

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Diplomová práce

**Posouzení vhodnosti vybraných spektrálních indexů
pro určení variability porostu chmele**

Autor práce: Bc. Jakub Kaiser

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

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Kaiser

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Posouzení vhodnosti vybraných spektrálních indexů pro určení variability porostů chmele

Název anglicky

Assessment of the suitability of selected spectral indices for determining the variability of hop stands

Cíle práce

- zpracovat rešerši k problematice monitorování růstu zemědělských plodin pomocí dálkového průzkumu Země, včetně chmele, a sledování variability porostů s důrazem na popis výnosotvorných prvků a metod analýzy dat;
- vybrat a zpracovat vhodné snímky;
- vybrat vhodné metody analýzy obrazu a zpracovat podklady;
- statisticky zhodnotit podklady získané během vegetačního období s referenčními daty;
- diskutovat vhodnost použitých metod a vyvodit ekonomickou analýzu týkající se využití distančních metod snímání chmele oproti konvenčním metodám zavedených v praxi.

Metodika

V rámci teoretické části práce (literární rešerše) se autor seznámí a popíše problematiku analýzy multispektrálních snímků, agronomických dat a vhodných agrotechnických opatření při pěstování chmele otáčivého.

V praktické části autor vybere a zpracuje letecké snímky a referenční data. Na základě porovnání dat a statistických analýz autor popíše vývoj porostů během vegetačního období a specifika vybraných odrůd při daném způsobu hospodaření.

V diskuzi autor dále zhodnotí a porovná výsledky své práce s odbornou literaturou. Autor bude také diskutovat ekonomickou rentabilitu distančních metod snímání oproti běžně používaným metodám.

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, chmel otáčivý, analýza obrazu, variabilita porostů, spektrální indexy,

Doporučené zdroje informací

- Pádua, L., Marques, P., Adão, T., Guimarães, N., Sousa, A., Peres, E., Sousa, J.J., 2019. Vineyard Variability Analysis through UAV-Based Vigour Maps to Assess Climate Change Impacts. *Agronomy*, 9, 581. DOI: 10.1080/01431161.2018.1471548
- Pádua, L., Marques, P., Hruška, J., Adão, T., Peres, E., Morais, R., Sousa, J.J. 2018. Multi-Temporal Vineyard Monitoring through UAV-Based RGB Imagery. *Remote Sensing*, 10, 1907. DOI:10.1080/01431161.2018.1471548
- Rybáček V., 1991. Hop Production. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands, 286 pp.
- Starý, K., Jelínek, Z., Kumhálová, J., Chyba, J., Balážová, K. (2020). Comparing RGB – based vegetation indices from UAV imageries to estimate hops canopy area. *Agronomy Research*, 18(4), 2592-2601. DOI: 10.15159/AR.20.169

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 20. 01. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Posouzení vhodnosti vybraných spektrálních indexů pro určení variability porostu chmele" 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 25.03.2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a cenné rady, které mi v průběhu zpracování diplomové práce věnovala.

Posouzení vhodnosti vybraných spektrálních indexů pro určení variability porostu chmele

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá posouzením vhodných spektrálních indexů pro určení variability chmele. V první části práce jsou popsány základní informace o chmelu, dálkovém průzkumu Země, použití různých spektrálních indexů a metod k monitorování speciálních plodin jako je vinná réva a chmel. V praktické části byly vybrány čtyři spektrální indexy $CI_{Red-edge}$, $CI_{Red\&Red-edge}$, NDVI a TGI. Tyto indexy byly použity na snímky z bezpilotního prostředku v Chmelařském institutu Stekník. Pro porovnání byla vybrána odrůda Premiant, která se zde pěstuje jak na klasické konvenční chmelnici, tak i na biochmelnici. Z výsledků vyplývá, že jsou všechny spektrální indexy schopny detekovat porost chmele, a tedy odhadovat listovou plochu. Tento fakt neplatí u vybraných indexů obsahujících Red-edge pásmo za použití Otsovy metody. Spektrální indexy $CI_{Red-edge}$, $CI_{Red\&Red-edge}$, NDVI vykazovaly dobře také napadení chmele plísní na biochmelnici.

Klíčová slova: chmel, vegetace, dálkový průzkum Země, spektrální index, variabilita, NDVI, bezpilotní prostředek, družice

Assessment of the suitability of selected spectral indices for determining the variability of hop stands

Abstract

The diploma thesis deals with the assessment of the suitability of selected spectral indices for determining the variability of hop stands. The first part of the thesis describes basic information about hops, remote sensing, the use of different spectral indices and methods to monitor special crops such as grapevines and hops. In the practical part, four spectral indices $CI_{Red-edge}$, $CI_{Red\&Red-edge}$, NDVI and TGI were selected. These indices were applied to the UAV images at the Hop Institute Stechnik. For comparison the Premiant variety was selected, because it is grown here on a conventional hop garden and a bio-hop garden. The results show that all spectral indices can detect the hop growth and therefore estimate the leaf area. This is not true for the selected indices containing the Red-edge band using the Otsu method. The spectral indices $CI_{Red-edge}$, $CI_{Red\&Red-edge}$, NDVI also showed well the hop blight infestation on bio-hop farm.

Keywords: hop, vegetation, remote sensing, spectral indices, variability, NDVI, unmanned aerial vehicle, satellite

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika	2
2.1	Cíl práce	2
2.2	Metodika	2
3	Chmel otáčivý	3
3.1	Stavba chmele otáčivého	3
3.2	Látkové složení chmelové hlávky.....	5
3.3	Makroelementy a mikroelementy obsažené v chmelu.....	6
3.4	Roční životní cyklus chmelových rostlin.....	7
3.5	Vlivy na výnos chmele	8
3.6	České odrůdy chmele.....	10
4	Dálkový průzkum Země	12
4.1	Základní rozdělení DPZ.....	12
4.2	Fyzikální podstata DPZ	13
4.3	Elektromagnetické spektrum	15
4.3.1	Ultrafialové záření	17
4.3.2	Viditelné záření	17
4.3.3	Blízké infračervené záření	17
4.3.4	Střední infračervené záření.....	18
4.3.5	Tepelné infračervené záření	18
4.3.6	Mikrovlnné záření	18
4.4	Vliv atmosféry na dálkový průzkum Země	18
4.5	Spektrální chování vegetace	20
4.6	Družicové systémy.....	22
4.7	Bezpilotní prostředky.....	23
4.8	Variabilita pozemku.....	24
5	Spektrální indexy	26
5.1	Normalized Difference vegetation index NDVI.....	28
5.2	RGB vegetační indexy	28
5.3	Ostatní vegetační indexy.....	29
6	Dálkový průzkum Země plodin s meziřádky.....	32
7	Ekonomické zhodnocení DPZ	34
8	Vlastní práce	36
8.1	Vegetační zpráva ze Žatecké oblasti za rok 2022.....	37

8.2	Zpracování snímků	39
8.3	Výsledky	39
8.3.1	Variabilita chmelnice.....	40
8.3.2	Metoda prahování	44
8.3.3	Porovnání konvenční chmelnice a biochmelnice	46
8.3.4	Korelace vybraných vegetačních indexů s NDVI	48
8.4	Ekonomické srovnání bezpilotních prostředků a družic	48
9	Hodnocení výsledků a diskuse.....	52
10	Závěr	54
11	Seznam použitých zdrojů.....	56
12	Přílohy	62

Seznam obrázků

Obrázek 1 Spektrální křivka vegetace

Obrázek 2 Umístění konvenční chmelnice a biochmelnice ve Stekníku

Obrázek 3 Umístění chmelařského institutu Stekník na mapě ČR

Obrázek 4 Nižší hodnoty indexu $Cl_{Red-edge}$ na konvenční chmelnici ze dne 10.5.2022

Obrázek 5 Nižší hodnoty indexu $Cl_{Red-edge}$ na konvenční chmelnici ze dne 9.7.2022

Obrázek 6 Nižší hodnoty indexu $Cl_{Red\&Red-edge}$ na biochmelnici ze dne 10.5.2022

Obrázek 7 Nižší hodnoty indexu TGI na biochmelnici ze dne 31.5.2022

Obrázek 8 Snímek biochmelnice z 11.8.2022 s vegetačním indexem $Cl_{Red\&Red-edge}$ s použitím Otsovy metody

Obrázek 9 Snímek biochmelnice z 11.8.2022 s vegetačním indexem NDVI s použitím Otsovy metody

Obrázek 10 Snímek biochmelnice – problémová západní část z 2.8.2022

Obrázek 11 Nadmořská výška terénu biochmelnice Stekník

Seznam tabulek

Tabulka 1 Termíny snímání bezpilotním prostředkem

Tabulka 2 Teploty a srážky v Žatecké chmelařské oblasti ve vegetačním období

Tabulka 3 Korelační koeficient vybraných vegetačních indexů s indexem NDVI za vegetační období v roce 2022 pro odrůdu Premiant

Tabulka 4 Srovnání cen bezpilotních prostředků a kamer

Tabulka 5 Ceny vybraných družicových snímků za 1 km²

Seznam grafů

Graf 1 Průměrné hodnoty indexu $CI_{Red\&Red-edge}$ na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022

Graf 2 Průměrné hodnoty indexu $CI_{Red-edge}$ na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022

Graf 3 Průměrné hodnoty indexu NDVI na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022

Graf 4 Průměrné hodnoty indexu TGI na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022

Seznam použitých zkratk

DPZ Dálkový průzkum Země

LAI Leaf area index, index listové plochy

UAV Unmanned aerial vehical, bezpilotní prostředek

RGB Červené, zelené a modré elektromagnetické spektrum

NIR Blízké infračervené elektromagnetické spektrum

NDVI Normalized Difference vegetation index, Normalizovaný diferenční vegetační index

TGI Triangular Greenes Index

1 Úvod

Žijeme v době, kdy se množství populace na naší planetě zvyšuje, a proto bude potřeba zvýšit produkci potravin. I přes tento fakt se velikost orné půdy zmenšuje. Nehledě na to, že dochází i k postupným změnám podnebních podmínek skrz všechny světadíly. Proto je zapotřebí získávat z pole maximální výnosy. Je potřeba nahlížet na pole jako na množinu, nikoliv jako na jednotku, z níž jde určitý výnos. Z každé části jednoho pole můžeme mít jiný výnos, proto je zapotřebí tuto variabilitu potlačit a vytěžit ze všech částí pole maximum. Této problematice se mimo jiné věnuje precizní zemědělství. Jedná se o moderní přístup hospodaření nejen v rostlinné, ale i živočišné výrobě, který využívá jak technického pokroku elektroniky, navigací, informačních technologií a senzoriky, tak i biologických a ekonomických poznatků. Jedním z dalších nástrojů precizního zemědělství je dálkový průzkum Země, kterým lze monitorovat stav vegetace, množství dusíku, chlorofylu, vody a mnoho dalšího. Tyto informace lze využít k provedení potřebných agrotechnických opatření a získat z pole maximální výnos s minimálními ekonomickými náklady a s co nejmenším zatěžováním životního prostředí.

Přestože je chmel jednou ze základních surovin při výrobě piva, oblíbeného nápoje nejednoho státu, monitorování chmele pomocí dálkového průzkumu Země nebylo do současnosti vědeckými pracovníky příliš zkoumáno. Je tedy potřeba se zaměřit na plodiny, které se pěstují podobně jako chmel. Ten se pěstuje s typickým meziřadím na chmelnicové konstrukci. Jistou podobnost lze spatřit na vinicích, z tohoto důvodu bude v rešeršní části práce mnoho odkazů na monitorování vinic pomocí dálkového průzkumu Země.

Tato diplomová práce si klade za cíl pomoci k získání vhodných spektrálních indexů a metod analýzy k monitorování porostů chmele s využitím snímků z bezpilotních prostředků. Je zapotřebí, aby získané výsledky co nejvíce korespondovaly s reálným stavem na chmelnici, a aby k monitorování chmelnice bylo využito co nejekonomičtější řešení.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem diplomové práce je zpracovat literární rešerši pro monitorování růstu plodin pomocí dálkového průzkumu Země se zaměřením zejména na chmel. Dále vybrat vhodné spektrální indexy a metody analýzy vybraných snímků chmele, které by popisovaly variabilitu chmelnice. Poté zpracované výsledky vyhodnotit a diskutovat, a nakonec ekonomicky vyhodnotit využití distančních metod snímání chmele.

2.2 Metodika

Teoretická část práce bude vytvořena na základě prostudované odborné literatury a článků týkajících se pěstování chmele otáčivého, dálkového průzkumu Země a odborných článků týkajících se monitorování speciálních plodin jako je vinná réva a chmel.

V praktické části budou vybrány čtyři spektrální indexy na základě teoretické práce, jejichž pomocí budou zpracovány a analyzovány multispektrální snímky pořízené bezpilotním prostředkem v průběhu vegetačního období chmele otáčivého. Zpracovávány budou z Chmelařského institutu Stekník, odrůdy Premiant pěstované na klasické konvenční chmelnici a biochmelnici za rok 2022.

Vypočtení spektrálních indexů bude provedeno v softwaru Pix4D mapper. V softwaru ENVI bude použita Otsova metoda k odlišení půdy a plodiny. Další zpracování snímků bude realizováno ve volně přístupném softwaru QGIS, kde bude provedeno přesné vymezení hranic, zonální statistika a mapové výstupy. Výsledky budou vyhodnoceny i za přispění softwaru Microsoft Excel. V rámci práce bude prováděno také ekonomické zhodnocení nástrojů dálkového průzkumu Země pro zemědělské podniky pěstující chmel. Budou porovnávány ceny komerčních družic, které mají vysoké prostorové rozlišení a bezpilotních prostředků.

3 Chmel otáčivý

Chmel je technická plodina, jejíž první zmínky najdeme v písemných památkách českých klášterů z let 1086, 1092 a 1100, které potvrzují pěstování chmele. Využití chmelových hlávek najdeme z velké části při výrobě piva, kde představují základní surovinu. Hlávky dávají pivu nahořklou chuť a tím se velkou měrou podílí na celkové chuti piva. Ve velmi malém množství mají chmelové hlávky využití v kosmetice a farmaceutickém průmyslu. Mezi největší producenty chmele patří Německo, USA a Česká republika. U nás se pěstování chmele soustředí ve třech oblastech: Žatecko, Ústěcko a Tršicko. Největší množství pěstovaného chmele se pěstuje v Žatecké oblasti. (1)

Chmel otáčivý je víceletou bylinou, u které před zimním obdobím odumírají všechny nadzemní orgány a přežívají pouze vyspělé podzemní orgány. Příčinou víceletosti jsou spící podzemní pupeny, které přetrvávají v životaschopném stavu čtyři roky. Po této době spící pupeny odumírají a nahrazují je nově vytvořené spící pupeny. (2)

3.1 Stavba chmele otáčivého

Chmel otáčivý má čtyři orgánové soustavy. V nadzemní sféře se nachází soustava nadzemních vegetativních orgánů, která v době sklizně tvoří 44 % z celé rostliny a soustava generativních orgánů, která tvoří 22 % z celé rostliny. V podzemí se nachází dvě soustavy, a to soustava kořenová a soustava podzemních lodyžních orgánů nazývaná také jako babka. Kořenová soustava tvoří 19 % a babka 15 % z celé rostliny v době sklizně. (2)

Babka má u chmele vysoké postavení, jelikož spojuje kořenovou soustavu s nadzemní sférou a její spící pupeny zabezpečují životaschopnost rostliny po dobu několika let. Babku si můžeme představit jako stonek pod povrchem půdy, skládá ze všech lodyžních orgánů, jako jsou již zmiňované podzemní pupeny, mladé dřevo a vyspělé dřevo. Podzemní pupeny mohou být spící nebo probuzené. Z probuzených pupenů vznikají všechny podzemní a nadzemní lodyžní orgány. Podzemní lodyžní orgány do věku jednoho roku nazýváme jako mladé dřevo, to je tvořeno podzemní částí révy nazývané také jako nové dřevo a vodorovnými šlahouny známými jako nové vlky. Hlavní funkcí mladého dřeva je, že z jeho probuzených pupenů vyrůstají v příštím vegetačním období nové nadzemní révy. Vyspělé dřevo, které je

tvořeno starým dřevem a starými vlky, vzniká z jednoletého nového dřeva a nových vlků. Věk starého dřeva lze zjistit dle počtu letokruhů, tak jak je tomu u stromů. (2)

Kořenová soustava obsahuje všechny kořeny, z nichž vyrůstají babky. Kořeny nemají na rozdíl od lodyžních orgánů nody s pupeny, proto je lze snadno rozeznat. Kořenová soustava se dělí na dvě základní skupiny. První skupina je označována jako kosterní kořeny, které tvoří kostru kořenové soustavy. Jedná se o pokročilé druhotně ztlustělé kořeny, které umožňují jak vzestupné, tak sestupné proudění rostlinných šťáv a ukládání zásobních látek. Druhou skupinou jsou koncové kořínky o průměru 1 milimetru, jejichž hlavní funkcí je přijímání vodních roztoků s rozpuštěnými minerálními látkami kořenovými vlásky. Neméně důležitou částí kořenové soustavy jsou také kořenové hlízy, druhotně ztlustělé kořeny, které ovšem plní funkci hlavního zásobního orgánu. Můžeme je najít ve vertikálních kořenových větvích v hloubce okolo 30 až 40 centimetrů pod povrchem půdy. Jsou typické pro svůj lahovitý tvar. (2)

Soustavu vegetativních orgánů v nadzemní části chmele nazýváme v chmelařské terminologii jako chmelina. Hlavní funkcí chmeliny, kterou tvoří lodyhy a listy, je tvorba organických látek při fotosyntéze a kumulace těchto látek v zásobních pletivech především v lodyhách rostliny. Lodyha, která tvoří základní kostru nadzemní části chmele, se vytvoří z vrcholového pupenu, který vznikne z nějakého orgánu na babce pod povrchem půdy. Růst lodyhy je zapříčiněn postupným narůstáním pletiv. Lodyhu můžeme rozdělit na révu a postranní větve nazývané jako pazochy. Réva je prvním nadzemním orgánem, který se vytváří na jaře a také posledním při odumírání na podzim. (2)

Listy mohou být buď révové, vyrůstající, jak název napovídá, z rév nebo pazochové. Obecně vyrůstají z nodů tedy z uzlin rév a pazochů. Z jednoho nodu vyrůstají dva listy vstřícně naproti sobě. Oba druhy listů jsou řapíkaté, ovšem révové listy vyrůstají dříve, jsou větší a tlustší. Tím, že pazochové listy vyrůstají později, obsahují v termínu sklizně více dusíkatých látek a bezdusíkatých látek výtažkových, naopak v sobě obsahují méně popela a éterického výtažku. (2)

Druhou nadzemní soustavou je soustava generativních orgánů. Chmel otáčivý je dvoudomá rostlina, což znamená, že u ní rozlišujeme samčí a samičí pohlaví. Květenství chmelových plodných rostlin vzniká z vrcholového pupenu révy a z pupenů větví plodných

pazochů. Z oplozených květů se vytváří pecky, což jsou vlastně plody. Samčí květenství tvoří rozkvetlá lata, která se skládá z jednotlivých drobných kvítků dosahující po rozkvětu průměru 5 až 6 milimetrů. Samičí květenství tvoří 20 až 60 kvítků, které jsou osazené na mnohokrát zalomeném věténku. Na každém zalomení jsou zpravidla čtyři listy. Plod chmele, nazývaný také jako pecka, je jednosemenná nažka, jejíž přítomnost snižuje jakost chmelových hlávek. V technické zralosti chmelové hlávky neobsahují pecky. Bylo zjištěno, že chmelové hlávky s plody mají vyšší obsah tuku a bílkovin než chmelové hlávky bez plodů, což má za následek nižší jakost hlávek. (2)

V chmelnici jsou pěstovány pouze samičí rostliny poskytující chmelové hlávky. Oplození samičích látek samčími je nežádoucí, jelikož by vedlo ke zhoršení kvality hlávek. Proto je nutné likvidovat rostoucí samčí rostliny v blízkosti chmelnice. (1)

3.2 Látkové složení chmelové hlávky

Chmelová hlávka obsahuje různé chemické látky, které se rozdělují z pivovarského hlediska na účinné látky, které mají význam pro výrobu piva a doprovodné látky, které mají význam z výrobního a obchodního hlediska. Mezi účinné látky patří chmelová pryskyřice, tříslovina a silice. (2)

Chmelová pryskyřice je směs velmi těžko rozpustných bezdusíkatých látek a také je zdrojem hořké chuti piva. Pryskyřice dělíme na měkké a tvrdé. Měkké pryskyřice vytváří celkovou hořkost piva, patří mezi ně α -hořké kyseliny, které mají největší význam, β -hořké kyseliny, které nejsou hořké a γ -hořké kyseliny, které vznikají oxidací α -hořkých kyselin a jsou také méně hořké. Oxidací β -hořkých kyselin vznikají δ -kyseliny, které jsou na rozdíl od β -hořkých kyselin hořké a podílí se velkou měrou na hořkosti piva. Další oxidací β -hořkých kyselin vznikají γ -pryskyřice, které patří pod skupinu tvrdých pryskyřic. Jsou nežádoucí, jelikož svojí nerozpustností snižují pivovarské hodnoty. Poslední tvrdou pryskyřicí jsou δ -pryskyřice, které jsou produktem konečného stupně oxidace α -hořkých kyselin. Jejich hořkost se pohybuje mezi 15-20 % z celkové hořkosti α -hořkých kyselin. V této problematice se vyskytuje taktéž pojem β -frakce. Jedná se o komplex měkkých pryskyřic bez α -hořkých kyselin. U českých chmelů je β -frakce zastoupena ve větším množství než α -hořké kyseliny. Lze to vyjádřit poměrem 1:1,2-1,5. Piva zastoupená tímto poměrem β -frakce a α -hořkých

kyselin jsou typické pro svou jemnou harmonickou hořkost. U chmelových pryskyřic ovšem dochází během skladování chmele k nežádoucím změnám, které snižují jeho pivovarskou hodnotu. (2)

Chmelová tříslovina je směs látek polyfenolového typu, které také hrají důležitou roli při výrobě piva. Podílí se na výraznosti, řízu piva, a dokonce i na samotném varném procesu. Další látkou jsou chmelové silice, což je směs uhlovodíků a kyslíkatých sloučenin terpenové řady, které jsou nerozpustné ve vodě a těkají s vodní parou. V konečném pivu je nenajdeme, až 90 % silice vytěká během chmelovaru, zbytek se ztratí kvašením a dokvašováním. Jejich význam je čistě obchodní, jelikož čichem lze podle chmelové silice rozpoznat do jaké skupiny chmel patří. (2)

Chmel obsahuje další doprovodné látky jako jsou cukry, dusíkaté látky, lipidy, těžké kovy a mnoho dalších. Ovšem tyto komponenty neovlivňují technologii nebo kvalitu piva. Těžké kovy, jako je například zinek, měď či železo se dostávají do chmele zejména postříky na ochranu chmele. (2)

Poslední složka v chmelové hlávce, která stojí za zmínku je voda. Ta tvoří 76 až 80 % u čerstvě sklizených látek. Chmel je poté potřeba usušit na vlhkost 5 až 7 % a následně upravit na 11 až 12 %, jelikož při vlhkosti pod 10 % se hlávky drolí. (1)

3.3 Makroelementy a mikroelementy obsažené v chmelu

Chmel potřebuje kromě prvků obsažených v produktech fotosyntézy, tedy uhlíku, kyslíku a vodíku, také nekovové makroelementy ve formě aniontů, a to zejména dusík, fosfor a síru. Dále pak kovové makroelementy ve formě kationtů, tedy draslík, vápník a hořčík. Z mikroelementů potřebuje hlavně železo, mangan, měď, molybden a zinek. (2)

Dusík se vyskytuje ve sloučeninách bílkovinné povahy, což má následek to, že jako u jiných rostlin podporuje růst. Při nedostatku dusíku je chmel zakrnělý s drobnějšími listy a hlávkami. Při velkém nedostatku dusíku je habitus chmele velmi malý, listy jsou bledě zelené až žluté a začínají brzy opadat. Naopak při nadbytku dusíku je habitus bujný, listy velké a sytě zelené a hlávky chmele jsou tak nadměrně velké, že se značně zhoršuje jejich jakost. (2)

Fosfor se vyskytuje v organických sloučeninách v buňkách rostlin. Podporuje vznik generativních orgánů jako je zvýšení množství osýpky a u hlávek zabraňuje přerůstání. Nodostatek fosforu omezuje přeměnu cukru na organické kyseliny, které jsou akceptory aminoskupin a tím se brzdí tvorba dusíkatých látek. To má poté za následek pomalejší růst kořenů, podzemních a nadzemních orgánů, menší počet osýpky a hlávek. Při nadbytku fosforu se zkracuje vegetační doba, jelikož dochází k rychlejšímu zakvétání chmele a dozrávání hlávek. (2)

Síra je součástí některých bílkovin, enzymů, vitamínů a silic. Nodostatek síry v chmelu se projevuje obdobně jako při nedostatku dusíku. Dochází k zabrzdění růstu a snížení syntézy chlorofylu. (2)

Mikroelementy se vyskytují v chmelu v malém množství, to ale neznamena, že jsou pro chmel méně důležité. Působí přímo na fyziologicko-biochemické pochody v rostlinách, působí velmi účinně v malém množství a při jejich nedostatku nemůže chmel normálně dokončit životní cyklus. (2)

3.4 Roční životní cyklus chmelových rostlin

Životní cyklus chmelových rostlin se rozděluje na dvě hlavní periody: kryptovegetace a vegetace. Perioda kryptovegetace neboli období zimního odpočinku trvá přibližně od poloviny října do začátku dubna. Počítá se od odumření nadzemních orgánů až po rašení nových na jaře. Kryptovegetace má čtyři fáze. První fáze, nazývaná jako přípravné období, začíná od odumření nadzemní révy. V průběhu této fáze, trvající od poloviny října do začátku listopadu, přerušují růst všechny probuzené pupeny na babce. Druhá fáze hlubokého klidu je typická pro nejvyšší utlumení všech životní procesů rostliny. V tomto období nedochází k probuzení pupenů ani k viditelnému růstu rostliny i v případě, že by se vnější podmínky výrazně zlepšily. Konec této fáze nastává obvykle v prosinci. Dále nastává období vynuceného klidu, kde růst pupenů chmele není omezoán vnitřním nastavením rostliny, ale nepříznivými vnějšími podmínkami, zejména nízkou teplotou. V babce dochází k přeměnám zásobních látek. Poslední fází kryptovegetace je období podzemního růstu klíčů. Začíná pučením pupenů na babce a končí rašením klíčů na povrch půdy. Délka tohoto období závisí

na okolí, tloušťce půdní vrstvy půdy nad babkou a dalších vlastnostech půdy. Nízká teplota, těžká půda a vysoká půdní vrstva nad babkou toto období prodlužuje. (2)

Perioda vegetace začíná od rašení vegetace v průběhu jara a končí odumřením rév na podzim. Na rozdíl od kryptovegetace v této periodě, která má osm fází, již dochází k fotosyntéze. První fáze, nazývaná obdobím rovného růstu rév, má počátek v rašení rév na povrch a končí vytvořením tří nadzemních článků révy. Křehké révy s velkým obsahem vody rostou kolmo vzhůru. Průměrná délka jednoho článku na konci této fáze činí 20 centimetrů, réva tedy celkově měří přibližně 60 centimetrů. Pro fázi zavádění rév je typické, že révy se začínají ovíjet v pravotočivém směru kolem opory, chmelovodu. Réva narůstá asi o 1 metr. Tato fáze končí začátkem růstu pazochů na révách. Třetí fáze období pazochování, jak je dle názvu zřejmé, je typické pro intenzivní tvorbu pazochů. Tvořením základů květenství tzv. paliček toto období končí. Následující období paličkování pokračuje růstem paliček neboli buttonů a končí na počátku osýpky, tedy kvetením chmele. Pátá fáze období kvetení chmele začíná tím, že se v malých hlávkách objeví čnělky s bliznami. V tomto období už nedochází ke značnému růstu révy do délky, ale naopak začíná intenzivní růst a větvení pazochů. Období hlávkování začíná zavadnutím blizen, které zapříčiní konec schopnosti chmele přijímat pyl. Dochází k ukončení růstu a větvení pazochů, na druhou stranu však dochází k intenzivnímu růstu hlávek. Toto období končí technickou zralostí chmelových hlávek. Sedmou fází je fyziologické dozrávání hlávek. V případě, že hlávka obsahuje nažky, tak dozrávají i plody. Všechny nadzemní části ukončují růst a nastává postupné odumírání všech nadzemních částí chmele. Nejdříve začnou odumírat listy a později pazochy. Toto období končí fyziologickým dozráním plodů, které zapříčiní hnědnutí hlávek. V poslední fázi odumírání rév dochází z úplného vrcholu révy k postupnému odumírání všech nadzemních částí chmele. (2)

3.5 Vlivy na výnos chmele

Výnos chmelových rostlin je závislý na třech prvcích, které se vzájemně ovlivňují. Jedná se o počet zavedených rév na jeden hektar, počet hlávek na jedné rostlině a velikost hlávek. Ta se udává jako hmotnost 100 kusů suchých hlávek. (2)

Hospodářský výnos chmele lze vypočítat jako součin hmotnosti hlávky a počtu chmelových hlávek. Nelze zvyšovat hmotnost hlávky a snižovat počet hlávek, jelikož by nebyl dodržen ideotyp jakostní hlávky. Výnos chmele je ovlivňován mnoha faktory. Prvním je prostředí, konkrétně půdní a klimatické podmínky; biologické vlastnosti chmelových rostlin, mezi něž patří zejména volba odrůdy chmele a v neposlední řadě agrotechnická opatření. (2)

Maximální výnos hlávek chmele ovlivňuje vztah mezi růstem vegetativních orgánů a generativní reprodukcí. Projevem růstu je mohutnost rostliny a projevem reprodukce je struktura nadzemní části rostliny. Mohutnost chmele je ovlivňována zejména množstvím zásobních látek v podzemních orgánech, výživou, závlahou a teplotou. K největším přírůstkům révy dochází v červnu, na začátku července se již objevují základy květenství a v srpnu se už urychluje dozrávání plodenství. Chmel je také náročný na vyšší obsah humusu v půdě. V místech s bohatou vrstvou povrchového humusu a dobrým zásobením půdní vláhou rostou nejbujnější chmele. (2)

Také intenzita slunečního záření ovlivňuje růst chmelových rostlin. Jakostní kulturní chmel vyžaduje roční průměrné trvání slunečního svitu 1300-1500 hodin. Je zapotřebí brát také v potaz, že mladé výhony a révy jsou na jaře osvětleny intenzivněji než révy v pozdější fázi vegetace, kdy z důvodu zahušťování porostu dochází k menší intenzitě osvětlení. Nedostatečné osvětlení zabraňuje vzniku květenství. (2)

Co se týče teploty, pro chmel jsou vhodné oblasti s průměrnou teplotou 8 až 10 °C. Je ovšem nutné brát tuto hodnotu s rezervou, jelikož pro chmel je důležitý průběh teplot v celém vegetačním období a také extrémní teploty. Pod hranicí 8 °C a nad 35 °C dochází k zastavení růstu chmele. (2)

Jak již bylo výše zmíněno, chmel je vlhkomilnou rostlinou. Jejím hlavním zdrojem vody je půdní vláha a zásoba podzemní vody, déšť a dodatkovým zdrojem je rosa. Největší potřeba dešťových srážek případně závlahy je potřeba od konce května do poloviny srpna. Naopak množství srážek v dubnu a na začátku května nemá tak výrazný vliv na výnos chmele. (2)

Z agrotechnických opatření, které mají vliv na výnos chmele patří hlavně spon rostlin, hloubka a způsob výsadby, výška chmelové konstrukce. Vyšší výnos a jakost je ovlivňována dobou rašení chmele. V našich podmínkách se osvědčuje opožděné rašení, které nastává až

po zničení prvních jarních výhonků, nejčastěji mechanicky řezem nebo i chemicky. Počet hlávek jsme schopni zvýšit i v průběhu vegetace. Před kvetením a také v průběhu tvorby hlávek lze podpořit růst hlávek výživou dusíkem, který je obsažený například v roztoku močoviny. Touto operací se však prodlouží vegetace a opozdí se nástup technické zralosti. (2)

3.6 České odrůdy chmele

Žatecký poloraný červeňák

Tato odrůda byla registrována již v roce 1952. Hlávky Žateckého poloraného červeňáku jsou považovány za standard světové jakosti. Má středně mohutný vzrůst s pravidelně válcovitým habitem. Jedná se o středně raný chmel s vegetační dobou 122 až 128 dní. Řez se provádí v druhé dekádě dubna. Nevýhodou této odrůdy je nižší výnos. Ten se pohybuje v rozmezí 0,8 až 1,5 tuny na hektar. Průměrná hmotnost 100 hlávek je 12 až 14 gramů. (3)

Saaz Late

Odrůda Saaz Late byla registrována v roce 2010. Má mohutný vzrůst nepravidelného válcovitého tvaru. Tuto polopozdní odrůdu s vegetační dobou 128 až 135 dní, je doporučeno pro její vysokou citlivost na zastínění, vysazovat do větších sponů. Řez chmele se provádí v první dekádě dubna. Vzhledem k faktu, že chmelové hlávky jsou velmi hustě nasazené, má odrůda Saaz Late výnosnost 2 až 2,6 tuny na hektar. Hmotnost 100 hlávek se pohybuje v rozmezí od 10 do 13,5 gramů. (3)

Sládek

Název Sládek získal díky své vyvážené hořkosti a příjemnému chmelovému aroma v pivě. Tato odrůda, jež byla registrována v roce 1994, má mohutný vzrůst válcovitého tvaru. Řadí se mezi pozdní odrůdy, jelikož se řez chmele provádí brzy, kolem třetí dekády v březnu, a její vegetační doba se pohybuje okolo 133 až 140 dní. Jedná se o rostlinu náročnou na dostatek vody. Výnos se pohybuje v rozmezí 1,8 až 2,5 tuny na hektar a hmotnost 100 hlávek je u této odrůdy 13 až 16 gramů. (3)

Agnus

Odrůda Agnus, registrována v roce 2001, je polopozdní odrůda se středně mohutným vzrůstem. Habitus rostliny má pravidelný válcovitý tvar. Řez chmele se provádí v první dekádě dubna a vegetační doba je v rozmezí 132 až 138 dnů. Agnus má vysoké nároky na hnojení dusíkem a dostatek vody v průběhu vegetace. Přestože průměrná hmotnost 100 hlávek se pohybuje v rozmezí 18,5 až 24 gramů, výnosnost této odrůdy je 1,5 až 2 tuny na hektar. To je dáno tím, že hustota chmelových hlávek je řídká až středně hustá. (3)

Premiant

Název získal podle tradičního českého dvanáctistupňového piva „Premium“. Jedná se o mohutnou polopozdní odrůdu s válcovitým habitem registrovanou v roce 1996. Její vegetační doba je 128 až 134 dní. Řez chmele se provádí v první dekádě dubna. Premiant má vysoké nároky na hnojení dusíkem, ovšem s nedostatkem vody v průběhu je schopná si poradit. Výnos se i díky středně až hustě nasazeným hlávkám pohybuje v rozmezí 1,8 až 2,5 tuny na hektar. Průměrná hmotnost hlávek je 14 až 18 gramů. (3)

Kazbek

Název Kazbek, podle nejvyšší hory středního Kavkazu, získal díky své robustnosti a stabilitě. Tato odrůda má mohutný vzrůst válcovitého tvaru. Jedná se o pozdní odrůdu, jelikož řez chmele se provádí ve třetí dekádě v březnu a vegetační doba se pohybuje okolo 134 až 141 dní. Výnos je, kvůli hustě až velmi hustě nasazeným hlávkám, v rozmezí 2,1 až 3 tuny na hektar. Hmotnost 100 hlávek je u této odrůdy 13 až 16,5 gramů. (3)

Dalšími odrůdami, které se v České republice pěstují jsou Bohemie, Harmonie, Bor, Rubín a Vital. (3)

4 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum (anglicky remote sensing) se zabývá zkoumáním zemského povrchu, díky němuž získáváme informace o jevech, procesech a objektech na něm. Informace se získávají bez přímého kontaktu pomocí elektromagnetického záření. DPZ patří mezi moderní geoinformační technologie, které můžeme rozdělit na dva základní subsystémy. Prvním je subsystém sběru a přenosu dat, který je představován zejména technickou stránkou prostředků využívaných v získávání dat. Druhým subsystémem je analýza a interpretace získaných dat. (4)

Pořízené obrazové materiály nazývané také jako snímky, obsahují dva druhy informací. První typ informace nás informuje o poloze zobrazených objektů, tvaru, velikosti a vzdálenosti od jiných objektů. Zatímco druhý typ nás informuje například o druhu vegetace či povrchu komunikace. (4)

4.1 Základní rozdělení DPZ

Prvním základním rozdělením je, že pomocí DPZ se mohou získávat data obrazová i neobrazová. Obrazová data si můžeme představit jako snímek určité oblasti a neobrazová data například jako graf sestavený z měření množství odraženého záření pod dráhou letu nosiče. (4)

Dále rozdělujeme DPZ podle charakteru sběru dat, tedy na metodu konvenční tzv. klasickou a nekonvenční. Konvenční metodou vznikají fotografie, u které obraz vzniká na celé ploše v jeden moment. Výhodou konvenční metody je možnost zachytit značný detail, který nemusí být vidět pouhým okem. Data jsou však poskytována v analogové formě v pouze úzkém intervalu vlnových délek. Takto pořízené fotografie mají využití ve fotogrammetrii, a to ke konstrukci přesných topografických map velkých měřítek. K snímkování se využívají zejména letadla a dále pak družice, bezpilotní prostředky, modely letadel a balónů. Tato metoda se používala především v minulosti. U nekonvenčních metod vznikají snímky postupně tzv. řádkováním za pomoci radiometrů a skenerů. Vzniklé obrazové záznamy mají

menší prostorový detail oproti fotografii, ale mohou být pořizovány v široké části elektromagnetického spektra. U nekonvenčních metod je základní jednotkou pixel, což je průsečík jednoho řádku a jednoho sloupce pořízeného snímku. Čím je menší pixel, tím je větší rozlišení snímku. Jsou pořizovány v digitální podobě, což umožňuje jejich automatické zpracování. (4) (5)

Metody DPZ lze rozdělit podle zdroje elektromagnetického záření. To může být aktivní nebo pasivní. Aktivní metody vysílají umělé záření ze zdroje umístěného na nosiči. Část záření se od objektů odrazí a zachycuje se zpět na senzor umístěném na nosiči. Tento princip využívají radarové systémy. Pasivní metody se rozdělují na přímé a nepřímé. Přímé pasivní metody využívají jako zdroj informace Slunce odražené od povrchu. Naopak u nepřímé metody je zdrojem záření vyzařované objekty na zemském povrchu nebo v atmosféře. (4) (5)

Další rozdělení může být podle druhu nosiče, což mohou být družice, letadla, drony, modely letadel atd. Podle osy záběru dělíme snímky na svislé a šikmé. (4) (5)

4.2 Fyzikální podstata DPZ

Informace o objektech na zemském povrchu získáváme pomocí elektromagnetického záření, které vznikne přeměnou z jiné energie jako je například tepelná, kinetická, chemická atd. Na příkladu tepelné energie je možné předvést vznik elektromagnetického záření. Tepelná energie je energie s náhodným pohybem částic, jenž má po vzájemných kolizích částic za následek excitaci elektronů, po nichž následuje emise elektromagnetických vln. (6)

Existují různé teorie šíření elektromagnetického záření. Vlnová teorie popisuje elektromagnetickou energii tak, že záření se šíří prostorem ve tvaru elektromagnetické vlny. Ta se skládá ze sinusoidy elektrické a magnetické vlny. Chování elektromagnetický vln popisují Maxwellovy rovnice, které vyobrazují poznatky o intenzitě elektromagnetického pole. Tyto rovnice vysvětlují periodickou měnitelnost velikosti elektrického a magnetického pole. Elektromagnetické vlny jsou rovnoběžné ve směru šíření, svírají spolu pravý úhel a šíří se rychlostí světla. Odlišnosti elektromagnetického záření jsou zejména ve vlnové délce λ , což je vzdálenost dvou sousedních vrcholů vlny a frekvence ν , která značí počet vrcholů vlny procházející fixním bodem za určitý čas. (4) (6)

Částicová teorie předpokládá, že elektromagnetické záření se skládá z fotonů nebo kvant. Foton je nejmenší jednotka elektromagnetického záření. Vztah pro energii kvant je dán vztahem níže.

$$Q = h \cdot \nu \quad (1)$$

Kde Q je energie kvanta, h Planckova konstanta ($6,62606 \times 10^{-34}$ J s) a ν frekvence.
(4) (7)

Mezi částicovou a vlnovou teorií platí následující vztah.

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

Kde Q je energie kvanta, h je Planckova konstanta, c rychlost světla a λ vlnová délka. Z tohoto vztahu můžeme odvodit, že čím je delší vlnová délka, tím je nižší obsah energie záření. To znamená, že emitované dlouhovlnné záření je hůře detekovatelné než záření krátkovlnné. Pro přijímání signálů musíme v systémech dlouhovlnného záření snímat velké plochy. (4)

V DPZ se využívá fyzikálních zákonů popisující přeměnu tepelné energie na zářivou. Elektromagnetické záření odráží a emitují objekty, které mají teploty vyšší, než je absolutní nula, což je v Celsiově stupnici $-273,15$ °C. Model absolutně černého tělesa vyjadřuje, že absolutně černé těleso pohltí veškeré množství energie. Souvislost s výše popsáním vyjadřuje Stefan-Boltzmannův zákon, který říká, že množství vyzařené energie M roste s vyšší teplotou.

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

Kde M je intenzita vyzařování z povrchu tělesa, σ Stefan-Boltzmannová konstanta ($5,669 \times 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴) a T absolutní teplota tělesa. (4)

Další zákon, který souvisí s vyzařováním a teplotou tělesa je Wiennův zákon posuvu, který říká, že maximální intenzita λ_{max} je nepřímo úměrná s teplotou těles T a rychlosti světla c .

$$\lambda_{max} = \frac{c}{T} \quad (4)$$

Z výše popsaných vztahů vyplývá, že čím bude vyšší teplota objektu na zemském povrchu, tím více energie bude vyzařovat o kratší vlnové délce. Takže teplé objekty o krátké vlnové délce jsou dobře detekovatelné, nevýhoda oproti hůře detekovatelnému dlouhovlnnému záření je ovšem ta, že je atmosféra docela dost pohlcuje a rozptyluje. (4)

Poslední vztah související s vyzařováním objektů je Kirkhoffův zákon, který vyjadřuje, že intenzita vyzařování reálného tělesa s určitou teplotou, je vždy menší než intenzita vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Tímto zákonem je dána emisivita ε daného materiálu.

$$\varepsilon = \frac{M_R}{M_A} \quad (5)$$

Kde M_R je intenzita vyzařování reálného tělesa a M_A je intenzita vyzařování absolutně černého tělesa. (4)

Elektromagnetická vlna může být na rozhraní různých objektů či prostředí odražena, pohlcena nebo propuštěna. Poté platí vztah, že intenzita ozařování E daného tělesa je rovna součtu intenzit odraženého M_ρ , pohlceného M_α a propuštěného M_τ záření. (6)

$$E = M_\rho + M_\alpha + M_\tau \quad (6)$$

Množství odražené energie závisí na daném povrchu objektu či prostředí, jeho vlastnostech a vlnové délce záření. Příkladem fyzikální vlastnosti ovlivňující množství odražené energie je obsah vody a z hlediska chemického složení je to například obsah určitých minerálů. Veličina popisující podíl odraženého záření k množství záření dopadajícího se nazývá spektrální odrazivost. Každá skupina povrchů jako je půda, vegetace, silniční komunikace, vodní plocha atd. vykazují podobno spektrální odrazivost v dané vlnové délce a lze z vytvořit spektrální křivku odrazivosti po celém elektromagnetickém spektru. Tomu se poté říká spektrální chování daného objektu. (4)

4.3 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je pro značnou část veřejnosti neznámým pojmem. Podle Zwinkelse je definováno jako grafické znázornění elektromagnetických vln uspořádaných

podle jejich vlnové délky. Pro lidské oko je citlivé pouze viditelné záření, známé také pod názvem RGB, které se vyskytuje přibližně ve vlnových délkách 380 až 780 nm. (7)

Zwinkels rozlišuje osm oblastí elektromagnetického spektra na záření. V závorce jsou uvedeny vlnové rozsahy daného spektra:

- gama ($<0,1$ nm),
- rentgenové (0,1 - 10 nm),
- ultrafialové (10 - 400 nm),
- viditelné (400 - 700 nm),
- infračervené (700 nm - 1 mm),
- mikrovlnné (1 mm – 1 cm),
- radiové (1 cm – 100 km),
- zvukové (100 – 1000 km). (7)

Dobrovolný se zmiňuje pouze šest oblastí elektromagnetického spektra, které mají využití v dálkovém průzkumu Země. Jedná se o spektra záření:

- ultrafialové (100 – 400 nm),
- viditelné (400 – 700 nm),
- infračervené blízké (700 – 1400 nm),
- infračervené střední (1400 – 3000 nm),
- tepelné (3000 nm – 1 mm),
- mikrovlnné (1 mm – 1 m). (4)

Halounová a Pavelka rozděluje elektromagnetická spektra na gama, rentgenové záření, ultrafialové, viditelné, infračervené, mikrovlnné a radiové záření. Infračervené pásmo, u kterého uvádí vlnový rozsah od 720 nm do 1 mm, rozděluje na 4 pásma:

- blízké infračervené (720 – 1300 nm),
- střední infračervené (1300 – 4000 nm),
- daleké infračervené = teplotní (4000 nm – 25 μ m),
- submilimetrové vlny (>100 μ m). (6)

Při výběru multispektrální kamery může člověk narazit na kameru, která zaznamenává pásmo Red-edge. Jedná se o oblast, kterou můžeme najít v oblasti 680 až 800 nm. Na spektrální křivce vegetace ukazuje náhlou změnu v odrazivosti vegetace mezi červeným a blízkým infračerveným zářením, která pro každou plodinu je trochu jiná. Jde vlastně o vlastnost křivky spektrální odrazivosti, a proto může být kvantifikována pouze v oblasti, kde se vyskytuje. (8)

4.3.1 Ultrafialové záření

Velká část tohoto spektra je atmosférou pohlcována, což je výhodné pro živé organismy, pro které je UV záření škodlivé. Využití v DPZ můžeme nalézt pomocí aktivní metody vysílání elektromagnetického záření, konkrétně UV laserem. Ten se využívá pro monitorování ropných skvrn, vyhledávání ložisek zlata a geologické aplikace. (4)

4.3.2 Viditelné záření

Toto záření viditelné lidským okem se dělí na část modrého spektra (0,4 až 0,5 μm), zeleného spektra (0,5 až 0,6 μm) a červeného spektra (0,6 až 0,7 μm). Zdrojem záření je Slunce, a proto je viditelné pouze v denních hodinách. V čisté a suché atmosféře není toto záření významně ovlivňováno, neprochází ovšem oblačností a mlhou. Výhodou viditelného záření je, že prochází vodou do hloubek 20 až 30 metrů a že pracují v tomto spektru většina systému pořizování obrazových dat. Jeho nevýhodou je neodlišné spektrální chování vegetace, hornin a půdy. (4)

4.3.3 Blízké infračervené záření

Oproti viditelnému záření je méně pohlcováno a rozptylováno atmosférou, díky čemuž jsou snímky ostré s dobrým kontrastem. Využívá se pro zkoumání vegetace, a to v zemědělství a lesnictví. Voda v tomto spektru se chová téměř jako absolutně černé těleso. V tomto i následujícím středním infračerveném pásmu je větší množství odraženého než emitovaného záření. (4)

4.3.4 Střední infračervené záření

Stejně jako blízké infračervené záření se využívá pro zkoumání vegetace a také pro geologické výzkumy. Ve vlnových délkách okolo 1,5 μm se dobře rozlišují druhy vegetace, jejich zdravotní stav a využívá se tako pro rozpoznávání ledu a sněhu. Ve vlnových délkách okolo 2,2 μm má mnoho minerálů absorpční pás. (4)

4.3.5 Tepelné infračervené záření

Používá se pro získávání informací o tepelné bilanci objektů, jako jsou například povrchové teploty oceánů, mapování tepelného znečištění řek a jezer, lokalizace lesních požárů atd. Ve vlnových délkách 3 až 5 μm je velké množství záření odraženého, využívá se k měření radiálních teplot pouze v noci. Ve vlnových délkách 8 až 12 μm je rozdíl množství odraženého s emitovaným velmi malý. Toto záření může být využíváno k zjišťování radiální teploty i v denních hodinách. (4)

4.3.6 Mikrovlnné záření

Využívá se zejména v aktivních systémech snímání jako jsou například radary. Výhodou tohoto dlouhovlnného pásma je, že ze všech pásem elektromagnetického spektra nejméně závisí na počasí. Mikrovlnné záření je zeslabováno pouze velmi vydatným deštěm. Proto se také využívá k zjišťování srážkových oblastí a intenzity srážek. Z důvodu nízké intenzity emitovaného záření musí měřící zařízení k zachycení signálů měřit na velké ploše. A to je nevýhoda mikrovlnného záření, jelikož toto je příčinou malého prostorového rozlišení získaných dat. Mikrovlnné záření má své využití ke zkoumání reliéfů, plovoucího ledu, geomorfologii, zemědělství a lesnictví. (4)

4.4 Vliv atmosféry na dálkový průzkum Země

Elektromagnetické záření, které se dostává na zemský povrch, urazí velkou vzdálenost. V části této vzdálenosti se nachází prostředí, které se nazývá atmosféra. Atmosféra Země obsahuje suchý vzduch, vodu v různých skupenství a znečišťující příměsi. Suchý vzduch se skládá z 78 % N_2 , 20 % O_2 , 0,9 % Ar, 0,03 % CO_2 a dalších prvků a sloučenin jako například ozón. (6)

Výskyt oxidu uhličitého z výškového hlediska je v atmosféře do 100 km rovnoměrný. Z hlediska prostorového a časového je jeho výskyt nerovnoměrný. Větší výskyt CO₂ je nad souší než nad mořem a také více v noci než přes den. Největší interakce molekul CO₂ s elektromagnetickým zářením je v infračerveném spektru. Pro člověka významný výskyt ozónu v atmosféře, z důvodu ochrany před škodlivým UV zářením, je v DPZ menší nevýhodou. Ozón pohlcuje ultrafialové záření, které tím pádem nemůžeme pasivními metodami DPZ používat. Vodní páry jsou v atmosféře tvořeny mraky a srážkami. V DPZ jsou nevhodným jevem, jelikož způsobují pohlcování záření ve vlnových délkách infračerveného a mikrovlnného spektra. Znečišťující příměsi mohou být pevného nebo kapalného původu. Například malé částice prachu tvoří šedavé zbarvení oblohy. Příkladem vodních aerosolů jsou kapky deště, mlhy, molekuly vzduchu, částice kouřma a kapky v oblaku. Výskyt aerosolů ovlivňuje počasí, hlavně vítr a dešť. Vzhledem k tomu, že částice aerosolů jsou velmi malé, mohou se v atmosféře vyskytovat i několik dní. (6)

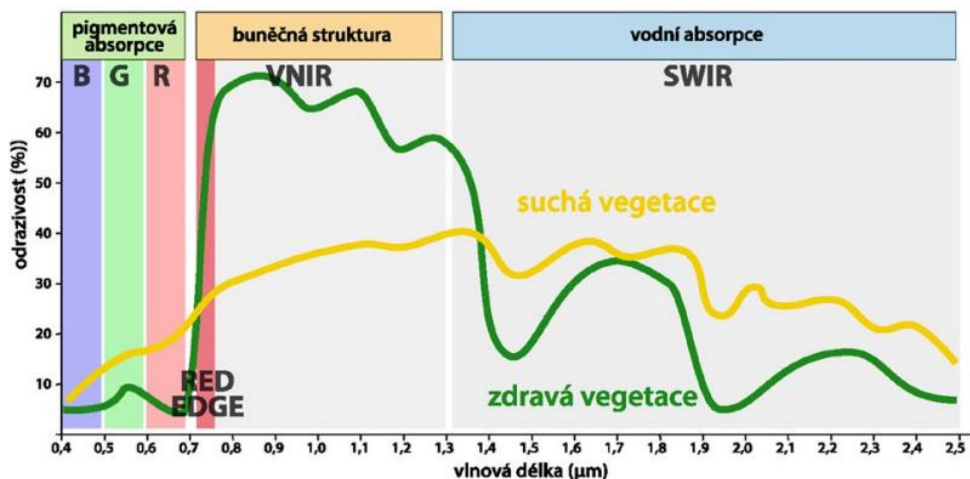
Z výše zmiňovaného můžeme vidět, že se v atmosféře objevuje celkem dost jevů, které ovlivňují elektromagnetické záření různě v určitých intervalech vlnových délek. Záření je v atmosféře hlavně pohlcováno a rozptylováno. Rozptyl záření ovlivňuje zejména rozměr rozptylujících částic. V DPZ rozlišujeme tři typy rozptylu, a to Rayleighův, aerosolový a neselektivní. Rayleighův rozptyl nebo též molekulární rozptyl způsobují částice, které jsou menší než vlnová délka záření. Tento rozptyl snižuje ostrost a kontrast snímků, zejména krátkovlnného záření. Aerosolový rozptyl způsobují částice větší než vlnová délka záření. Typickým představitelem aerosolového rozptylu je vodní pára a prachové částice. Posledním typem je neselektivní rozptyl, který nezávisí na vlnové délce záření. Tento rozptyl způsobují velké částice jako jsou dešťové kapky, oblaka a mlhy. (4)

Pohlcování záření je ovlivněno ztrátou energie v určitých intervalech vlnových délek. V atmosféře nejvíce pohlcují záření následující představitelé O₃, CO₂ a vodní pára. Interval vlnových délek, které nejsou pohlcovány a může se v nich zaznamenávat a měřit intenzita elektromagnetického záření se nazývají atmosférická okna. (4)

4.5 Spektrální chování vegetace

Jak již bylo zmiňováno výše podobné objekty mají podobné spektrální chování v jednotlivých částech elektromagnetického spektra. Vzhledem k cíli práce, považují za vhodné zmínit se o spektrálním chování vegetace a tím si uvědomit základy, které budou v další práci využity. Vegetace se jeví lidskému oku jako zelená. Infračervené snímky ji zobrazují světleji. Ve většině případů se používá pro zobrazení charakteristického chování vegetace odrazivost listů dané rostliny či stromu. Vliv na odrazivost vegetace má:

- vnější uspořádání vegetačního krytu
- vnitřní struktura jednotlivých částí rostlin
- vodní obsah
- zdravotní stav
- vlastnosti půdního substrát (4)



Obrázek 1 Spektrální křivka vegetace

(zdroj: https://www.ctpz.cz/media/upload/1646732225_17-precizni-zemedelstvi-5-web.pdf)

Spektrální křivka vegetace, zobrazená na obrázku 1, se dělí do následujících tří částí. Oblast pigmentační absorpce se nachází v intervalu vlnových délek od 0,4 do 0,7 μm , což odpovídá viditelné části spektra. Jak už z názvu napovídá, typickým znakem této části je absorpce pigmentačních látek, jako je chlorofyl a karoten. Chlorofyl pohlcuje záření v modré a červené části spektra. Lokální maximum odrazivosti se nachází v zelené části spektra, a proto rostliny ve vegetačním období vidíme zeleně. (4)

Oblast buněčné struktury odpovídá části blízkého infračerveného spektra (0,7-1,3 μm). Typickým znakem je velký nárůst odrazivosti kolem vlnové délky 0,7 μm . Vliv na odrazivost má zejména morfologické utváření listu. Vzhledem ke skutečnosti, že morfologické utváření listu je u různých rostlin velmi proměnlivé, používá se toto spektrum nejenom pro odlišení vegetace od ostatních objektů, ale i na odlišení různých druhů rostlin, které jsou ve viditelné části spektra podobné. Listy na rostlinách se formují do více vrstev, to umožňuje opakovaný odraz infračervené části spektra. Maximální odrazivost se dostává při 6-8 vrstvách listů. Odrazivost v této části spektra se používá zejména pro charakterizování míry hustoty vegetačního krytu. Pro tuto charakteristiku se používá index LAI, Leaf area index, česky index listové pokrývnosti. Výsledkem je bezrozměrné číslo, které udává kolikrát je plocha všech listů větší než plocha sloupce, ve kterém se listy nacházejí. (4)

Oblast vodní absorpce se najdeme ve vlnových délkách 1,3 až 3,0 μm . Typickým znakem je absorpce pásů vody. Nejmenší odrazivost, a tedy středy pásů absorpce vody nalezneme kolem vlnových délek 1,4 μm , 1,9 μm a 2,7 μm . Naopak největší odrazivost nalezneme ve vlnových délkách 1,6 μm a 2,2 μm . V těchto vlnových délkách pozorujeme změny ve vodním obsahu rostlin. (4)

Na odrazivost vegetace má vliv i zdravotní stav rostlin. Rostliny s poruchou růstu, které jsou vystaveny určitému stresu, ztrácí chlorofyl. Díky tomu se zvyšuje odrazivost v modrém a červeném spektru, a naopak se snižuje odrazivost v infračerveném spektru. Při ztrátě chlorofylu dochází ke žloutnutí listu, a to se projeví zvýšenou odrazivostí v červené části spektra. Tyto jevy se na snímcích objeví mnohem dříve než pohledem na vegetaci pouhým okem. Příkladem je pokles obsahu vody vegetace, která je příčinou větší odrazivosti, změny struktury listu a obsahu chlorofylu. Do spektrálního chování některých rostlin se může promítnout i odrazivost půdy, a to přesněji obsahem určitých minerálů a kovů. Například nedostatečné množství železa nebo hořčíku způsobí pokles obsahu chlorofylu. (4)

4.6 Družicové systémy

Dálkový průzkum Země využívá k monitorování družice, jež jsou umístěné na oběžných drahách. Na družicích jsou umístěné senzory, jimiž lze měřit odražené elektromagnetické záření rostlin. Toto záření obsahuje informace o biofyzikálním složení a fyziologickém stavu vegetace. (9)

Pro využití v DPZ se používají družice, které jsou umístěné na subpolárních drahách ve výšce 700 až 1000 km. Tyto družice obíhají v poledníkovém směru přes zemské póly a jejich oběh je nastaven tak, aby byl synchronizován se Sluncem. Vliv na frekvenci oběhu v určitém místě má zeměpisná šířka daného místa. Čím blíže je místo pólům, tím je kratší doba mezi snímáním. Zkrácení doby návratu zpět na určité místo, je možné použitím dvou platforem družic. (10)

V průběhu posledních 50 let vzniklo mnoho družic s multispektrálními kamerami, které mají uplatnění v ekologii a zemědělství. U družic sledujeme čtyři parametry, které mají vliv jejich využití. Jedná se o:

- spektrální rozlišení – vyjadřuje počet a rozsah vlnových délek elektromagnetického spektra,
- prostorové rozlišení – udává rozměry nejmenšího prvku, respektive pixelu na snímku,
- časové rozlišení – udává frekvenci snímání stejné oblasti,
- radiometrické rozdělení – určuje počet bitů, na které se dělí zaznamenané záření a určuje spektrální přesnost měření. (9)

Jedním z nejdůležitějších programů, který se zabývá detekcí a hodnocením vegetace je program Copernicus společnosti ESA. V rámci tohoto programu byly na oběžnou dráhu vypuštěny dva satelity pod názvem Sentinel-2. Tyto dva satelity byly navrženy tak, aby vyhovovaly potřebám jak zemědělcům, tak i akademickým výzkumníkům se zaměřením na rozvoj zemědělství. První platforma Sentinel-2A byla vypuštěna 23.6.2015 a druhá platforma pod názvem Sentinel-2B 7.3.2017. Vypuštěním druhé platformy se snížilo časové rozlišení na pět dnů. Obě platformy Sentinel mají na snímání snímků multispektrální přístroje se 4 pásmy s rozlišením 10 metrů (modré 490 nm, zelené 560 nm, červené 665 nm a blízké

infračervené 842 nm), se 4 pásmy s rozlišením 20 metrů (Red-edge 705, 740, 775 a 865 nm a SWIR 1610 a 2190 nm) a 3 pásmy s rozlišením 60 metrů, která jsou vyhrazena pro atmosférickou korekci aerosolů a vodní páry. Snímky lze stáhnout z webu ESA či USGS nebo pomocí zásuvných modulů v QGIS. (9)

Dalšími družicemi, které stojí za zmínku, je například Landsat s časovým rozlišením 16 dní a prostorovým rozlišením 30 metrů. Výhodou výše zmíněných družic je jejich volný přístup, jimi pořízené snímky si mohou uživatelé stáhnout bez poplatků. Toto neplatí pro komerční družice jako je například PlanetScope nebo QuickBird, který mají časové rozlišení 24 hodin a prostorové rozlišení menší než 3 metry. Snímky z těchto družic lze kontrolovat jen v době, kdy má uživatel uzavřenou smlouvu k používání těchto snímků. (9)

4.7 Bezpilotní prostředky

Bezpilotní prostředky, často nazývané drony, anglicky UAV – unmanned aerial vehicles, jsou prostředky, které umožňují let bez posádky na palubě. UAV je možné opatřit kamerami, které mohou být multispektrální, termální či klasické RGB. V oblasti DPZ je vhodné bezpilotní prostředky použít tam, kde je potřeba mít detailní informace o pozemcích nebo stavech porostu. V závislosti na výšce letu můžeme dosáhnout prostorového rozlišení v řádech centimetrů. Výhodou UAV oproti družicím je nejenom lepší prostorové rozložení, ale také flexibilita použití. Mohou být použity kdykoliv a nemusíme se obávat oblačnosti a atmosférických vlivů, která na snímání nemají vliv. (10) UAV jako platforma pro dálkový průzkum Země ukazuje vhodné použití pro více časové monitorovací operace a lze jimi tak sledovat fenologii rostlin. (11)

Výhodou bezpilotních prostředků je také cenová dostupnost a jednoduchá obsluha. Když se ovšem pozastavíme u ceny, samotný bezpilotní prostředek je rozhodně levnější než jiné typy zařízení v dálkovém průzkumu Země. Cena kamer je však dle typu velmi různorodá. V dnešní době jsou nejlevnější a nejlehčí RGB kamery, lze však pořídit také dražší multispektrální či hyperspektrální kamery například s hojně používanými pásmy NIR a Red-edge. (12)

Nevýhodou bezpilotních prostředků je omezení letu z důvodu kapacity baterie, která může omezit snímání potřebné plochy. Při provozu je zapotřebí dbát na bezpečnost provozu a řídit se legislativou, která provoz bezpilotních prostředků upravuje. (10)

4.8 Variabilita pozemku

Variabilitu zemědělského pozemku způsobuje řada faktorů, které můžeme rozdělit do několika měřítek. V regionálním měřítku se jedná o klimatické faktory, způsob využití půdy a charakteristiku povrchu krajiny. V měřítku daného pozemku je to půdní typ, předplodina či předchozí způsob hospodaření. V dalším měřítku je to například směr řádků plodiny, způsob aplikace hnojiv, zpracování půdy a její utužení. Dalšími neméně důležitými faktory je voda a člověk, které mohou půdní variabilitu ovlivnit ve velkém měřítku. (13)

Variabilitu pozemku lze chápat dvěma způsoby: jako prostorovou a časovou variabilitu. Prostorová variabilita představuje změny v rámci pozemku, a to jak plochy, tak i hloubky půdy. Jedná se například o variabilitu výnosu jedné plodiny na totožném pozemku či utužení půdy. Příčinami variability může být například heterogenita půdy, bioticky škodlivé vlivy či rozdílná intenzita obhospodařování pozemku. Časovou variabilitu představují změny pozemku v čase. Jedná se například o množství nadzemní biomasy nebo napadení škůdci. Obě variability se vzájemně prolínají. (13)

Velmi vysokou variabilitu jak prostorovou, tak časovou zaujímá obsah dusíku v půdě, zatímco na druhé straně je časově neměnnou například zrnitost půdy, vápnění nebo obsah fosforu a draslíku v půdě. Rozdílné množství živin v půdě, heterogenita půdy, škůdci atd. mají vliv na výnos v různých částech pozemku. (13)

K popisu prostorové variability se využívají geostatistické metody. Jedním z nástrojů geostatistických metod je prostorová interpolace. Princip této metody je odhad sledovaného znaku na místech, která nejsou vzorkováním pokryta. Konečným výsledkem interpolace je spojitá mapa a využívá se v následujících případech:

- v místech, ve kterých nejsou zjištěna data vlivem velikosti rastru půdního vzorkování, výpadku senzorů nebo ztrátě dat,
- nepravidelná bodová data pozemku, které je nutné zobrazit ve spojitě mapě,

- nepřesnosti jednotlivých naměřených dat. (13)

Mezi nejpoužívanější metody interpolace patří metoda kriging a metoda inverse distance weighting (IDW). Obě metody vypočítávají nevzorkovaná místa z vážených průměrů z hodnot okolních naměřených bodů. Rozdílem je způsob výpočtu jednotlivých vah. U metody kriging jsou jednotlivé váhy počítány dle variogramu, který popisuje změnu prostorové závislosti se vzdáleností a směrem. Výhodou této metody je vyhlazování lokálních extrémů. Metoda IDW vypočítává váhy dle vzdálenosti bodu od ostatních sousedících bodů. Čím blíže je interpolovaný bod k naměřenému tím vyšší je váha. Tato metoda je výpočetně méně náročná, tudíž je možno ji použít na rozsáhlé datové soubory. (13)

Mapování půdní variability můžeme provádět půdním vzorkováním, měřením elektrické vodivosti půdy, mechanickými senzory nebo pomocí dálkového průzkumu Země. Výhodou DPZ oproti ostatním metodám mapování je, že lze zmapovat území během malého časového okamžiku. Nevýhodou je naopak, že zjišťujeme odrazivost na povrchu půdy. Což může způsobit komplikace u pozemků, kde je odlišná svrchní a spodní vrstva půdy. (13)

Variabilitu pozemku můžeme sledovat taktéž u plodin jako je vinná réva a chmel. Tyto plodiny jsou oproti ostatním zemědělským plodinám specifické z důvodu pěstování na speciální konstrukci a typickými meziřádky mezi vegetací. Jedním z omezení sledování těchto plodin je monitorováním pomocí volně přístupných družic, jako je například řada Sentinel nebo Landsat. Tato zařízení mají prostorové rozlišení maximálně 10 metrů, čímž přicházíme o meziřádkové informace. Proto je pro tyto plodiny vhodnější používat snímací zařízení s menším prostorovým rozlišením, tedy bezpilotní prostředky UAV. Hodnoty NDVI u celé plochy vinice a pouze plochy vegetace vinice bez meziřádků jsou odlišné. Průměrné hodnoty NDVI pouze u plochy vegetace jsou o plus minus 20 % vyšší než průměrné hodnoty NDVI u celé plochy vinice. Tato segmentace vinice by mohla vést k lepšímu posouzení variability vinice a lepší pomoci při řízení polních operací. (11)

5 Spektrální indexy

Spektrální index, někdy též nazývaný vegetační index, je kombinace odrazivosti dvou nebo více vlnových délek, čímž vznikne jedna hodnota. Tato kombinace, která je vyjádřena matematickým vzorcem, je navržena tak, aby zvýraznila určitou vlastnost vegetace. Jejich cílem je získávání informací o biomase, listové ploše, zdraví rostlin a mnoho dalších. Pro vegetační indexy se používají zejména pásma RGB a NIR, jelikož jejich spektrální odrazivost u vegetace je dost rozdílná. (14)

Dle Klema vegetační indexy obecně:

- Maximalizují citlivost na biofyzikální parametry rostlin tak, aby z výsledku bylo možno hodnotit stav a vegetační podmínky.
- Eliminují rušivý vliv externích činitelů – atmosféry, půdy, úhel dopadajícího záření aj.
- Po validaci mohou být navázány na některý z měřitelných parametrů vegetace (obsah chlorofylu, celková biomasa aj.). (15)

Vegetační indexy mohou v určitých případech nahradit klasické metody diagnostiky porostů a mohou tak být dobrými pomocníky při rozhodování o agrotechnických opatřeních. Vzhledem k tomu, že se jedná o nepřímé metody měření, je přesnost nižší oproti přímému měření jako jsou například laboratorní rozborů a odpočty. Výhodou je naopak nižší pracnost, větší pohotovost a vyhodnocení větší plochy v kratším čase. (15)

Vegetační indexy se mohou rozdělit do následujících kategorií, kde lze najít indexy s podobnými vlastnostmi:

- širokopásmové indexy,
- úzkopásmové indexy,
- indexy hodnotící využití světla,
- indexy hodnotící obsah dusíku v porostu,
- indexy hodnotící množství uhlíku v porostu,
- indexy hodnotící obsah pigmentů v listech,
- indexy hodnotící obsah vody v porostu. (16)

Širokopásmové indexy

Tato kategorie indexů využívá odrazivosti vegetace v pásmu o vlnových délkách odpovídající pásmu zeleném a NIR a dále využívá absorpci pásma modrého a červeného. Tyto indexy se zejména používají pro zjištění všeobecného množství a vitality zelené vegetace. Do této kategorie patří například tyto následující vegetační indexy: DVI, EVI, GDVI, LAI, MSAVI2, OSAVI, NDVI, TGI, SAVI, GVI, VARI, WDRVI, SR a mnoho dalších. (16)

Úzkopásmové indexy

Úzkopásmové vegetační indexy jsou citlivější na menší změny ve zdravotním stavu vegetace než širokopásmové indexy. Toto tvrzení platí zejména pro hustou vegetaci. U těchto indexů se používají vlnové délky, které jsou v tzv. oblasti Red-edge. Tato oblast odpovídá nárůstu odrazivosti ve vlnových délkách 690 až 740 nm. Mezi tyto indexy patří například: ARVI, TVI, RENDVI, MCARI, MTVI a mnoho dalších. (16)

Indexy hodnotící využití světla

Tyto indexy se snaží popsat účinnost využití světla na vegetaci pro procesy fotosyntézy. Mohou pomoci k odhadu výnosnosti či stavu růstové fáze. Do této kategorie řadíme například PRI, SIPI nebo RGRI. (16)

Index hodnotící obsah dusíku v porostu

Tato kategorie indexů odhaduje informaci o obsahu dusíku v porostu. Dusík se vyskytuje ve zdravé vegetaci ve vysoké koncentraci, jelikož je důležitou složkou chlorofylu. Představitelem této kategorie je vegetační index NDNI. (16)

Indexy hodnotící množství uhlíku

Jedná se o indexy, které poskytují odhad množství uhlíku v ligninu a celulóze v suchém stavu. Lignin používají rostliny jako strukturní složku a celulózu při stavbě buněčných stěn. Molekuly uhlíku je možné najít v dřevěných materiálech a odumřelých či neaktivních rostlinách. V případě stárnutí vegetace je možné pozorovat zvyšující množství uhlíku v rostlinách. Je možné je použít například pro detekci vegetace ohrožené požárem. (16)

Indexy hodnotící obsah pigmentů v listech

Tato skupina odhaduje množství stresových pigmentů jako anthocyanin nebo karotenoid, které se vyskytují ve vyšších koncentracích v napadené vegetaci. (16)

Indexy hodnotící obsah vody v porostu

Tyto indexy, které využívají pásem NIR a SWIR, poskytují odhad množství vody v listech rostliny. Známy indexy jsou například NDWI a MSI. (16)

5.1 Normalized Difference vegetation index NDVI

Normalizovaný diferenční vegetační index NDVI je jeden z nejvíce používaných a implementovaných vegetačních indexů. Byl vyvinut na počátku 70. let 20. století pro účely dálkového průzkumu Země. Umožňuje odlišení vegetace od ostatních objektů jako je půda, zástavba či voda. Z agronomického hlediska kombinuje dva parametry: stav rostlin a množství biomasy na jednotce plochy. