikoval správně jako vegetaci, což můžeme považovat za další důkaz funkčnosti thresholdu 0.24. Toto je pouze jedno z mnoha míst, kde k podobnému konfliktu došlo, a proto je potřeba stanovit novou hranici thresholdu pro SAVI.

Opět bylo provedeno vizuální přezkoumání různých prahových hodnot pro SAVI a nejlépe se vizuálně osvědčil nový threshold 0.15, což je zobrazeno na obrázku 18.



Obrázek 18 - zobrazení stejného místa z obrázku 18 s nastavením nové prahové hodnoty pro SAVI = 0.15

Jak je z vizuálního hodnocení výše zřejmé, problémové místo v horní části obrázku 18 je až na zanedbatelnou odchylku už správně klasifikováno jako vegetace. Nyní je předpoklad prostý – budou-li hodnoty grafů nového thresholdu SAVI = 0.15 podobné hodnotám NDVI s thresholdem 0.24, znamená to, že index už po úpravě správně klasifikuje holou půdu a vegetaci a je tak možné ho používat. Nutno znovu připomenout, že hodnota tohoto nového SAVI thresholdu byla nastavena i porovnávána v defaultních podmínkách obou indexů a korekční faktor L byl pro SAVI nastaven na defaultní nejpoužívanější hodnotu 0.5, což značí průměrnou hustotu, nebo neznámou hustotu vegetace. V extrémně vegetačně hustých nebo naopak vegetačně řídkých oblastech by se správná hodnota thresholdu pro SAVI mohla lišit.

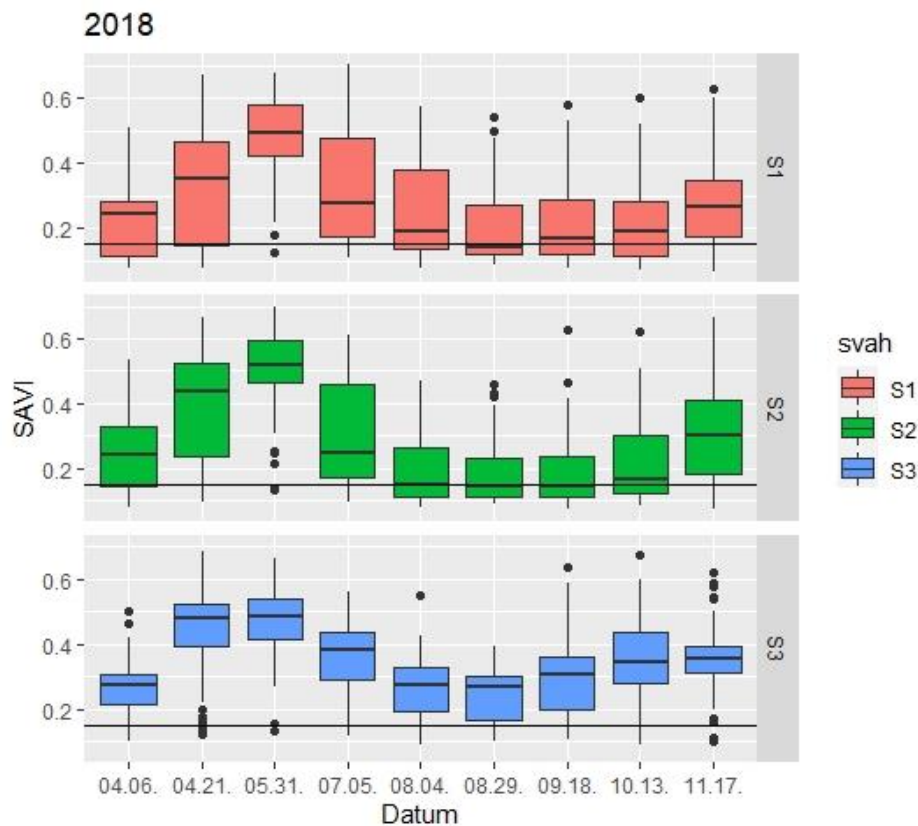


Obrázek 19 - vizualizace problémově klasifikovaného místa indexem NDVI

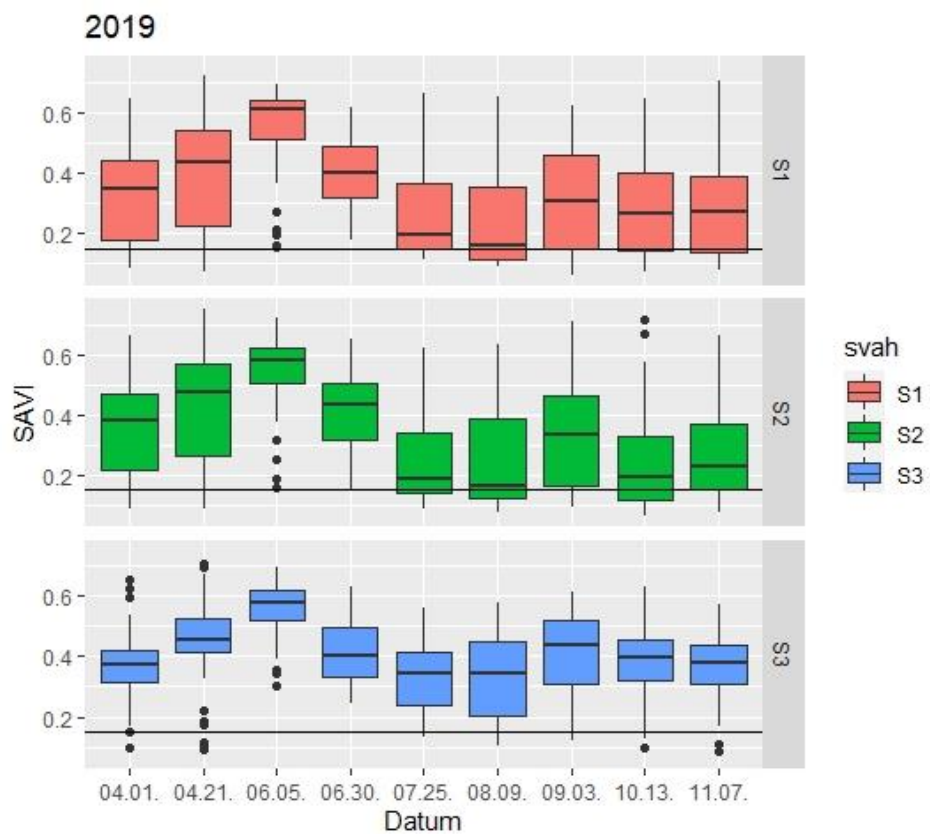
Problém špatné klasifikace nižších vegetačních pokryvů jsme již vyřešili a stanovili thresholdy pro NDVI (0.24) i pro SAVI (0.15). Při dalším porovnávání obou indexů s RGB kompozity byl však objeven ještě jeden problém s klasifikací určitých území, a to konkrétně holých půd, které jsou výrazně tmavší než ostatní. Může to být způsobeno odlišným složením, vlhkostí nebo odlišnou světlostí těchto půd (Huete, 1985). Problémové území je ohraničeno červeně na obrázku 19 výše. V prostřední části obrázku je na vizualizaci NDVI vidět, jak je jinak barevná holá půda označena chybně za vegetaci. Oproti tomu ale v horní části obrázku můžeme vidět, jak si nový threshold pro SAVI i s touto chybou poradil. To můžeme brát jako další důkaz jeho funkčnosti v našich podmínkách na našem území.

