

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Diplomová práce

**Vyhodnocení radarových snímků pro účely řízení
zemědělského podniku**

Bc. František Falta

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. František Falta

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Vyhodnocení radarových snímků pro účely řízení zemědělského podniku

Název anglicky

Evaluation of synthetic aperture radar images for the purposes of agricultural enterprise management

Cíle práce

- zpracovat rešerši k problematice monitorování růstu zemědělských plodin pomocí SAR snímků;
- vybrat a zpracovat vhodné snímky;
- vybrat vhodné metody analýzy obrazu a zpracovat podklady;
- statisticky zhodnotit podklady získané během vegetačního období s referenčními daty;
- diskutovat výsledky analýz v souvislosti s jejich ekonomickou rentabilitou;

Metodika

V rámci teoretické části práce (literární rešerše) se autor seznámí a popíše problematiku analýzy družicových SAR snímků a jejich využití v rostlinné výrobě.

V praktické části vybere a zpracuje družicové SAR snímky a referenční data (optická data, výnos, digitální model reliéfu, meteodata, agrotechnické zásahy). Na základě porovnání dat a statistických analýz autor popíše vývoj porostů během vegetačního období a jejich potenciál pro agrotechnická opatření.

V diskuzi autor dále zhodnotí a porovná výsledky své práce s odbornou literaturou. Autor bude také diskutovat ekonomickou rentabilitu využití popsaných materiálů a metod při implementaci v rostlinné výrobě.

Řešení praktické části diplomové práce počítá s využitím nástrojů geoinformatiky, především volně dostupné řešení SW QGIS a SNAP.

Doporučený rozsah práce

40 – 80 stran

Klíčová slova

Geoinformatika, SAR, analýza obrazu, variabilita porostu, rentabilita

Doporučené zdroje informací

- Nasirzadehdizaji, R., Sanli F. B., Cakir, Z. (2019). Application of Sentinel-1 multi temporal data for monitoring and mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, 2019 GeoSpatial Conference 2019 – Joint Conferences of SMPR and GI Research, 12–14 October 2019, Karaj, Iran.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-803-2019>
- Steele-Dunne, S. C., McNain, H., Monsivais-Huertero, A., Judge, J., Liu, W., & Papathanassiou, K. (2017). Radar remote sensing of agricultural canopies: A review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017(10), 2249–2273. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2639043>
- Tůma, L., Kumhálová, J., Kumhála, F., Krepl, V. (2022). The noise-reduction potential of Radar Vegetation Index for crop management in the Czech Republic. Precision Agriculture, 23(2), 450-469.
<https://doi.org/10.1007/s11119-021-09844-5>

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 17. 1. 2023

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 2. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vyhodnocení radarových snímků pro účely řízení zemědělského podniku" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28. 3. 2024

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucí práce doc. Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za výborné vedení v průběhu zpracování celé práce, podnětné konzultace a optimistický přístup, díky nimž jsem byl schopen tuto práci dokončit.

Vyhodnocení radarových snímků pro účely řízení zemědělského podniku

Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím metod dálkového průzkumu země pro účely řízení zemědělského podniku za využití principů precizního zemědělství. Práce se zaměřuje na analýzu radarových snímků z družice Sentinel 1, která byla provedena na pozemcích v okolí obce Dolní Újezd u Litomyšle na porostech kukuřice, pšenice, máku a řepky ozimé. V rámci rešerše bylo zpracováno téma problematiky použitelnosti SAR snímků a využití v rostlinné výrobě. Na základě provedení statistické analýzy dat za účelem porovnání radarových dat s referenčními daty odebranými z terénu a optickými daty Sentinel 2 bylo zjištěno, že SAR snímky jsou využitelné v rámci mapování variability porostu a jeho vývoje v čase. Získané křivky průběhů sledovaných parametrů radarových snímků (RVI a VV polarizace) vykazují shodu s dalšími výzkumnými pracemi, které se tímto tématem zabývaly. Je tedy předpokládáno na základě výsledků této práce, že radarové snímky lze využít pro řízení zemědělského podniku a v rámci aplikace metod precizního zemědělství. Dle provedené ekonomické analýzy bylo zjištěno, že využití zjištěných variabilit na pozemku může vést k vyšším výnosům oproti konvenčním plošným agrotechnickým opatřením. Práce naznačuje možné směry dalšího výzkumu využití dálkového průzkumu Země, zejména s využitím radarových snímků.

Klíčová slova: Geoinformatika, SAR, analýza obrazu, variabilita porostu, rentabilita

Evaluation of synthetic aperture radar images for the purposes of agricultural enterprise management

Abstract

This study focuses on the use of remote sensing methods for the management of agricultural enterprises through the principles of precision agriculture. It centers on the analysis of radar images from the Sentinel 1 satellite, conducted on lands around the municipality of Dolní Újezd near Litomyšl on crops of corn, wheat, poppy, and winter oilseed rape. The literature review addressed the issue of the usability of SAR images and their application in crop production. Based on the statistical analysis of data for the purpose of comparing radar data with reference data collected from the field and optical data from Sentinel 2, it was found that SAR images can be utilized for mapping crop variability and its development over time. The curves of the monitored parameters of radar images (RVI and VV polarization) are consistent with other research works that have addressed this topic. Therefore, based on the results of this study, it is anticipated that radar images can be used for the management of agricultural enterprises and within the application of precision agriculture methods. According to the conducted economic analysis, the use of identified variabilities on the land can lead to higher yields compared to conventional uniform agronomic measures. The work suggests possible directions for further research in the use of Earth remote sensing, especially with the use of radar images.

Keywords: Geoinformatics, SAR, image analysis, vegetation variability, profitability

Obsah

1	Úvod.....	14
2	Cíl práce a metodika	15
2.1	Cíl práce	15
2.2	Metodika	15
2.2.1	Družicová data.....	15
2.2.2	Zpracování dat.....	16
2.2.3	Příprava dat pro statistickou analýzu.....	16
2.2.4	Analýza dat v Excelu a interpretace výstupů	16
2.3	Charakteristika studijního území.....	17
2.3.1	Klasifikace podnebí	18
3	Rešerše k problematice monitorování růstu zemědělských plodin pomocí SAR snímků.....	21
3.1	Úvod do monitoringu zemědělských plodin	21
3.1.1	Význam a potřeba monitoringu růstu plodin.....	21
3.2	Technologie a nástroje	22
3.2.1	Dálkový průzkum Země	23
3.2.2	Rozsah pozorovaného spektra	23
3.2.3	Družicový systém Landsat	24
3.2.4	Program Copernicus	25
3.2.5	Družice Sentinel 1	26
3.2.6	Radar se syntetickou aperturou	28
3.3	Data ESA.....	30
3.3.1	Copernicus Data Space Ecosystem	30
3.3.2	Collaborative Ground Segment – Czech Republic.....	30
3.3.3	ESA SNAP	31
3.3.4	Práce se SNAP.....	31
3.3.5	Kalibrace a příprava snímku pro zpracování.....	33
3.3.6	Výpočet RVI v programu SNAP.....	33
3.4	Software QGIS	34
3.5	Rešerše k analýze radarových dat	35
3.5.1	WCM (Water Cloud Model)	35
3.5.2	Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI).....	36
3.5.3	Analýza charakteristiky porostu podle K. Harfenmeister	37
3.5.4	Výzkum Tůma a kol.	38
3.5.5	Výzkum R. Nasirzadehdizaji a kol.	39
3.6	Precizní zemědělství.....	39
3.6.1	Zaváděná opatření PZ.....	40

3.6.2	Náklady na zavedení a provoz PZ	40
4	Výsledky a diskuse.....	42
4.1	Časové srovnání RVI, VV polarizace a NDVI.....	42
4.1.1	Kukuřice	42
4.1.2	Pšenice	44
4.1.3	Mák	46
4.1.4	Řepka	48
4.2	Korelace RVI a VV polarizace s referenčními daty	50
4.2.1	Kukuřice	50
4.2.2	Pšenice	50
4.2.3	Mák	51
4.2.4	Řepka	51
4.3	Diskuze výsledku analýz v souvislosti s jejich ekonomickou rentabilitou.....	52
4.4	Diskuze výsledků s jinými výzkumy.....	53
5	Závěr	55
6	Seznam použitých zdrojů	56

Seznam obrázků:

Obrázek 1	Rozmístění zkoumaných pozemků.....	17
Obrázek 2	Kumulativní srážky během sledovaného období, zdroj dat: Wunderground (10)	18
Obrázek 3	Klasifikace klimatických oblastí podle Quitta, červený bod ukazuje polohu zkoumaných pozemků, zájmová oblast se nachází v klimatické oblasti MT9 (mírně teplá), popsáno v podkapitole 2.3.1	19
Obrázek 4	Fotografie porostu máku, pořízeno 2. 6. 2022.....	19
Obrázek 5	Fotografie porostu pšenice, pořízeno 2. 6. 2022	20
Obrázek 6	Fotografie porostu kukuřice, pořízeno 18. 6. 2022	20
Obrázek 7	Srovnání pásem Landsat 7 a 8 s pásmem Sentinel-2 (15).....	24
Obrázek 8	Spektrální reflexní charakteristiky vegetace, suché půdy, šedého travního porostu, vody a sněhu (16).....	24
Obrázek 9	Konstelace družice Sentinel 1A a 1B (23)	26
Obrázek 10	Geometrie pozorování použitých k vytvoření syntetické apertury pro cíl P (25)	28
Obrázek 11	Zobrazení elektromagnetického spektra s vyznačením pásem snímaných SAR (25)	29
Obrázek 12	Odlišení struktury povrchu na základě typu rozptylu (25).....	30
Obrázek 13	Úvodní okno programu SNAP	32

Obrázek 14 Snímek mise Sentinel 1 otevřený v programu SNAP	33
Obrázek 15 Nástroj Band Maths programu SNAP s předpisem rovnice pro výpočet RVI.	34
Obrázek 16 Okno programu QGIS	34
Obrázek 17 Časové profily snímků zpětného odrazu v polarizaci VV pro porost pšenice z let 2017 (vlevo) a 2018 (vpravo) včetně standardních odchylek. Modré sloupce představují denní srážky na pokusných pozemcích. (33)	37
Obrázek 18 Časové profily snímků zpětného odrazu v polarizaci VV pro porost ječmene z let 2017 (vlevo) a 2018 (vpravo) včetně standardních odchylek. Modré sloupce představují denní srážky na pokusných pozemcích. (33)	38
Obrázek 19 Celkové náklady podniků s PZ a bez PZ v roce 2021 (37)	41
Obrázek 20 Celková produkce podniků s PZ a bez PZ 2021 (37)	41
Obrázek 21 Hodnoty RVI porostu kukuřice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku	42
Obrázek 22 Hodnoty snímku polarizace VV u porostu kukuřice, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku	43
Obrázek 23 Hodnoty NDVI pro porost kukuřice, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku	43
Obrázek 24 Hodnoty variačních koeficientů použitých dat	44
Obrázek 25 Hodnoty RVI pro porost pšenice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku	44
Obrázek 26 Hodnoty bodů SAR snímku s VV polarizací pro porost pšenice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku	45
Obrázek 27 Hodnoty NDVI pro porost pšenice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku	45
Obrázek 28 Hodnoty variačního koeficientu pro použitá data porostu pšenice	45
Obrázek 29 Hodnoty RVI pro porost máku v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku	46
Obrázek 30 Hodnoty SAR snímku v polarizaci VV pro porost máku v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku	46
Obrázek 31 Hodnoty NDVI pro porost máku v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku	47

Obrázek 32 Hodnoty variačního koeficientu pro sledované parametry porostu máku.....	47
Obrázek 33 Hodnoty RVI pro porost řepky v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku.....	48
Obrázek 34 Průběh hodnot v čase pro VV polarizované SAR snímky porostu řepky, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku.....	48
Obrázek 35 Hodnoty NDVI pro porost řepky v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku.....	49
Obrázek 36 Hodnoty variačního koeficientu pro data použitá pro analýzu porostu řepky..	49

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Data použitých snímků z družic Sentinel 1 a 2.....	16
Tabulka 2 základní data zkoumaných pozemků, HNIg ^c – hnědozem luvická slabě oglejená, HNIg – hnědozem luvická oglejená, LUg – luvizem oglejená, FLq – fluvizem glejová, KAv – kambizem vyluhovaná, KAm – kambizem modální, LUm – luvizem modální	18
Tabulka 3 Přehled režimů snímání družic Sentinel 1 (23).....	27
Tabulka 4 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost kukuřice.....	50
Tabulka 5 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost pšenice.....	50
Tabulka 6 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost máku.....	51
Tabulka 7 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost řepky.....	51
Tabulka 8 Teoretická agrotechnická opatření pro porost máku.....	52

Seznam použitých zkratk:

Zkratka	Význam
DPZ	Dálkový průzkum Země
EM záření	Elektromagnetické záření
ESA	European Space Agency
FADN	Farm Accountancy Data Network
GPS	Globální družicový polohový systém
NDVI	Normalized difference vegetation index
PZ	Precizní zemědělství

RVI	Radar vegetation index
SAR	Synthetic aperture radar

1 Úvod

Současné zemědělství se potýká s řadou výzev. Počet lidí na planetě Zemi neustále narůstá a populace dosáhla v roce 2023 počtu převyšujícího 8 miliard lidí (1), zatímco plocha zemědělské půdy se za posledních 50 let příliš nezvýšila (2). Existuje tedy otázka, jak uživit zvyšující se populaci na současné ploše orné půdy. Lidstvo má k dispozici technologie, které před 30 lety byly v plenkách a před 50 lety úplně nemyslitelné. Těmi technologiemi jsou globální poziční systémy (GPS) a dálkový průzkum Země (DPZ) za pomoci družic neustále sbírajících velké množství dat.

Velkým trendem uplynulých několika let je pojem „precizní zemědělství“. Jedná se o myšlenku využití těchto technologií ke zvýšení efektivity pěstování plodin. Díky přesnému navádění a znalostech variability porostu je možné cíleně aplikovat agrotechnické zásahy směřující k vyšším výnosům, aniž bychom zvětšovali obdělávanou plochu. Nabízí se tak možnost využít dálkového průzkumu Země v rámci principů precizního zemědělství.

Základem pro správné řízení jak podniku, tak v té souvislosti i zmíněných agrotechnických zásahů znamená především vycházet z přesných dat. DPZ se zaměřuje na sbírání a vyhodnocování dat o povrchu Země bez přímého kontaktu člověka. Využívá technologie snímání z družic nebo letounů nesoucích potřebné technologické vybavení. Výhodou může být snímání v jiném, než viditelném spektru. To spolu s využitím algoritmů otevírá možnosti analýzy zemědělských plodin bez nutnosti vstupovat na pozemek. Současný výzkum se zabývá problémy interpretace těchto snímků, což je i náplň této diplomové práce. Radarové snímky na rozdíl od optických mohou být využity i během oblačnosti nad zájmovým územím. Díky tomu je možné využít mnohem širší datové základny. Výzkumy se v dnešní době zajímají především o to, jak ze snímků odfiltrout nežádoucí šum a jak kvantifikovat data, která poskytují.

Smyslem této diplomové práce je porovnání vybraných radarových snímků z družice Sentinel 1 s referenčními daty odebranými v terénu. Práce se také soustředí na ekonomické přínosy získaných informací z pohledu podniku. V diskuzi jsou pak zohledněny přístupy dalších výzkumných prací, které se touto problematikou zabývají.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zpracovat rešerši k problematice monitorování růstu zemědělských plodin pomocí SAR snímků, vybrat a zpracovat vhodné satelitní snímky, vybrat a aplikovat vhodné metody analýzy obrazu a zpracovat podklady, následně statisticky zhodnotit podklady získané během vegetačního období s referenčními daty, diskutovat výsledky analýz v souvislosti s jejich ekonomickou rentabilitou.

Práce bude obsahovat teoretickou část, která se bude zabývat teoretickými východisky a potřebnou znalostní bází pro tuto diplomovou práci. Další částí je zpracování a analýza družicových snímků a jejich vyhodnocení v kontextu získaných terénních dat. Třetí část se bude zabývat ekonomickou analýzou z hlediska rentability využití procesů a výstupů této práce jako jednoho z informačních vstupů při řízení zemědělského podniku.

2.2 Metodika

Praktická část této diplomové práce se zabývá zpracováním družicových snímků za účelem provedení monitoringu vegetace na vybraných pozemcích v okolí obce Dolní Újezd u Litomyšle. Smyslem snímání a analýzy růstu vegetace je zjištění variability v rámci pozemku. Na tomto základě se může následně zemědělec rozhodovat o agrotechnických opatřeních na pozemcích, jako například variabilní dávka hnojiva, postřiku apod., nebo také může odhadovat očekávaný výnos. Výchozí data byla získána ze snímků družic Sentinel 1 a 2, referenční data, která byla odebrána v terénu ve čtyřech termínech, byla získána z jiného výzkumu, který probíhal na stejných pozemcích. Termíny odběrů terénních dat byly 14. 4. 2022, 2. 6. 2022, 18. 6. 2022 a 18. 7. 2022.

2.2.1 Družicová data

Družicové snímky z družic Sentinel 1 a 2 byly staženy z platformy Collaborative Ground Segment, určené pro uživatele z České republiky (3). Z této webové platformy je možné pro účely výzkumu a nekomerční aktivity stahovat po přihlášení družicové snímky. Pro úspěšné stažení správných snímků byla nejprve definována oblast zájmu. Poté byly definovány parametry snímku. Typ produktu byl zvolen GRD (Ground Range Detected) a relativní orbita 22 pro zajištění stejných vlastností jednotlivých snímků z důvodu jejich srovnávání. Práce se soustředila na analýzu snímků v kontextu terénních dat. Z tohoto důvodu byly vybrány pouze 4 družicové snímky Sentinel 1 a Sentinel 2, které nejbližší odpovídají odběrovým termínům terénních dat. Konkrétní data vybraných snímků jsou uvedena v tabulce (Tabulka 1). Data z družice Sentinel 2 byla vybírána s ohledem na absenci oblačnosti v zájmové oblasti.

Tabulka 1 Data použitých snímků z družic Sentinel 1 a 2

Sentinel 1	16. 4. 2022, 3. 6. 2022, 15. 6. 2022, 21. 7. 2022
Sentinel 2	26. 3. 2022, 15. 5. 2022, 24. 6. 2022, 19. 7. 2022

2.2.2 Zpracování dat

Pro primární zpracování dat byl využit volně dostupný software SNAP (4), který vyvíjí ESA pro základní zpracování dat jejich misí. V případě zpracování dat Sentinel 1 byly provedeny v softwaru SNAP následující kroky:

1. Ořez snímku pomocí nástroje Subset
2. Radiometrická kalibrace: Radar / Radiometric / Calibrate
3. Filtrace šumu (speckle filtering): Radar / Speckle Filtering / Multi-temporal Speckle Filter
4. Terénní korekce: Radar / Geometric / Terrain Correction / Range-doppler Terrain Correction
5. Výpočet RVI pomocí nástroje Band Maths (vzorec pro RVI v kapitole 3.3.6)
6. Konverze pásem Sigma0_VV a Sigma0_VH na dB

Pro data Sentinel 2 byly provedeny v softwaru SNAP následující kroky:

1. Resampling – převzorkování pásem na shodné rozlišení 10 m
2. Ořez snímku pomocí nástroje Subset
3. Výpočet NDVI pomocí vestavěného nástroje

2.2.3 Příprava dat pro statistickou analýzu

Pro přípravu dat k statistické analýze byl použit software QGIS (5), který je volně dostupný ke stažení z internetu a je vyvíjen skupinou dobrovolníků. V této práci byla použita verze QGIS 3.34 (popsáno v kapitole 3.4).

Byla importována data shapefile sledovaných pozemků a bodová data odběrů terénních dat. Následně byla importována data Sentinel 1 a 2, tedy již zpracované RVI, Sigma0_VV, Sigma0_VH a NDVI. Pro každý jednotlivý bod odběru terénních dat byly pomocí nástroje „Navzorkovat rastrové hodnoty“ přiřazeny těmto bodům do atributové tabulky hodnoty RVI, Sigma0_VV, Sigma0_VH a NDVI. Pro každou plodinu zvlášť byla tato data vyexportována do Excelu.

2.2.4 Analýza dat v Excelu a interpretace výstupů

Pro všechna získaná data, jak referenční, tak družicová, byla vypočítána střední hodnota, rozptyl, směrodatná odchylka a variační koeficient. Pomocí nástroje „Analýza dat“

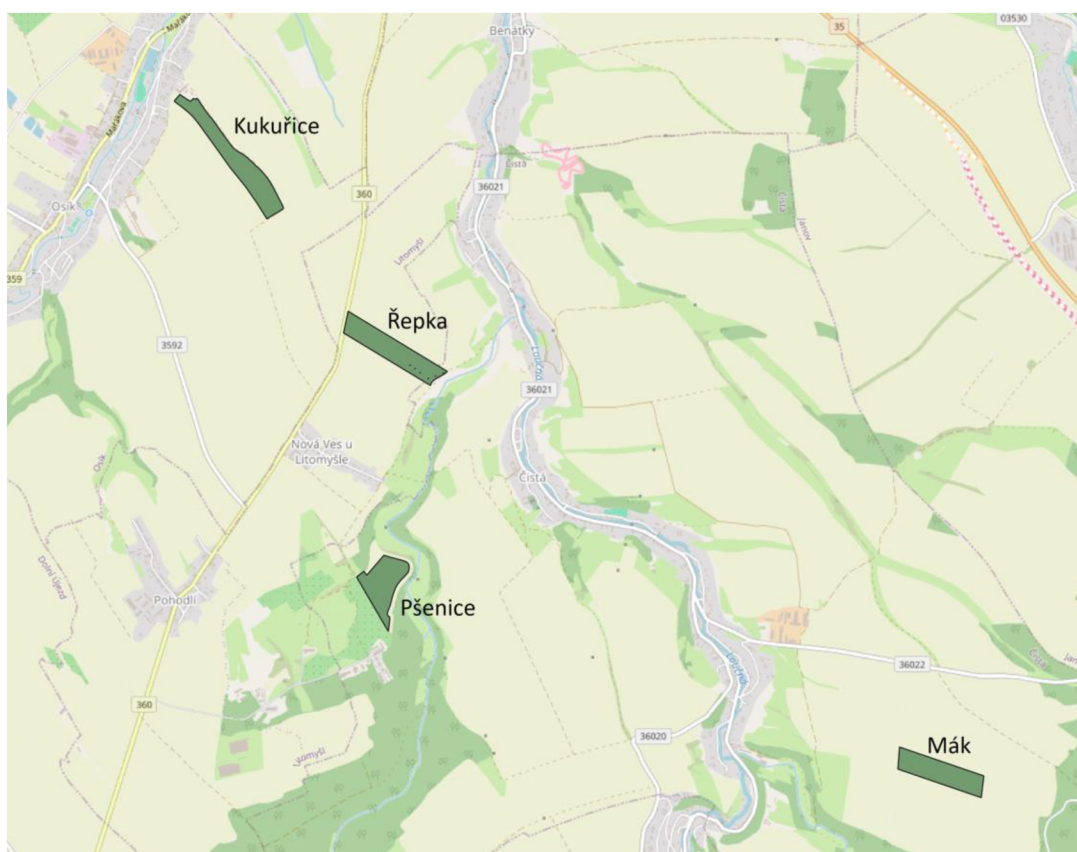
byla vypočtena korelační matice. Byly vytvořeny grafy průběhů hodnot RVI, Sigma0_VV a NDVI a tabulka velikosti variačních koeficientů pro každou plodinu.

Hodnoty Sigma0_VH nebyly využity z toho důvodu, že je průběh křivky těchto hodnot (oproti křivce Sigma0_VV) méně výrazný a tím pádem jsou i její trendy méně zřetelné.

Byla provedena časová analýza získaných satelitních dat, která se z důvodu své variability vztahuje k pozemku jako celku. Tato data byla zobrazena na grafech průběhu zkoumaných křivek. Byla také provedena analýza dat v jednotlivých bodech pomocí vzájemné korelace referenčních dat a radarových dat. Výstupy byly zobrazeny v tabulce jako hodnoty korelace těchto dat.

2.3 Charakteristika studijního území

Zkoumané pozemky se nachází v katastrech obcí Čistá a Osík a města Litomyšl (v části Nová Ves u Litomyšle). Rozmístění pozemků je ukázáno na obrázku (Obrázek 1). Základní informace o zkoumaných pozemcích jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2).



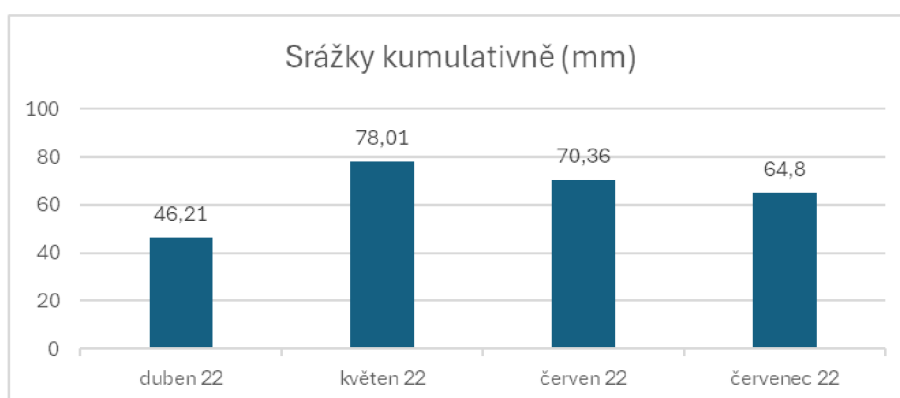
Obrázek 1 Rozmístění zkoumaných pozemků

Tabulka 2 základní data zkoumaných pozemků, HNIg' – hnědozem luvická slabě oglejená, HNIg – hnědozem luvická oglejená, LUg – luvizem oglejená, FLq – fluvizem glejová, KAv – kambizem vyluhovaná, KAm – kambizem modální, LUm – luvizem modální

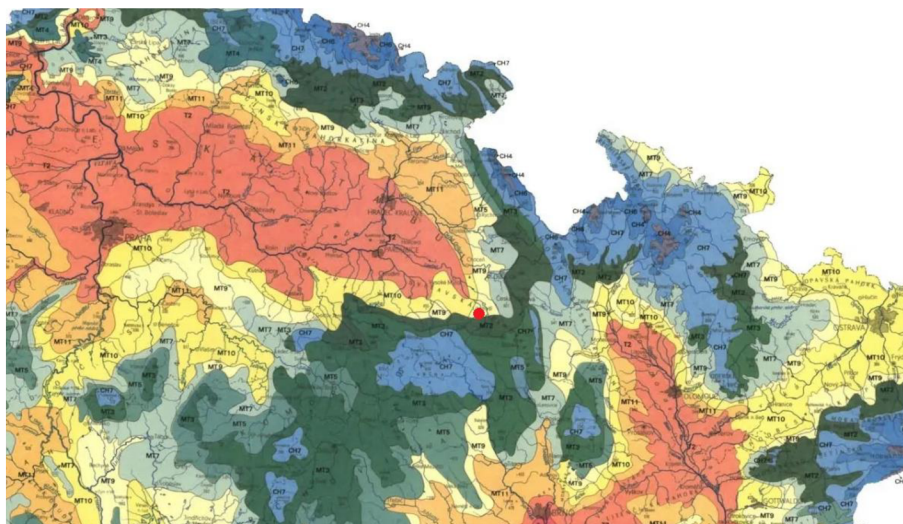
Plodina	Nadmořská výška (m. n. m.) (6)	Rozloha pozemku (ha) (7)	Průměrná sklonitost (°) (7)	Půdní poměry (8)
Kukuřice	373	11,78	2,32	HNIg'
Řepka	397	10,72	1,88	HNIg', HNIg, LUg
Pšenice	403	9,63	4,85	FLq, KAv, KAm, HNIg', HNIg
Mák	465	8,54	2,44	LUm, KAm

2.3.1 Klasifikace podnebí

Oblast se nachází podle Quitta (9) v mírně teplé klimatické oblasti. Charakteristika mírně teplé klimatické oblasti podle Quitta, v tomto případě se jedná o typ MT9, uvádí počet letních dní 40 – 50, počet dní s průměrnou teplotou nad 10 °C 140 – 160, počet dní s mrazem 110 – 130, počet ledových dní 30 – 40, průměrnou lednovou teplotu -3 až -4 °C, průměrnou červencovou teplotu 17 – 18 °C, průměrnou dubnovou teplotu 6 – 7 °C, průměrnou říjnovou teplotu 7 – 8 °C, průměrný počet dní se srážkami nad 1 mm 100 – 120, suma srážek ve vegetačním období 400 – 450 mm, suma srážek v zimním období 250 – 300 mm, suma srážek celkem za rok 650 – 750 mm, počet dní se sněhovou pokrývkou 60 – 80, počet zatažených dní 120 – 150, počet jasných dní 40 – 50. Mapu klimatických oblastí ukazuje Obrázek 3, skutečné srážky ve sledovaném období roku 2022 ukazuje Obrázek 2.



Obrázek 2 Kumulativní srážky během sledovaného období, zdroj dat: Wunderground (10)



Obrázek 3 Klasifikace klimatických oblastí podle Quitta, červený bod ukazuje polohu zkoumaných pozemků, zájmová oblast se nachází v klimatické oblasti MT9 (mírně teplá), popsáno v podkapitole 2.3.1

Na přiložených fotografiích (Obrázek 4, Obrázek 5, Obrázek 6) je možné vidět reálný stav sledovaného porostu máku, pšenice a kukuřice. Všechny tři fotografie byly pořízeny během června 2022, tedy během sledovaného období a doplňují tak představu o stavu zkoumaného porostu především na dálku skrze radarová data.



Obrázek 4 Fotografie porostu máku, pořízeno 2. 6. 2022



Obrázek 5 Fotografie porostu pšenice, pořízeno 2. 6. 2022



Obrázek 6 Fotografie porostu kukuřice, pořízeno 18. 6. 2022

3 Rešerše k problematice monitorování růstu zemědělských plodin pomocí SAR snímků

3.1 Úvod do monitoringu zemědělských plodin

Polní pozemky, na kterých zemědělci hospodaří, zpravidla nebývají homogenní a variabilita úrodnosti se v rámci jednoho uzavřeného pozemku může výrazně lišit. Zemědělci v dřívější době věděli, kde je jejich pole více úrodné a kde méně, a dokázali během let vysledovat opakující se trendy a přizpůsobit tomu způsob hospodaření na svých pozemcích. Tyto znalosti se pak předávaly z generace na generaci spolu s hospodářstvím. (11)

Kvůli změnám v zemědělství v druhé polovině 20. století došlo k přerušení vztahu zemědělce k půdě, vznikly podniky, které hospodařily na mnohem větších výměrách polí. Za takovýchto podmínek a často s nedostatečným vybavením nebylo možné nadále zachovat tento individuální přístup k hospodaření.

Až vývoj technologií v poslední době napomáhá k obnově dříve ztraceného individuálního přístupu k péči o půdu. Díky satelitním technologiím a dostatečnému výpočetnímu výkonu je možné lokalizovat rozdíly v rámci pozemku. Tento nový přístup se nazývá „precizní zemědělství“.

Hlavním cílem precizního zemědělství je provádět pěstební zásahy ve správný čas, na správném místě a ve správné intenzitě. Předpokladem pro takové zásahy je znalost variability pozemku a parametrů vzrostlého porostu.

3.1.1 Význam a potřeba monitoringu růstu plodin

Sledování růstu plodin je klíčové pro zajištění maximálního výnosu a kvality. Díky monitorování růstu plodin mohou zemědělci včas identifikovat potenciální problémy a podniknout nápravná opatření. Monitorování růstu plodin umožňuje zemědělcům optimalizovat jejich vstupy, jako je voda a hnojiva, což může vést k významným úsporám v nákladech. (12)

Zemědělci používají různé metody ke sledování růstu plodin, které bychom mohli rozdělit na *tradiční* a *moderní*. K těm tradičním řadíme zejména vizuální pozorování, kdy zemědělec jde fyzicky na pole a pohledem kontroluje stav porostu. Tato kontrola je vysoce závislá na kvalifikaci dotyčného člověka, jeho zkušenostech a může poskytovat různě zkreslené výstupy.

Druhým tradičním přístupem je vzorkování půdy. Tato metoda monitoringu zahrnuje odběr vzorků půdy z různých částí pole a jejich následné testování na různé parametry, jako

např. pH, úroveň živin nebo zasolení. Tato metoda pomáhá zemědělcům rozhodovat o zavlažování a hnojení.

Dalším tradičním přístupem by mohl být odběr vzorků rostlin a jejich zkoumání. Takové vzorky mohou být testovány na obsah živin nebo přítomnost chorob a mohou zemědělci poskytovat cenné informace o potřebě hnojení nebo použití pesticidních prostředků.

Jedním z dalších tradičních přístupů uvádí zdroj (12) sledování zásoby vody v půdě a tomu přizpůsobené zavlažování.

Existují i moderní přístupy ke sledování růstu plodin, které jsou dostupné hlavně s rozvojem informačních technologií. Za takové přístupy můžeme považovat například dálkový průzkum Země, využití satelitních snímků, využití bezpilotních prostředků, senzorů např. půdní vlhkosti, živinové senzory aj.

Dálkový průzkum Země je chápán v oblasti zemědělství jako obecný pojem moderního přístupu k monitorování půdy a růstu rostlin, který využívá k zachycení dat senzory umístěné na příslušných nosičích, jako jsou například družice, bezpilotní prostředky apod.

Satelitní snímky jsou pořizovány družicí obíhající okolo Země. Tyto snímky lze použít ke sledování parametrů rostlin, jako je například jejich zdraví, úroveň vlhkosti a stav živin. Satelitní snímky se dají využít ke sledování velkých ploch.

Také bezpilotní prostředky mohou být vybaveny různými senzory pro monitoring rostlin a lze je ovládat na dálku. Bepilotní prostředky mohou poskytovat snímky s vyšším prostorovým rozlišením, než snímky z družice, a lze je použít také ke sledování různých parametrů rostlin. Bepilotní prostředky se používají ke sledování menších ploch půdy.

Jedním z dalších moderních přístupů je použití senzorů, které bez přítomnosti obsluhy zachycují data a přenáší je např. přes internet do centrálního systému, kde jsou vyhodnocována a analyzována. Tato metoda se hodí pro monitorování parametrů, jako je např. vlhkost půdy, stav živin v půdě ad. Takto lze mimo jiné optimalizovat následné zavlažování a hnojení rostlin. Výhodou je široký sběr dat z více míst najednou.

3.2 Technologie a nástroje

V případě dálkového průzkumu země hovoříme o získávání informací o objektech nebo jevech bez fyzického kontaktu s pozorovaným objektem. V dnešním pohledu je tento termín používán v souvislosti s využíváním družicových snímků nebo senzorů nesených na letadlech nebo bezpilotních prostředcích. (13)

3.2.1 Dálkový průzkum Země

Techniky dálkového průzkumu, které primárně sloužily jako prostředek ke shromáždění dat, stále více slouží jiným rolím ve vědeckém a aplikovaném výzkumu. Tato snímaná data o přírodních a antropogenních prvcích slouží jako vstup pro řadu simulačních modelů včetně hydrologických, klimatických ekologických a ekonomických.

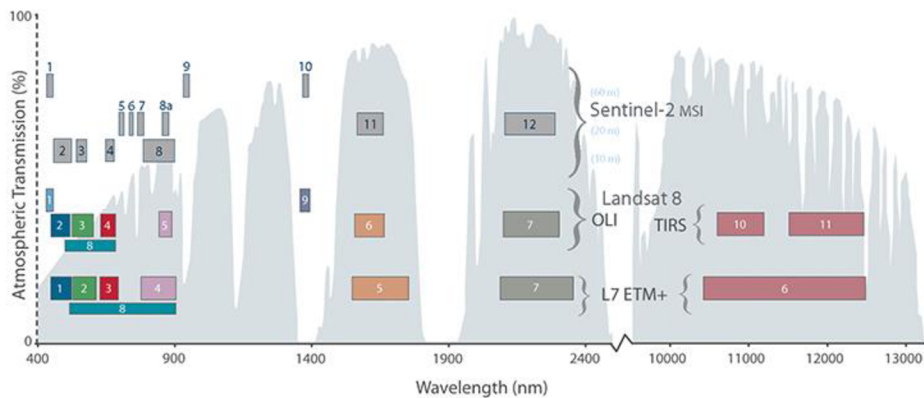
Satelity sloužící k dálkovému průzkumu Země mohou být umístěny na různých oběžných drahách. Tři nejčastější druhy oběžných drah jsou nízká oběžná dráha (přibližně 160 až 2 000 km nad Zemí), střední oběžná dráha (přibližně 2 000 až 35 500 km nad Zemí) a vysoká oběžná dráha (nad 35 500 km nad Zemí). Družice obíhající ve výšce 35 786 km se nacházejí ve výšce, ve které jejich oběžná rychlost odpovídá rotaci planety, a jsou na tzv. geosynchronní dráze (GSO). Družice na GSO přímo nad rovníkem má navíc geostacionární dráhu. Geostacionární dráha umožňuje družici udržovat svou polohu přímo nad stejným místem na povrchu Země. (14)

Nízká oběžná dráha Země je běžně používanou dráhou, protože družice mohou kolem Země obíhat po několika drahách. Například družice na polární dráze jsou skloněny téměř o 90 stupňů k rovině rovníku a pohybují se od pólu k pólu, jak se Země otáčí. Díky tomu mohou senzory na palubě družice rychle získávat data pro celou zeměkouli, včetně polárních oblastí. Mnoho polárních družic je považováno za slunečně synchronní, což znamená, že družice prolétá nad stejným místem ve stejném slunečním čase v každém cyklu. Nepochárné družice na nízké oběžné dráze Země naproti tomu neposkytují globální pokrytí, ale pokrývají pouze část zeměpisných šířek.

Družice na střední oběžné dráze Země obíhá přibližně 12 hodin. Za 24 hodin družice každý den přeletí dvakrát stejné místo na rovníku. Tato oběžná dráha je stálá a vysoce předvídatelná. Proto tuto dráhu využívá mnoho telekomunikačních družic a družic GPS.

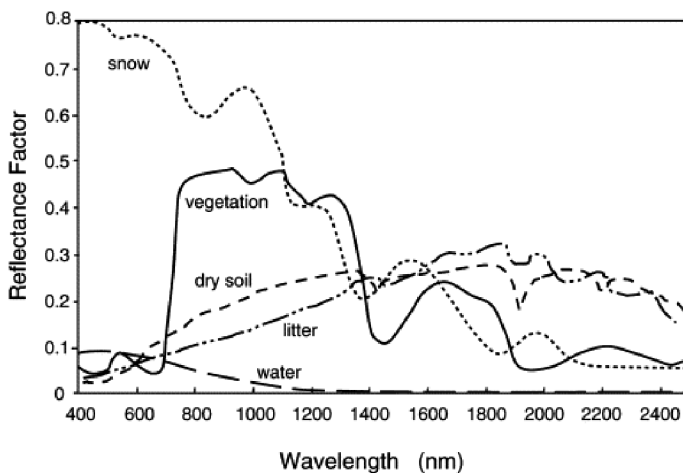
3.2.2 Rozsah pozorovaného spektra

Systémy dálkového průzkumu Země jsou založeny na zachycování odraženého elektromagnetického (EM) záření od pozorovaných objektů. K DPZ se využívá celá škála vlnových délek tohoto EM záření (Obrázek 7). Spektrum viditelného záření označujeme takovou část EM záření s délkou vlnových délek od 400 do 750 nm. Do spektra kratších vlnových délek řadíme ultrafialové záření, dále rentgenové a gama záření. Tyto druhy záření mají vlnovou délku kratší, než je vlnová délka viditelné části spektra. Do části EM spektra s delšími vlnovými délkami, které můžeme pozorovat, se řadí rádiové vlnění, mikrovlnné a infračervené. K detekci všech vlnových délek kromě viditelného spektra je nutné použití přístrojového vybavení. (14)



Obrázek 7 Srovnání pásem Landsat 7 a 8 s pásmem Sentinel-2 (15)

V DPZ je využívána vlastnost pozorovaných objektů pohlcovat nebo odrážet určité vlnové délky elektromagnetického záření. Různé objekty se liší v tom, jaká spektra pohlcují nebo odrážejí. Tato vlastnost se využívá k další analýze v rámci DPZ. Například hladina oceánu odráží pouze 6 % dopadajícího slunečního záření, zbytek záření je pohlcen. Pohlcená energie je často znovu objektem vyzářena na delší vlnové délce. (14) Tyto spektrální charakteristiky jsou ukázány na obrázku Obrázek 8 a je patrné, že míra odrazivosti živé vegetace se v určitých spektrech záření výrazně odlišuje od suché půdy.



Obrázek 8 Spektrální reflexní charakteristiky vegetace, suché půdy, šedého travního porostu, vody a sněhu (16)

3.2.3 Družicový systém Landsat

Program Landsat vznikl v 60. letech 20. století ve Spojených státech v době, kdy probíhal rozmach vědy a vesmírných průzkumů. Myšlenka satelitu pořizujícího snímky zemského povrchu přišla v roce 1965. Během prvních testů pro mise Apollo byly pořízeny snímky zemského povrchu z vesmíru. Snímky byly pořízeny v rámci misí Mercury a Gemini. To nakonec inspirovalo vznik programu Landsat. První družice Landsat 1 byla vypuštěna do vesmíru 23. července 1972. (17) (18)

3.2.4 Program Copernicus

Program Copernicus je projektem Evropské komise ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou (ESA). Program byl zřízen v roce 2014. Služby programu Copernicus jsou založeny na sběru informací ze satelitů na oběžné dráze Země. Hlavní družice programu Copernicus nesou jméno Sentinel. Většina dat, analýz, předpovědí a map je zdarma dostupná. (19)

Pokrytí programu Copernicus je rozděleno do šesti zájmových oblastí: monitoring atmosféry, monitoring mořského prostředí, monitoring pevniny, klimatická změna, management krizových událostí, bezpečnost. V zemědělství je použití dat vhodné například pro pozorování polí s plodinami a jejich růstu, vyhodnocování potřeb zavlažování, odhad vhodné doby sklizně apod. (19) (20)

Družice Sentinel 1, 2, 3 a 6 jsou samostatné družice, Sentinel 4 a 5 jsou přístroje umístěné na palubě meteorologických družic EUMETSAT. Mise Sentinel 5P, předchůdce mise Sentinel 5, je také samostatnou družicí. Program Copernicus rovněž čerpá data z přispěvatelských misí a jiných komerčních zdrojů. (21)

Každá z misí Sentinel je založena na konstelaci dvou satelitů, které dokáží pokrýt požadované území a dodat spolehlivá data. Každá z misí nese různé druhy technologií. (22)

Družice Sentinel 1 obíhají Zemi na polární dráze a nesou s sebou mikrovlnný radar pro monitoring pevniny a oceánů. Základní prostorové rozlišení snímků je 20 m na pixel, ale mohou být v určitých případech poskytovány i ve vyšším rozlišení (např. $10 \text{ m} \cdot \text{px}^{-1}$)

Družice Sentinel 2 také obíhají na polární dráze a nesou multispektrální kamery umožňující pozorování Země ve 13 optických pásmech v rozsahu od viditelného záření po infračervené záření (442 nm až 2202 nm). Prostorové rozlišení snímků je 10 m, 20 m a 60 m. Šířka záběru je 290 km. (9)

Sentinel 3 nese přístrojové vybavení zahrnující především radiometr, spektrometr a přesný výškoměr. Cílem této mise je sledování výšky hladiny moře, barvy oceánů a pevniny s vysokou přesností a spolehlivostí.

Sentinel 4 není plánován jako samostatná družice. Měl by být součástí družice MTG-S (Meteosat Third Generation-Sounder) na geostacionární dráze, jeho účelem se plánuje měření složení zemské atmosféry.

Sentinel 5P (P z ang. precursor) je mise vyslaná jako náhrada družice Envisat do doby, než bude vyslána družice Sentinel 5.

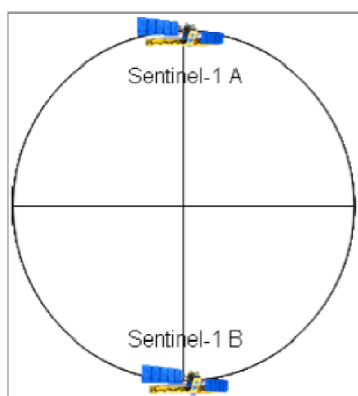
Sentinel 5 také není plánován jako samostatná družice, měl by být součástí družice s polární dráhou letu MetOP Second Generation. Úkolem této mise by mělo být měření složení zemské atmosféry.

Družice Sentinel 6 nesou radarový výškoměr pro globální měření výšky hladiny moří, primárně pro účely oceánografie a klimatické studie.

3.2.5 Družice Sentinel 1

Družice Sentinel 1A byla vypuštěna na oběžnou dráhu 3. dubna 2014, družice Sentinel 1B byla vypuštěna 25. dubna 2016. Na své palubě nese jednofrekvenční radarový senzor C-SAR snímající zemský povrch v pásmu C (5404 MHz). Využití radaru umožňuje snímání zemského povrchu prakticky bez ohledu na meteorologické podmínky (pouze mimo silný déšť či husté sněžení) a denní dobu, umožňuje tak pořizování dat i při vysoké oblačnosti nebo v noci. (23)

Mise Sentinel 1 se skládá ze dvou stejných družic obíhajících na polární dráze. Družice jsou pojmenovány Sentinel 1A a Sentinel 1B, obíhají po stejné dráze s posunem 180° (viz Obrázek 9). Přelet jedné z družic nad stejným místem na Zemi je jednou za 6 dní (při konstelaci dvou družic). V důsledku širší záběrů je pro ČR časové rozlišení cca 2 dny. Pro vyšší zeměpisné šířky je časové rozlišení ještě kratší.



Obrázek 9 Konstelace družice Sentinel 1A a 1B (23)

Cílem mise Sentinel 1 je monitorování krajinného pokryvu a využití území, sledování vodních ploch, sledování pohybů zemského povrchu (např. sesuvy půdy), mapování přírodních i člověkem způsobených katastrof a podpora krizového řízení, monitorování mořského prostředí a úniků ropy, monitoring mořského ledu a ledovců, detekce námořních plavidel ad.

Družice snímají zemský povrch ve 4 režimech: Strip Map Mode (zkr. SM), Interferometric Wide Swath Mode (zkr. IW), Extra Wide Swath Mode (zkr. EW) a Wave Mode (zkr. WV). Stručný přehled jednotlivých režimů je ukázán v tabulce (Tabulka 3). Radar družice Sentinel 1 umožňuje duální polarizaci, jeho anténa může vysílat i přijímat série pulzů v horizontální i vertikální polarizaci.

Tabulka 3 Přehled režimů snímání družic Sentinel 1 (23)

Režim	Způsob využití	Prostorové rozlišení	Šířka záběru
Strip Map Mode	pouze při zvláštním požadavku pro monitorování krizových událostí	5 x 5 m	80 km
Interferometric Wide Swath Mode	hlavní režim snímání nad pevninou, částečně nad mořem a v polárních oblastech	5 x 20 m	250 km
Extra Wide Swath Mode	částečně používaný nad mořem a v polárních oblastech	20 x 40 m	400 km
Wave Mode	hlavní režim snímání nad otevřeným mořem	prostorové rozlišení 5 m ve čtvercích 20 x 20 km každých 100 km, snímáno pod dvěma různými úhly	

Snímky v režimu Wave Mode jsou pořizovány pouze v jednoduché polarizaci, v ostatní režimech je možné využít polarizaci jednoduchou i duální.

Data pořízená v režimech snímání SM, IW a EW jsou distribuována ve třech úrovních zpracování: Level-0 (L0), Level-1 (L1) a Level-2 (L2). Všechny produkty jsou zpracovány z produktu úrovně L0, které se skládají z komprimovaných surových dat. Data L0 obsahují šum, vnitřní kalibraci a informaci o poloze na oběžné dráze při pořízení snímku.

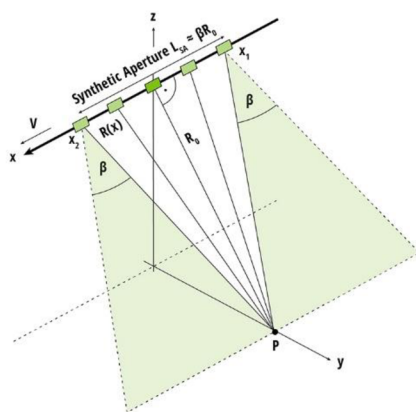
Data úrovně L1 jsou z úrovně dat L0 transformována kalibrací dat a použitím algoritmů. Vznikají dva produkty úrovně L1, a to Single Look Complex (skr. SLC) a Ground Range Detected (zkr. GRD). V případě SLC jsou data georeferencovaná s využitím informací o výšce a poloze družice na oběžné dráze a zachovávají informaci o fázi snímku (pro detekci fázového posunu). Produkt GRD obsahuje radarová data zpracovaná pomocí „multilookingu“, tj. vícenásobného snímání jednoho místa pro složení výsledného snímku, a georeferencovaná pomocí referenčního zemského elipsoidu (např. WGS84). Nezachovává se informace o fázi a dochází k redukci šumu (speckle) za cenu nižšího geometrického rozlišení. GRD produkty jsou dostupné ve třech prostorových rozlišeních: Full Resolution (FR), High Resolution (HR) a Medium Resolution (MR), rozlišení závisí na provedeném multilookingu.

Data na úrovni L2 se sestávají z geolokalizovaných produktů získaných z úrovně L1. Zpracování úrovně 2A zahrnuje klasifikaci scény a atmosférickou korekci aplikovanou na ortofotografické produkty úrovně 1C. Hlavním výstupem úrovně 2A je ortofotografický produkt s atmosférickou korekcí a odrazivostí povrchu. (24)

3.2.6 Radar se syntetickou aperturou

Zatímco projekty dálkového průzkumu Země založené na technologii optických systémů využívají záření odražené od zemského povrchu a pozorovaných objektů a zachycují ho pasivními senzory, družice s radarem typu SAR aktivně vysílají přesně stanovené vlnění a zachycují jeho energii při odrazu od zemských objektů. Na rozdíl od optických systémů vyžaduje tato technologie jiný přístup k vyhodnocování dat, zachycený signál je totiž citlivý na charakteristiky povrchu, jako například struktura nebo vlhkost. (25)

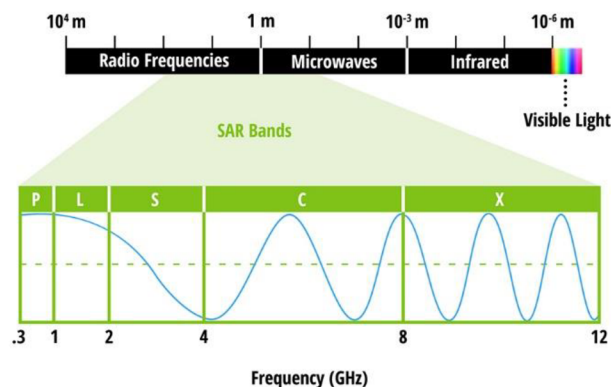
Prostorové rozlišení radarových dat přímo souvisí s poměrem vlnové délky senzoru a délky antény senzoru. Pro danou vlnovou délku platí, že čím delší je anténa, tím vyšší je prostorové rozlišení. Toto prosté řešení by však vyžadovalo použití příliš velkého senzoru, a proto bylo vyvinuto řešení syntetické apertury, které tuto vlastnost dokáže simulovat s použitím menšího senzoru (názorně ukazuje Obrázek 10). Toto řešení spočívá v kombinaci sekvence snímků z menšího senzoru, čímž je simulován větší sensor a jsou získána data s vyšším rozlišením.



Obrázek 10 Geometrie pozorování použitých k vytvoření syntetické apertury pro cíl P (25)

Na rozdíl od optických senzorů, jakým je například MSI (Multispectral Instrument) nesený družicemi Sentinel 2, které sbírají data ve viditelném spektru, blízkém a krátkovlnném infračerveném spektru, využívají radarové senzory delší vlnové délky záření v řádu centimetrů až metrů. To dává systémům založeným na použití radaru možnost snímat i skrz oblačnost. Různé vlnové délky SAR se často označují jako pásma s písmenným označením, například X, C, L a P (viz Obrázek 11). Radarové senzory nesené družicemi Sentinel 1 snímají v pásmu C, což představuje vlnovou délku 7,5 až 3,8 cm.

Vlnová délka je důležitou vlastností, kterou je třeba při práci se SAR zohlednit, protože určuje, jak radarový signál interaguje s povrchem a jak daleko může signál proniknout do prostředí. Například radar v pásmu X, který pracuje na vlnové délce přibližně 3 cm, má velmi malou schopnost proniknout do listnatého lesa, a proto většinou interaguje s listy v horní části korun stromů. Naproti tomu signál v pásmu L má vlnovou délku přibližně 23 cm, čímž dosahuje většího průniku do lesa a umožňuje větší interakci radarového signálu s velkými větvemi a kmeny stromů. Vlnová délka neovlivňuje pouze hloubku průniku do lesa, ale také do jiných typů pokryvu, jako je půda a led.

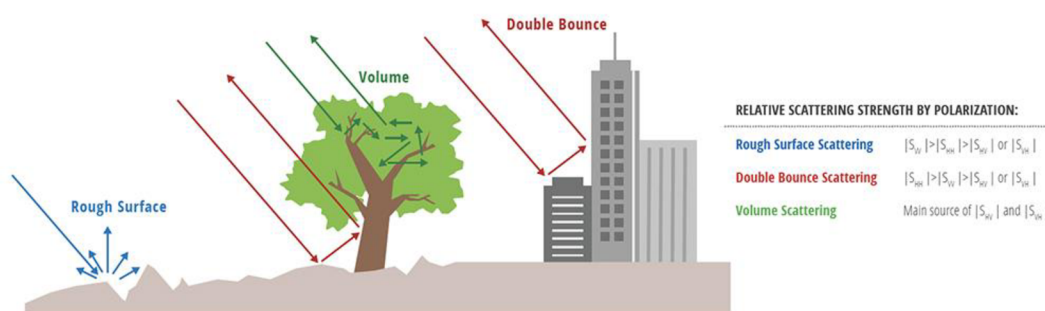


Obrázek 11 Zobrazení elektromagnetického spektra s vyznačením pásem snímaných SAR (25)

Radar dokáže snímat v různých polarizacích tím, že je řízena analyzovaná polarizace jak vysílaného, tak přijímaného signálu. Polarizací je myšlena orientace plochy, ve které je elektromagnetické záření vysíláno. SAR senzory obvykle vysílají lineárně polarizované záření. Horizontální polarizace se označuje písmenem „H“ a vertikální polarizace se označuje písmenem „V“.

Výhodou radarových senzorů je, že polarizaci signálu lze přesně řídit jak při vysílání, tak při příjmu. Signály vysílané ve vertikální (V) a přijímané v horizontální (H) polarizaci se označují VH. Případně signál, který byl vysílán v horizontální (H) a přijímán v horizontální (H) polarizaci, se označuje HH atd. Zkoumání intenzity signálu z těchto různých polarizací nese informaci o struktuře snímaného povrchu na základě následujících typů rozptylu: drsný povrch, objem a dvojitý odraz.

