**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra využití strojů**

# Diplomová práce

## Porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostů máku setého

**Vedoucí diplomové práce: doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.**

**Autor: Bc. Vojtěch Friml**

**© 2023 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Vojtěch Friml

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostů máku setého**

Název anglicky

**Comparison of selected spectral indices for evaluating the condition of poppy stands**

---

**Cíle práce**

- zpracovat rešerši k problematice monitorování růstu zemědělských plodin s důrazem na speciální plodiny a mák setý;
- 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 snímků, výnosových dat a vhodných agrotechnických opatření při pěstování máku setého.

V praktické části vybere a zpracuje družicové (letecké) snímky a referenční data. Na základě porovnání dat a statistických analýz autor popíše vývoj porostů během vegetačního období.

V diskuzi autor dále zhodnotí a porovná výsledky své práce s odbornou literaturou. Autor bude také diskutovat ekonomickou rentabilitu metod monitorování růstu máku setého.

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

**Doporučený rozsah práce**

40 – 80 stran

**Klíčová slova**

Geoinformatika, mák setý, analýza obrazu, spektrální index, variabilita porostu,

---

**Doporučené zdroje informací**

Jelínek, Z., Starý, K., Kumhálová, J., Lukáš, J., Mašek, J. (2020). Winter wheat, winter rape and poppy crop growth evaluation with the help of remote and proximal sensing measurements. Agronomy Research, 18(3), 2049-2059.

Křen, J., Neudert, L., Procházková, B., Smutný, V., Hůla, J. (2015). Obecná produkce rostlinná – 2. část. Mendelova univerzita v Brně, 152 s. ISBN 978-80-7509-327-1.

Křen, J., Neudert, L., Procházková, B., Smutný, V. (2015). Obecná produkce rostlinná – 1. část. Mendelova univerzita v Brně, 146 s. ISBN 978-80-7509-325-7.

Toscano, P. (2020). Remote Sensing Applications for Agriculture and Crop Modelling. Printed Edition of the Special Issue Published in Agronomy. MDPI, Basel, Switzerland, 310 s. ISBN 978-3-03928-227-2.

Zhang, Q. (2016). Precision Agriculture Technology for Crop Farming. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 382 s. ISBN 978-1-4822-5108-1.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2022/2023 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra využití strojů

Elektronicky schváleno dne 25. 1. 2022

**doc. Ing. Petr Šařec, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 10. 03. 2023

**Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostů máku setého vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 25. 3. 2023 _____

**Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky, které mi pomohly při tvorbě diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni Tereze Sitaiové, své mamince Ing. Martině Frimlové, své sestře Bc. Karolíně Frimlové a celé své rodině za podporu během celého studia.

# Porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostů máku setého


## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá porovnáním vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostu máku setého. Skládá se z teoretické části zabývající se problematikou dálkového průzkumu Země, používáním vhodných agrotechnických opatření při pěstování máku setého a monitorováním růstu plodin pomocí spektrálních indexů. Praktická část se věnuje zvolení a výpočtu vhodných spektrálních indexů, charakteristice zkoumané oblasti. Porovnání výsledků, následné diskuzi a ekonomickému zhodnocení výzkumu. K výzkumu byly použity snímky z družic a bezpilotního prostředku. Snímky z družic byly získány z archivu Evropské kosmické agentury a byly následně zpracovány ve volně dostupných softwarech SNAP a QGIS. Data byla statisticky zpracována a porovnána pomocí koeficientu determinace. V předložené diplomové práci byly použity vybrané spektrální indexy, které na základě literární rešerše mohly vhodně popsat variabilitu porostu. Radar Vegetation Index (RVI) byl vybrán, protože by mohl být alternativním spektrálním indexem k indexům v optické části spektra: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green NDVI (GNDVI), Triangular Greenness Index (TGI), Moisture Stress Index (MSI) a Enhanced MSI (EMSI). Výsledkem je tedy přehled porovnání použitých spektrálních indexů a diskuze nad výsledky v souvislosti s ekonomickou rentabilitou.



**Klíčová slova:** Geoinformatika; mák setý; analýza obrazu; spektrální index; variabilita porostu; dálkový průzkum Země

# Comparison of selected spectral indices for evaluating the condition of poppy stands


## Abstract

The diploma thesis deals with a comparison of selected spectral indices for evaluating the condition of poppy stands. It consists of a theoretical part that deals with the issues of remote sensing of the Earth, the use of suitable agronomic measures in growing poppy crops, and monitoring crop growth using spectral indices. The practical part focuses on selecting and calculating suitable spectral indices, characterizing the studied area, comparing the results, subsequent discussion, and economic evaluation of the research. The research utilized satellite and unmanned aerial vehicle images. Satellite images were obtained from the archives of the European Space Agency and were subsequently processed using freely available software SNAP and QGIS. The data were statistically processed and compared using the coefficient of determination. Selected spectral indices were used in the presented thesis, which could adequately describe the variability of the crop based on a literature review. The Radar Vegetation Index (RVI) was selected because it could be an alternative spectral index to indices in the optical part of the spectrum: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green NDVI (GNDVI), Triangular Greenness Index (TGI), Moisture Stress Index (MSI), and Enhanced MSI (EMSI). The result is an overview of the comparison of the spectral indices used and a discussion of the results in relation to economic profitability.



**Keywords**: Geoinformatics; poppy; image analysis; spectral index; vegetation variability; remote sensing

# Obsah

**1 ÚVOD ... 1**

**2 CÍL PRÁCE ... 3**

**3 METODIKA ... 3**

**4 TEORETICKÁ VÝCHODISKA ... 5**

4.1 MÁK SETÝ ... 5

*4.1.1 Agrotechnická opatření při pěstování máku setého ... 6*

*4.1.2 Rentabilita máku setého ... 8*

4.2 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ ... 11

*4.2.1 Systém pořizování dat DPZ ... 11*

*4.2.2 Elektromagnetické spektrum ... 13*

*4.2.3 Spektrální odrazivost ... 14*

*4.2.4 Senzorové systémy ... 17*

4.3 SPEKTRÁLNÍ INDEXY ... 21

*4.3.1 Širokopásmové indexy ... 22*

*4.3.2 Úzkopásmové indexy ... 23*

*4.3.3 Indexy hodnotící využití světla ... 24*

*4.3.4 Indexy hodnotící celkový obsah dusíku v porostu ... 24*

*4.3.5 Indexy hodnotící množství uhlíku ... 25*

*4.3.6 Indexy hodnotící obsah pigmentů v listech ... 25*

*4.3.7 Indexy hodnotící obsah vody v porostu ... 26*

**5 VLASTNÍ ZPRACOVÁNÍ ... 27**

5.1 VÝBĚR SPEKTRÁLNÍCH INDEXŮ K POROVNÁNÍ ... 27

5.2 CHARAKTERISTIKA ZKOUMANÉHO ÚZEMÍ ... 30

**6 VÝSLEDKY A JEJICH HODNOCENÍ ... 33**

6.1 VÝSLEDKY ... 33

6.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ ... 36

*6.2.1 Satelitní snímkování ... 36*

*6.2.2 Snímkování pomocí bezpilotního prostředku ... 37*

**7 ZÁVĚR ... 40**

**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ... 42**

**9 PŘÍLOHY ..... 46**

SEZNAM OBRÁZKŮ: ..... 46

SEZNAM TABULEK: ..... 46

SEZNAM ROVNIC: ..... 47

# Seznam použitých zkratek

RVI – Radar Vegetation Index

SAR – Synthetic Aperture Radar

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index

TGI – Triangular Greenness Index

MSI – Moisture Stress Index

EMSI – Enhanced Moisture Stress Index

ESA – Evropská kosmická agentura

MJ – Měrná jednotka

ČSÚ – Český statistický úřad

DPZ – Dálkový průzkum Země

NIR – Near-infrared band

SWIR – Short-wavelength infrared band

RGB – Red, Green, Blue band

RE – Red edge band

GPS – Global Positioning Systém

LIDAR – Light Detection And Ranging

# 1 Úvod

V posledních letech dochází v zemědělství ke značnému využívání moderních technologií, jimiž jsou například bezpilotní prostředky, různé senzory, geografické informační systémy a menší výkonnější počítače. Prostřednictvím těchto technologií mohou zemědělci získávat a analyzovat velké množství dat, která mohou pomoci zlepšit výnosnost plodin, snížit náklady a minimalizovat negativní dopady na životní prostředí způsobené nadměrným hnojením. Spektrální odrazivost je právě jednou z oblastí, kde lze moderní technologie využít.

Stále důležitější je monitorování stavu vegetace. K tomu mohou být nápomocny spektrální indexy. Díky indexům je možné zjistit informace o koncentraci chlorofylu v listech, množství dusíku nebo uhlíku v rostlinách nebo obsah vody v porostu. Diplomová práce je věnována problematice porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostu máku setého.

Teoretická část diplomové práce se věnuje problematice vztahující se k praktické části. První kapitola je věnována zkoumané plodině – máku setému, významu jeho pěstování v České republice, agrotechnickým požadavkům na jeho pěstování a poslední část kapitoly je věnována rentabilitě pěstování máku setého. Dále teoretická část pojednává o dálkovém průzkumu Země. Zabývá se problematikou pořizování dat při dálkovém průzkumu Země, odrazivostí elektromagnetického spektra objektů na Zemi, a to zejména u vegetace, a senzorových systémů, které data zachycují. Poslední část se zabývá spektrálními indexy využívanými při monitorování vegetace. Patří k nim vegetační indexy hodnotící využití světla, celkový obsah dusíku v porostu, obsah uhlíku, obsah pigmentů v listech, obsah vody v porostu, ale také širokopásmové a úzkopásmové indexy.

Praktická část je věnována porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení stavu máku setého během vegetačního období. Nejdříve bylo nutné zvolit oblast vhodnou pro výzkum a vybrat vhodné spektrální indexy k porovnávání. Dalším krokem byl výběr a zpracování vhodných družicových a leteckých snímků a jejich přepočítání v softwaru SNAP na požadované spektrální indexy.

Hlavním cílem této diplomové práce je porovnat vybrané spektrální indexy k hodnocení stavu máku setého ve vegetačním období, statisticky tyto výsledky zhodnotit a diskutovat výsledky analýz v souvislosti s ekonomickou rentabilitou. Dílčím cílem je získání literární rešerše na téma pěstování máku setého v České republice, dálkového průzkumu Země a monitorování stavu zemědělských plodin pomocí spektrálních indexů.

Výsledky této studie by mohly být prospěšné pro zemědělce, kteří usilují o zlepšení výnosnosti svých plodin a současně o snížení nákladů na hnojení a další zemědělské operace. Využití spektrálních indexů a nových technologií může též pomoci minimalizovat negativní dopady zemědělství na životní prostředí, jako je například znečištění vod a půdy.

# 2 Cíl práce

Cílem teoretické části diplomové práce je poskytnout přehled odborné literatury zaměřený na dálkový průzkum Země, sledování růstu zemědělských plodin pomocí spektrálních indexů a vhodná agrotechnická opatření pro úspěšné pěstování máku setého v České republice.

Cílem praktické části diplomové práce je porovnat vhodné spektrální indexy, které se používají k hodnocení stavu máku setého. Pro tento účel je nutné vybrat vhodné družicové a letecké snímky a následně identifikovat spektrální indexy, které jsou nejvhodnější pro porovnání. Snímky je nutné zpracovat do podoby spektrálních indexů a získaná data statisticky vyhodnotit a výsledky prodiskutovat s ohledem na jejich ekonomickou rentabilitu.

# 3 Metodika

Za účelem dosažení stanoveného cíle bylo nezbytné vybrat vhodné spektrální indexy pro hodnocení stavu máku setého během vegetačního období. Dále bylo nutné vybrat vhodné letecké a družicové snímky. Ty byly získány z družic Sentinel 1 a 2 a z bezpilotních prostředků. Dále bylo nutné snímky převést do podoby spektrálních indexů pomocí volně dostupných softwarů SNAP a QGIS. Získané hodnoty byly zprůměrovány, aby je bylo možné porovnat. Snímky z družic Sentinel 1 a 2 byly získány z archivu Evropské kosmické agentury (ESA) volně dostupné na adrese https://scihub.copernicus.eu.

Snímky z družice Sentinel 1 byly nejdříve zpracovány korekcemi a poté z nich byl vypočítán Radar Vegetation Index (RVI). Pořízení snímků probíhalo v termínech 15. 5., 21. 5., 27. 5., 2. 6., 8. 6., 14. 6., 20. 6., 26. 6. a 2. 7. roku 2020. Družice Sentinel 1 snímala pomocí radaru Synthetic Aperture Radar (SAR), který operuje v mikrovlnném pásmu C-band.

Družicové snímky ze Sentinel 2 byly přepočítány na hodnotu Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Triangular Greenness Index (TGI), Moisture Stress Index (MSI) a Enhanced Moisture Stress Index (EMSI). Pořízení snímku senzorem MSI na družici Sentinel 2 probíhalo v termínech 18. 5., 2. 6. a 12. 6. roku 2020.