#### 4.5. Vizualizace trvání holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI

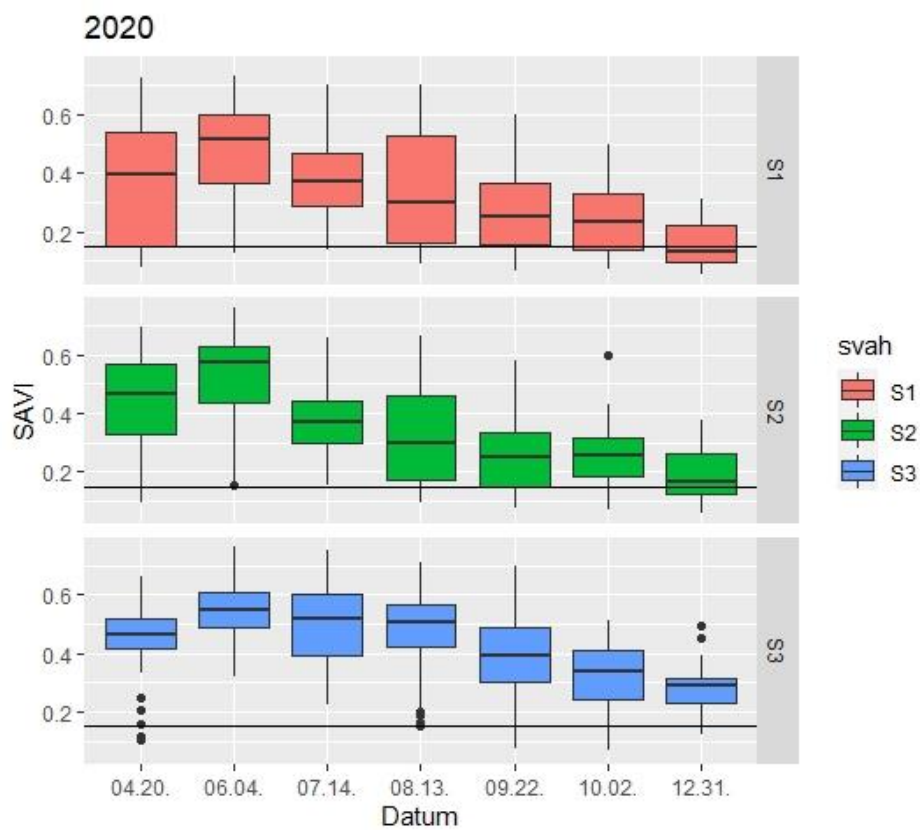
Nyní, když jsme pomocí vizuálních analýz jednotlivých indexů v porovnání s RGB kompozity došli k názoru, že nejlepším klasifikátorem holé orné půdy v našich podmínkách na našem modelovém území je vegetační index SAVI a jeho nový threshold 0.15 jako prahová hodnota odlišení holé orné půdy od vegetace je potřeba pomocí grafů znovu zobrazit vývoj holé orné půdy v jednotlivých kategoriích svažitosti, jako jsme to udělali u předešlých thresholdů indexů. Na výsledek vizualizace podle nového thresholdu SAVI se můžeme podívat na obrázcích 20-23.