Množství signálu připadající na různé typy rozptylu se může měnit v závislosti na vlnové délce, protože vlnová délka mění hloubku průniku signálu. Například signál v pásmu C proniká pouze do horních vrstev korun stromů v lese, a proto se u něj projeví převážně drsnostní rozptyl smíšený s omezeným množstvím objemového rozptylu. Signál v pásmu L nebo P však proniká mnohem hlouběji, a proto se u něj projeví silně zvýšený objemový rozptyl a také rostoucí množství dvojitého odrazového rozptylu způsobeného kmeny stromů. Velmi názorně je tento jev ukázán na obrázku (Obrázek 12).



Obrázek 12 Odlišení struktury povrchu na základě typu rozptylu (25)

3.3 Data ESA

Data získaná organizací ESA jsou z velké většiny dostupná na internetu zdarma. Přístup k datům je uživateli udělen po předcházející registraci. Některá data jsou přístupná na vyžádání uživatelem. Toto omezení může být zapříčiněno specifickými podmínkami politiky přístupu, technickými nebo finančními omezeními nebo přístup k datovým souborům podléhá předchozímu schválení. (26)

3.3.1 Copernicus Data Space Ecosystem

ESA představila začátkem roku 2023 novou platformu s názvem Copernicus Data Space Ecosystem, která si klade za cíl soustředit veškeré nástroje pro přístup a analýzu dat DPZ programu Copernicus. Tato nová platforma nahrazuje původní aplikaci Copernicus Open Access Hub, jejíž činnost byla v říjnu 2023 ukončena. Ekosystém nabízí okamžitý přístup k velkému množství otevřených a bezplatných dat z pozorování Země a škálovatelných rozhraní nad družicemi Sentinel programu Copernicus, včetně nových i historických snímků Sentinel, komerčních datových sad a také přispívajících misí programu Copernicus. Ekosystém také nabízí cloudové výpočetní služby právě pro zpracování nabízených dat. Hlavními přednostmi této nové platformy je její škálovatelnost, snadné použití a široké možnosti zpracování dat. Kromě toho se uživatel dostane i do archivu všech původních dat programu Copernicus. Všechny tyto aktivity mají být soustředěny právě v tomto jediném ekosystému. (27)

3.3.2 Collaborative Ground Segment – Czech Republic

Pro přístup k datům programu Copernicus je možné využít v České republice platformu Collaborative Ground Segment (3). Tato platforma funguje ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou (ESA), programem Copernicus a českou organizací poskytující infrastrukturu Cesnet. Pro plné využití tohoto nástroje je nutné si nejprve vytvořit registraci, která je ale pro nekomerční uživatele zdarma. Po přihlášení pak může uživatel stahovat data z programu Copernicus bez omezení. Pro vyhledání snímku nejprve uživatel zvolí oblast zájmu a vybere z rozevírací nabídky konkrétní parametry snímku, tedy z jaké

mise programu Copernicus má být snímek, čas jeho pořízení, typ produktu, relativní orbita, pokrytí oblačností ad. Po vyhledání snímků může uživatel prohlížet jednotlivé snímky nebo je přímo stahovat do počítače.

3.3.3 ESA SNAP

Volně dostupný software s názvem SNAP distribuovaný pod ESA je volně stažitelný z jejich webových stránek. Zkratka SNAP představuje slovní spojení Sentinel Application Platform. Tento software je využíván pro zpracování a analýzu dat poskytovaných ESA, jako jsou například družicové snímky Sentinel 1 a Sentinel 2, jejichž zpracování a analýza je předmětem této diplomové práce. SNAP je distribuován v rámci sady nástrojů pro analýzu a zpracování dat Sentinel-1 Toolbox. Tato sada softwarových nástrojů obsahuje jak nástroj SNAP, tak také aplikaci PolSARpro, která obsahuje sbírku algoritmů a nástrojů sloužící k výzkumu a vzdělávání v oblasti radarové polarimetrie. SNAP je také určen ke zpracování dat mise Sentinel 3, umí pracovat i s daty misí ESA Earth Explorer, jako např. satelit SMOS, ale také i s daty z misí třetích stran provozovaných mezinárodními partnery. (4) (28)

SNAP je přizpůsoben k výzkumu, analýze a zpracování dat DPZ, díky čemuž je umožněno vést špičkový vědecký výzkum, vzdělávací a školicí aktivity a také vývoj široké škály provozních aplikací. SNAP je využíván širokým spektrem zájemců jako jsou například akademické obce, poskytovatelé služeb pozorování Země a obecně odvětví satelitního DPZ. SNAP je založen na snadno použitelném rozhraní, které je přístupné i lidem s malými zkušenostmi s kódováním a programováním, stejně jako i odborníkům na analýzu dat DPZ. SNAP tak lze využívat prostřednictvím grafického rozhraní, jako i s pomocí příkazového řádku prostřednictvím skriptování. Díky tomu je tento software vhodný pro použití v počítačích a noteboocích i v datových centrech.

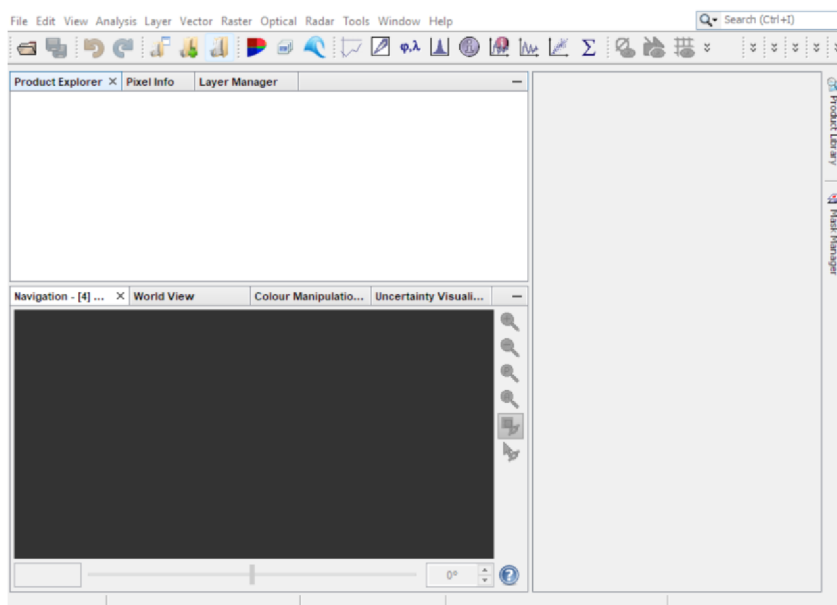
SNAP obsahuje širokou škálu nástrojů, které lze využít pro analýzu a zpracování dat napříč různými platformami ESA, jako například nástroje pro polarimetrii, interferometrii, kalibraci, koregistraci, ortorektifikaci nebo konverzi dat.

V této práci byl použit software SNAP ve verzi 9.0.0.

3.3.4 Práce se SNAP

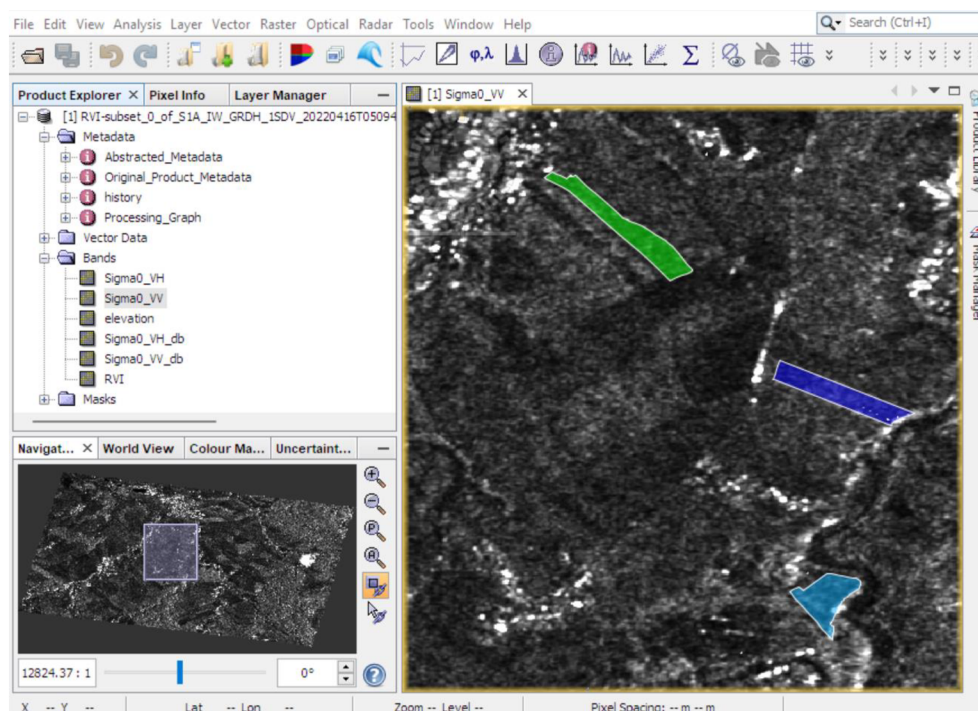
Po spuštění aplikace se uživateli otevře okno programu (Obrázek 13). V horní části se nachází lišta s pracovními nástroji. V pravé polovině obrazovky se nachází okno pro zobrazení otevřeného snímku, to je po spuštění programu prázdné. V levé polovině obrazovky se nachází dvě okna se záložkami. Vrchní okno obsahuje záložky Product Explorer, Pixel Info a Layer Manager. Toto okno je také po spuštění programu prázdné, a to z důvodu, že zatím nebyl v programu otevřen žádný snímek, který uživatel zpracovává. Spodní okno obsahuje také více záložek, ze kterých je pro uživatele nejdůležitější ta první

s názvem Navigation. Zde se po otevření snímku ukazuje velikost výřezu snímku, který uživatel vidí v hlavním okně a pomáhá tak s orientací na tomto snímku.



Obrázek 13 Úvodní okno programu SNAP

Otevření snímku k jeho zpracování se provádí buď otevřením přes kontextové menu programu nebo jen prostým přetažením myši ze složky do okna programu. Ten si poté načte potřebná data a v okně Product Explorer zobrazí otevřený soubor s rozevírací nabídkou, kde může uživatel nahlížet do jednotlivých komponent snímku (Obrázek 14). Soubor snímku obsahuje také jeho metadata, která lze při zpracování snímku použít. Pro každé pásmo dat existuje datová sada anotací produktu, jejichž metadata popsují hlavní charakteristiky odpovídající danému pásmu, jako je například stav platformy během pořizování, vlastnosti obrazu, polarizace, dopplerovské informace, sloučení pásem a zeměpisná poloha. Kalibrační anotace obsahují informace, které lze použít pro absolutní kalibraci produktu. Anotace šumových dat obsahují odhadované tabulky tepelného šumu. Sady anotovaných dat jsou poskytovány ve formátu XML. (29)



Obrázek 14 Snímek mise Sentinel 1 otevřený v programu SNAP

3.3.5 Kalibrace a příprava snímku pro zpracování

Družicové snímky stahované z databáze ESA mají standardně velikost přes 1 GB. To komplikuje manipulaci s takovýmto snímek a zbytečně zabírá místo na disku počítače. Zpracování takto velkého snímku také značně zvyšuje zátěž na hardware počítače a prodlužuje práci s daty. Z celého snímku se proto pořizuje jen výřez zájmové oblasti. To dokáže snížit velikost snímku řádově na vyšší desítky MB, případně nízké jednotky stovek MB. Výřez snímku najdeme při práci s programem pod pojmem „subset.“ Vyříznutí snímku není pro úspěšné zpracování snímku podstatné, ale výrazným způsobem usnadňuje následnou práci.

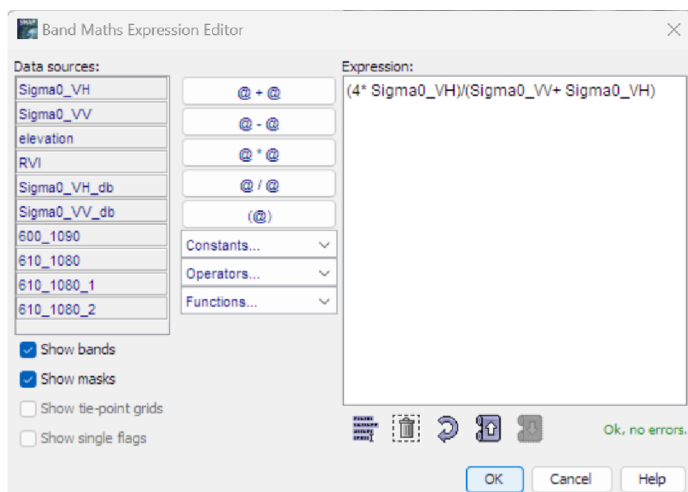
3.3.6 Výpočet RVI v programu SNAP

Výpočet indexu RVI se v programu SNAP provádí pomocí nástroje Band Maths (Obrázek 15). RVI bylo vypočteno vzorcem (1) podle Charbonneau a kol. (2005) Výstupem je nové pásmo snímku s tímto vypočteným indexem. Veškerá data se ukládají do souboru programu SNAP a jsou kompatibilní i s dalšími GIS programy, takže není potřeba soubory zvlášť exportovat.

$$RVI = \frac{(4\sigma^{oVH})}{(\sigma^{oVV} + \sigma^{oVH})}$$

(1)

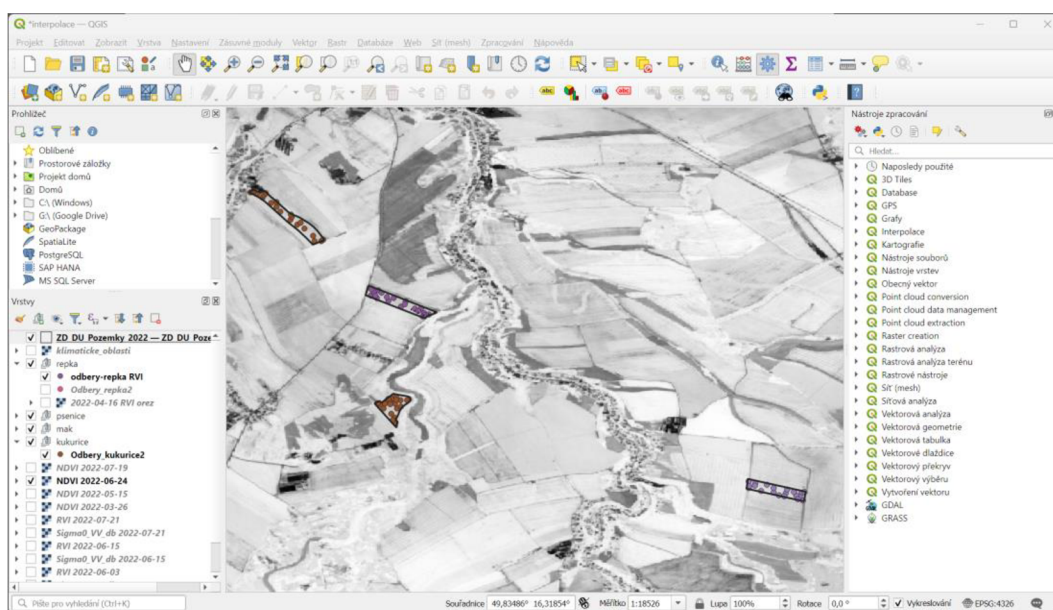
kde VV a VH představují duální polarizace radarového snímku



Obrázek 15 Nástroj Band Maths programu SNAP s předpisem rovnice pro výpočet RVI

3.4 Software QGIS

Data, která byla předzpracována v programu SNAP byla dále zpracovávána prostřednictvím softwaru QGIS (Obrázek 16), který je volně dostupný ke stažení z webu. Verze softwaru použitá pro tuto diplomovou práci byla 3.34. Program nabízí mnoho pokročilých nástrojů a umožňuje snadným způsobem pracovat s daty DPZ.



Obrázek 16 Okno programu QGIS

QGIS je výkonný geografický informační systém (GIS), který se vyznačuje širokou podporou různých formátů geodat, včetně vektorových, rastrových a databázových formátů. Díky této flexibilitě mohou uživatelé bez problémů zpracovávat a analyzovat data z různých zdrojů. Program nabízí bohaté možnosti pro tvorbu a editaci dat, umožňuje pracovat s atributy a geometrií objektů a poskytuje nástroje pro pokročilé prostorové analýzy, jako

jsou bufferování, overlay operace a prostorové dotazy. Tyto funkce uživatelům umožňují provádět komplexní geoprostorové analýzy a získávat z dat hlubší poznatky.

Kromě toho QGIS podporuje rozšíření funkcionalit prostřednictvím zásuvných modulů, což umožňuje přizpůsobení programu specifickým potřebám uživatelů. Zásuvné moduly, které mohou být vytvořeny v jazycích Python nebo C++, rozšiřují možnosti QGIS o nové nástroje a funkce. Program také nabízí pokročilé nástroje pro vizualizaci dat a tvorbu map, včetně podpory pro tematické mapování a složité mapové kompozice určené pro tisk nebo webové publikování. Díky multiplatformní podpoře je QGIS dostupný pro širokou škálu operačních systémů, což uživatelům zajišťuje vysokou úroveň flexibility a přístupnosti v různých pracovních prostředích

3.5 Rešerše k analýze radarových dat

Steele-Dunne (30) ve svém review uvádí k využití radarových aplikací pro monitoring vegetace, že stále (v r. 2018) přetrvává dilema ohledně výběru vhodného modelu. Široce využívaným modelem je dle článku model WCM (Water Cloud Model), který je oblíbený také pro svoji jednoduchost. Jeho klíčové předpoklady týkající se rozložení vlhkosti v korunách stromů neplatí obecně. Více teoretické přístupy založené na energii a vlnění jsou zatím předmětem výzkumu také kvůli velkému počtu vstupních parametrů. Takový požadavek na sběr dat je možný jen během intenzivní terénní výzkumné činnosti, ale je příliš časově náročný a nákladný na to, aby se dal provádět pravidelně a pro všechny možné typy vegetace. Kromě toho článek uvádí, že i modely založené na reprezentaci vegetačního krytu pomocí energie a vlnění jsou stále příliš zjednodušené. Uvádí, že je zapotřebí nový přístup k modelování, který bude odrážet nerovnoměrnost a dynamický profil obsahu vlhkosti a význam vícenásobného odrazu mezi povrchem půdy a vegetací. Aby mohl být takový model použitelný, musí být dle článku stejně jednoduchý na parametrizaci a použitelný jako model WCM.