Byly použity dva bezpilotní prostředky FireFly6 Pro se senzorem Micasense RedEdge MX a DJI Mavic Pro se senzorem RGB. Snímky z bezpilotního prostředku FireFly6 Pro byly pořízeny v termínech 21. 5. a 15. 7. 2020, poté byly zpracovány a přepočítány do podoby indexu NDVI, GNDVI a TGI. Snímky z druhého bezpilotního prostředku byly pořízené 23. 6. 2020 a následně z nich byl vypočítán spektrální index TGI.

Sklízecí mlátička Case 8250 vybavena výnosoměrem byla použita k získání výnosových dat na zkoumaném území. Vzorky plodiny máku byly odebrány dne 12. srpna 2020, kdy se plodina nacházela v růstové fázi BBCH 90 před sklizní. Vzorky byly odebírány z oblasti o velikosti 0,5 x 0,5 m na 20 místech vybraných podle stupnice indexu TGI z 23. června 2020. Po odběru byly vzorky plodiny analyzovány, aby se zjistil počet tobolek máku a hmotnost semen.

# 4 Teoretická východiska

Tato část diplomové práce je věnována literární rešerši potřebné k pochopení tematiky diplomové práce a rovněž důležité k správnému porovnání vybraných spektrálních indexů pro hodnocení porostu máku setého. Věnuje se pěstování máku setého v České republice, dálkovému průzkumu Země, analýze družicových a leteckých snímků a monitorování zemědělských plodin pomocí spektrálních indexů.

## 4.1 Mák setý

Mák setý (*Papaver somniferum*, L.) je tradiční plodina pěstovaná na českém území podle archeologických nálezů už od 3 tis. let př. n. l. Největším vývozcem máku setého na světě je už od roku 2006 právě Česká republika. Jedná se o druhou nejpěstovanější olejninu v České republice. V roce 2021 bylo vyprodukováno 29 691 tun této plodiny a z toho 73 % šlo na export do zahraničí. Plodina se využívá především jako potravinová složka, jako surovina na výrobu oleje nebo pro farmaceutický průmysl. [1]

Mák je oblíbenou potravinou nejen u slovanských národů, ale také v Rakousku, Rumunsku, Německu nebo v Indii. Je používán na výrobu náplně sladkých druhů pečiva nebo jako posyp na slané pečivo. Největší spotřebu máku na světě, 25 tisíc tun ročně, má Indie. Celou spotřebu musí však dovážet, protože v Indii se mák nepěstuje. Mezi zeměmi ve střední a východní Evropě má největší spotřebu máku Česká republika, kde každý občan spotřebuje přibližně 400 g máku ročně. V mnoha státech je však využití máku z potravinářského hlediska zakázáno legislativou, mák se tedy z důvodu zákazu stanoveného právními předpisy v některých zemích nepěstuje a ani se do nich nesmí dovážet. [1]

V České republice je nutné ohlásit pěstování máku setého v souladu se zákonem č.167/1998 Sb., který upravuje návykové látky. Podle tohoto zákona jsou osoby, které pěstují mák setý na celkové výměře větší než 100 $m^2$, povinny oznámit příslušnému Celnímu úřadu informace o výměře, způsobu zneškodnění zbytků sklizně a roční sklizni. Dále zákon vyžaduje povolení Ministerstva zdravotnictví pro vývoz a dovoz makoviny. Tato opatření jsou v platnosti kvůli obavám z možného zneužití máku setého k výrobě drog. [2]

Problémem při využívání máku v potravinářství je jeho obsah morfinu na povrchu semen, který může být způsoben znečištěným okolím, nevhodným skladováním nebo nekvalitním čištěním. Dalším faktorem může být sklizeň nedostatečně zralých rostlin, kdy se latex z nezralých tobolek dostává na semena a způsobuje znečištění. Zákon stanoví maximální povolený obsah morfinových alkaloidů na povrchu semen v 1 kg máku na 25 mg. Snížení znečištění lze docílit propláchnutím máku vodou a následným sušením. [2]

V současné době se pěstují výhradně liniové odrůdy máku setého. Hybridní odrůdy se v současnosti nešlechtí. Z hlediska pěstitelského zaměření se dělí odrůdy máku na:

a) odrůdy modrosemenné s nízkým až středně vysokým obsahem morfinu (Aplaus, Bergam, Maratón)
b) odrůdy modrosemenné se středně vysokým obsahem morfinu (MS Harlekyn, Onyx, Opex)
c) odrůdy modrosemenné s velmi nízkým obsahem morfinu
d) odrůdy bělosemenné, okrovosemenné s nízkým až středně vysokým obsahem morfinu (Orel, Racek) [2] [3]

### 4.1.1 Agrotechnická opatření při pěstování máku setého

Mák lze pěstovat v mírně kopcovitých až rovinatých polohách s nadmořskou výškou do 600 m. Proto jej můžeme pěstovat ve většině zemědělsky produkčních oblastech České republiky. Jako předplodina máku setého je doporučena hnojená okopanina, luskovino-obilná směska, případně obilnina. Zásadně není doporučeno mít jako předplodinu řepku a mák setý, protože se tím zvyšuje riziko infekce polyfágními houbovitými patogeny. To je důvod k dodržování minimálně čtyřletého odstupu v osevním postupu mezi jinou či stejnou odrůdou máku setého. Po podmítce následuje orba do hloubky 25 cm. [4]

Výběr odrůdy nemá na velikost výnosu příliš velký vliv. Větší pozornost si zaslouží agrotechnika, kterou již lze výnos opravdu výrazně ovlivnit. Záleží především na vnějších podmínkách, jenž jsou každý rok odlišné. Při výskytu extrémních jevů počasí, jako je sucho, se může výnos z pěstování značně snížit. [5]

Předseťová příprava se provádí pomocí kompaktorů mělce do hloubky 0,2 m, a to jedním přejezdem. Díky tomu se vytvoří pro plodinu optimální půdní vlastnosti a zabezpečí se tak optimální vlhkost. Jako hnojivo se používá dusík, dávky se však stanovují v závislosti na předplodině a půdních podmínkách. Je potřeba klást důraz na zásobení půdy živinami a úpravou jejího pH na 6-7. Mezi další důležité prvky, které zvyšují výnos máku, se řadí fosfor, draslík, vápník, hořčík a síra. Setí by mělo probíhat brzy na jaře, a to ihned po zahájení jarních prací. Provádí se bezezbytkovým secím strojem do hloubky 2 cm a tzv. na vodu, aby semena máku byla v kontaktu s vodou z hlubších částech půdy. [5]

S ochranou proti plevelům je potřeba začít už u výběru místa, kde bude mák pěstován. Není vhodné vybrat plochu, kde se nachází vytrvalé a v máku obtížně hubitelné plevele, jako je například mák vlčí. Zaplevelení merlíkem a lebedou je velkým rizikem z důvodu obtížného oddělení jejich semen při sklizni. Dalšími významnými pleveli jsou pýr plazivý, ježatka kuří noha a penízek rolní. Proti těmto plevelům se aplikují herbicidy, u kterých je důležité dodržovat zásady, jimiž jsou například doporučená dávka vody, precizní aplikace a minimalizace přestřiků. [5]

Proti škůdcům a chorobám se volí chemosyntetické prostředky. Škůdci, kteří se při pěstování máku nejčastěji vyskytují jsou krytonosec kořenový, žlabatka stonková, krytonosec makovicovitý a mšice maková. Mezi jeho nejvýznamnější choroby patří plíseň maková a pleosporová hnědá skvrnitost máku. Významným problémem je postupné ukončení používání některých pesticidů, což může vést k problematickému pěstování máku v budoucnu. [5]

Znehodnocení celé sklizně máku setého lze zabránit jedině dodržením správné technologie sklizně. Při sklizni máku je důležité, aby semena nebyla poškozena, protože by mohla zhořknout. Je tedy nutné začít sklizeň v okamžiku, kdy jsou semena plně zralá a suchá. Nejlepší doba pro začátek sklizně je v odpoledních hodinách za suchého dne. Pokud mák má nízkou vlhkost semen (menší než 10 %) a makovina má nízkou vlhkost (menší než 17 %), není potřeba sušit sklizeň. K minimalizování poškození semen je důležité správné nastavení sklízecí mlátičky. [5]

Skladovat mák delší dobu lze jen, když je nepoškozený, dokonale vyzrály a suchý nebo po posklizňové úpravě. Při poškození semena žloutnou a na vzduchu rychle zhořknou, což

zapříčiní znehodnocení sklizně a tím menší výnos. Nebezpečím při skladování máku jsou roztoči, kteří se při vyšší vlhkosti máku než 12 % začínají množit a mohou zničit veškerou úrodu. Proto musí být sklad dostatečně provětrávaný a musí se zabezpečit proti zatékání. [5]

### 4.1.2 Rentabilita máku setého

Rentabilitu máku ovlivňují náklady na pěstování, hektarový výnos a realizační cena. Snahou je, aby náklady byly co nejmenší a hektarový výnos co největší. Mezi největší náklady na pěstování máku řadíme náklady na technické zajištění operací, náklady na materiálové vstupy a náklady na skladování sklizně. [6]

K výpočtu nákladů na technické zajištění operací je nutné znát spotřebu litrů paliva na hektar, pracnost v hodinách na hektar a cenu dané operace. Z toho je možné vypočítat náklady v $Kč \cdot ha^{-1}$. Pro výpočet nákladů na materiálové vstupy je nezbytné vědět hodnoty potřebného množství daného materiálu v $MJ \cdot ha^{-1}$ a cenu materiálu v $Kč \cdot MJ^{-1}$. Přímé náklady na pěstování máku setého jsou přibližně 17 500 $Kč \cdot ha^{-1}$, nepřímé náklady se odhadují na 33 000 $Kč \cdot ha^{-1}$. [6] [7]

Plocha pěstování máku setého se dle Českého statistického úřadu (ČSÚ) v roce 2021 zvýšila o více jak 3 tisíce hektarů oproti roku 2020 na hodnotu 43 867 hektarů. To je navýšení skoro o 9 %. Hektarový výnos máku je oproti jiným olejninám nízký. Data ČSÚ z roku 2021 uvádí výnos 0,68 $t \cdot ha^{-1}$. Správná agrotechnická opatření při pěstování máku dokážou výrazně zvýšit hektarový výnos máku, ovšem mák je velice citlivý na extrémní výkyvy počasí. Nesvědčí mu sucho, ale ani nadprůměrné srážky. Kvůli těmto výkyvům počasí se může hektarový výnos snížit a lze najít i rozdíly v kvalitě semene máku. [6]

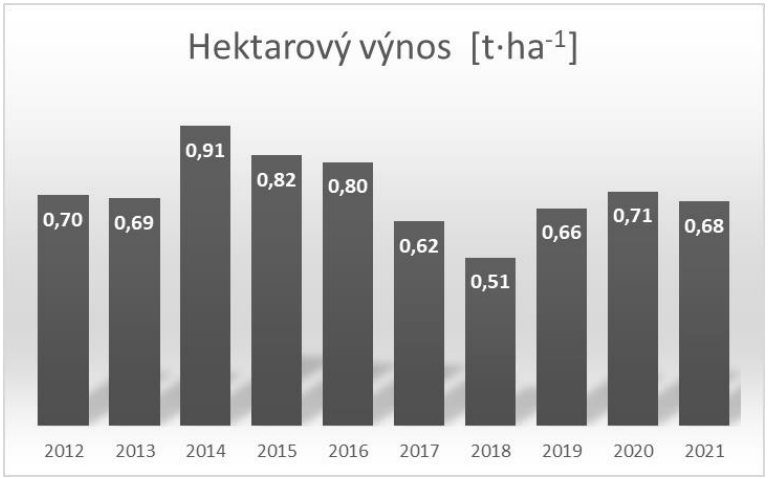
*Tabulka 1 - Zobrazení plochy, produkce a výnosu máku setého za 10 let*

| Rok | Plocha [ha] | Produkce [t] | Výnos [t·ha$^{-1}$] |
|---|---|---|---|
| **2012** | 18 363 | 12 814 | 0,70 |
| **2013** | 20 250 | 13 911 | 0,69 |
| **2014** | 27 020 | 24 665 | 0,91 |
| **2015** | 32 650 | 26 743 | 0,82 |
| **2016** | 35 543 | 28 574 | 0,80 |
| **2017** | 32 586 | 20 048 | 0,62 |
| **2018** | 26 608 | 13 666 | 0,51 |
| **2019** | 35 778 | 23 606 | 0,66 |
| **2020** | 40 255 | 28 702 | 0,71 |
| **2021** | 43 867 | 29 691 | 0,68 |

***Zdroj**: Český statistický úřad dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=statistiky&katalog=30840#*

V přiložené tabulce 1 lze dohledat údaje o ploše pěstování, produkci v tunách a výnos máku v tunách na hektar za posledních 10 let. Celková plocha pěstování máku se zvětšuje a tím zvětšuje i produkce. Mezi lety 2014–2016 byly vnější podmínky obzvláště příznivé a tím i se zvětšil i výnos na hektar, kdy byl téměř 1 t·ha$^{-1}$. Právě v roce 2021 bylo dosaženo největší produkce máku setého, a to z důvodu z důvodu největší osevní plochy. Porovnání hektarových výnosů máku setého za 10 let lze vidět na obrázku 1.