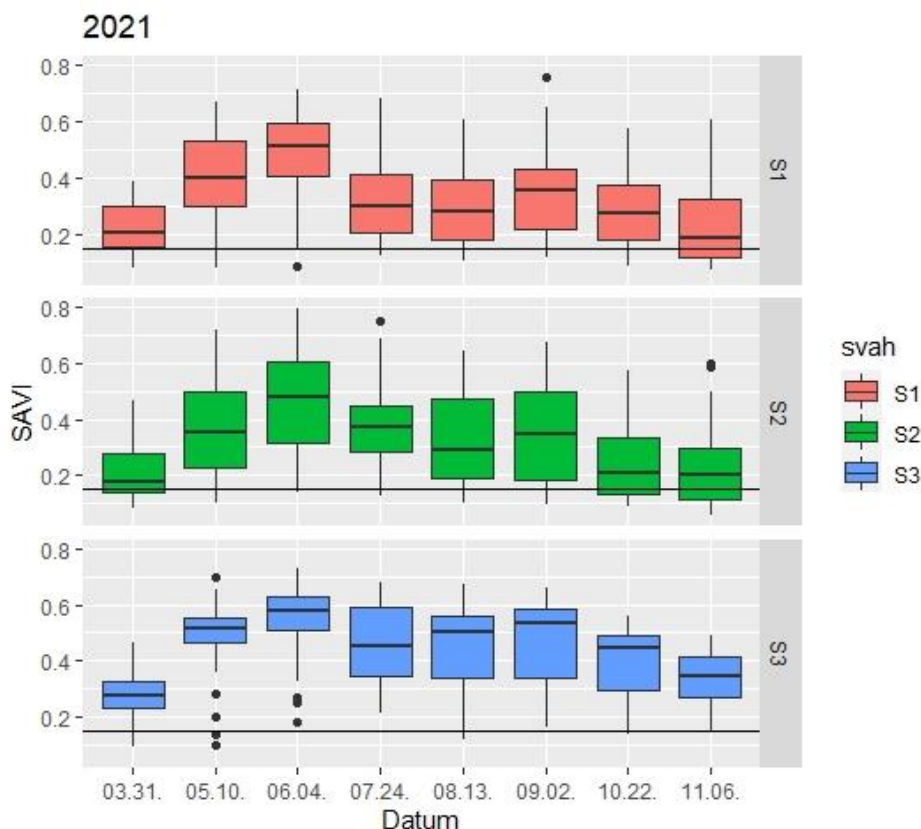
Obrázek 20 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2018



Obrázek 21 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2019



Obrázek 22 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2020

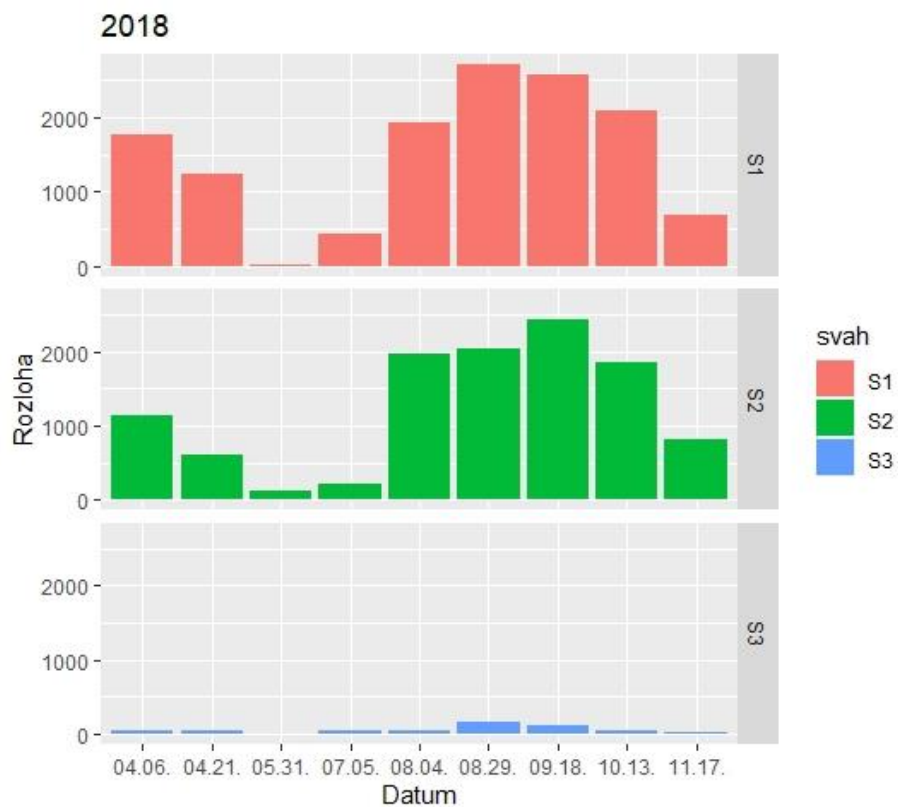


Obrázek 23 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2021

Na první pohled jsou grafy pro nový threshold SAVI a pro NDVI podobné. Mezi těmito dvěma grafy je zřetelně možné pozorovat stejné trendy, které se napříč indexy nezměnily, jako například minimální přítomnost holé orné půdy pro kategorii svažitosti S3. I při porovnávání tohoto nového thresholdu s RGB kompozity byla prokázána vysoká přesnost a dobrá schopnost správně klasifikovat holou ornou půdu a vegetaci. Hodnotu thresholdu SAVI=0.15 tedy můžeme považovat za dobrý klasifikátor holé orné půdy a vegetace.