3.5.1 WCM (Water Cloud Model)

Model WCM je široce využívaný model pro analýzu zpětného radarového rozptylu k získání informace o vlhkosti půdy na poli zkoumaného porostu. Water Cloud Model (WCM) je semi-empirický model, který slouží k interpretaci a analýze zpětného rozptylu mikrovlnných signálů z vegetací pokrytých oblastí, zejména v aplikacích zaměřených na odhad vlhkosti půdy nebo biofyzikálních parametrů vegetace. WCM předpokládá, že vegetační kryt je homogenní "oblak" vodních částic a že celkový zpětně rozptýlený signál je možné vyjádřit jako nekoherentní součet příspěvků od vegetační vrstvy a od podkladového drsného povrchu. Tento model se ukázal jako užitečný nástroj pro odvozování fyzikálních vlastností vegetace a půdy vzhledem k jeho schopnosti modelovat komplexní rozptylové charakteristiky vegetačně pokrytých oblastí pomocí jednoduchých vegetačních deskriptorů, jako je například obsah vody ve vegetaci nebo listový plošný index (LAI).

Hlavním výzvám při použití WCM je kalibrace modelu, což zahrnuje určení optimálních vegetačních deskriptorů a parametrizaci modelu na základě specifických podmínek pozorování a heterogenity pozemního povrchu. Kalibrace WCM byla prováděna pomocí experimentálních dat o vlhkosti půdy a drsnosti povrchu, stejně jako hodnot NDVI získaných z optických snímků, což umožňuje vývoj metodiky pro inverzi radarového signálu v zemědělských oblastech. Významným výsledkem kalibrace WCM je, že příspěvek půdy k celkovému zpětnému rozptylu je v polarizaci VV dominantní, když je vlhkost půdy mezi 5 a 35 vol % a NDVI mezi 0 a 0,8, ale tento příspěvek klesá s rostoucím NDVI nebo klesající vlhkostí půdy. V polarizaci VH se příspěvek půdy k celkovému signálu výrazně snižuje s rostoucím úhlem dopadu a NDVI nebo s klesající vlhkostí půdy, což naznačuje, že použití polarizace VH samotné nebo ve spojení s VV pro odhad vlhkosti půdy není optimální v případě dobře vyvinutého vegetačního krytu.

Tento model také umožňuje teoretické hodnocení a výběr optimálních vegetačních deskriptorů tím, že zkoumá vztah mezi parametry vegetace ve WCM a předpověďmi teoretického modelu rozptylu. V praktickém použití WCM je však hlavním problémem parametrizace tohoto zjednodušeného modelu kvůli heterogenitě skutečného povrchu země. Různé deskriptory vegetace, včetně obsahu vody v rostlinách (VWC) a listového plošného indexu (LAI), byly použity jako vegetační deskriptory ve WCM, ale existuje nedostatek konsenzu ohledně výběru optimálních deskriptorů. (31)

3.5.2 Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI)

Normalizovaný vegetační index, jehož zkratka NDVI je odvozena z anglického názvu Normalized Difference Vegetation Index, se využívá pro určení stavu vegetace v rámci zkoumané plochy. Kvantifikace vegetace pomocí NDVI je založena na měření rozdílu mezi blízkým infračerveným zářením (NIR), které vegetace silně odráží a červeným spektrem viditelného záření, které vegetace pohlcuje. Zdravá vegetace obsahující chlorofyl odráží více NIR a zeleného spektra viditelného záření, a naopak pohlcuje červené a modré spektrum viditelného záření. Hodnoty NDVI se mohou pohybovat od -1 do 1, přičemž hodnoty okolo 0 indikují vodní plochy, případně jiné plochy, než vegetace, například zástavba apod. Hodnoty NDVI pro porosty vegetace se pohybují v kladných číslech, přičemž vyšší hodnota znamená zdravější porost s hustým pokryvem vegetace. Index NDVI se počítá podle vzorce (2), viz níže. (32)

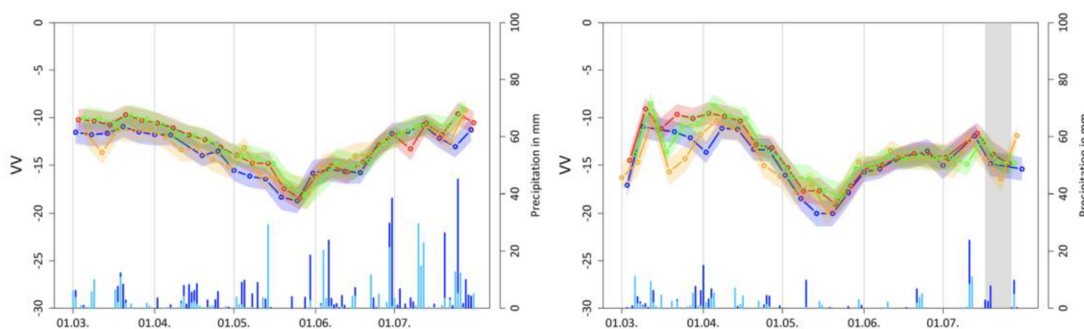
$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

(2)

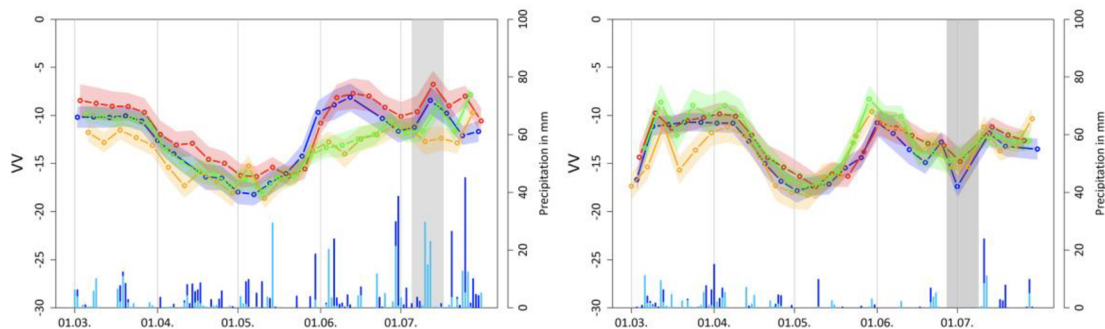
Vzorec výpočtu NDVI (32), NIR – pásmo blízké infračervenému EZ (Near Infra Red), Red – červené pásmo viditelného spektra

3.5.3 Analýza charakteristiky porostu podle K. Harfenmeister

K. Harfenmeister (33) ve své studii (2019) využila pro mapování strukturálních změn plodin v čase snímky zpětného rozptylu SAR v polarizacích VH a VV. Strukturální změny porostu, rozdíly ve vlhkosti a pokryvu plodiny jsou vyjádřeny ve vývoji zpětného rozptylu SAR. Z tohoto výzkumu vyplynulo, že parametry plodin, jako například absolutní a relativní obsah vody ve vegetaci, index listové plochy, výška rostlin souvisí s parametry zpětného rozptylu SAR za využití lineární, exponenciální i vícenásobné regrese. Bylo zjištěno, že analýza časového profilu i regresní analýza poskytují závěry o mechanismech zpětného rozptylu u pšenice a ječmene v různých fenologických stupních vývoje. Časové profily pšenice a ječmene ukazují citlivost na strukturální změny rostlin, jako je odnožování a také na změny vlhkosti. Fenologický vývoj rostlin je naznačen útlumem odrazu signálu, což je způsobeno růstem vegetace na jaře, dosažením určité výšky a rozvojem praporcových listů. Zpětný rozptyl se zvyšuje s růstem klasů, to pomáhá vyvodit závěry o jejich poloze a vlhkosti zrna. Tyto informace pomáhají zemědělcům určit optimální termíny hnojení nebo sklizně. Výzkum také ukázal, že rozdíly mezi poli jsou výrazně větší, než je variabilita uvnitř pole, a to kvůli geometrickým charakteristikám snímků SAR. Navíc strukturální změny rostlin nebyly vždy reprodukovány změřenými parametry rostlin. Výsledky regresní analýzy byly úspěšné pro porosty pšenice v raných fenologických fázích od vzcházení až po odnožování. Hodnoty koeficientu determinace se pohybovaly okolo 0,7 v případě SAR snímků s VV polarizací pro všechny parametry porostu kromě objemového obsahu vody. Také poměr VH/VV ve srovnání s hmotností vlhké biomasy a výšky rostliny vykazuje hodnoty R^2 nad 0,6. Výsledky regrese pro celá pole převyšuje hodnoty R^2 nad 0,9 v těchto fenologických fázích, především pro pole s pšenicí a hodnoty zpětného rozptylu VV a vícenásobné regrese. Harfenmeister uvádí v závěru své studie, že se výsledky regrese výrazně lišily mezi jednotlivými poli. To bylo zapříčiněno rozdíly v kvalitě polních dat, úhly polních řádků, srážkami a také obhospodařováním pole. Regresní rovnice jsou zatím stále závislé na dostupných polních datech, přestože obecné trendy jsou již patrné. K nalezení obecně platných regresních rovnic je dle Harfenmeister zapotřebí dalšího výzkumu, především širší datová základna s větším časovým obdobím. (33)



Obrázek 17 Časové profily snímků zpětného odrazu v polarizaci VV pro porost pšenice z let 2017 (vlevo) a 2018 (vpravo) včetně standardních odchylek. Modré sloupce představují denní srážky na pokusných pozemcích. (33)



Obrázek 18 Časové profily snímků zpětného odrazu v polarizaci VV pro porost ječmene z let 2017 (vlevo) a 2018 (vpravo) včetně standardních odchylek. Modré sloupce představují denní srážky na pokusných pozemcích. (33)

Dle výzkumu Harfenmeister (33) vykazují obě pozorované plodiny (pšenice a ječmen) charakteristickou křivku (Obrázek 17 a Obrázek 18), kdy sledovaná křivka VV polarizace až do května vykazuje klesající trend a následně opět stoupá. Variace zpětného odrazu signálu je zdůvodněna různým podílem půdy a vegetace, stejně jako měnicími se parametry na základě růstu sledovaných plodin.

Práce K. Harfenmeister (33) se také zabývá analýzou snímků s VH polarizací. Ty jsou více citlivé na objemový rozptyl signálu od vegetace. U rostlin jako pšenice a ječmen dominuje v raných fenologických fázích zpětný rozptyl půdy. Signál VH polarizace je především ovlivňován rozptylem signálu mezi stonky a půdou tvořící tak dvojitý rozptyl. Hodnoty odrazivosti jsou také výrazně ovlivněny vlhkostí půdy.

3.5.4 Výzkum Tůma a kol.

V rámci studie (34) byl prozkoumán potenciál RVI získaného z radarových snímků Sentinel 1 pro monitorování a řízení plodin pšenice a řepky v České republice. Bylo zjištěno, že vývoj RVI úzce koresponduje s fenologickou křivkou, což naznačuje, že radarová data mohou účinně doplnit optická data získaná z jiných družicových misí. Tento závěr otevírá možnosti pro zlepšení přesnosti satelitních dat a zajištění jejich použitelnosti pro specifické řízení rostlinné produkce, a to i v podmínkách, kdy jsou optická data omezena kvůli oblačnosti. Navzdory pozitivním výsledkům zůstává otázka, zda mohou radarová data optická data plně nahradit, otevřená a vyžaduje si další zkoumání.

Dalším klíčovým zjištěním je, že při analýze vegetace pomocí časových řad Sentinel-1 je nutné zohlednit anizotropii zpětného rozptylu, která je způsobena různými úhly dopadu a azimutálními úhly. Výzkum odhalil, že relativní orbita a platforma jsou pro interpretaci radarových dat klíčové a jejich správný výběr může vést k výraznému zlepšení kvality RVI dat. Tento závěr naznačuje, že pro dosažení spolehlivých výsledků monitorování plodin pomocí radarových dat je nezbytné provést pečlivý výběr a analýzu satelitních konfigurací.

Z výzkumu dále vyplynulo, že ačkoliv RVI poskytuje slibné výsledky pro monitorování fenologického vývoje pšenice a řepky, existuje potřeba dalšího výzkumu

v oblasti odstraňování prostorového a časového šumu. Tato problematika je klíčová pro zajištění přesných a spolehlivých výsledků, které jsou nezbytné pro efektivní řízení zemědělské produkce. Výsledky studie tedy otevírají cestu k dalšímu vývoji metod pro zpracování a interpretaci radarových dat v kontextu precizního zemědělství, což může mít významný dopad na řízení plodin v různých agroekologických podmínkách.

3.5.5 Výzkum R. Nasirsadehdizaji a kol.

Studie R. Nasirsadehdizaji (35) zkoumala využití polarimetrických SAR dat zpětného rozptylu získaných ze satelitů Sentinel-1 v zemědělské oblasti pro sledování růstu různých typů plodin (kukuřice, slunečnice, pšenice a brambory) a mapování plodin pomocí polarimetrických kompozitních obrázků vytvořených z analýzy časových dat. Bylo zjištěno, že každý podobný typ plodiny na různých testovacích polích vykazoval odlišné intenzity hodnot zpětného rozptylu v důsledku rozdílných metod zavlažování a hnojení, avšak všechny sledovaly zhruba totožný trend zpětného rozptylu během růstových fází plodiny. Toto zjištění umožňuje extrahovat užitečné informace, například odhadovat čas zavlažování a sklizně na základě změn v hodnotách zpětného rozptylu.

Dále bylo zjištěno, že mezi oběžnými drahami ve vzestupné a sestupné fázi ve VH a VV polarizacích byla vysoká shoda v hodnotách zpětného rozptylu pro každé pole se stejným typem plodiny, zejména ve sestupné fázi s VH polarizací. Naproti tomu byly ve VV polarizaci zaznamenány vysoké hodnoty pro všechny typy plodin. Kromě toho bylo zjištěno, že polarimetrické kompozitní vzory křivek pro různá data jsou užitečné pro hrubé identifikaci typů plodin, což bylo ověřeno aplikací metod klasifikace v studované oblasti. Předběžné výsledky ukázaly, že SAR data poskytují užitečné informace o stavu plodin, což činí radarová data ze Sentinel-1 ideální volbou díky jejich volné dostupnosti a stálému dlouhodobému archivu dat.

3.6 Precizní zemědělství

Precizní zemědělství (PZ) představuje inovativní přístup k hospodaření na zemědělské půdě, jehož cílem je optimalizovat využití zdrojů a maximalizovat efektivitu produkce. Tento přístup je založen na využívání pokročilých technologií, jako jsou geoinformační systémy (GIS), globální navigační satelitní systémy, senzory a aplikace pro precizní řízení zemědělské techniky. Díky těmto technologiím je možné dosáhnout přesného mapování variability půdních a agroekologických podmínek, což umožňuje detailně monitorovat a spravovat jednotlivé části polí s ohledem na jejich specifické požadavky. Potenciálně je tedy možné, že v rámci technologie PZ se budou využívat i radarová data, která mohou poskytovat informace o vývoji porostu častěji a s vyšší přesností. Kromě toho se díky tomu nabízí dávkové zpracování dat, protože se ukazuje, že technologie PZ jsou zatím využívány spíše většími zemědělskými podniky hospodařícími na větších rozlohách pozemků. PZ tak překonává tradiční přístup považující zemědělské pozemky za homogenní celky a namísto

toho zavádí diferencovaný management, kde jsou agrotechnická opatření přizpůsobena malým parcelám v rámci větších celků. To vede k efektivnějšímu využití hnojiv, osiv, přípravků na ochranu rostlin i zavlažování, a tím k zvýšení udržitelnosti zemědělské výroby. Současně PZ nabízí potenciál pro snižování negativního dopadu zemědělské činnosti na životní prostředí, podporu biodiverzity a zvýšení výnosů. (36)

3.6.1 Zaváděná opatření PZ

V kontextu implementace PZ se nabízí široké spektrum cílených opatření, která jsou navržena tak, aby maximalizovala efektivitu zemědělské produkce při současném minimalizování dopadů na životní prostředí. Tato opatření jsou založena na detailním pochopení a analýze variabilit podmínek specifických pro jednotlivé části polí, a zahrnují techniky jako optimalizaci pojezdových linií, variabilní setí a hnojení, přesně cílenou ochranu rostlin, a také sofistikované metody pro odhady a měření výnosů. (36)

Optimalizace pojezdových linií využívá pokročilé navigační systémy pro plánování efektivních tras pohybu zemědělské techniky po poli. Tímto způsobem je možné výrazně snížit množství neproduktivních přejezdů a zároveň minimalizovat riziko zhutnění půdy, což přináší pozitivní efekty jak pro samotnou půdu, tak pro celkovou efektivitu zemědělské produkce. Variabilní setí a hnojení představují další klíčové prvky, které se opírají o přesné informace o nutričních potřebách plodin a podmínkách růstu v různých částech pozemku. Díky této strategii je možné adaptivně regulovat množství osiva a hnojiv podle aktuálních potřeb každé části pozemku, čímž se optimalizuje využití vstupů a současně se snižuje riziko negativních dopadů na životní prostředí. V oblasti ochrany rostlin umožňuje precizní zemědělství využití senzorů a dálkového průzkumu pro detekci škůdců a nemocí, což umožňuje provádět zásahy cíleně a s vysokou přesností. Tento přístup nejenže zvyšuje efektivitu ochranných opatření, ale také výrazně snižuje množství potřebných pesticidů. Odhady a měření výnosu jsou nezbytné pro posouzení úspěšnosti zavedených opatření a pro budoucí plánování. Využití výnosoměrů a technologií dálkového průzkumu poskytuje důležité informace o produkci a pomáhá identifikovat oblasti, kde je možné procesy dále optimalizovat pro zvýšení výnosů a zvýšení efektivity produkce.

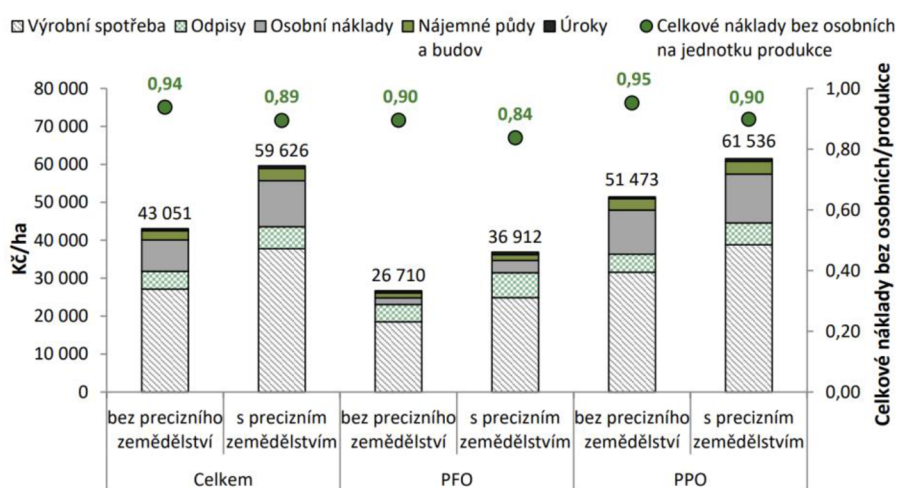
Tato integrace technologických inovací do zemědělské praxe vyžaduje nejen investice do nových technologií, ale také neustálé vzdělávání a adaptaci pracovních postupů, aby bylo možné tyto nástroje využít co nejefektivněji.

3.6.2 Náklady na zavedení a provoz PZ

Ze studie FADN (37) vyplynulo, že implementace technologií PZ, ačkoli vyžaduje významné počáteční investice a provozní náklady, přináší zemědělským podnikům řadu nepopíratelných výhod, které se projevují v zlepšení ekonomické efektivity a udržitelnosti. Podle dat za rok 2021 (také ukázáno na Obrázek 19 a Obrázek 20) se celkové náklady

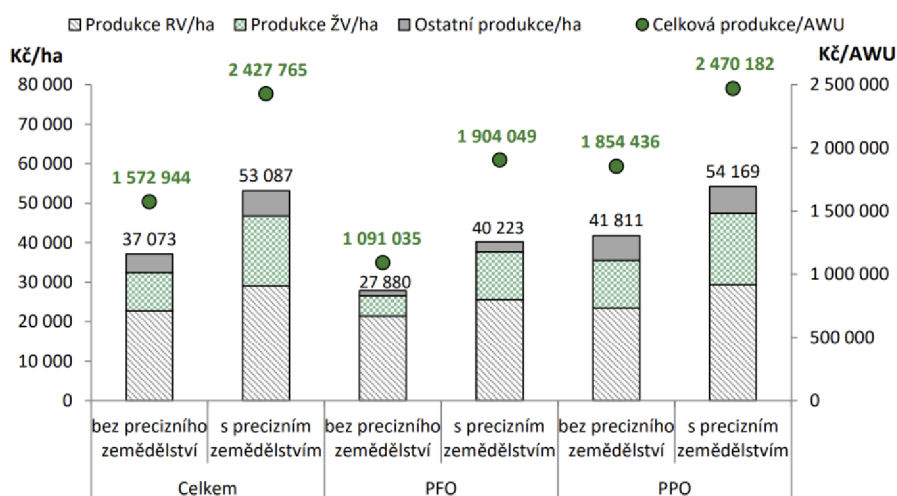
podniků aplikujících principy PZ vyšplhaly na 59,6 tis. Kč na hektar, což bylo o 38,5 % více ve srovnání s tradičně hospodařícími podniky, jež zaznamenaly náklady ve výši 43,1 tis. Kč na hektar. Nicméně, díky optimalizovanému využívání zdrojů a zefektivnění produkčních procesů, které technologie PZ umožňují, dosáhly tyto podniky na hektar o 43,2 % vyšší celkové produkce, a to ve výši 53,1 tis. Kč oproti 37,1 tis. Kč u podniků bez těchto inovací. Tato vyšší produktivita, společně s lepším využitím pracovní síly a snížením spotřeby vstupů na jednotku produkce odhaluje, že navzdory vyšším počátečním nákladům, precizní zemědělství vede ke zvýšení rentability a výnosů.

Ze studie také vyplývá, že zavádění technologií PZ využívají více podniky hospodařící intenzivním způsobem. Z ekonomických důvodů, především pokud se jedná o úspory z rozsahu, je zřejmé, že se implementace konceptu PZ vyplatí především velkým zemědělským podnikům hospodařícím na větších rozlohách pozemků.



Zdroj: Šetření FADN CZ

Obrázek 19 Celkové náklady podniků s PZ a bez PZ v roce 2021 (37)



Zdroj: Šetření FADN CZ

Obrázek 20 Celková produkce podniků s PZ a bez PZ 2021 (37)

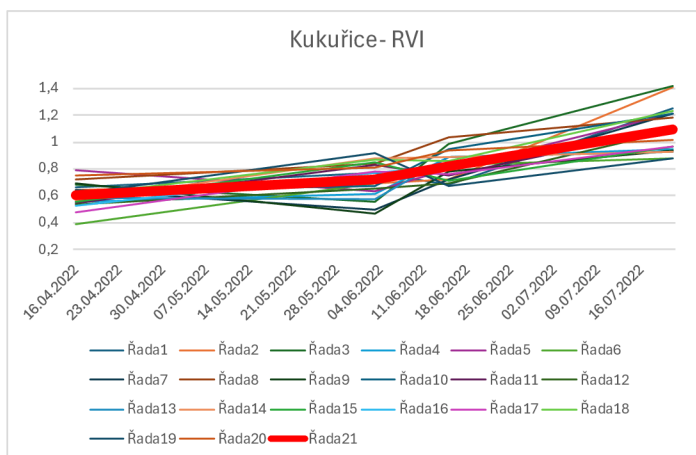
4 Výsledky a diskuse

V této práci byly zpracovány vhodné satelitní snímky. Jednalo se o radarové snímky mise Sentinel 1 jako primární zdroj informací a o optické snímky mise Sentinel 2, které sloužily jako referenční ve vztahu ke zkoumaným radarovým snímkům. Radarové snímky byly využity pro výpočet RVI a také byly využity snímky s VV polarizací. Z optických snímků byl vytvořen NDVI, který v časové řadě sloužil jako referenční k porovnání s RVI a radarovými snímky s VV polarizací.

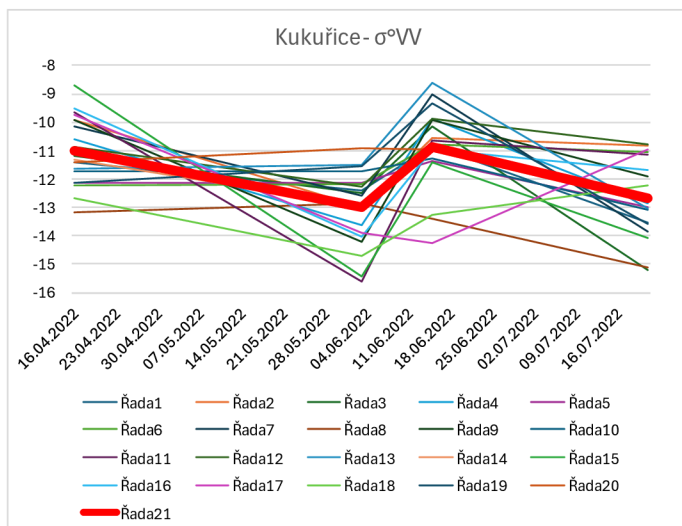
4.1 Časové srovnání RVI, VV polarizace a NDVI

U jednotlivých porostů bylo provedeno časové porovnání hodnot RVI, VV polarizace a NDVI. Nejprve byly k jednotlivým zkoumaným bodům na pozemku přiřazeny hodnoty postupně RVI, VV polarizace a NDVI ze zpracovaných snímků. V každém z časových okamžiků byla vypočtena střední hodnota, která je v grafech vynesena sytě červenou barvou a zvýrazněna.

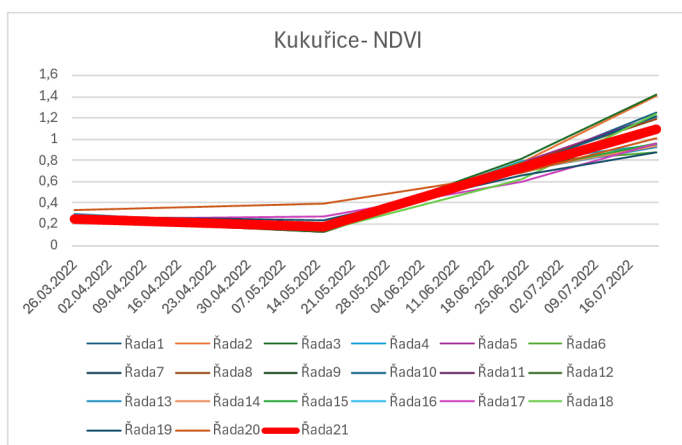
4.1.1 Kukuřice



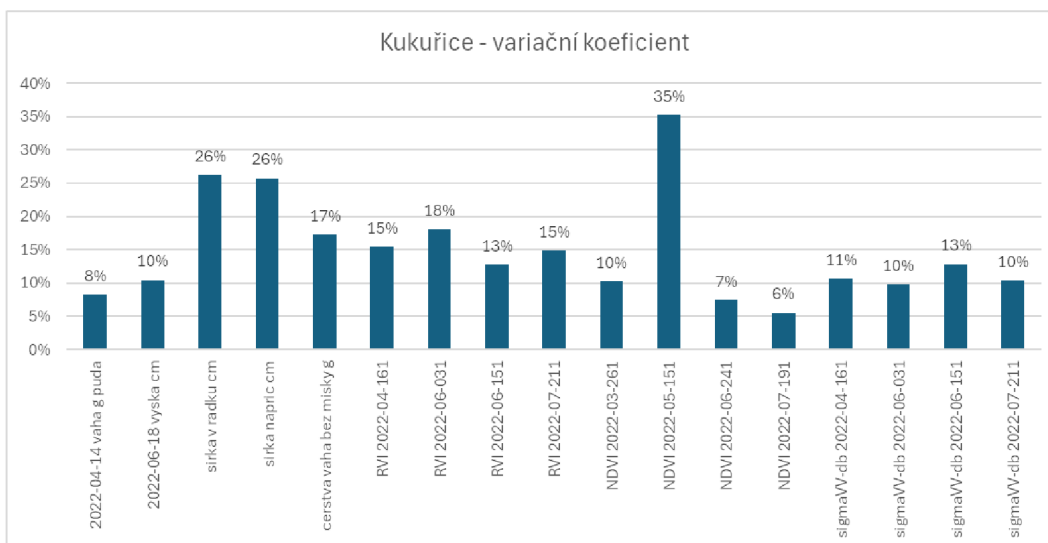
Obrázek 21 Hodnoty RVI porostu kukuřice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



Obrázek 22 Hodnoty snímku polarizace VV u porostu kukuřice, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku



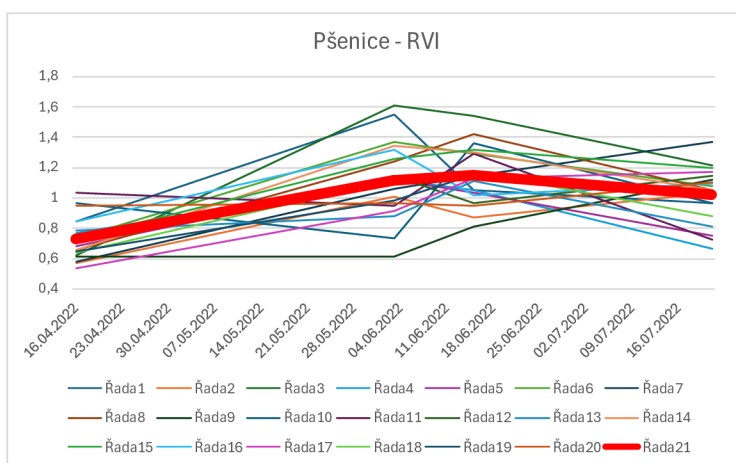
Obrázek 23 Hodnoty NDVI pro porost kukuřice, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



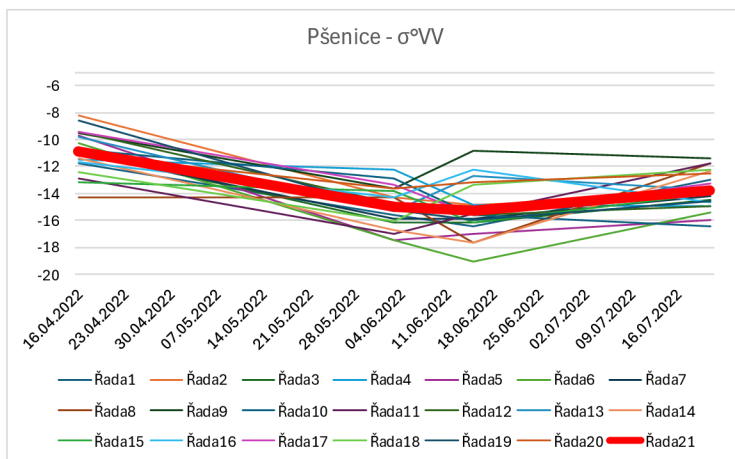
Obrázek 24 Hodnoty variačních koeficientů použitých dat

Porosty kukuřice vykazují běžné hodnoty všech zkoumaných parametrů s ohledem na jiné výzkumy, např. Harfenmeister 2019. Hodnoty RVI (Obrázek 21) vykazují téměř lineární růst, přestože by bylo očekáváno zpomalení růstu křivky přibližně od června dále. Na datech s VV polarizací (Obrázek 22) je patrný pokles hodnot mezi dubnem a červnem, kdy dochází vlivem rozrůstání rostlin k útlumu zpětného odrazu radiového signálu. Hodnoty variačních koeficientů (Obrázek 24) u družicových dat vykazují podobné hodnoty při porovnání radarových a optických dat, ale i při srovnání s referenčními daty získanými terénním průzkumem.

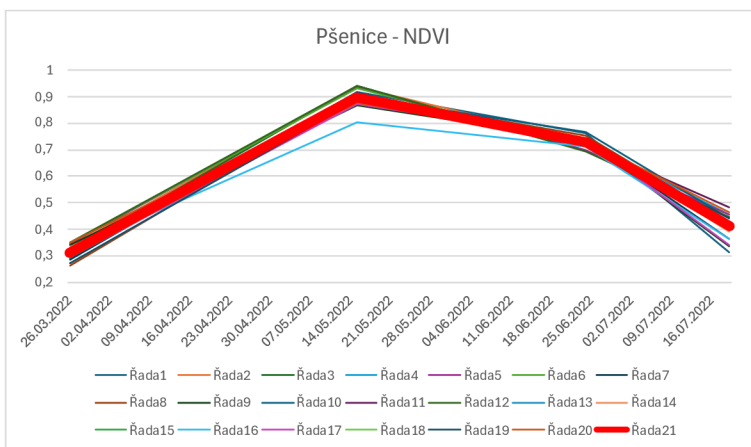
4.1.2 Pšenice



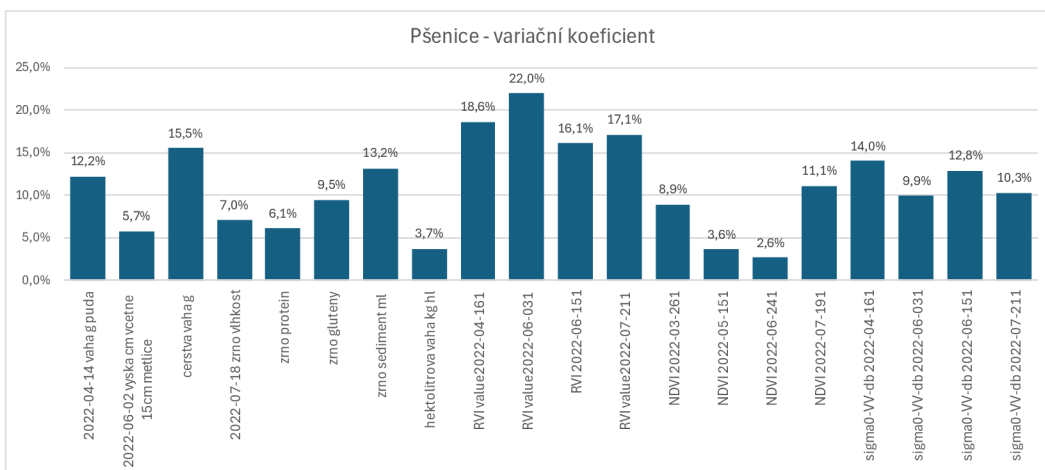
Obrázek 25 Hodnoty RVI pro porost pšenice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



Obrázek 26 Hodnoty bodů SAR snímku s VV polarizací pro porost pšenice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku



Obrázek 27 Hodnoty NDVI pro porost pšenice v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku

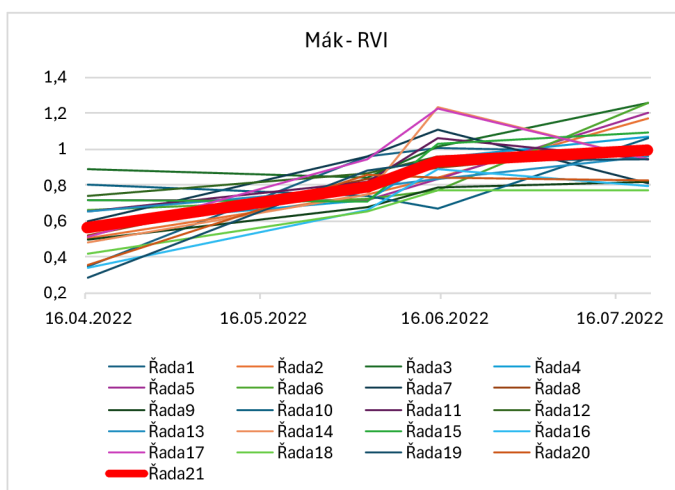


Obrázek 28 Hodnoty variačního koeficientu pro použítá data porostu pšenice

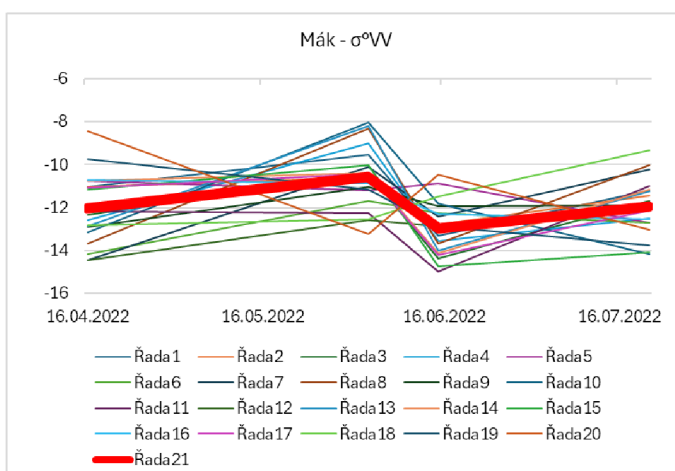
Křivky RVI pro porost pšenice (Obrázek 25) vykazují vyšší hodnoty variačního koeficientu převyšující 15 %. Naproti tomu křivka NDVI (Obrázek 27) vykazuje velmi nízké

hodnoty variačního koeficientu. Křivka polarizace VV (Obrázek 26) má mezi měsícem dubnem a červnem klesající trend, což nejspíše souvisí s růstem plodin, jejich rozvojem a tím pádem útlumem odraženého radarového signálu. Růst křivky během fáze dozrávání pšenice už není tak strmý, jako například u kukuřice. Výzkum Harfenmeister naznačuje, že by se mohlo jednat o to, že útlum signálu zůstává nízký z důvodu vertikální polohy klasů i během dozrávání, ale také je do velké míry ovlivněn vlhkostí půdy. Výzkum Harfenmeister porovnával křivky pro porosty pšenice a ječmene, u kterého na rozdíl od pšenice při dozrávání dochází ke sklonění klasů. I zde se ukazuje, že křivka VV polarizace (Obrázek 25) v případě pšenice ve fázi dozrávání má velmi nízký vzrůstající trend. Kromě polohy klasů to ale může být způsobeno i nízkou vlhkostí půdy, pro toto tvrzení ale nejsou dostupná data.