*Obrázek 1 - Hektarový výnos máku setého za 10 let*




***Zdroj**: Český statistický úřad dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=statistiky&katalog=30840#*

Cenu makových semen silně určuje poptávka trhu. Z toho důvodu se ceny makových semen v posledních letech výrazně mění. Zatím co roce 2019 byla průměrná cena máku 70 262 Kč·t$^{-1}$, v roce 2021 se tuna makového semena prodávala v průměru za 41 427 Kč. Na obrázku 2 lze vidět velké výkyvy cen semene máku setého za posledních 10 let, které jsou způsobené právě poptávkou trhu. [6]

*Obrázek 2 - Vývoj ceny tuny semene máku za 10 let*

***Zdroj**: Český statistický úřad dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=statistiky#katalog=31785*

Maková semena nejsou jedinou komoditou, která se dá využít k tvorbě většího zisku z pěstování máku setého. Dalším je maková sláma neboli makovina. Jsou to vyprázdněné tobolky máku, které jsou suché bez semene a stonku. Využívá se ve farmaceutickém průmyslu jako surovina pro výrobu morfinu. V České republice se však maková sláma nezpracovává, a proto je zařazena do agrárního vývozu. [6]

## 4.2 Dálkový průzkum Země

Získáváním informací o objektech na dálku se zabývá dálkový průzkum. Zkoumaný objekt či jev je bez přímého kontaktu se sledovacím zařízením. K přenosu informací je používáno elektromagnetické záření, které objekty či jevy samy vyzařují, nebo každý objekt či jev ovlivňuje charakteristickým způsobem. [8]

Téměř každý autor, který se zabývá dálkovým průzkumem, má svou definici tohoto pojmu. Některé definice jsou uvedeny zde: Například CAMBELL uvádí ve své práci „*Dálkový průzkum Země je obor, který má lidem umožnit nahlédnout za hranice dosahu lidského zraku. Ať už je to mimo náš omezený dosah nebo ve spektrálním rozsahu mimo naše vnímání, hledáme informace.*“ [9] Autor SABINS definuje dálkový průzkum Země jako „*dálkový průzkum Země je definován jako věda o získávání, zpracování a interpretaci snímků a souvisejících dat získaných z letadel a družic, které zaznamenávají interakci mezi hmotou a elektromagnetickým zářením.*“ [10]

Z předchozích definic pojmu dálkový průzkum Země (DPZ) lze vyvodit, že jde o dálkový průzkum zemského povrchu, vody i souše. K tomu je využíváno určité množství vlnových délek, tzv. elektromagnetické záření. Zařízení zaznamenávající intenzitu elektromagnetického záření je umístěno na nosiči, kterým může být letadlo, družice nebo bezpilotní prostředek. Podstatou je, že každý objekt jako vegetace, půda a voda odráží elektromagnetické záření vyzařující od Slunce s rozdílnou intenzitou. Získaná data se musí zpracovat pomocí digitálních postupů, které převádějí surová data na snímky. Poslední nejdůležitější částí je interpretace snímků, kdy je snímek převáděn na informace, jako jsou například mapy využití půdy, vyhledávání ložisek ropy a nerostných surovin a mnoho dalších. [8] [10] [11]

### 4.2.1 Systém pořizování dat DPZ

Nejčastěji se v dálkovém průzkumu Země měří intenzita odraženého elektromagnetického záření, díky čemuž lze rozeznat druhy objektu zkoumání nebo zjistit některé jeho vlastnosti. Hlavním požadavkem je mít dostatečný zdroj záření, který je v interakci s objektem. Kvůli atmosféře je však zdrojové a odražené záření modifikováno. Při dopadu záření na objekt se znovu záření modifikuje, závisí zde jak na vlastnostech objektu, tak i na vlastnostech záření. Záření je

po odrazu od objektu zaznamenáno na senzoru. Záznam je poté přenesen na přijímací stanici, kde se data dále zpracovávají do obrazové podoby. Data musí být upravena, kvůli modifikaci záření, které bylo zapříčiněno průchodem atmosféry. Dále se data analyzují, tím se získají požadované informace o objektu. [8] [9] [12]

Podle způsobu záznamu obrazu existují dvě základní metody měření záření:

- konvenční
- nekonvenční

Při použití konvenční metody se fotografie vytváří v analogové podobě pomocí fotografického papíru, který reaguje na míru záření dopadající na něj. Objekty na fotografii se jeví velmi světlé, když na papír dopadá větší množství elektromagnetického záření. Tento postup umožňuje zachytit elektromagnetické záření pouze v úzkém intervalu viditelného spektra. Kvalita fotografie je ovlivněna počasím a podmínkami během fotografování. [8] [9] [12]

Nekonvenční metodou naopak vzniká obrazový záznam. Nevzniká v jednom okamžiku jako fotografie, ale postupně po jednotlivých obrazových prvcích. Na rozdíl od konvenční metody kvalita nezávisí tolik na počasí. Naopak konvenční metodou lze zaznamenat větší detail objektu, u nekonvenční je limitováni rozměrem nejmenšího prvku, který se pohybuje od 1 metru do několika desítek metrů. Obrazové záznamy jsou zachycovány elektronicky v číselné podobě, která umožňuje snadnější kalibraci a porovnávání mezi sebou. [8] [9] [12]

Televizní systémy jsou představiteli prvního používaného systému, který je založen na nekonvenčním způsobu snímání. Představují přechod mezi klasickými fotografiemi a rozkladovými zařízeními pro snímání. Obraz se získává pomocí snímání ve viditelné a infračervené části spektra. Kvalita obrazu byla ovlivněna rozkladem do jednotlivých řádků a také kvalitou přenosu. Rozlišovací schopnost se lišila v závislosti na druhu zařízení a výšce snímkování a pohybovala se od 40 metrů až do několika kilometrů. Tento způsob snímání byl využíván meteorologickými družicemi jako TIROS, družicemi LANDSAT 1, 2, 3 a METEOR. [8] [9] [12]

Snímací rozkladová zařízení neboli skenery jsou další systémy využívající nekonvenční metodu. V současnosti se používají dva základní typy: mechanooptický a elektrooptický skener. Základem obou je radiometr, přístroj na měření záření odraženého objektu, které zachycuje

v určitém intervalu elektromagnetického spektra a z určité plochy zemského povrchu. V současnosti všechny skenery umí zachycovat obrazové záznamy území v několika intervalech elektromagnetického spektra. [8] [9] [12]

### 4.2.2 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je souvislé spektrum energie, které má vlnovou délku od nanometrů až po metry. Veškerá hmota vyzařuje určité elektromagnetické záření tak, že s rostoucí teplotou hmoty se její maximální intenzita posouvá směrem ke stále kratším vlnovým délkám. Elektromagnetické spektrum sahá od velmi krátkých vlnových délek gama záření až po velmi dlouhé vlnové délky rádiového vlnění, které se měří v metrech. Spektrum je rozděleno na intervaly gama záření, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření, mikrovlny a rádiové vlny viz tabulka 2. [8] [10]

*Tabulka 2 - Elektromagnetické spektrum*

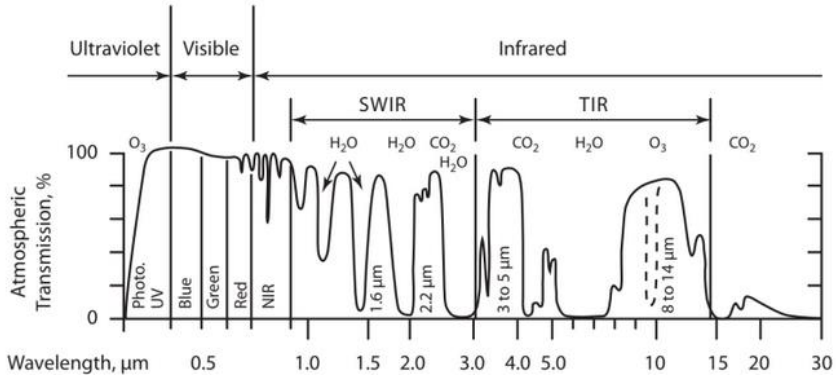
| Oblasti spektra | Vlnová délka | Popis |
|---|---|---|
| **Oblast gama záření** | < 0,03 nm | Dopadající záření pohlcování horními vrstvami atmosféry. Nepoužívá se na dálkový průzkum Země |
| **Oblast rentgenového záření** | 0,03 až 30 nm | Dopadající záření pohlcování horními vrstvami atmosféry. Nepoužívá se na dálkový průzkum Země |
| **Oblas ultra-fialového záření** | 0,03 až 0,4 μm | Dopadající záření pohlcováno ozonovou vrstvou. |
| **Oblast viditelného světla** | 0,4 až 0,7 μm | Dříve se snímalo pomocí snímků, nyní se snímá pomocí fotodetektorů. |
| *Modré pásmo* | 0,4 až 0,5 μm | Rozptýleno atmosférou. Pohlceno chlorofylem v rostlinách. |
| *Zelené pásmo* | 0,5 až 0,6 μm | |
| *Červené pásmo* | 0,6 až 0,7 μm | Pohlceno chlorofylem v rostlinách. |
| **Oblast infračerveného pásma** | 0,7 až 1 000 μm | |
| *NIR rozsah* | 0,7 až 0,9 μm | Sluneční záření, které se odráží od vegetace. |
| *SWIR rozsah* | 0,9 až 3,0 μm | SW IR spektra se používají k identifikaci minerálů. |
| *TIR rozsah* | 3,0 až 5 μm | Užitečné pro detekci žhavých cílů (např. požáry a sopky) |
| **Oblast mikrovln** | 0,1 až 100 cm | Ve velké míře se používají v aktivních radarových pásmech. Používá se pro zjištění vlhkosti půdy. |
| **Oblast rádiových vln** | > 100 cm | Použité ke komunikaci. |

***Zdroj**: SABINS, Floyd F. Remote Sensing: Principles and Interpretation. Ilustrované vydání. San Francisco: W. H. Freeman, 1978. ISBN 9780716700234.*

Části elektromagnetického spektra, které nejsou ovlivněny a pohlceny atmosférou, se nazývají atmosférická okna a používají se k pořizování snímků dálkového průzkumu Země.

Některé atmosférické plyny absorbují části spektra v určitých intervalech vlnových délek tzv. atmosférická absorpční pásma. Tato pásma nejsou pro dálkový průzkum Země použitelná. Hlavní oblasti pro dálkový průzkum Země jsou viditelné světlo, infračervené pásmo a mikrovlnné pásmo. [8] [10]

*Obrázek 3 - Propustnost atmosféry [12]*




***Zdroj**: SABINS, Floyd F. Remote Sensing: Principles and Interpretation. Ilustrované vydání. San Francisco: W. H. Freeman, 1978. ISBN 9780716700234.*

Na obrázku 3 je zobrazena propustnost atmosféry pro část pásma představující atmosférická okna, což jsou oblasti, které jsou minimálně ovlivněny atmosférou. Avšak i tyto oblasti mohou být pohlceny, viditelné spektrum může být absorbováno mechanickým znečištěním jako je prach a vodní kapky. U infračervené oblasti se na absorpci může podílet vodní pára a plyny jako oxid uhličitý, uhelnatý a dusný. Vodorovné čáry nad grafem znázorňují jednotlivá pásma vlnových délek. Viditelné až infračervené oblasti jsou zaznamenávány hlavními zobrazovacími systémy jako jsou optická čidla a skenery. [10] [11]

### 4.2.3 Spektrální odrazivost

K odrazu světelného záření dochází, když se záření při dopadu na neprůhledný povrch přesměruje. Charakter odrazu je závislý na vlnové délce záření dopadajícího na povrch a na drsnosti a nerovnosti daného povrchu. Jeli povrch dostatečné hladký, může dojít k zrcadlovému odrazu světelného záření, záleží však na jeho vlnové délce. Zrcadlový odraz přesměruje téměř veškeré záření dopadající na povrch daným směrem. Úhel odrazu záření je roven úhlu dopadu na povrch. Ve vlnové délce viditelného záření dochází k takovému odrazu u povrchů jako je

zrcadlo nebo hladký kov. Pokud povrch není dostatečně hladký, dochází k difúznímu odrazu, paprsek záření je rozptýlen pod mnoha úhly. [9]

Elektromagnetické záření nemusí být vždy odráženo. V závislosti na fyzikální a chemické podstatě povrchu objektu může být záření objektem částečně nebo úplně pohlcováno. Množství pohlcené či odražené energie ovlivňuje například obsah vody a organických látek, drsnost povrchu, teplota a další vlastnosti. I když dva objekty mohou v jednou intervalu vlnové délky odrážet stejné nebo podobné množství energie, v jiném intervalu vlnové délky mohou odrážet rozdílní množství energie.