#### 4.6. Znárodnění celkové rozlohy holé orné půdy podle SAVI

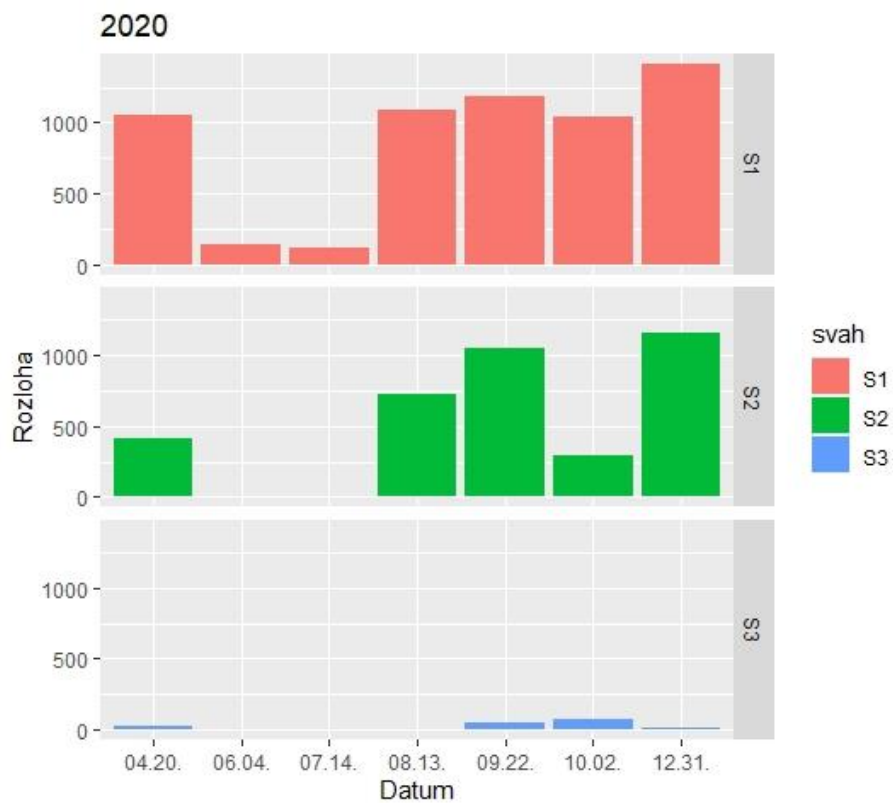
Nyní je po splnění hlavního cíle, tj. určení ideálního vegetačního indexu a jeho thresholdu pro odlišení holé orné půdy a vegetace ještě potřeba zjistit celkovou rozlohu holé orné půdy pro finální vizualizaci, konkrétně v hektarech. K tomu využijeme podobných postupů a grafů v programu RStudio jako když jsme se snažili vizuálně porovnat thresholdy indexů a průběh holé orné půdy v čase a kategoriích svažitosti. Nyní budeme opět porovnávat holou ornou půdu v čase a svažitostních kategoriích, ale díky přesným hodnotám celkových rozloh již budeme mít lepší povědomí o tom, kolik holé orné půdy na území v určitých měsících a svažitostních kategoriích skutečně je.



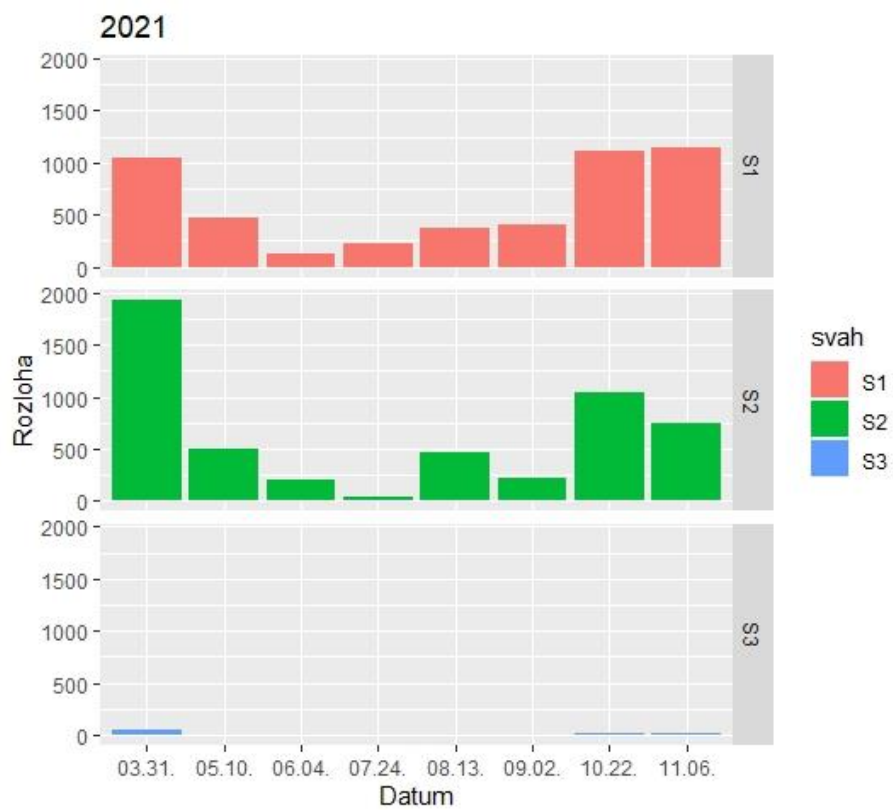
Obrázek 24 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2018)



Obrázek 25 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2019)



Obrázek 26 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2020)



Obrázek 27 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2021)



I z těchto grafů vyobrazujících celkovou rozlohu holé orné půdy je zřejmé, jak se rozloha holé orné půdy na nejsvažitějších polích pohybuje ve velmi malých číslech. Lze tedy tvrdit, že sklon hraje poměrně významnou roli v otázce holé orné půdy, jelikož nejsvažitější pole jsou obhospodařována tak, aby na nich holá půda téměř nebyla, a tím pádem je i vedlejší cíl této práce možné považovat za splněný.

#### 4.7. Vedlejší výsledky

Pro ověření dalších zjištěných parametrů, které nebyly přímým předmětem zkoumání této práce, nám může posloužit tabulka agrotechnických lhůt hlavních polních plodin v ČR, která je dostupná k nahlédnutí v příloze č.1 a všechny níže popsané výsledky s ní souvisí. Nutno podotknout, že tabulku nelze brát úplně doslova, jelikož doba sklizně či setí se může v realitě z nějakých důvodů lišit, a proto tabulka slouží spíše jako přibližný doklad správnosti výsledků.

Jedním z opakujících se trendů, který nebyl hlavním ani vedlejším předmětem analýz v této práci je občasný nárůst rozlohy holé orné půdy především v kategoriích sklonu S1 a S2 v období cca od konce července do září. Toto samotné zjištění dobře reflektuje období sklizně některých obilnin, olejnin, okopanin a luskovin. V případě, že se rozloha holé orné půdy následně od září do listopadu až prosince zvětšila nebo zůstala přibližně stejná, je pravděpodobné, že se na daných polích v tomto období nic nezaselo. To odpovídá lhůtám např. pšenice jarní, ovesa, většiny olejnin a luskovin. Pokud se naopak rozloha holé půdy začala v některých letech od září zmenšovat, může to znamenat, že zde došlo k zasetí ozimých plodin, jako např. pšenice ozimé, ječmene ozimého, žita ozimého nebo křížené plodiny triticales ozimého. Napříč kategoriemi svažitosti S1 a S2 a všemi zkoumanými roky platí, že nejméně holé orné půdy bylo zaznamenáno v období od začátku dubna do přibližně poloviny července, což lze potvrdit při pohledu na tabulku v příloze č.1. Všechny zde uvedené plodiny (kromě losu jarního a brambor raných, které se v tomto období občas už sklízí) vykazují fázi růstu a je tím potvrzeno, že se v daném období v daných kategoriích opravdu nenachází téměř žádná holá půda.