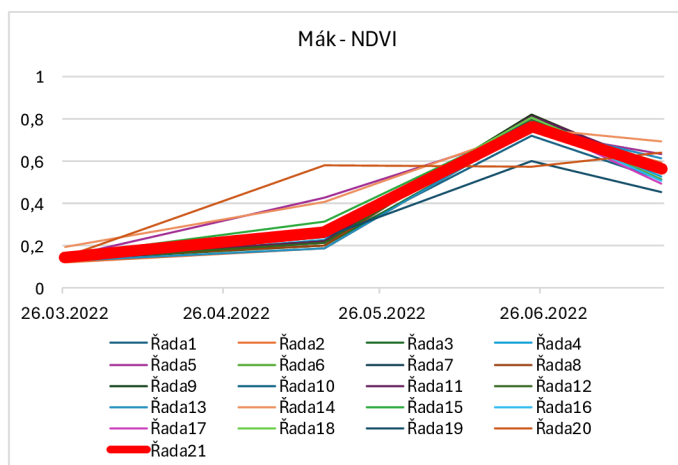
4.1.3 Mák



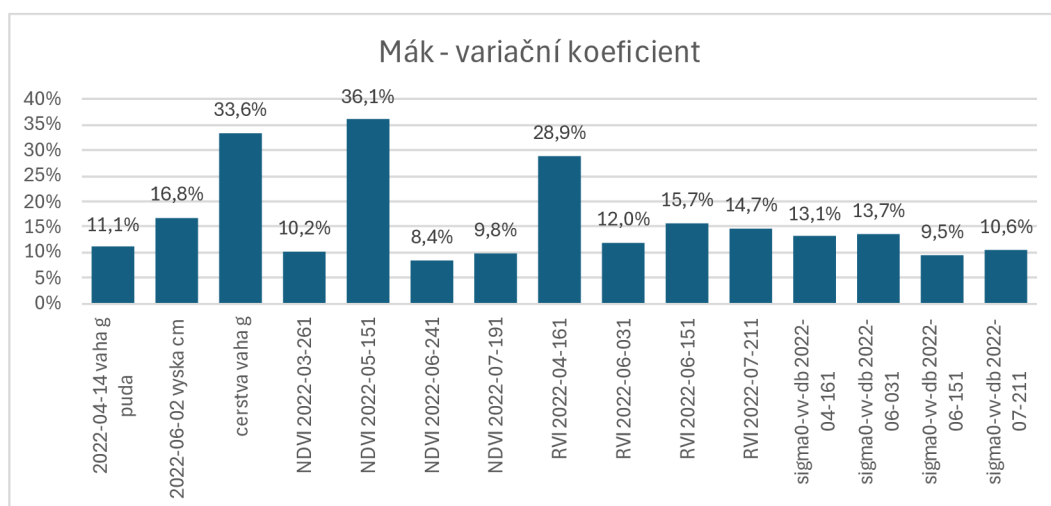
Obrázek 29 Hodnoty RVI pro porost máku v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



Obrázek 30 Hodnoty SAR snímku v polarizaci VV pro porost máku v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku



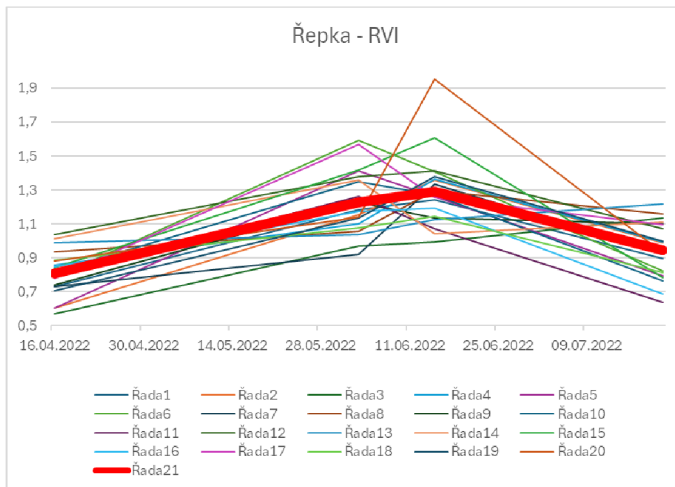
Obrázek 31 Hodnoty NDVI pro porost máku v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



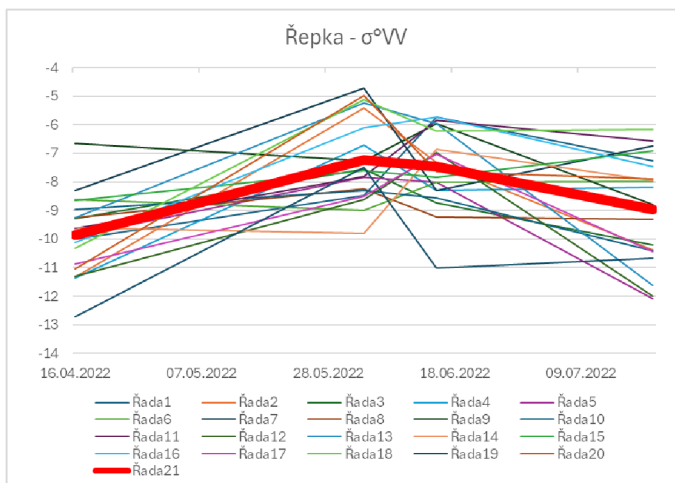
Obrázek 32 Hodnoty variačního koeficientu pro sledované parametry porostu máku

Hodnoty variačního koeficientu pro křivky porostu máku (Obrázek 32) vykazují podobné odchylky jako referenční terénní data v rozmezí 10 až 15 %. To ukazuje, že zachycené rozdíly v rámci pozemku pomocí satelitních snímků nijak nevybočují z variability porostu zachycené referenčními daty. Podle dat indexu NDVI (Obrázek 31) lze usuzovat, že vývoj vegetace máku byl v zachyceném období nejprve pozvolnější a akceleroval během května. Průběh křivky VV polarizace (Obrázek 30) je charakteristický pro zemědělské plodiny, je zde patrné období, kdy došlo k vzejití porostu a tvorbě většiny biomasy, stejně tak následné dozrávání a usychání stonků máku, kdy se křivka nevrací na původní hodnoty a má mírný rostoucí trend. Velmi podobný trend křivek VV polarizace můžeme sledovat i u ostatních plodin (Obrázek 22, Obrázek 26, Obrázek 34). Výzkum Harfenmeister (33) tvrdí, že hodnoty VV polarizace jsou citlivé na srážky a vlhkost půdy. Nízké hodnoty by znamenaly vysychání půdy, což se s ohledem na srážková data (Obrázek 2) nepotvrzuje, protože srážky byly i v červenci dostatečné a objemově podobné jako v červnu.

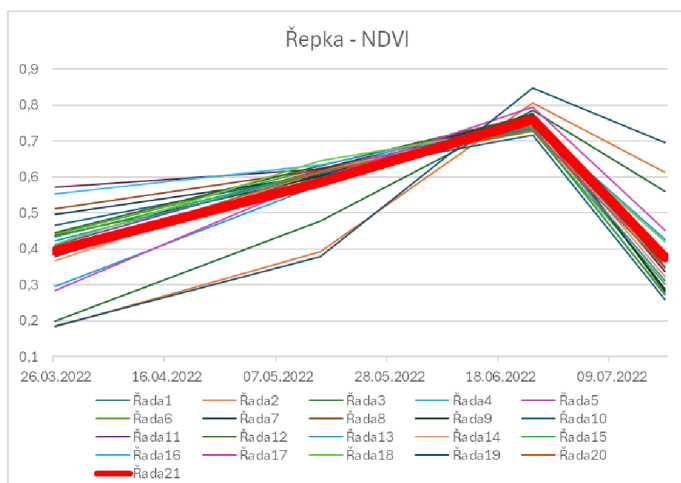
4.1.4 Řepka



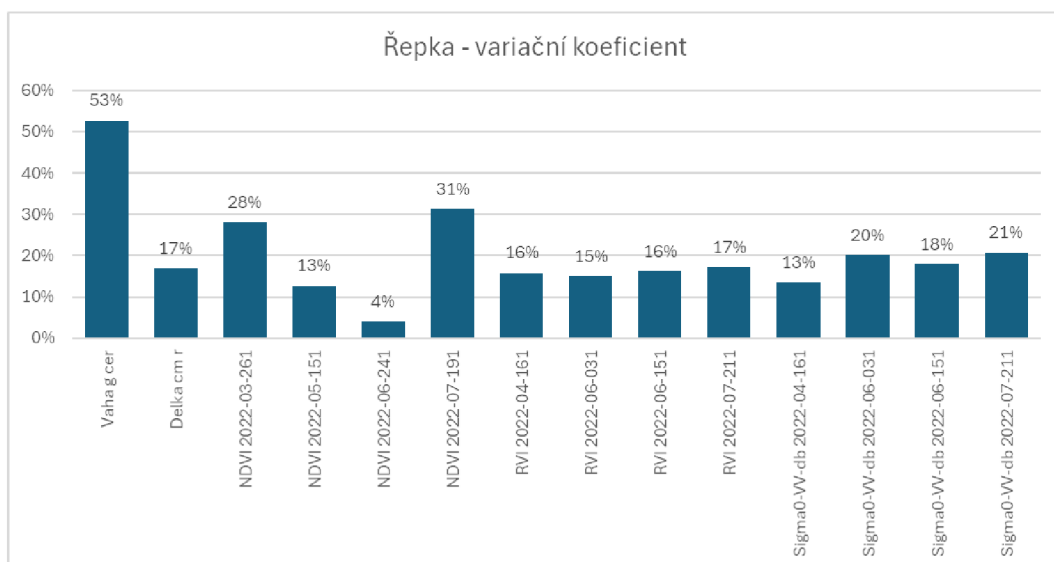
Obrázek 33 Hodnoty RVI pro porost řepky v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



Obrázek 34 Průběh hodnot v čase pro VV polarizované SAR snímky porostu řepky, Řada 1 až 20 – hodnoty pásma polarizace VV v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty polarizace VV v rámci pozemku



Obrázek 35 Hodnoty NDVI pro porost řepky v čase, Řada 1 až 20 – hodnoty indexu v jednotlivých bodech v rámci pozemku, Řada 21 – průběh střední hodnoty indexu v rámci pozemku



Obrázek 36 Hodnoty variačního koeficientu pro data použitá pro analýzu porostu řepky

Velikost variačního koeficientu dat (Obrázek 36), které se vztahují k porostu řepky, je velmi vyrovnaná, především pak ve vztahu délky rostliny pořízené v rámci terénního průzkumu a indexu RVI (Obrázek 33) i VV polarizace (Obrázek 34). Křivky RVI (Obrázek 33) a NDVI (Obrázek 35) mají podobný průběh, který odpovídá standardnímu průběhu křivek pro analýzu vegetace.

Pro všechny sledované plodiny je toto pozorování a analýza relevantní, pokud hodnotíme pozemek jako celek. Je to možné tvrdit s ohledem na hodnoty variačního koeficientu získaných hodnot, které se pohybují od 10 do 15% v případě pšenice, kukuřice a máku a do 20 % v případě řepky.

4.2 Korelace RVI a VV polarizace s referenčními daty

Bylo provedeno hodnocení korelace dat získaných z družice s referenčními daty získanými terénním průzkumem. Cílem bylo stanovit, do jaké míry korelují získaná družicová data s referenčními daty. V tomto případě je posuzována korelace dat v jednotlivých bodech, kde byla odebírána terénní data. Nízké hodnoty korelace nemusí nutně ukazovat, že družicová data s terénními nekorelují jako celek. Cílem tohoto postupu bylo zjistit, jestli je možné radarová data použít na analýzu porostu v konkrétních bodech. Výstupy korelačních dat ukázaly, že radarová data jako je index RVI a VV polarizace nelze využít k hodnocení variability porostu v rámci jednoho pozemku.

4.2.1 Kukuřice

Tabulka 4 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost kukuřice

	2022-04-14 váha půda (g)	2022-06-18 výška (cm)	2022-06-18 čerstvá váha rostliny (g)
RVI 2022-04-16	0,07	0,03	-0,03
RVI 2022-06-03	0,17	0,21	-0,15
RVI 2022-06-15	-0,27	0,35	-0,21
RVI 2022-07-21	0,20	-0,15	0,13
sigmaVV-db 2022-04-16	-0,15	-0,13	0,22
sigmaVV-db 2022-06-03	0,04	0,13	-0,09
sigmaVV-db 2022-06-15	0,18	0,14	0,54
sigmaVV-db 2022-07-21	-0,29	-0,23	0,14

Analýza korelace dat ukázala částečnou pozitivní korelaci RVI a výšky rostliny v průběhu června sledovaného roku. Vyšší hodnota korelace byla také nalezena mezi čerstvou váhou a daty VV polarizace v červnu.

4.2.2 Pšenice

Tabulka 5 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost pšenice

	2022-04-14 váha půda (g)	2022-06-02 výška (cm) včetně 15cm metlice	2022-06-02 čerstvá váha (g)	2022-07-18 zrno vlhkost	2022-07-18 zrno protein	2022-07-18 zrno gluteny	2022-07-18 zrno sediment (ml)	2022-07-18 hektolitrová váha (kg/hl)
RVI 2022-04-16	-0,34	0,09	-0,21	-0,10	-0,03	0,12	-0,04	0,21
RVI 2022-06-03	0,05	-0,17	0,04	-0,03	0,01	-0,11	0,00	-0,11
RVI 2022-06-15	0,12	0,01	0,06	-0,01	-0,40	-0,39	-0,31	-0,16
RVI 2022-07-21	0,25	-0,06	-0,04	0,09	-0,06	0,13	0,10	0,55
sigma0-VV-db 2022-04-16	0,10	0,01	-0,21	0,22	0,19	0,32	0,32	0,17

<i>sigma0-VV-db 2022-06-03</i>	-0,09	0,03	0,16	0,00	0,17	0,12	0,06	0,03
<i>sigma0-VV-db 2022-06-15</i>	0,00	-0,09	-0,11	-0,12	0,37	0,37	0,14	0,09
<i>sigma0-VV-db 2022-07-21</i>	0,00	0,07	0,22	-0,05	-0,04	-0,04	0,04	-0,06

V případě porostu pšenice lze z hodnot korelace mezi satelitními a terénními daty konstatovat, že jen VV polarizace během měsíce června vykazuje dobré hodnoty korelace s obsahem proteinu a glutenu v znu, zde RVI naopak vykazuje vysokou negativní korelaci.

4.2.3 Mák

Tabulka 6 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost máku

	2022-04-14 váha půda (g)	2022-06-02 výška (cm)	2022-06-02 čerstvá váha (g)
RVI 2022-04-16	-0,14	0,15	0,31
RVI 2022-06-03	0,29	-0,58	-0,46
RVI 2022-06-15	0,22	-0,17	-0,15
RVI 2022-07-21	-0,33	0,02	0,05
sigma0-vv-db 2022-04-16	0,17	-0,04	-0,40
sigma0-vv-db 2022-06-03	-0,26	-0,17	0,01
sigma0-vv-db 2022-06-15	0,40	-0,18	-0,16
sigma0-vv-db 2022-07-21	-0,13	0,06	0,13

Hodnoty radarových a terénních dat pro porost máku vykazují korelaci, která ale mezi sebou nijak logicky nespojuje, například korelace čerstvé váhy sklizené rostliny s RVI z dubna, kdy se porost teprve začíná vyvíjet. Jedná se ovšem o korelaci dat v jednotlivých bodech. V tomto případě lze říci, že data nekorelují v rámci jednotlivých bodů na pozemku. Při sledování dat v rámci pozemku jako jednoho celku je možné vysledovat určitý trend křivek, což ukazuje, že data dokáží alespoň na úrovni celého pozemku poskytnout informaci o stavu porostu.

4.2.4 Řepka

Tabulka 7 Hodnoty korelace mezi družicovými a terénními daty pro porost řepky

	2022-04-14 Váha čerstvá (g)	2022-04-14 Délka rostliny (cm)
RVI 2022-04-16	0,41	0,51
RVI 2022-06-03	-0,26	0,13
RVI 2022-06-15	-0,03	0,06
RVI 2022-07-21	0,02	-0,15
Sigma0-VV-db 2022-04-16	0,32	0,01
Sigma0-VV-db 2022-06-03	0,09	0,06
Sigma0-VV-db 2022-06-15	0,39	0,46
Sigma0-VV-db 2022-07-21	0,56	0,18

V případě řepky bylo zjištěno, že RVI dobře koreluje s terénními daty v měsíci dubnu. Z tohoto důvodu se jeví porost řepky jako perspektivní k dalšímu výzkumu využitelnosti SAR dat pro monitoring vegetace. Bohužel v případě řepky je obtížné odebrat terénní vzorky po vzrůstu vegetace, kdy je fyzicky velmi obtížné se dostat na celý pozemek.

4.3 Diskuze výsledku analýz v souvislosti s jejich ekonomickou rentabilitou

Využití výsledku analýz radarových dat může sloužit jako datový podklad pro rozhodování o agrotechnických opatřeních v rámci metod precizního zemědělství. V rámci těchto opatření je možné uvažovat o variabilitě hnojení a postřiků během vegetačního období. Implementace radarových snímků do precizního zemědělství může představovat zásadní pokrok směrem k efektivnějšímu řízení zemědělských podniků. I přes dostačující prostorové rozlišení radarových snímků existuje klíčové omezení spojené s jejich využitím, které spočívá v nedostatečné schopnosti radarových snímků poskytovat spolehlivá a věrohodná data na úrovni jednotlivých pixelů, což může být problematické pro aplikace vyžadující vysokou přesnost a detailní rozlišení specifických charakteristik zemědělských ploch. Tato limitace je způsobena především rozptylovými vlastnostmi radarového signálu, který se od zemského povrchu odrazí a interaguje s objekty různé velikosti, struktury a materiálové složení, což může vést k tzv. 'speckle' efektu, tedy náhodnému rozptylu signálu způsobujícímu granulární texturu na snímku, která snižuje jeho čitelnost a interpretovatelnost. Z výzkumu ovšem vyplynulo, že variabilita radarových dat odpovídá variabilitě referenčních dat, což znamená, že radarové snímky jsou schopny odhalit variabilitu v rámci pozemku. Otázkou, kterou tato práce nezodpovídá, stále zůstává aplikace těchto variabilit do zonální statistiky.

V případě zavedení variability hnojení vycházíme z principu zvýšeného odběru živin v místech zvýšeného výnosového potenciálu, v těchto zónách uvažujeme o zvýšení dávky, zatímco v zónách s místem nízkého výnosového potenciálu je odběr živin nízký a můžeme zde uvažovat o snížení dávky. (36) Dle analýz v této práci je možné uvažovat o opatřeních pro porost máku (příp. řepky), kde se ukazuje vyšší korelace výšky rostliny s hodnotami indexů již v průběhu dubna, kdy opatření hnojení a postřiku ovlivňují další růst a potenciální výnos během sklizně.

Tabulka 8 Teoretická agrotechnická opatření pro porost máku

Operace	Použitý produkt	Množství	Cena produktu	Náklady na ha (Kč)	Náklady na pozemek (Kč)
Hnojení N	LAD 27%N (38)	60 kg/ha	5.620 Kč/t	337,2	2.880

Aplikace mikroprvku B	CAMPOFORT® Special B (39)	10 l/ha	1.950 Kč/20 l	975	8.326,5
Aplikace mikroprvku Zn	YaraVita ZINTRAC 700 (40)	0,3 l/ha	526 Kč/5 l	31,56	270
Regulace plevelů	Laudis (41)	1,7 l/ha	7.150 Kč/5 l	2.431	20.761
Celkem:				3.774,76	32.237,5

V tabulce (Tabulka 8) byla navržena základní teoretická agrotechnická opatření, která by v průběhu vegetačního období máku mohla být aplikována. Celkové náklady na hnojiva a postřiky v rámci zkoumaného pozemku byly vyčísleny na 3.774,76 Kč/ha.

Z dat FADN (Farm Accountancy Data Network) vyplynulo, že podniky hospodařící s technologií precizního zemědělství (PZ) dosáhly o 43,2 % vyšší celkové produkce (53,1 tis. Kč/ha) oproti podnikům hospodařícím bez PZ (37,1 tis. Kč/ha). U hlavních plodin dosáhly podniky s PZ o 11,7 % vyššího výnosu u hlavních pěstovaných plodin. Podniky hospodařící s PZ vykázaly celkové náklady na ha ve výši 59,6 tis. Kč/ha, což bylo o 38,5 % více, než u podniků hospodařících bez PZ (43,1 tis. Kč/ha). Je třeba také zdůraznit, že podniky s PZ hospodaří více intenzivněji, než podniky bez PZ, kde se dokonce můžeme setkat i s extenzivním způsobem hospodaření nebo ekologickým hospodařením. (36)

Hlavní náklady na zavedení precizního zemědělství spočívají v použití pokročilých technologií, především mechanizace umožňující přesné navádění pomocí GPS a variabilitu činnosti, ať už jde o setí, hnojení nebo postřik. Jak ukazují data (odstavec výše), je zvýšená nákladovost převýšena ještě vyšší výnosností. Z toho je možné usuzovat, že v případě intenzivního hospodaření se implementace PZ vyplatí.

Průměrný výnos máku se v ČR pohybuje okolo 0,79 t/ha (42), což při výkupní ceně 45 Kč/kg (43) znamená výnos 35.550 Kč/ha. V tomto případě se odhadnuté náklady na hnojení a postřiky pohybují okolo 10,6 %. Po zavedení PZ také s využitím podpůrných satelitních dat by se výnos máku mohl dostat v případě jeho zvýšení o 10% na hodnotu 0,87 t/ha, tedy 39 150 Kč/ha. Dá se předpokládat, že díky optimalizaci na základě výnosových map, podkladů ze satelitních dat a zonální analýzy dojde i ke snížení nákladů na podpůrné prostředky jako přihnojování a postřiky díky jejich cílené aplikaci.

4.4 Diskuze výsledků s jinými výzkumy

Průběhy křivek RVI i Sigma VV u pozorovaných plodin mají obdobný průběh jako dosahuje Harfenmeister (33) ve svém výzkumu. Ta ve svém výzkumu uplatňuje kromě srovnání s referenčními daty také průběžné sledování srážek. Jejím závěry je, že křivka VV

polarizace je ovlivňována i vlhkostí půdy (Obrázek 17 a Obrázek 18). V této diplomové práci se projeví průběhy křivek, které by mohly odpovídat sníženým srážkám během měsíce července, kdy se hodnoty VV polarizace po propadu již nevrátily na původní hodnoty z dubna (Obrázek 26 a Obrázek 30). Data o kumulativních srážkách za jednotlivé měsíce (Obrázek 2) ve sledované oblasti ukazují, že ani v červenci nepanovalo sucho a měsíc byl na srážky bohatý. Zůstává tedy otázkou, co tento fakt zapříčinilo.

Radarové snímky z družic Sentinel 1 jsou ideální především z hlediska své dostupnosti, kdy kvalita snímku není závislá od množství oblačnosti nad zkoumanou oblastí. Díky tomu je možné využít snímky v celé časové řadě. Zásadní nevýhodou je jejich nejednoznačná interpretace, zvláště, pokud ji porovnáme s optickými snímky družice Sentinel 2 a indexem NDVI, které dokáží poskytovat mnohem snáze a s vyšší určitostí interpretovatelná data. Výzkum Tůmy a kol. (34) se zaměřuje na využití radarových snímků jako doplňku časové řady optických snímků v době, kdy nejsou pro použití optických snímků vhodné podmínky (zpravidla oblačnost na snímku). V rámci výzkumu v této diplomové práci nebyla zkoumána korelace mezi radarovými a optickými daty, ale získaná data naznačují, že je z obou možné indikovat změny v porostu a tedy vzájemně tyto dva přístupy doplňovat.

Tato práce se zabývá analýzou čtyř různých porostů, takže chybí přímé srovnání dat pro jednotlivé plodiny. Výzkum Nasirzadehdizaji (35) ukazuje, že existují v radarových křivkách VV a VH polarizace vzorce, díky kterým je možné jednotlivé plodiny od sebe odlišit a provádět jejich klasifikaci. Také došel k závěru, že ačkoliv nejsou radarová data úplně přesná z hlediska jednotlivých pixelů, jsou vhodná pro použití v případě pěstování stejné plodiny na více pozemcích. Na získaných křivkách lze následně od sebe odlišit jednotlivé pozemky a růstové fáze plodin, ve kterých se tyto porosty nachází.

Steele-Dunne (30) i Harfenmeister (33) se shodují, že je stále obtížné s dostatečnou přesností interpretovat signál zpětného rozptylu z důvodu velkého vlivu půdy. Obě vidí do budoucna prostor pro další výzkum, který se bude zabývat způsoby, jak vliv půdy co nejvíce eliminovat.

V kontextu ostatních vědeckých prací je zřejmé, že radarová data Sentinel 1 mají velký potenciál především z důvodu jejich velmi snadné dostupnosti. Zůstává nevyřešená otázka toho, jak eliminovat nepříznivé vlivy půdy na zachycený zpětně odražený radarový signál. Prostor pro další výzkum dává také vyřešení variability signálu mezi jednotlivými pozemky se stejnou plodinou, která může být dána také vlivy půdy nebo i jinými faktory jako například úhel snímání porostu, stoupající či klesající orbita apod.

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá analýzou radarových dat Sentinel 1 pro využití v rámci řízení zemědělského podniku. Radarová data byla analyzována v kontextu referenčních terénních dat a také v kontextu optických dat družice Sentinel 2. K analýze dat byly využity softwarové nástroje SNAP, QGIS a MS Excel. Jednoznačnou výhodou radarových dat mise Sentinel 1 oproti optickým datům mise Sentinel 2 je jejich dostupnost, která nezávisí na oblačnosti během pořizování snímku. Radarová data mají potenciál být spolehlivým zdrojem družicových dat poskytujících informace o stavu vegetace.

Z analýzy dat zcela jasně vyplynulo, že radarová data jsou schopna poskytovat informace o vývoji sledovaného porostu v čase. Bylo zjištěno, že radarová data jsou schopna poskytovat informace také o variabilitě stavu vegetace, což otevírá zemědělcům možnost implementace principů precizního zemědělství. Analýza získaných radarových dat byla diskutována s dalšími vědeckými pracemi a vyplynulo z ní, že průběhy radarových křivek se shodují s průběhy křivek prezentovaných v podobných výzkumech. Míra korelace mezi radarovými a terénními daty ukázala, že čistě z radarových dat nelze s přijatelnou spolehlivostí získávat informace o stavu porostu, jedná-li se o data s rozlišením na úrovni jednotlivých pixelů. Z diskuze s dalšími výzkumnými pracemi vyplynulo, že je možné radarová data využít jako doplňková v kombinaci s daty družic Sentinel 2, například pro vykrývání mezer v optických datech z důvodu jejich nedostupnosti (zpravidla kvůli oblačnosti). Právě dostupnost radarových dat a předvídatelnost jejich kvality představuje potenciál stabilního použití systémů precizního zemědělství.

Z hlediska praktické aplikace poskytuje tato práce základ pro další rozvoj nástrojů a metodik, které mohou být implementovány do řízení zemědělských podniků s cílem zvýšení produktivity a efektivity hospodaření, především prostřednictvím metod precizního zemědělství.

Další výzkum v této oblasti by se mohl orientovat na hledání univerzálně uplatnitelných algoritmů pro analýzu porostu z radarových dat. Na základě diskuze v této práci by měly být nejprve nalezeny vhodné algoritmy pro jednotlivé plodiny. Výzkum by se měl také orientovat na spolehlivé metody nebo algoritmy pro odstranění nežádoucího šumu ze snímku a potlačení nežádoucího vlivu půdy na zpětný rozptyl signálu.

6 Seznam použitých zdrojů

- (1) *Světová populace překročila hranici 8 miliard.* online. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/zahranicni-svetova-populace-prekrocila-hranici-8-miliard-242695>. [cit. 2024-03-24].
- (2) *Breakdown of global land use today.* online. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/land-use>. [cit. 2024-03-24].
- (3) *Collaborative Ground Segment - Czech Republic.* online. Dostupné z: <https://dhr1.cesnet.cz/#/home>. [cit. 2024-03-22].
- (4) *SNAP spurs Earth observation innovation with one million downloads.* online. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/SNAP_spurs_Earth_observation_innovation_with_one_million_downloads??haha. [cit. 2024-03-18].
- (5) *QGIS.* online. Dostupné z: <https://qgis.org/en/site/>. [cit. 2024-03-23].
- (6) GOOGLE. *Google Earth.* online. Dostupné z: <https://earth.google.com/web>. [cit. 2024-03-21].
- (7) MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Veřejný registr půdy LPIS.* online. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>. [cit. 2024-03-21].
- (8) ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA. *Půdní mapa 1:50000.* online. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/pudy/#>. [cit. 2024-03-21].
- (9) *Klimatické oblasti dle Evžena Quitta.* online. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/klima/klimaticke-oblasti-dle-e-quitta-1971/>. [cit. 2024-03-26].
- (10) WEATHER WUNDERGROUND. *GARNI PWS - IDOLNJ5.* online. Dostupné z: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IDOLNJ5/table/2022-04-30/2022-04-30/monthly>. [cit. 2024-03-24].
- (11) LUKAS, Vojtěch; NEUDERT, Lubomír a KŘEN, Jan. *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství: metodika pro praxi.* online. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011. ISBN 978-80-7375-562-1. Dostupné z:

- https://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/metodiky_pro_praxi/3_sber_dat.pdf. [cit. 2023-11-08].
- (12) *How to Monitor Crop Growth: A Comprehensive Guide*. online. Dostupné z: <https://getonspace.com/blog/how-to-monitor-crop-growth/>. [cit. 2023-12-26].
- (13) SCHOWENGERDT, Robert A. *Remote sensing: models, and methods for image processing*. 3rd ed. Burlington: Academic Press, 2007. ISBN 978-012-3694-072.
- (14) NASA. *What is Remote Sensing?*. online. In: NASA. Dostupné z: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing/>. [cit. 2024-02-24].
- (15) USGS. *How does data from Sentinel-2A's MultiSpectral Instrument compare to Landsat data?*. online. In: USGS. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/faqs/how-does-data-sentinel-2as-multispectral-instrument-compare-landsat-data>. [cit. 2024-02-25].
- (16) HUETE, A.R. REMOTE SENSING FOR ENVIRONMENTAL MONITORING. online. *Environmental Monitoring and Characterization*. 2004, s. 183-206. ISBN 9780120644773. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50013-8>. [cit. 2024-02-27].
- (17) NASA. *DĚJINY*. online. In: Landsat Science. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/history/>. [cit. 2023-12-30].
- (18) NASA. *LANDSAT 1*. online. In: Landsat Science. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/>. [cit. 2023-12-30].
- (19) *Copernicus Brochure*. online. Publications Office of the European Union, 2015. ISBN 978-92-79-45666-4. Dostupné z: https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus_brochure_EN_web_Oct2017_0.pdf. [cit. 2024-01-02].
- (20) *Základní informace o programu Copernicus*. online. In: Copernicus. Dostupné z: <https://www.copernicus.eu/cs/o-programu-copernicus/zakladni-informace-o-programu-copernicus>. [cit. 2024-01-02].
- (21) *Infrastruktura*. online. In: Copernicus. Dostupné z: <https://www.copernicus.eu/cs/o-programu-copernicus/infrastruktura>. [cit. 2024-01-02].

- (22) *Sentinels*. online. In: The European Space Agency. Dostupné z: https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinels. [cit. 2024-01-02].
- (23) ŽUBRIETOVSKÝ, Lukáš; ŠVÁBOVÁ, Lenka a ŠVÁB, Ondřej. *Sentinel-1*. online. Dostupné z: <https://collgs.czechspaceportal.cz/flotila-druzic-sentinel/sentinel-1/>. [cit. 2024-01-27].
- (24) EUROPEAN SPACE AGENCY. *Level-2*. online. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>. [cit. 2024-02-21].
- (25) HERNDON, Kelsey. *What is Synthetic Aperture Radar?*. online. In: Earth Science Data Systems. Dostupné z: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>. [cit. 2024-02-22].
- (26) ESA. *How to access data*. online. In: ESA. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_to_access_data. [cit. 2024-02-27].
- (27) ESA. *Copernicus Data Space Ecosystem*. online. Dostupné z: <https://dataspace.copernicus.eu/>. [cit. 2024-03-24].
- (28) ESA. *PolSARpro*. online. Dostupné z: <https://earth.esa.int/eogateway/tools/polsarpro>. [cit. 2024-03-18].
- (29) *SAR Formats*. online. In: Sentinel Online. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/sar-formats>. [cit. 2024-03-18].
- (30) STEELE-DUNNE, Susan C.; MCNAIRN, Heather; MONSIVAIS-HUERTERO, Alejandro; JUDGE, Jasmeet; LIU, Pang-Wei a kol. Radar Remote Sensing of Agricultural Canopies: A Review. online. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017, roč. 10, č. 5, s. 2249-2273. ISSN 1939-1404. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2639043>. [cit. 2024-03-11].
- (31) BAGHDADI, Nicolas; EL HAJJ, Mohammad; ZRIBI, Mehrez a BOUSBIH, Safa. Calibration of the Water Cloud Model at C-Band for Winter Crop Fields and Grasslands. online. In: *Remote Sensing*. 2017. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs9090969>. [cit. 2024-03-24].

- (32) GISGEOGRAPHY. *What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)?*. online. Dostupné z: <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>. [cit. 2024-03-12].
- (33) HARFENMEISTER, Katharina; SPENGLER, Daniel a WELTZIEN, Cornelia. Analyzing Temporal and Spatial Characteristics of Crop Parameters Using Sentinel-1 Backscatter Data. online. *Remote Sensing*. 2019, roč. 11, č. 13. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs11131569>. [cit. 2024-03-11].
- (34) TŮMA, Lukáš; KUMHÁLOVÁ, Jitka; KUMHÁLA, František a KREPL, Vladimír. The noise-reduction potential of Radar Vegetation Index for crop management in the Czech Republic. online. In: *Precision Agriculture*. 2022, s. 450-469. ISSN 1385-2256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09844-5>. [cit. 2024-03-18].
- (35) NASIRZADEHDIZAJI, R. APPLICATION OF SENTINEL-1 MULTI-TEMPORAL DATA FOR CROP MONITORING AND MAPPING. online. In: . Karaj, Iran, 2019. Dostupné z: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-4-W18/803/2019/isprs-archives-XLII-4-W18-803-2019.pdf>. [cit. 2024-03-24].
- (36) *Precizní zemědělství*. online. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2023. ISBN 978-80-7434-707-8. [cit. 2024-03-24].
- (37) DÖBERTOVÁ, Ing. Martina. *Vliv precizního zemědělství na hospodaření zemědělských podniků v ČR*. online. In: FADN ČR, ÚZEI. Dostupné z: <https://fadm.cz/wp-content/uploads/2023/08/PZ-Zemedelec-FINAL-2023.pdf>. [cit. 2024-03-24].
- (38) *Ledek amonný s dolomitom, 27 % N*. online. Dostupné z: <https://agrozetaservis.cz/hnojiva/lad-27n-zemedelske-hnojivo>. [cit. 2024-03-24].
- (39) *Listové hnojivo CAMPOFORT® Special B*. online. Dostupné z: <https://www.agra.cz/agrodivize/produkty/listova-hnojiva-na-upravu-aktualniho-vyzivneho-stavu/campofort-special-b/>. [cit. 2024-03-24].
- (40) *YaraVita ZINTRAC 700*. online. Dostupné z: <https://www.yaraagri.cz/vyziva-rostlin/hnojiva/yaravita/yaravita-zintrac-700/>. [cit. 2024-03-24].
- (41) *Laudis 5l*. online. Dostupné z: <https://agromanualshop.cz/laudis-5l/>. [cit. 2024-03-24].
- (42) *Máku poskytnout maximální péči*. online. Dostupné z: <https://uroda.cz/maku-poskytnout-maximalni-peci/>. [cit. 2024-03-24].

- (43) *Český modrý mák v roce 2023 a legislativní změny*. online. Dostupné z: <https://uroda.cz/cesky-modry-mak-v-roce-2023-a-legislativni-zmeny/>. [cit. 2024-03-24].