Základní výhodou dálkového průzkumu Země je, že díky studiu odraženého záření se lze o objektech na Zemi dozvědět více informací. Odražené záření se zachycuje pomocí senzorů, filmové kamery, digitálních fotoaparátů, videorekordérů v mnoha vlnových délkách. Závislost mezi odrazivostí objektu a vlnovou délkou nazýváme spektrální křivka odrazivosti daného objektu a je pro něj víceméně typická. Podrobná znalost křivky spektrální odrazivosti umožňuje rozlišit nejen rostliny od půdy či vody, ale i jednotlivé druhy plodin, lesů nebo nerostů. Pro určité typy vegetace je možné zjistit výskyt nemocí nebo stres vegetace.

Viz rovnice 1 odrazivost se v dálkovém průzkumu Země vyjadřuje jako poměr mezi naměřeným jasem odraženého záření od povrchu a určitým intervalem vlnové délky, kterým je povrch ozářen. [9]

*Rovnice 1 - Vzorec pro výpočet odrazivosti*

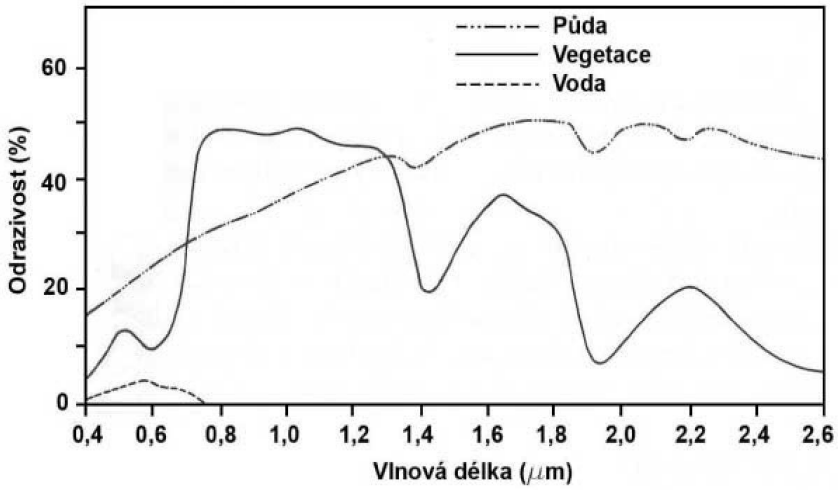
$$Odrazivost = \frac{Odražené\ záření}{Dopadající\ záření}$$

***Zdroj**: CAMPBELL, James B. Introduction to Remote Sensing. 2, ilustrované vydání. New York: Guilford Press, 1996. ISBN 9781572300422*

Poměr je bezrozměrné číslo mezi 0 a 1, ale většinou se vyjadřuje v procentech. V praxi ovšem naměříme jen záření, které je odražené od zemského povrchu, a proto intenzitu dopadajícího záření musíme odhadovat. [9]

Na obrázku 4 můžeme vidět chování tří křivek odrazivosti záření půdy, vegetace a vody v závislosti na vlnovou délku dopadajícího záření.

*Obrázek 4 - Odrazivost půdy, vegetace a vody [13]*




***Zdroj**: KROULÍK, Milan. Využití bezpilotních prostředků ve sběru dat a řízení vstupů: Precizní zemědělství. Agromanual [online]. 2019 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/precizni-zemedelstvi/vyuziti-bezpilotnich-prostredku-ve-sberu-dat-a-rizeni-vstupu*

Spektrální odrazivost vegetace závisí na mnoha proměnných, jako je obsah vody v rostlině, obsah minerálů v rostlině, hustota a vrstevnatost vegetačního krytu, množství stresu, který na rostlinu působí a mnoho dalších. Největší vliv na odrazivost mají listy rostlin. Kvůli absorpci vody se odrazivost zelené vegetace s rostoucí vlhkostí výrazně zmenšuje.

Spektrální křivka odrazivosti vegetace se sleduje hlavně ve třech pásmech spektra:

- oblast pigmentační absorpce (0,4 – 0,7 μm)
- oblast buněčné struktury (0,7 – 1,3 μm)
- oblast vodní absorpce (1,3 – 3,0 μm)

Vegetace absorbuje záření v oblasti od 0,45 μm do 0,67 μm. Tuto absorpci zapříčiňuje chlorofyl, který silně absorbuje červenou a modrou složku spektra, naopak zelenou silně odráží. Stres vegetace zapříčiní, že v rostlině je méně chlorofylu a tím se snižuje odrazivost zeleného spektra naopak obsah červené složky se zvyšuje. [11]

V oblasti infračerveného záření NIR se začíná výrazně zvyšovat odrazivost, zejména u zdravých rostlin, kdy se dostane přibližně na 50 %. Toto zvýšení odrazivosti je způsobeno několikanásobným odrazem záření uvnitř listů a nízkou absorpcí. V tomto pásu od 0,7 μm do 1,3 μm je také možné rozlišit rostlinné druhy na základě odrazivosti vnitřní struktury listu, která

se mezi různými druhy liší, i když pro lidské oko se jeví stejně. Toto pásmo také umožňuje zjištění, zda je rostlina pod stresem. Poklesy odrazivosti na grafu v oblastech 1,4 μm, 1,9 μm a 2,7 μm jsou způsobeny absorpcí záření vodou v listech. [11]

Odrazivost půdy je ovlivněna několika faktory, včetně vlhkosti půdy, zrnitosti, složení, drsnosti povrchu, obsahu železa a organické hmoty v půdě. Křivka odrazivosti u půdy má mnohem menší výkyvy než křivka odrazivosti u vegetace. Půda je značně heterogenním povrchem z hlediska spektrálních vlastností. [11]

Voda má velmi nízkou odrazivost mezi 0,4 μm až 0,7 μm, což je způsobeno tím, že voda dobře absorbuje záření. V oblasti infračerveného záření se voda jeví téměř jako absolutně černé těleso, protože absorbuje záření velmi silně. [11]

### 4.2.4 Senzorové systémy

Existuje celá řada nosičů senzorů, které DPZ používá ke sběru dat. Nosiče jsou zařízení, která nesou senzor a zajišťují jeho pohyb a polohovou konfiguraci. Zde je uveden přehled hlavních kombinací senzorů a nosiče, které jsou v DPZ často používané: [12] [13]

- letecké systémy
- satelitní systémy
- bezpilotní prostředky

#### Letecké systémy

Jsou to nejstarší systémy používané dálkovým průzkumem Země. Senzory jsou umístěné na letadlech, která se pohybují ve výšce od 200 m až do 15 km. Zachycují velké množství podrobných informací. Data jsou pořizována s lepším prostorovým rozlišením a s nízkým obsahem šumu. [12] [13]

Konfigurace senzorů na leteckých systémech lze rozdělit na šikmá a vertikální. Šikmá konfigurace pořizuje data pod úhlem k Zemi. Vertikální konfigurace je více žádaná, pořizuje data se senzorem namířeným přímo dolů. Zachycují pozemní objekty v půdorysné rovině a lze je porovnávat s mapami. [12]

Mezi nevýhody leteckých systémů patří omezení leteckého provozu v některých oblastech, menší plocha snímání při snímání v nižší výšce a možnost použití jen při vyhovujících meteorologických podmínkách. [13]

### Satelitní systémy

Data ze satelitních systémů spadají mezi nejpoužívanější v rámci DPZ. Jsou to systémy, které kolem Země obíhají jako umělé družice. Oproti leteckým systémům data pořizují z výšky cca od 700 do 36 000 km nad zemským povrchem. Nevýhodou je nižší prostorové rozlišení v řádu desítek metrů. [12] [13]

Družice pohybující se ve velkých výškách cca 36 000 km mají stejnou rychlost jako rotace Země. Mají geostacionární oběžnou dráhu a zdánlivě se vůči povrchu nepohybují. Získávají kontinuální informace o daném území. Zahrnujeme mezi ně meteorologické a komunikační družice. [12] [13]

Nejčastěji používané družice v DPZ se pohybují ve výšce 700–1000 km nad povrchem. Mají subpolární oběžnou dráhu a v kombinaci s rotací Země mohou pokrýt snímky celý zemský povrch. Umožňují opakované snímání rozsáhlých území, a to i vy stejném lokálním čase. [12] [13]

**Přehled vybraných družic:**

**LANDSAT**

Jeden z nejznámějších družicových systémů pro výzkum přírodních zdrojů. Je nejstarším a nejdéle provozovaným programem družic DPZ. Provozuje jej geologické datové centrum Spojených států amerických. Poskytuje snímky celé Země s vysokým rozlišením a umožňuje sledovaní změn v krajině. Celkem bylo vypuštěno 9 družic, první z nich byla vypuštěna už v roce 1972 a zatím poslední v roce 2021. Stále funkční jsou dvě a to LANDSAT 8 a 9. [14]

**SENTINEL**

Družice spravované Evropskou vesmírnou agenturou ESA, jsou vyvíjené v rámci kosmického programu Copernicus a tvoří 5 řad. Každá řada má dvě družice. Program se zaměřuje na poskytování snímků ve vysokém rozlišení a četnosti snímkování dané oblasti. Satelity nesou

řadu technologií například radarové a multispektrální zobrazovací přístroje pro monitorování pevniny, vody a atmosféry. [15]

### Bezpilotní prostředky

V současné době se bezpilotní prostředky čím dál více používají k dálkovému průzkumu Země. Zásluhu na zvýšeném využití má jejich mohutný vývoj a zdokonalování snímacích technologií na nich instalovaných. Díky tomu získaly přízeň nejen v akademické sféře, ale i komerční. Jedná se o celou řadu nosičů, které nesou různé typy senzorů. Umožňují let bez posádky a ve většině případů jsou ovládány dálkově, jelikož se nejedná o zcela autonomní stroje. [13] [16]

Oproti leteckým a družicovým systémům mohou nabídnout vysokou všestrannost a flexibilitu, navíc pracují rychle, bez nutného plánování a za nižších nákladů. Krom toho létají v malých výškách od několika metrů až teoreticky do 9 km a pomalu, proto mají kvalitnější prostorové rozlišení. Výška letu je omezena jednak legislativou, ale také dosahem jejich komunikačního systému, který zajišťuje kontakt s jeho pozemní stanicí, v rozsahu od metrů až po desítky kilometrů. Doba letu závisí na jejich hmotnosti a kapacitě baterie. Existují bezpilotní prostředky, které jsou schopny létat ve velkých výškách od 5 minut do 30 hodin. [16]

Od konce roku 2020 platí pro bezpilotní prostředky používané v Evropské unii, nová pravidla, která regulují jejich provoz. Každý bezpilotní prostředek musí být registrován vlastníkem bezpilotního prostředku, až na výjimku, pokud bezpilotní prostředek váží méně než 250 g, a přitom nemá kameru nebo jiný senzor anebo se jedná o hračku. Bezpilotní prostředek musí být označen registračním číslem jeho vlastníka. Každý provozovatel bezpilotního prostředku musí složit online testy. Povinností pro provozovatele bezpilotního systému je udržovat stálou vizuální kontrolu nad svým prostředkem, zajistit bezpečnou vzdálenost od osob a překážek, musí dodržet maximální výšku 120 m nebo 400 ft a nesmí se přiblížit k lidem na 30 m, pokud s tím daný člověk nesouhlasí. Jsou dány zeměpisné zóny, ve kterých se nemůže bezpilotní prostředek provozovat jako jsou například letiště. [17] [18]

Bezpilotní systémy se podle nařízení Evropské komise rozdělují na 3 kategorie: otevřená, specifická a certifikovaná. U certifikované kategorie je nutné potvrzení provozovatele

příslušným úřadem, protože při provozování těchto bezpilotních systémů je riziko ztráty života. Provoz bezpilotních prostředků kategorie specifické vyžaduje také povolení příslušného úřadu před uskutečněním provozu. Výjimkou je, pokud provozovatel bude používat v souladu s určitými standardními scénáři, u kterých bude stačit jen prohlášení provozovatele. Poslední kategorie otevřená nepotřebuje povolení příslušného úřadu ani prohlášení provozovatele pro použití v provozu. [17] [18]

## 4.3 Spektrální indexy

Data získaná monitorováním multispektrálním odrazu vegetace samy o sobě nedávají tolik specifických informací. Pro vyjádření v číselné podobě se používají spektrální indexy. Spektrální index je tvořen dvou nebo více kombinací hodnot spektrálních pásem, které se aritmeticky zpracovávají, aby vznikla jediná hodnota. Nejpopulárnějším typem jsou vegetační indexy, ale existují indexy pro člověkem vytvořené objekty, vodu nebo geologické prvky. [19] [20]