## 5. Diskuse

Při zpracování dat pro potřeby této práce vyplynulo na povrch několik problémů, které ztížily celkový průběh výpočtů a analýz. Eliminace těchto problémů by značně zvýšila přesnost výsledků, ale není reálné celou práci vytvořit tak, aby do výpočtů a analýz nevstoupil alespoň nějaký rušivý element ovlivňující výsledky.

Hlavním problémem, se kterým jsem se potýkal už od výběru snímků mého území, byla bezesporu většinou velmi vysoká oblačnost, což má samozřejmě negativní dopad na přesnost výsledků, stejně jak popisuje v závěru své práce např. Castaldi (2021). Pro představu – ideální míra oblačnosti by měla být na základě přibližných vizuálních hodnocení maximálně cca 5-10 %, aby nedošlo k ovlivnění výsledků formou znemožnění provádění analýz na polích zakrytých oblačností. To ale v praxi není reálné a snímky jsou většinou zatížené oblačností o procentuální míře až kolem 50 %, což může ovlivnit výsledky už poměrně citelně. To byl také jeden z důvodů, proč nebylo možné udržet přesně měsíční rozestupy mezi snímky v hlavním sledovaném období. Právě kvůli minimalizování rušivých vlivů oblačnosti byl vždy vybrán takový snímek, aby byly výsledky oblačností ovlivněny, tj. aby byla procentuální míra oblačnosti co nejmenší a zároveň byl rozestup co nejblíže jednomu měsíci. Výsledky by tedy mohly být přesnější, pokud by snímky zájmového území byly kompletně bez oblačnosti, jelikož by se na území vždy v každém sledovaném měsíci nacházela všechna testovaná pole.

Další mírná odchylka lehce ovlivňující výsledek byla zjištěna při jedné z vizuálních prohlídek testovaných polí nad RGB kompozitem v jednotlivých měsících. Někdy je totiž možné, že polygon půdního bloku podle LPIS je v realitě rozdělen majitelem na části, z nichž jedna je holá a druhá pokrytá vegetací. Proto byly pro každé pole počítány průměrné hodnoty vegetačních indexů na nich a tedy např. další rozdělení těchto polí na takové polygony, aby byl každý buďto pouze holý, nebo pouze pokrytý vegetací by bylo dobré z hlediska zpřesnění výsledků, avšak z časového hlediska by byl tento postup náročnější a také by se zaprvé už nejednalo o náhodný výběr polí a zadruhé by v případě polí ve stejné svažitostní kategorii mohlo dojít k jejich sousedění, což bylo pravidlem o minimálních kilometrových rozestupech mezi jednotlivými poli v rámci stejné kategorie zamítnuto.

Značně lepší vizualizace rozložení hodnot indexů i rozloh holé orné půdy by bylo možné dosáhnout analyzováním více snímků pro každý daný rok, např. klidně 3-4 snímky pro jeden měsíc, což frekvence přeletů Sentinelu-2 nad stejným územím umožňuje, avšak jednalo by se o poměrně náročnou analýzu jak z časového hlediska,

tak z hlediska vysokého objemu dat a nutno znovu podotknout, že v realitě není možné všechny snímky pořídit zcela bez oblačnosti. Množství snímků zvolené pro potřeby této práce bylo prokonzultováno s vedoucí práce a schváleno jako dostačující.

Při zvolení právě indexů NDVI a SAVI byl klíčový fakt, že oba indexy jsou poměrně často využívané. Konkrétně klasifikace typů zemského povrchu a hledání holých půd na základě hodnot NDVI byla hlavním terčem zájmu již několika prací. Taufik et al. (2016) jako jeden z mnoha prokázal, že NDVI je schopen rozlišit holou půdu od vegetace s velmi uspokojivou přesností, což bylo prokázáno i v mé práci jeho vizuálním porovnáním s RGB snímkem, tudíž v této práci nebylo v rámci prvních porovnávacích analýz o přesnosti jeho defaultního thresholdu pochybováno. Oproti tomu index SAVI pro tento účel nebyl zatím příliš otestován. Z důvodu schopnosti indexu SAVI oproti NDVI lépe odolávat rušivým vlivům různorodé barevnosti holých půdních bloků (Huete, 1988) a z důvodu poměrně malého množství prací, které by se testováním thresholdů SAVI pro odlišování holých půd a vegetace zabývaly jsem se rozhodl pro otestování SAVI a následně jeho vizuální porovnání s NDVI.

Možnost otestovat více indexů by také dozajista vedla ke zpřesnění výsledků, jelikož bychom měli k porovnání více rastrů jednotlivých indexů, ale takový přístup by byl velmi náročný jednak z hlediska obrovského objemu dat, a také z časového hlediska.

Na základě výsledků již provedených výzkumů (např. Singh et al., 2004) je známo, že NDVI je do určité míry ovlivňováno odlišnými barvami různých typů půd. Toto ovlivnění je vzhledem k cílům této práce minimální a poměrně zanedbatelné, což až na malé odchylky poměrně dobře reflektuje podobnost rozložení hodnot mezi grafy NDVI na obrázcích 9-12 a mezi grafy pro SAVI na obrázcích 20-23. Nicméně pro minimalizování těchto odchylek spočívajících v někdy špatné schopnosti NDVI klasifikovat některé typy holých půd jako skutečně holé, byl nakonec za nejlepší označen klasifikátor SAVI s nově nastaveným thresholdem a byl tak splněn hlavní cíl práce.