Pro tuto práci jsou zejména důležité vegetační indexy, které udávají množství, vitalitu nebo jinou vlastnost vegetace v pixelu. Umožňují tedy nejen kvalitativní hodnocení vegetace, ale i kvantitativní hodnocení. Zároveň umožňují odlišit zelenou vegetaci od ostatních povrchů. Každý vegetační index je navržen na jednu určitou vlastnost vegetace, kterou má zdůraznit na základě spektrálních vlastností vegetace. [19] [20]

Vegetační indexy jsou ovlivňovány vnějšími a vnitřními faktory. Mezi vnější faktory spadá zorný úhel, atmosférické podmínky a kalibrace senzoru. Naopak vnitřní faktory jsou rozdíly v spektrálních vlastnostech porostů a jeho pozadí. Lze je rozdělit do kategorií, které vypočítávají podobné vlastnosti vegetace: [19] [20]

- širokopásmové indexy
- úzkopásmové indexy
- indexy hodnotící využití světla
- indexy hodnotící celkový obsah dusíku v porostu
- indexy hodnotící množství uhlíku
- indexy hodnotící obsah pigmentů v listech
- indexy hodnotící obsah vody v porostu

Kategorie obsahuje více způsobů, jak hodnotu vlastnosti vypočítat, protože každý index v rámci kategorie se hodí použít za jiných terénních podmínek. Některé indexy mají v daných podmínkách větší validitu než jiné. Proto je důležité vyzkoušet více indexu v rámci kategorie a vybrat si pro dané podmínky ten nejvhodnější. [20]

### 4.3.1 Širokopásmové indexy

Kategorie zahrnuje indexy nejjednodušší na výpočet. Jedná se o jednoduchý poměr dvou či více pásem, která jsou citlivá na koncentraci chlorofylu v listech, obsahu listové plochy, strukturu a hustotu porostu. Jsou navrženy tak, aby poskytly informace o kvalitě a vitalitě zelené vegetace. [20] [13]

Širokopásmové vegetační indexy porovnávají odrazivost vegetace v nízkém infračerveném pásmu s červeným viditelný světlem. Chlorofyl absorbuje fotony, aby je využil ve fotosyntéze, a tím zapříčiní snížení hodnoty odrazivosti v pásmu NIR a zvýšení hodnot v červeném pásmu. Toto vše vede ke zvýšení hodnoty širokopásmového indexu. Tyto indexy jsou používané k rozlišení druhů vegetace, k určení typu krajiny, sledování fenologických fází a k hodnocení dopadu změn klimatu. [20] [13]

**Příklady indexů:**

- Difference Vegetation Index (DVI)
- Enhanced Vegetation Index (EVI)
- Global Environmental Monitoring Index (GEMI)
- Green Atmospherically Resistant Index (GARI)
- Green Chlorophyll Index (GCI)
- Green Difference Vegetation Index (GDVI)
- Green Leaf Index (GLI)
- Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)
- Green Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (GOSAVI)
- Green Ratio Vegetation Index (GRVI)
- Green Soil Adjusted Vegetation Index (GSAVI)
- Green Vegetation Index (GVI)
- Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI)
- Leaf Area Index (LAI)
- Leaf Chlorophyll Index (LCI)
- Modified Non-Linear Index (MNLI)
- Modified Simple Ratio (MSR)
- Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2 (MSAVI2)
- Non-Linear Index (NLI)
- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)
- Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI)

- Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)
- Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)
- Simple Ratio (SR)
- Sum Green Index (SGI)
- Transformed Difference Vegetation Index (TDVI)
- Triangular Greenness Index (TGI)
- Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)
- Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI)
- WorldView Improved Vegetation Index (WV-VI)

### 4.3.2 Úzkopásmové indexy

Stejně jako širokopásmové indexy jsou i úzkopásmové indexy kombinací spektrálních pásem citlivých na obsah chlorofylu v listech, obsahu plochy listu, strukturu a hustotu vegetace. Stejně tak jejich hodnota určuje celkové množství a kvalitu fotosyntetického materiálu ve vegetaci, díky čemuž můžeme monitorovat stav porostu. [20] [13]

Rozdíl je takový, že k výpočtu těchto indexů se používají úzká red edge pásma mezi 690 nm a 740 nm. To umožňuje, aby tyto indexy byly citlivější na menší změny ve vegetaci. Proto se používají zejména u husté vegetace, kde by širokopásmové indexy změny nezachytily. Jednou z oblastí, kde se úzkopásmové indexy často používají, je precizní zemědělství. [20] [13]

**Příklady indexů:**

- Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)
- Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI)
- Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index – Improved (MCARI2)
- Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (MRENDVI)
- Modified Red Edge Simple Ratio (MRESR)
- Modified Triangular Vegetation Index (MTVI)
- Modified Triangular Vegetation Index – Improved (MTVI2)
- Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI)
- Red Edge Position Index (REPI)

- Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index (TCARI)
- Triangular Vegetation Index (TVI)
- Vogelmann Red Edge Index 1 (VREI1)
- Vogelmann Red Edge Index 2 (VREI2)

### 4.3.3 Indexy hodnotící využití světla

Vegetační indexy v této kategorii hodnotí, s jakou účinností vegetace využije dopadající elektromagnetické záření k fotosyntéze. Tato účinnost je spojena s tím, jak je vegetace schopna přijímat uhlík a jakou rychlostí roste. Vegetační indexy pomáhají odhadnout výnosnost vegetace a její rychlost růstu, čehož využívá precizní zemědělství. Využívá se odrazivosti ve viditelném části spektra, stejně tak i se využívají vlastnosti různých typů pigmentů ve vegetaci. [20] [13]

**Příklady indexů:**

- Photochemical Reflectance Index
- Structure Insensitive Pigment Index
- Red Green Ratio Index

### 4.3.4 Indexy hodnotící celkový obsah dusíku v porostu

Pro vegetaci je dusík důležitým prvkem, neboť je přítomen v chlorofylech. Ve vysoké koncentraci je přítomen v rostoucí vegetaci, proto tato kategorie indexů hodnotí koncentraci dusíku v dálkově snímané vegetaci. Využívají odrazivost infračerveného pásma k měření relativního obsahu dusíku ve vegetaci. [20] [13]

**Příklad indexu:**

- Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)

### 4.3.5 Indexy hodnotící množství uhlíku

Indexy odhadují množství uhlíku v ligninu a celulóze v suchém stavu. Lignin, molekula na bázi uhlíku, vegetace používá jako strukturní složku, celulóza je používána především při stavbě buněčných stěn v rostlinných buňkách. Zvýšený obsah uhlíku v suchém stavu může indikovat stáří vegetace. Zároveň jsou tyto materiály vysoce hořlavé, takže indexy mohou odhadnout ohrožení vegetace požárem. Využívá krátkovlnné infračervené pásmo a absorpční vlastnosti celulózy a ligninu. Není vhodné tyto indexy používat, pokud jsou suché materiály ve vlhkém prostředí nebo zakryty zelenou vegetací. [20] [13]

**Příklady indexů:**

- Cellulose Absorption Index
- Lignin Cellulose Absorption Index
- Normalized Difference Lignin Index
- Plant Senescence Reflectance Index

### 4.3.6 Indexy hodnotící obsah pigmentů v listech

Velkým nebezpečím pro vysokou výnosnost vegetace je stres. Pokud je rostlina vystavena stresu, objevuje se větší množství stresových pigmentů. Indexy odhadují množství právě takových stresových pigmentů ve vegetaci. Tyto indexy však neměří chlorofyl, který se měří pomocí indexů, které detekují množství zeleně. [20] [13]

**Příklady indexů:**

- Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1)
- Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI2)
- Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1)
- Carotenoid Reflectance Index 2 (CRI2)

### 4.3.7 Indexy hodnotící obsah vody v porostu

Obsah vody ve vegetaci je další důležitou veličinou. Vyšší obsah vody svědčí o zdravější vegetaci a tím se zvětšuje pravděpodobnost rychlejšího růstu, nesmí jí být však příliš. Tyto indexy poskytují odhad o množství vody obsažené v listech. Snaží se využít absorpční vlastností vody v blízké a krátkovlnné infračervené části spektra.

**Příklady indexů:**

- Disease Water Stress Index (DWSI)
- Leaf Water Vegetation Index 1 (LWVI1)
- Leaf Water Vegetation Index 2 (LWVI2)
- Moisture Stress Index (MSI)
- Normalized Difference Infrared Index (NDII)
- Normalized Difference Water Index (NDWI)
- Normalized Multi-band Drought Index (NMDI)
- Water Band Index (WBI)

# 5 Vlastní zpracování

Teoretická část této diplomové práce byla věnována literární rešerši o zkoumané plodině máku setém, rentabilitě pěstování a agrotechnickým požadavkům na pěstování. Další část se zabývala dálkovým průzkumem Země a jeho praktické využití v podobě spektrálních indexů. Praktická část se zabývá zpracování snímků z družic Sentinel 1, 2 a bezpilotního prostředku. Dále se praktická část zabývá vybráním a následným porovnáním spektrálních indexů pro hodnocení vegetačního stavu máku setého a charakteristikou zkoumané oblasti.

## 5.1 Výběr spektrálních indexů k porovnání

Pro splnění cíle diplomové práce bylo potřeba vybrat k porovnání vhodné spektrální indexy hodnotící stav máku setého. Byl vybrán RVI k výzkumu, zda by mohl být alternativním spektrálním indexem k indexům NDVI, GNDVI, TGI, MSI a EMSI.

RVI byl navržen pro monitorování růstu vegetace, jeho hodnoty se pohybují v rozmezí 0 až 1 a je citlivý na biologický materiál, vodu ve vegetaci a hustotu porostu. Pokud je povrch hladký bez vegetace je jeho hodnota blízko k nule a zvětšuje se s příbytkem vegetace. Jeho hlavní výhodou oproti NDVI je, že není omezen oblačností jako jsou omezeny indexy, které využívají snímky od optických senzorů. Rovnice 2 zobrazuje vzorec použitý na výpočet indexu RVI. [21]

*Rovnice 2 - Radar Vegetation Index*

$$RVI = \frac{4\sigma^{\circ}_{HV}}{\sigma^{\circ}_{HH} + \sigma^{\circ}_{HV}}$$

***Zdroj**: Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton. Indian Cartographer [online]. Regional Centres, National Remote Sensing Centre, Hyderabad, 2013, **2013**(), 7 [cit. 2023-03-10].*

Normalized Difference Vegetation Index je další index vyvinutý primárně k oddělení vegetace od jejího pozadí a mapování hustoty vegetace. Je vyjádřen jako poměr rozdílu mezi blízkým infračerveným a červeným pásmem a součtu mezi blízkým infračerveným a červeným pásmem. Rovnice 3 prezentuje vzorec, který byl použit pro výpočet indexu NDVI. [19]

*Rovnice 3 - Normalized Difference Vegetation Index vzorec pro výpočet*

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

***Zdroj**: EASTMAN, J. Ronald. IDRISI Guide to GIS and Image Processing Volume 2 [online]. 2. Worcester, MA: Clark Labs, 2001 [cit. 2023-01-22].*

Green NDVI je vegetační index pro hodnocení fotosyntetické aktivity vegetace a používá se také pro stanovení příjmu vody a dusíku vegetací. Hodnoty indexu nabývají hodnot od −1 až do 1. Hodnoty menší než 0 znamenají holou půdu nebo vodní oblast. Nejvíce se využívá v závěrečné fázi vegetačního cyklu. Rovnice 4 ukazuje vzorec, který slouží k výpočtu indexu GNDVI. [22]

*Rovnice 4 - Green NDVI vzorec pro výpočet*

$$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$$

***Zdroj**: GITELSON, Anatoly, Yoram KAUFMAN a Mark MERZLYAK. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment [online]. 1996, 58 [cit. 2023-03-10]*

Triangular Greenness Index je index vhodný pro použití u bezpilotních prostředků s RGB kamerami. TGI je citlivý na obsah chlorofylu v listech. Hodnoty tohoto indexu jsou kladné, pokud je zelená odrazivost větší než odrazivost červeného a modrého pásma. Hodnotí zdraví a vitalitu vegetace během vegetační fáze. Index TGI byl vypočítán podle vzorce uvedeného v rovnici 5. [23]

*Rovnice 5 - Triangular Greenness Index vzorec pro výpočet*

$$TGI = GREEN - 0{,}39 * RED - 0{,}61 * BLUE$$

***Zdroj**: HUNT, E., C. DAUGHTRY, J. EITEL a D. LONG. Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. Agronomy Journal. 2011, **103**(4), 1090-1099.*

Moisture Stress Index (MSI) je index hodnotící stres vegetace kvůli nedostatku hydratace. Využívá k tomu pásma SWIR a NIR. Je citlivý na obsah vody v listech vegetace. Hodnoty tohoto indexu nabývají hodnot 0 až více než 3. Pro vegetaci je běžný dosah hodnot 0,4 až 2. Při vyšší koncentraci vody v listech se zvyšuje intenzita absorpce a tím menší hodnoty indexu.

SWIR1 a SWIR2 odpovídá B11 a B12 pásma pro snímky z družice Sentinel 2. Vzorec pro výpočet indexu MSI je vyjádřen v rovnici 6 a pro výpočet EMSI v rovnici 7. [24]

*Rovnice 6 - Moisture Stress Index vzorec pro výpočet*

$$MSI = \frac{SWIR1}{NIR}$$

***Zdroj**: HUNT JR., E a B ROCK. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- And Middle-Infrared Reflectances. Remote Sensing of Environment 30. 1989, 43-54.*

*Rovnice 7 - Enhanced MSI vzorec pro výpočet*

$$EMSI = \frac{SWIR2}{NIR}$$

***Zdroj**: HUNT JR., E a B ROCK. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- And Middle-Infrared Reflectances. Remote Sensing of Environment 30. 1989, 43-54.*

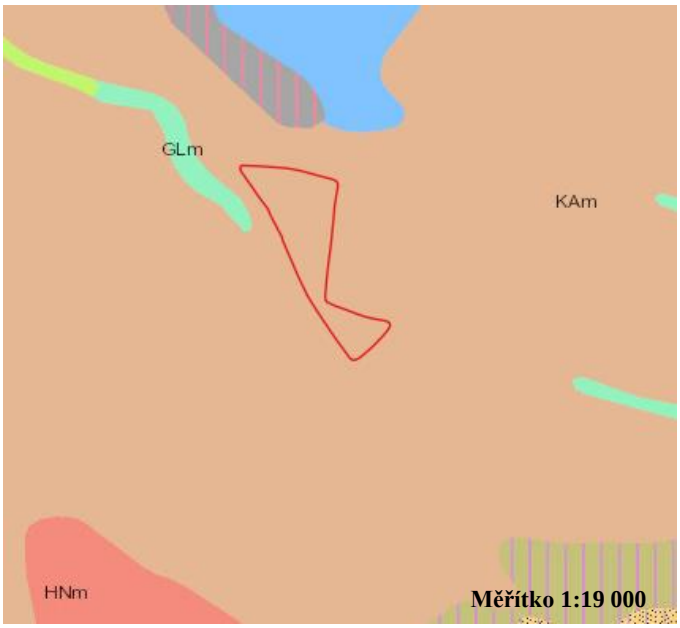
## 5.2 Charakteristika zkoumaného území

Jako zkoumané území bylo vybráno pole nedaleko Kněževsi u Rakovníka (50° 7' 58,65"severní šířky, 13° 39' 41,05" východní délky). Jedná se o standardní ornou půdu používanou pro konvenční hospodaření, patřící společnosti Lupofyt s.r.o. Firma Lupofyt s.r.o. sídlí ve středočeském kraji a v dnešní době hospodaří na ploše téměř 2000 ha. Pěstují především mák, řepku ozimou, jarní ječmen, ozimý ječmen, ozimou pšenici a chmel. Fotografie zkoumané oblasti lze vidět na obrázku 7.

Geografické informace pozemku jsou následující. Výměra tohoto pozemku je 8,77 ha. Průměrná nadmořská výška pozemku je 374,11 m, průměrná sklonitost 1,19°, obvod pozemku je 1762,32 m.

Půdní poměr zkoumané oblasti je převážně tvořen kambizemí, ale nachází se zde i černozem a hnědozem. Celkový obsah skeletu se pohybuje kolem 25 %. Půdy tohoto typu jsou hluboké až středně hluboké. Druh půdy na pozemku je ze 76 % střední a zbytek těžký. Je to půda se střední rychlostí infiltrace při úplném nasycení, díky tomu se minimalizuje povrchový odtok vody a vodní eroze. Je charakterizována jako hlinitopísčitá až jílovitohlinitá. Patří mezi erozně neohrožené půdy. Na obrázku 5 můžeme vidět mapu půdních poměrů zkoumané oblasti dostupné z České geologické služby.

*Obrázek 5 - Mapa půdních poměrů zkoumané oblasti (KAm – Kambizemě modální, HNm – Hnědozemě modální, Glm – Glej modální)*




***Zdroj**: Česká geologická služba dostupné z: https://mapy.geology.cz/arcgis/services/Pudy/pudni_typy50/MapServer/WmsServer*

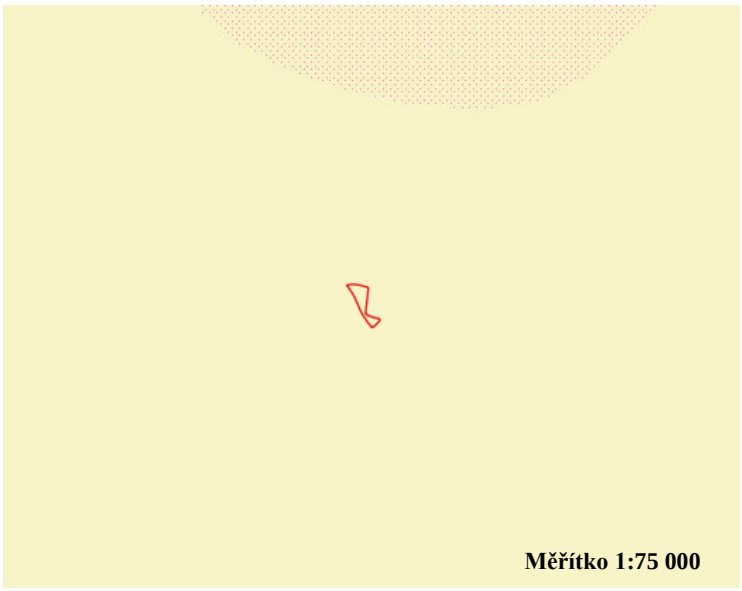
Pozemek spadá pod klimatický region 4, což je mírně teplý a mírně vlhký region. Průměrná roční teplota je mezi 7 – 8,5 °C. Průměrné roční srážky se zde pohybují okolo 450-550 mm. Pravděpodobnost suchých vegetačních období je 30–40 %. Pozemek spadá do výnosové hladiny 2, což znamená výnos plodiny okolo 0,8 - 1,2 $t \cdot ha^{-1}$ a možnost hnojení dusíkem 120 kg $N \cdot ha^{-1}$. Na obrázku 6 lze vidět klimatické regiony ve zkoumané oblasti a v tabulce 3 jsou průměrné měsíční teploty a srážky ve zkoumané oblasti roku 2020.

*Tabulka 3 - Průměrné měsíční teploty a srážky ve zkoumané oblasti roku 2020*

| Parametry/Měsíce | Duben | Květen | Červen | Červenec | Srpen |
|---|---|---|---|---|---|
| Srážky [mm] | 27 | 58 | 101 | 55 | 76 |
| Teploty [°C] | 9,2 | 12,9 | 17,0 | 18,6 | 18,2 |

***Zdroj**: Český hydrometeorologický ústav – meteorologická stanice Heřmanov*

*Obrázek 6 - Mapa klimatických oblastí ve zkoumané oblasti (žlutá – mírně teplé oblasti, červenožlutá – přechod mezi mírně teplou oblastí a teplou oblastí)*




***Zdroj**: Klimatické oblasti ČR – WMS dostupné z: https://micka.cenia.cz/record/basic/4e64bc59-65b0-4475-aae2-06a8c0a80138*

*Obrázek 7 - Fotografie zkoumané oblasti*

***Zdroj**: https://goo.gl/maps/1o7vE58GMYg51ssa7*

# 6 Výsledky a jejich hodnocení

V této části diplomové práce jsou prezentovány a hodnoceny výsledky porovnání vybraných spektrálních indexů hodnotících porost máku setého. Dále se ekonomicky hodnotí satelitní a letecké snímkování.

## 6.1 Výsledky

Koeficient determinace ($R^2$) udává míru, jak moc jsou data blízká křivce regrese. Hodnoty koeficientů determinace v tabulce 4 ukazují, jak moc velká je závislost v jednotlivých termínech snímkování porostu mezi spektrálním indexem RVI a spektrálními indexy NDVI, GNDVI, MSI a EMSI. Index RVI byl vypočítán z družicových snímků Sentinel 1 a zbylé spektrální indexy ze snímků družice Sentinel 2.

Bylo zjištěno, že závislost mezi indexem RVI a ostatními indexy je poměrně malá. Nicméně, v některých termínech snímkování, konkrétně 27. května a 2. června, byly pozorovány významné závislosti, které byly způsobeny vztahem mezi hodnotami RVI a obsahem vody v půdě a nárůstem objemu porostu. Na druhé straně, u spektrálních indexů MSI/EMSI byly pozorovány vysoké hodnoty závislosti, které byly pravděpodobně způsobeny nízkou vlhkostí půdy. Nicméně, po deštivém období a následném nárůstu porostu, hodnoty závislosti rapidně klesaly.

*Tabulka 4 - Koeficienty determinace ($R^2$) mezi spektrálními indexy odvozenými ze satelitních snímků (NDVI – Normalized Difference Vegetation, GNDVI – Green NDVI, MSI - Moisture Stress Index, EMSI – Enhanced Moisture Stress Index)*

| *RVI* | *NDVI 18.5.* | *NDVI 2.6.* | *NDVI 12.6.* | *GNDVI 18.5.* | *GNDVI 2.6.* | *GNDVI 12.6.* | *MSI 18.5.* | *MSI 2.6.* | *MSI 12.6.* | *EMSI 18.5.* | *EMSI 2.6.* | *EMSI 12.6.* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **15.5.** | 0.06 | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.04 | 0.32 | 0.01 | 0.00 | 0.28 | 0.00 | 0.01 |
| **21.5.** | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.00 |
| **27.5.** | 0.30 | 0.05 | 0.00 | 0.37 | 0.04 | 0.00 | 0.40 | 0.07 | 0.00 | 0.41 | 0.05 | 0.00 |
| **2.6.** | 0.07 | 0.22 | 0.17 | 0.15 | 0.29 | 0.24 | 0.10 | 0.25 | 0.21 | 0.09 | 0.24 | 0.20 |
| **8.6.** | 0.01 | 0.07 | 0.07 | 0.01 | 0.06 | 0.04 | 0.08 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.08 |
| **14.6.** | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.06 |
| **20.6.** | 0.09 | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.02 |
| **26.6.** | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.05 |
| **2.7.** | 0.10 | 0.03 | 0.00 | 0.16 | 0.04 | 0.01 | 0.26 | 0.08 | 0.07 | 0.24 | 0.01 | 0.00 |

V tabulce 5 se nachází hodnoty koeficientu determinace mezi spektrálními indexy NDVI, GNDVI a TGI, vypočítaných ze snímků bezpilotních prostředků, a RVI v jednotlivých termínech snímkování porostu.

Bylo zjištěno, že podobně jako u družicových snímků, i u snímků bezpilotních prostředků je mezi hodnotami RVI a spektrálními indexy jen velmi malá až žádná závislost. Většina dat neprokázala žádnou statisticky významnou korelaci mezi RVI a ostatními indexy. Nicméně, v jediném termínu skenování (Sentinel 1), 27. května, byla zaznamenána relativně vyšší závislost mezi hodnotami RVI a hodnotami indexů NDVI, GNDVI a TGI vypočítaných ze snímků snímaných bezpilotním prostředkem 21. května. Tento výsledek odpovídal prodlužovací růstové fázi máku.

Výsledky ukázaly, že spektrální index TGI by mohl být použit jako alternativa k indexům NDVI a GNDVI, to může být užitečné pro situace, kdy není k dispozici vybavení se spektrální citlivostí na NIR. Zároveň bylo zjištěno, že snímky z bezpilotních prostředků mohou být použity k doplnění informací o růstu plodiny v případech, kdy družicové snímky nejsou k dispozici, například kvůli špatnému počasí nebo pokud je potřeba detailnějšího rozlišení, než poskytují družice.

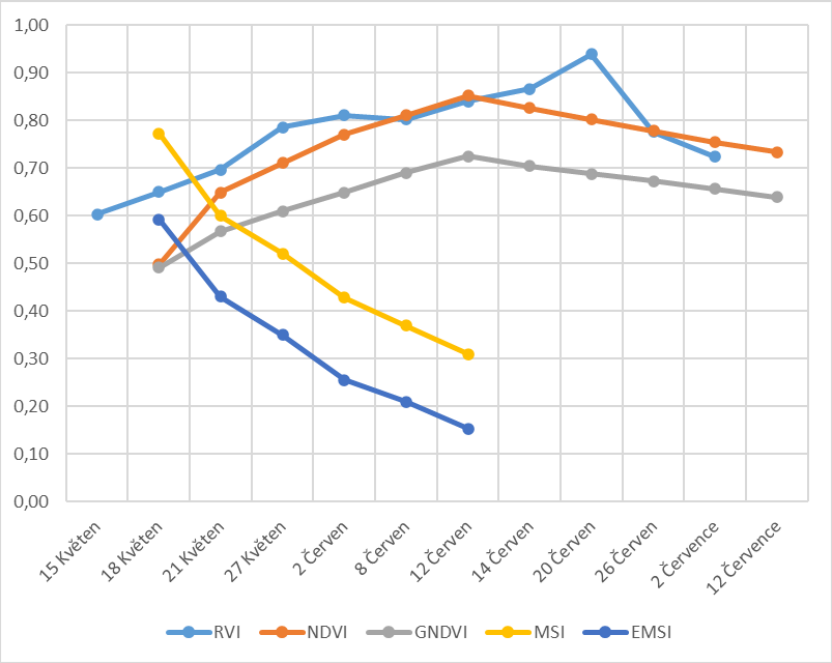
Index RVI by mohl být schopen vysvětlit prostorové rozložení výnosu v určitých růstových fází, konkrétně z 32 % 15. května, kdy se plodina nacházela v období prodlužování a z 21 % 2. července, kdy se nacházela v fázi BBCH 68, tedy na konci kvetení. Tyto výsledky tedy naznačují, že existuje možná variabilita výnosu během růstu máku v souvislosti s nárůstem biomasy. Mezi indexem RVI a počtem makovic a hmotnosti semen byla zjištěna závislost v termínu 20. června, konkrétně 27 % u počtu makovic a 28 % u hmotnosti semen.

*Tabulka 5 - Koeficienty determinace ($R^2$) mezi spektrálními indexy odvozenými ze snímků bezpilotních prostředků (NDVI – Normalized Difference Vegetation, GNDVI – Green NDVI, TGI - Triangular Greenness Index, DEM - Digital Elevation Model, NoP - počet makovic, W – hmotnost semen v gramech)*

| *RVI* | *NDVI 21.5.* | *NDVI 15.7.* | *GNDVI 21.5.* | *GNDVI 15.7.* | *TGI 21.5.* | *TGI 23.6.* | *TGI 15.7.* | *DEM* | *Výnos ($t.ha^{-1}$)* | *NoP* | *W(g)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **15.5.** | 0.15 | 0.02 | 0.18 | 0.02 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.32 | 0.09 | 0.02 |
| **21.5.** | 0.09 | 0.06 | 0.09 | 0.05 | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.18 | 0.05 |
| **27.5.** | 0.28 | 0.11 | 0.35 | 0.13 | 0.24 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.15 | 0.02 | 0.00 |
| **2.6.** | 0.03 | 0.10 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.12 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| **8.6.** | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |
| **14.6.** | 0.03 | 0.00 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 0.10 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.17 | 0.21 |
| **20.6.** | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.10 | 0.00 | 0.05 | 0.16 | 0.11 | 0.03 | 0.27 | 0.28 |
| **26.6.** | 0.11 | 0.01 | 0.10 | 0.03 | 0.13 | 0.00 | 0.06 | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 0.01 |
| **2.7.** | 0.04 | 0.00 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.21 | 0.00 | 0.01 |

Byl sestrojen graf, k vidění na obrázku 8, průměrných hodnot indexů za období výzkumu. Lze vidět tendenci křivky indexu RVI sledovat křivku indexů NDVI a GNDVI. Ale na konci května, kdy došlo k růstové fázi prodloužení a bylo relativně vlhké jaro, lze vidět u křivky RVI zřetelný nárust. Během kvetení máku, 8. června, křivka RVI zaznamenala náhlý pokles hodnot. Poté následoval nárůst a pokles hodnot probíhající od počátku zrání do odumírání plodiny.

*Obrázek 8 - Křivky průměrných hodnot indexů RVI, NDVI, GNDVI, MSI a EMSI*



## 6.2 Ekonomické zhodnocení

### 6.2.1 Satelitní snímkování

Družicové snímky jsou neocenitelným zdrojem informací pro zemědělce a mají velký potenciál pro zvětšení výnosů, snížení nákladů a minimalizaci zemědělských aktivit na polích. Tato analýza se zaměřuje na ekonomické aspekty použití družicových snímků v zemědělství.

Jedním z hlavních ekonomických přínosů použití družicových snímků je zvětšení výnosů. Družicové snímky poskytují zemědělcům přesné informace o stavu plodin, například je možné zjistit, kde se na poli nachází slabá místa, a ta eliminovat, nebo naopak silná místa, která můžeme ještě podpořit hnojením ke zvýšení výnosu. Díky zmapování lze provést přesné aplikace hnojiv nebo pesticidů na určité oblasti. Satelitní snímky lze také využít pro detekci stresu, chorob a škůdců rostlin. Lze tak zareagovat včas a minimalizovat ztráty ve výnosu. Tyto postupy umožňují snížení nákladů na hnojení a pesticidy, což v konečném důsledku vede ke zvýšení zisku.

Další výhodou satelitního snímkování je jeho četnost. Satelity létají nad stejnou oblastí pravidelně v určitých intervalech, takže lze sledovat vývoj rostlin a půdy po dobu vegetační sezóny a porovnávat výsledky z různých období. Tento průběžný monitoring umožňuje efektivnější plánování a řízení zemědělských operací a tím znovu ušetřit na nákladech.

Další možnost využití je při analýze půdního pokryvu a stanovení půdních charakteristik. Díky satelitům lze například získat informace o typu půdy, jejím složení a obsahu vody. Tyto informace pomáhají při plánování výsadby a hnojení a přispívají k udržitelnému hospodaření.

Na druhou stranu, jednou z nevýhod použití satelitních snímků v zemědělství je jejich cena. Ceny snímků se mohou výrazně lišit podle typu družice, rozlišení snímků a požadavků zákazníka. Pro mnohé zemědělce může být cena satelitních snímků příliš vysoká, což může být limitující faktorem pro jejich použití.

Cena za jednotku plochy a zpracování dat jsou nejvýznamnějšími nákladovými položkami při použití satelitních snímků pro precizní zemědělství. Na základě cenových nabídek od několika poskytovatelů satelitních snímků byla vytvořena tabulka 6 minimálních cen za hektar.

*Tabulka 6 - Ceny satelitních snímků*

| Satelit | Minimální objednávka [ha] | Cena za minimální objednávku [Kč] | Cena za jednotku [Kč·ha$^{-1}$] | Prostorové rozlišení [m] | Četnost snímkování [dny] |
|---|---|---|---|---|---|
| **Deimos-2** | 10 000 | 13 290,00 | 1,33 | 0,75 | 2,0 |
| **Dove** | 10 000 | 2 613,70 | 0,26 | 3,00 | 1,0 |
| **GeoEye-1** | 10 000 | 60 912,50 | 6,09 | 0,50 | 3,0 |
| **Kompsat-2** | 2 500 | 3 034,55 | 1,21 | 1,00 | 6,0 |
| **Kompsat-3** | 2 500 | 6 091,25 | 2,44 | 0,70 | 3,0 |
| **Kompsat-3A** | 2 500 | 8 860,00 | 3,54 | 0,55 | 3,0 |
| **Landsat-7/8** | 3 700 000 | 0,00 | 0,00 | 15,00 | 8,0 |
| **Pleiades-1A/1B** | 10 000 | 47 068,75 | 4,71 | 0,50 | 1,0 |
| **Rapideye** | 10 000 | 2 613,70 | 0,26 | 5,00 | 5,5 |
| **Sentinel-2** | 1 200 000 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 5,0 |
| **Spot-6/7** | 10 000 | 9 967,50 | 1,00 | 1,50 | 1,0 |
| **WorldView-2/3/4** | 10 000 | 60 912,50 | 6,09 | 0,50 | 1,0 |

***Zdroj**: SOZZI, Marco, Francesco MARINELLO, Andrea PEZZUOLO a Luigi SARTORI. Benchmark of Satellites Image Services for Precision Agricultural use.* AgEng conference. *Wageningen, the Netherlands, **2018**.*

### 6.2.2 Snímkování pomocí bezpilotního prostředku

Bezpilotní prostředky mohou být využity v zemědělství pro mnoho úkolů, jako například mapování polí, monitorování růstu plodin, detekci chorob, sledování sklizně a mnoho dalších úkolů, které jsou důležité pro efektivní hospodaření na poli. Jedním z nejběžnějších senzorů na bezpilotním prostředku je RGB senzor, který může být použit k monitorování růstu rostlin. Tento senzor dokáže zachytit obrazy zelené, červené a modré složky spektra a poskytuje informace o stavu plodin na základě toho, jak tyto barvy interagují s rostlinami.

Při ekonomickém zhodnocení nákupu bezpilotního prostředku pro monitorování plodin je třeba zvážit několik faktorů, včetně ceny samotného prostředku, provozní náklady nebo náklady na výcvik pilota. Cena samotného bezpilotního prostředku se může výrazně lišit v závislosti na značce a modelu bezpilotního prostředku, kapacitě baterie, dosahu, funkčnostech a kvalitě senzoru. Nicméně, nejlevnější bezpilotní prostředky s RGB senzorem lze očekávat za cenu přibližně desítek tisíc korun. Další náklady spojené s použitím bezpilotního prostředku jsou provozní náklady. Ty zahrnují například náklady na palivo a údržbu bezpilotního prostředku. Tyto

náklady by však měly být nízké v porovnání s náklady na využití jiných zemědělských technologií.

Použití bezpilotního prostředku však nabízí výhody, které pomáhají zvýšit zisk zemědělců. Pomocí těchto prostředků mohou zemědělci identifikovat problémy s plodinami rychleji a přesněji, což jim umožňuje okamžitou reakci a minimalizaci ztrát. Bezpilotní prostředky mohou být použity kdykoli a nemusí se čekat na intervaly přeletu jako u družice. Navíc snímkování probíhá oproti družicím v malé výšce, proto nevznikají snímky, kde místo pole lze vidět akorát mraky, a lze dosáhnout lepšího prostorového rozlišení. Mezi nevýhody patří potřeba člověka, který bude bezpilotní prostředek obsluhovat, a náklady na jeho mzdu. Další nevýhodou je nemožnost použití bezpilotního prostředku za každého počasí, při příliš velkém větru by mohlo dojít k nehodě.

Jako bezpilotní prostředek vhodný pro monitorování zemědělských plodin může být například Dron DJI Mavic 3M na obrázku 9. Profesionální dron, který nese čtyřpásmovou multispektrální kameru (GREEN, RED, RE, NIR) a RGB kameru. V rámci jednoho letu je schopen efektivně změřit 200 ha. Zároveň je schopen měřit sluneční záření a následně získaná data světelně kompenzovat a zvýšit tím konzistentnost snímků. Pořizovací cena dronu je 109 900 Kč [25]

*Obrázek 9 - Dron DJI Mavic 3M*

***Zdroj**: https://dji-official-fe.djicdn.com/cms/uploads/1d5df050695b621ed32cd2593759ffed.png*

Dražším zástupcem bezpilotních prostředků používaných v zemědělství je senseFly eBee Ag. Jedná se o pevnokřídlý bezpilotní prostředek s rozpětím křídel přibližně 110 cm, který je navržen pro využití v zemědělství a dalších oborech, kde je potřeba vysoká přesnost

a opakovatelnost letů. Na jedno nabití zvládne letět 55 minut, za které stihne obletět přibližně 160 ha. Je vybaven RGB kamerou, multispektrální kamerou, termokamerou a LIDAR senzorem. Umožňuje automatické plánování letu a přesně řízení pomocí GPS senzoru. Cena senseFly eBee Ag se může lišit v závislosti na zvolené konfiguraci a dodavateli. Obecně lze říci, že základní model bezpilotního prostředku bez dalších senzorů a vybavení se pohybuje v cenové relaci od 300 000 Kč. Nicméně s přidáním dalších senzorů a vybavení se cena může výrazně zvýšit. [26]

*Obrázek 10 - Bezpilotní prostředek senseFly eBee Ag*

***Zdroj**: https://ageagle.com/wp-content/uploads/2022/06/eBeeAg-Expanded-capabilities.png.webp*

Na základě cenových nabídek od několika výrobců bezpilotních prostředků byla vytvořena tabulka 7 s počáteční cenou pořízení bezpilotního prostředku, spektrálních pásem, které jsou schopné zaznamenat a maximální délkou letu.

*Tabulka 7 - Ceny, spektrální pásma a maximální délka letu vybraných dronů*

| Dron | Cena od | Spektrální pásma | Maximální délka letu [min] |
|---|---|---|---|
| DJI Phantom 4 RTK | 135 000 Kč | RGB | 30 |
| DJI Matrice 300 RTK | 225 000 Kč | RGB | 55 |
| AgEagle RX60 | 394 000 Kč | RGB, NIR, RE | 60 |
| Delair UX11 AG | 360 000 Kč | RGB, NIR, RE | 59 |
| senseFly eBee X | 300 000 Kč | RGB, NIR, RE | 90 |
| WingtraOne | 425 000 Kč | RGB, NIR, RE | 59 |
| PrecisionHawk Lancaster 5 | 563 000 Kč | RGB, NIR, RE | 40 |
| DJI Agras T20 | 360 000 Kč | RGB, NIR, RedEdge-S | 15 |
| Trimble UX5 HP | 259 000 Kč | RGB, NIR | 35 |

# 7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo vybrat spektrální indexy k porovnání a zpracovat vhodné družicové a letecké snímky do podoby spektrálních indexů za účelem získání experimentálních dat. Data byla použita pro porovnání spektrálních indexů pro hodnocení stavu porostů máku setého. Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

První část diplomové práce byla věnována literární rešerši. Byla vysvětlena problematika pěstování máku setého v České republice, dálkového průzkumu Země, analýzy družicových a leteckých snímků a monitorování růstu zemědělských plodin pomocí spektrálních indexů. Byl tak vytvořen teoretický přehled těchto témat.

V praktické části byly vybrány vhodné spektrální indexy sloužící pro hodnocení porostu máku setého. K porovnání byly vybrány indexy RVI, NDVI, GNDVI, TGI, MSI a EMSI. Mák setý byl monitorován senzory a radarem v průběhu vegetačního období 2020. Bylo nutné vybrat a zpracovat družicové a letecké snímky a dále je převést do podoby spektrálních indexů pomocí volně dostupného softwaru SNAP a QGIS. Byly využity snímky z družic Sentinel 1 a 2, snímky ze dvou bezpilotních prostředků, FireFly6 Pro se senzorem Micasense RedEdge MX a DJI Mavic Pro se senzorem RGB. Výsledky spektrálních indexů byly zprůměrovány a porovnány pomocí koeficientu determinace. Další částí je ekonomické zhodnocení satelitního a leteckého snímkování v zemědělství.

Výsledky ukázaly, že hodnoty indexu RVI v čase by mohly být velmi užitečné při hodnocení porostu máku setého. Jeho hlavní výhodou je možnost využití, i když je nad zkoumanou oblastí oblačnost, chybí satelitní snímky nebo nelze použit bezpilotní prostředek. Nepotvrdilo se, že by mohl index RVI nahradit indexy NDVI, GNDVI, TGI, MSI a EMSI. Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace u satelitních snímků byly zaznamenány 27. května, kdy dosahovaly hodnoty 0,30 u indexu NDVI; 0,37 u indexu GNDVI; 0,40 u indexu MSI a 0,41 u indexu EMSI, a 2. června, kdy dosahovaly hodnoty 0,22 u indexu NDVI; 0,29 u indexu GNDVI; 0,25 u indexu MSI a 0,24 u indexu EMSI. U leteckých snímků od bezpilotních prostředků se potvrdilo, že index TGI by mohl postačit jako alternativa k NDVI a GNDVI. Dále bylo zjištěno, že index RVI by mohl být využíván k odhadu výnosu máku setého, zejména v růstových fázích prodlužování a na konci kvetení.

Využívání spektrálních indexů v praxi může vést k většímu výnosu, efektivitě a snížení nákladů na zemědělskou produkci, což přináší pro zemědělce větší zisk. Umožňují zemědělcům identifikovat oblasti, kde jsou rostliny oslabené nebo postižené chorobami, a díky tomu zasáhnout a zabránit větším ztrátám. To může vést k většímu výnosu a efektivitě v zemědělské produkci. Zároveň se tím sníží náklady na pesticidy a hnojiva, protože je aplikujeme pouze tam, kde jsou potřeba.

Index RVI ukázal velký potenciál u monitorování máku setého, proto by se další výzkumy mohly zaměřit na jeho další využívání, například při monitorování i jiných zemědělských plodin. Další možností je výzkum zabývající se monitorováním vlhkosti máku setého před sklizní pomocí spektrálních indexů, a to za účelem předejít znehodnocení sklizně latexem z nezralých tobolek.

# 8 Seznam použitých zdrojů


[1] MIKŠÍK, Vlastimil a Václav LOHR. The Czech Republic - the largest producer of breadseed poppy. Prague: Ministry of Agriculture of the Czech Republic, 2020. ISBN 978-80-7434-584-5.

[2] ZEHNÁLEK, Petr. Přehledy odrůd hořčice bílé, máku setého a kmínu kořenného 2022 [online]. 1. vydání. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský Brno, 2022 [cit. 2022-03-16]. ISBN 978-80-7401-169-6. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/696683/Olejniny_2022.pdf

[3] Registrované odrůdy máku setého v ČR. In: EAGRI [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2022 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/app/sok/odrudyNouRL.do

[4] SATRANSKÝ, Matěj a Pavel CIHLÁŘ. Zakládání porostů jarního máku. Agromanual.cz [online]. 2021, 1 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/zakladani-porostu-jarniho-maku

[5] HAVEL, Jiří, Martin BÁRNET, Pavel CIHLÁŘ et al. Pěstitelská technologie máku pro snížení rizikovosti pěstování: certifikovaná metodika. 1. vydání. Opava: Oseva vývoj a výzkum, 2018. ISBN 978-80-905808-1-7.

[6] Situační a výhledová zpráva: Olejniny. [Praha]: Ministerstvo zemědělství České republiky, 2021. ISBN 978-80-7434-614-9. ISSN 1211-7692. Dostupné také z: https://eagri.cz/public/web/file/682857/SVZ_Olejniny_12_2020.pdf. 60.

[7] Náklady technologických operací na 1 ha: Mák setý. In: Výzkumný ústav zemědělské techniky, v. v. i. [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: http://vuzt.cesnet.cz/cgi-bin/start99.cgi

[8] DOBROVOLNÝ, Petr. Dálkový průzkum Země: Digitální zpracování obrazu. 1. Brno: Skripta PřF MU Brno, 1998.

[9] CAMPBELL, James B. Introduction to Remote Sensing. 2, ilustrované vydání. New York: Guilford Press, 1996. ISBN 9781572300422.

[10] SABINS, Floyd F. Remote Sensing: Principles and Interpretation. Ilustrované vydání. San Francisco: W. H. Freeman, 1978. ISBN 9780716700234.

[11] KROULÍK, Milan. Využití bezpilotních prostředků ve sběru dat a řízení vstupů: Precizní zemědělství. Agromanual [online]. 2019 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/precizni-zemedelstvi/vyuziti-bezpilotnich-prostredku-ve-sberu-dat-a-rizeni-vstupu

[12] EASTMAN, J. Ronald. Guide to GIS and Image Processing Volume 1 [online]. První. Worcester, MA: Clark Labs Clark University, 2001 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Ronald-Eastman-2/publication/242377547_Guide_to_GIS_and_Image_Processing_Volume_2/links/5419a9d10cf25ebee9887ac2/Guide-to-GIS-and-Image-Processing-Volume-2.pdf

[13] ŽÍŽALA, Daniel, Vojtěch LUKAS a Jitka KUMHÁLOVÁ. Dálkový průzkum Země a precizní zemědělství [online]. První. Zemědělský svaz ČR - Česká technologická platforma pro zemědělství, 2021 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: https://www.ctpz.cz/media/upload/1646732225_17-precizni-zemedelstvi-5-web.pdf

[14] Landsat Science. In: NASA Official [online]. NASA/USGS Landsat Program [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: https://landsat.gsfc.nasa.gov/

[15] The Sentinel missions. In: European Space Agency [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z:

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions

[16] PAJARES, Gonzalo. Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Photogramm. Eng. Remote Sens [online]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 281–329 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2015/00000081/00000004/art00015;jsessionid=j8m1e20vbd53.x-ic-live-03#

[17] Základní informace k regulačnímu rámci EU pro bezpilotní systémy. In: Úřad pro civilní letectví [online]. Praha: Sekce provozní, 2020 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/zakladni-informace-k-regulacnimu-ramci-eu-pro-bezpilotni-systemy/

[18] Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel. In: . Brusel, 2019, L 152/45. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0947

[19] EASTMAN, J. Ronald. IDRISI Guide to GIS and Image Processing Volume 2 [online]. 2. Worcester, MA: Clark Labs, 2001 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: http://ultra.sdk.free.fr/docs/DxO/Idrisi%2032%20-%20Guide%20to%20GIS%20and%20image%20processing%202%20(2001).pdf

[20] Vegetation Indices. L3Harris Geospatial Solutions, Inc. [online]. 2022 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/vegetationindices.html

[21] DINESH KUMAR, S, S SRINIVASA RAO a J SHARMA. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton. Indian Cartographer [online]. Regional Centres, National Remote Sensing Centre, Hyderabad, 2013, 2013(), 7 [cit. 2023-03-10].

Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Dinesh-Kumar-Sahadevan/publication/267020154_Radar_Vegetation_Index_as_an_Alternative_to_NDVI_for_Monitoring_of_Soyabean_and_Cotton/links/54a130ee0cf267bdb9018673/Radar-Vegetation-Index-as-an-Alternative-to-NDVI-for-Monitoring-of-Soyabean-and-Cotton.pdf?origin=publication_detail

[22] GITELSON, Anatoly, Yoram KAUFMAN a Mark MERZLYAK. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment [online]. 1996, 58 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Anatoly-Gitelson/publication/222494609_Use_of_a_green_channel_in_remote_sensing_of_global_vegetation_from_EOS-MODIS/links/5cc2a19c92851c8d22050a04/Use-of-a-green-channel-in-remote-sensing-of-global-vegetation-from-EOS-MODIS.pdf?origin=publication_detail

[23] HUNT, E., C. DAUGHTRY, J. EITEL a D. LONG. Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. Agronomy Journal. 2011, 103(4), 1090-1099.

[24] HUNT JR., E a B ROCK. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- And Middle-Infrared Reflectances. Remote Sensing of Environment 30. 1989, 43-54.

[25] DJI Mavic 3M [online]. In: . TELINK, spol. s r.o. proud DJI Authorized Retail Store [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: https://www.djitelink.cz/cs/mavic-3-enterprise/12641-dji-mavic-3m-2-roky-dji-care.html

[26] EBee Ag. In: AgEaglE [online]. AgEagle Aerial Systems Inc. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: https://ageagle.com/drones/ebee-ag/

# 9 Přílohy

## Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Hektarový výnos máku setého za 10 let ..... 9
Obrázek 2 - Vývoj ceny tuny semene máku za 10 let ..... 10
Obrázek 3 - Propustnost atmosféry [12] ..... 14
Obrázek 4 - Odrazivost půdy, vegetace a vody [13] ..... 16
Obrázek 5 - Mapa půdních poměrů zkoumané oblasti (Kam – Kambizemě modální, HNm – Hnědozemě modální, Glm – Glej modální) ..... 31
Obrázek 6 - Mapa klimatických oblastí ve zkoumané oblasti (žlutá – mírně teplé oblasti, červenožlutá – přechod mezi mírně teplou oblastí a teplou oblastí) ..... 32
Obrázek 7 - Fotografie zkoumané oblasti ..... 32
Obrázek 8 - Křivky průměrných hodnot indexů RVI, NDVI, GNDVI, MSI a EMSI ..... 35
Obrázek 9 - Dron DJI Mavic 3M ..... 38
Obrázek 10 - Bezpilotní prostředek senseFly eBee Ag ..... 39

## Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Zobrazení plochy, produkce a výnosu máku setého za 10 let ..... 9
Tabulka 2 - Elektromagnetické spektrum ..... 13
Tabulka 3 - Průměrné měsíční hodnoty teploty a srážek ve zkoumané oblasti roku 2020 ..... 31
Tabulka 4 - Koeficienty determinace (R2) mezi spektrálními indexy odvozenými ze satelitních snímků (NDVI - Normalized Difference Vegetation, GNDVI – Green NDVI, MSI - Moisture Stress Index, EMSI – Enhanced Moisture Stress Index) ..... 33
Tabulka 5 - Koeficienty determinace (R2) mezi spektrálními indexy odvozenými ze snímků bezpilotních prostředků (NDVI – Normalized Difference Vegetation, GNDVI – Green NDVI, TGI - Triangular Greenness Index, DEM - Digital Elevation Model, NoP - počet makovic, W – hmotnost semen v gramech) ..... 35
Tabulka 6 - Ceny satelitních snímků ..... 37
Tabulka 7 - Ceny, spektrální pásma a maximální délka letu vybraných dronů ..... 39

# Seznam rovnic:

ROVNICE 1 - VZOREC PRO VÝPOČET ODRAZIVOSTI....15
ROVNICE 2 - RADAR VEGETATION INDEX....27
ROVNICE 3 - NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX VZOREC PRO VÝPOČET....28
ROVNICE 4 - GREEN NDVI VZOREC PRO VÝPOČET....28
ROVNICE 5 - TRIANGULAR GREENNESS INDEX VZOREC PRO VÝPOČET....28
ROVNICE 6 - MOISTURE STRESS INDEX VZOREC PRO VÝPOČET....29
ROVNICE 7 - ENHANCED MSI VZOREC PRO VÝPOČET....29