Výsledek vedlejšího cíle této práce byl uspokojivým a milým zjištěním. Téměř nulová rozloha holé orné půdy ve svažitostní kategorii nad 7° dokazuje, že pole splňující toto kritérium jsou obhospodařována tak, aby se na nich holá půda téměř nevyskytla. Stejného výsledku se ve své práci dopátral i Sklenička et al. (2015), který dokázal, že pole s největším sklonem jsou obhospodařována nejpečlivěji z důvodu motivace dotacemi vztaženými na půdní bloky právě se sklonem nad 7°.

## 6. Závěr

Na modelové lokalitě o rozloze jedné snímkové dlaždice Sentinel-2 s kódem R122\_T33UWR jsem provedl analýzy, jejichž hlavním cílem bylo zjistit kvalitu vegetačních indexů jako klasifikátorů holé orné půdy a vegetace. Vedlejším cílem této práce bylo zjistit, zdali rozloha holé orné půdy nějakým způsobem závisí na sklonu jednotlivých půdních bloků.

Zvolené klasifikační indexy NDVI a SAVI byly porovnány mezi sebou a s RGB snímky. Došlo k přezkoumání původních doporučených thresholdů pro jednotlivé indexy podle Huete (1988) a bylo zjištěno, že ačkoliv NDVI má až na drobné nepodstatné odchylky v klasifikaci prahovou hodnotu nastavenou správně, ekvivalentní hodnota indexu SAVI vykazovala již poměrně značné odchylky od reality. Na základě postupného vizuálního přezkoumávání RGB kompozitů a testování několika nových thresholdů se hodnota 0,15 pro SAVI ukázala jako nejlepší kompromis a dokázala oproti NDVI dokonce na půdních blocích správně klasifikovat i různě barevnou holou ornou půdu jako skutečně holou, díky čemuž je oproti hodnotě 0.24 pro NDVI index SAVI považován za lepší klasifikátor holé orné půdy a vegetace.

Na základě úspěchu indexu SAVI jako přesného klasifikátoru byla podle jeho hodnot spočítána celková rozloha holé orné půdy ve zkoumaném období a bylo zjištěno, že opravdu existuje spojitost mezi sklonem půdních bloků a celkovou rozlohou holé půdy na nich. Ačkoliv se rozlohy napříč kategoriemi S1 a S2 příliš nelišily, kategorie S3 se ve všech testovaných letech vyznačovala velmi malým množstvím půdních bloků s holou ornou půdou na nich.

Informace ověřené hlavními i vedlejšími analýzami v této práci mohou v budoucnu hrát pomocnou roli v odhadování přítomnosti takových půdních bloků, které by mohly být náchylné k erozi díky jejich časté holosti. Možnosti dálkového průzkumu Země provádět výzkumy, jako byl tento, má v oblasti zkoumání eroze velký potenciál se rozvíjet, ať už kvůli velkému množství dostupných družicových dat, tak i kvůli neustále se rozvíjející technice a optimalizování již existujících vegetačních indexů.

## 7. Seznam použitých zdrojů

**Amundson, Ronald, Asmeret Asefaw Berhe, Jan W. Hopmans, Carolyn Olson, A. Ester Sztein, Donald L. Sparks. (2015).** Soil and human security in the 21st century. Science [online]. Dostupné z: doi:10.1126/science.1261071

**Anys, H. (1991).** Utilisation des données de télédétection dans un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant d'oued Aricha, (Settat, Maroc). Mémoire de maîtrise en télédétection, Département de géographie et télédétection, Str. 100.

**Avery, T. E., and G. L. Berlin. (1992).** Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation, 5th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

**Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A. R. (1995).** A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 13. Str. 95-120

**Baret, F. (1986).** Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud Orsay. Str. 182

**Baret, E, Guyot, G. and Major, D. J. (1989).** TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing. Vancouver, Canada. Str. 1355-1358.

**Castaldi, Fabio. (2021).** Sentinel-2 and Landsat-8 Multi-Temporal Series to Estimate Topsoil Properties on Croplands. Remote Sensing [online] 13, no. 17: 3345. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13173345>

**Cierniewski, Jerzy, Jean-Louis Roujean, Jarosław Jasiewicz, Sławomir Królewicz. (2021).** Seasonal Net Shortwave Radiation of Bare Arable Land in Poland and Israel According to Roughness and Atmospheric Irradiance. Remote Sensing [online]. Dostupné z: doi:10.3390/rs13101897

**Colombo, S.; Hanley, N.; Calatrava-Requena, J. (2005).** Designing policy for reducing the off-farm effects of soil erosion using choice experiments. J. Agric. Econ. Str. 81–95.

**Cyr, L. (1993).** Apport des indices de végétation pour l'évaluation de la couverture du sol en vue d'une modélisation spatiale de l'érosion. Mémoire de maîtrise en télédétection. Département de géographie et télédétection. Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, Str. 160.

Český statistický úřad ©, 2010: Metodické vysvětlivky II. [online]. [cit. 2022-02-06]. Dostupné z:  
<https://www.czso.cz/documents/10180/20566807/212911m.pdf/ef1f9c7b-3b7d-49e7-a63c-26ccab94b8b5?version=1.0>

**Deering, D. W., Rouse, J. W., Haas, R. H. and Schell, H. H. (1975).** Measuring "forage production" of grazing units from Landsat-MSS data. Proceedings of the Tenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment. ERIM, Ann Arbor, Michigan, USA. Str. 1169-1198.

**Demattê, J.A.M.; Fongaro, C.T.; Rizzo, R.; Safanelli, J.L. (2018).** Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. *Remote. Sens. Environ.* Str. 161–175.

**Dobrovolný, P. (1998).** Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu. Brno: Masarykova univerzita. ISBN 80-210-1812-7.

ESA – Sentinels ©, nedatováno: Sentinels [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z:  
[https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Operations/Sentinels](https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinels)

**Escadafal, R., Huete, A. R. and Post, D. (1990).** Estimating soil spectral properties (visible and NIR) from color and roughness field data. Proceedings of the 23rd International Symposium on Remote Sensing of Environment. Bangkok, Thailand.

**Escadafal, R. and Huete, A. R. (1991).** Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. Paris. Str. 1385-1391.

**Gamba, P.; Acqua, F.D. (2003).** Increased accuracy multiband urban classification using a neuro-fuzzy classifier. *Int. J. Remote Sens.* Str. 827–834.

**Guyot, G. (1989).** Signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection satellitaire, tome 5. Paradigme. Caen, France. Str. 165.

**Hoffer, R. M. (1978).** Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In *Remote sensing: The quantitative approach*, ed. P. H. Swain and S. M. Davis. New York: McGraw-Hill. Str. 227-289.

**Holben, B. N., Kaufman, Y.J. and Kendall, J. D. (1990).** NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration. *International Journal of Remote Sensing*, 11. Str. 1511-1519.

- Huete, A. R. (1984).** Soil spectral effects on vegetation discrimination Ph. D. Thesis, Department of Soils, Water and Engineering; University of Arizona, USA. Str. 208.
- Huete, A. R., Post, D. E and Jackson, R. D. (1984).** Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination Remote Sensing of Environment, 15. Str. 155-165.
- Huete, A. R. (1985).** Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, 17. Str. 37-53.
- Huete, A. R. (1987).** Soil and sun angle interactions on partial canopy spectra. International Journal of Remote Sensing, 8. Str. 1307-1317.
- Huete, A. R. (1988).** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25. Str. 295-309.
- Huete, A. R. (1989).** Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. Theory and Applications of Optical Remote Sensing (G. Asrar eds.). Wiley, Washington, USA. Str. 107-141.
- Chance, J. E. (1981).** Crop identification and leaf area index calculation with Landsat multispectral data. International Journal of Remote Sensing, 2. Str. 1-14.
- Jackson, R. D., Slater, P. N. and Pinter, P. J. (1983).** Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. Remote Sensing of Environment, 13. Str. 187-208.
- Kaufman, Y. J. (1984).** Atmospheric effects on remote sensing of surface reflectance. SPIE Remote Sensing, 475. Str. 20-33.
- Kaufman, Y. J. (1988).** Atmospheric effects on spectral signature measurements and corrections. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26. Str. 441-450.
- Kaufman, Y. J. and Tanré, D. (1992).** Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30. Str. 261-270.
- Kerr, Y. H., Imbernon, J., Dedieu, G., Hautecoeur, O., Lagouarde, J. and Seguin, B. (1989).** NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. International Journal of Remote Sensing, 10. Str. 847-854

- Kogan, F.; Salazar, L.; Roytman, L. (2012).** Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA. *Int. J. Remote Sens.*, 33. Str. 2798–2814.
- Kosmas, C.; Danalatos, N.G.; López-Bermúdez, F.; Romero-Díaz, M.A. (2002).** The Effect of Land Use on Soil Erosion and Land Degradation under Mediterranean conditions. In *Mediterranean Desertification: A Mosaic of Processes and Responses*, Thornes, J.B., Ed.; John Wiley & Sons: Chichester, UK.
- Lillesand, Thomas M., Ralph W. Kiefer, Jonathan W. Chipman. (2004).** Remote sensing and image interpretation. 5th ed. New York: Wiley. ISBN 0471451525.
- Lobell, D. B., and G. P. Asner. (2002).** Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66. Str. 722–727.
- Major, D. J., Baret, F. and Guyot, G. (1990).** A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, 11. Str. 727-740.
- Mzuku, M., R. Khosla a R. Reich. (2015).** Bare Soil Reflectance to Characterize Variability in Soil Properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 46. Str. 1668-1676.
- Netopil, P.; Šarapatka, B.; Ayalew, D.A.; Drncová, K. (2021).** Multi-temporal analysis of erosional plots using aerial images and deep soil probes. *Phys. Geogr.*
- Nguyen, C.T.; Chidthaisong, A.; Kieu Diem, P.; Huo, L.-Z. (2021).** A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. *Land*, vol. 10. Str. 231.
- Pimentel, D.; Harvey, C.; Resosudarmo, P.; Sinclair, K.; Kurz, D.; McNair, M.; Crist, S.; Shpritz, L.; Fitton, L.; Saffouri, R.; et al. (1995).** Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, vol. 267. Str. 1117–1123.
- Pozemkyafarmy.cz ©, 2014:** Zemědělská půda [online]. [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.pozemkyafarmy.cz/zemedelska-puda.html>
- Prince, S. D. and Tucker, C. J. (1986).** Satellite remote sensing of rangelands in Botswana. II. NOAA AVHRR and herbaceous vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 7. Str. 1555-1570.



- Sellers, P. J. (1985).** Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6. Str. 1335-1372.
- SEOS ©, nedatováno:** Vegetation indices [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://seos-project.eu/agriculture/agriculture-c01-s04.html>
- Singh D., I. Herlin, J.P. Berroir, E.F. Silva, M. Simoes Meirelles. (2004).** An approach to correlate NDVI with soil colour for erosion process using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 33. Str. 328–332.
- Sklenička P., Kristina Janeckova Molnarova, Miroslav Šálek, Petra Šimová, Josef Vlasák, Pavel Sekac, Vratislava Janovská. (2015).** Owner or tenant: Who adopts better soil conservation practices? *Land Use Policy*. Volume 47. Str. 253-261.
- Slater, P. N. (1980).** *Remote Sensing: Optics and Optical Systems*. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
- Stoner, E. R., M. F. Baumgardner, L. L. Biehl, and B. F. Robinson. (1980).** Atlas of soil reflectance properties (Research Bulletin 962). West Lafayette, Purdue University.
- Taufik, Afirah & Syed Ahmad, Sharifah Sakinah & Ahmad, Asmala. (2016).** Classification of Landsat 8 satellite data using NDVI thresholds, 8. Str. 37-40.
- Telles, T.S.; de Fátima, G.M.; Dechen, S.C.F. (2011).** The costs of soil erosion [Os custos da erosão do solo]. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, vol. 35. Str. 287–298.
- Tengberg, A.; Da Veiga, M.; Dechen, S.C.F.; Stocking, M. (1998).** Modelling the impact of erosion of soil productivity: A comparative evaluation of approaches on data from Southern Brazil. *Exp. Agric.*, vol. 34. Str. 55–71.
- Tucker, C. J. (1979).** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8. Str. 127-150.
- Tucker, C. J. and Sellers, P. J. (1986).** Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7. Str. 1395-1416.
- van den Born, G.J.; de Haan, B.J.; Pearce, D.W.; Howarth, A. (2000).** Technical Report on Soil Degradation in Europe: An Integrated Economic and Environmental Assessment; RIVM Report 481505018; National Institute of Public Health and Environment—RIVM: Bilthoven, The Netherlands.

## 8. Seznam obrázků

Obrázek 1 - příklad půdní linie ( <a href="https://seos-project.eu/agriculture/images/soil_line.jpg">https://seos-project.eu/agriculture/images/soil_line.jpg</a> , nedatováno) .....	7
Obrázek 2 - umístění zájmového území v ČR .....	12
Obrázek 3 - kategorie sklonů polí v zájmovém území.....	13
Obrázek 4 - fishnet 1x1km.....	14
Obrázek 5 - vizualizace náhodně vybraných polí z kategorie sklonu do 1,99 stupňů	15
Obrázek 6 – vizualizace náhodně vybraných polí z kategorie sklonu od 2 do 7 stupňů .....	15
Obrázek 7 - vizualizace náhodně vybraných polí z kategorie sklonu od 7,1 do 9,9 stupňů .....	16
Obrázek 8 - ilustrační vizualizace odmaskovaných rastrů (červenec 2018) .....	17
Obrázek 9 - holá orná půda podle NDVI v roce 2018 .....	19
Obrázek 10 - holá orná půda podle NDVI v roce 2019 .....	19
Obrázek 11 - holá orná půda podle NDVI v roce 2020 .....	20
Obrázek 12 - holá orná půda podle NDVI v roce 2021 .....	20
Obrázek 13 - holá orná půda podle SAVI v roce 2018 .....	21
Obrázek 14 - holá orná půda podle SAVI v roce 2019 .....	22
Obrázek 15 - holá orná půda podle SAVI v roce 2020 .....	22
Obrázek 16 - holá orná půda podle SAVI v roce 2021 .....	23
Obrázek 17 - zobrazení problémově klasifikovaného místa (nahore SAVI, uprostřed NDVI, dole RGB) .....	24
Obrázek 18 - zobrazení stejného místa z obrázku 18 s nastavením nové prahové hodnoty pro SAVI = 0.15.....	25
Obrázek 19 - vizualizace problémově klasifikovaného místa indexem NDVI.....	26
Obrázek 20 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2018 .....	27
Obrázek 21 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2019 .....	28
Obrázek 22 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2020 .....	28
Obrázek 23 - holá orná půda podle nového thresholdu SAVI v roce 2021 .....	29
Obrázek 24 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2018).....	30
Obrázek 25 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2019).....	30
Obrázek 26 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2020).....	31
Obrázek 27 - vizualizace celkové rozlohy holé orné půdy podle nového thresholdu SAVI (2021).....	31
Obrázek 28 - tabulka agrotechnických lhůt hlavních polních plodin ( <a href="http://user.mendelu.cz/xvaltyni/systemy/projekt/files/03-op-soubory/Terminy-seti-a-sklizne.pdf">http://user.mendelu.cz/xvaltyni/systemy/projekt/files/03-op-soubory/Terminy-seti-a-sklizne.pdf</a> , nedatováno) .....	42

## 9. Přílohy

### 9.1. Příloha č.1.

Tabulka agrotechnických lhůt setí a sklizně hlavních polních plodin v ČR.

Agrotechnické lhůty setí (S-sowing) a sklizně (H-harvest) hlavních polních plodin v ČR

OBILNINY	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
PŠENICE ozimá								H H		S S		
PŠENICE jarní			S S					H H H				
JEČMEN ozimý							H H H		S S S			
JEČMEN jarní			S S S					H H H				
ŽITO ozimé								H H		S S S		
TRITICALE ozimé								H H H		S S S		
OVES			S S S					H H H				
KUKUŘICE				S S S						H H H H		

OLEJNINY	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
ŘEPKA ozimá								H H	S S			
MÁK ozimý								H H		S S		
MÁK jarní			S S S					H H H				
LEN				S S S				H H H H				
SLUNEČNICE				S S S				H H H H				
SÓJA				S S S				H H H				
SAFLOR			S S S					H H				

OKOPANINY	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
ŘEPA cukrovka				S S S						H H H H		
ŘEPA krmná				S S						H H H		
BRAMBORY rané				S S S			H H					
BRAMBORY poloran.				S S S				H H H				
BRAMBORY pozdní				S S S						H H H H		

LUSKOVINY	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
HRÁCH				S S S				H H				
BOB				S S					H H			
SÓJA				S S S					H H H			

PÍČNINY	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
VOJTĚŠKA rok zal.				S S S				H H H		H H H		
1. užitkový rok					H H H		H H		H H			
2. užitkový rok					H H H		H H H					
JETEL rok založení				S S S				H H H				
1. užitkový rok						H H H		H H				
JTS rok založení				S S S				H H				
1. užitkový rok						H H		H H H				
LOS jarní			S S S			H H						
KUKUŘICE silážní				S S S						H H		

Obrázek 28 - tabulka agrotechnických lhůt hlavních polních plodin

(<http://user.mendelu.cz/xvaltyni/systemy/projekt/files/03-op-soubory/Terminy-seti-a-sklizne.pdf>, nedatováno)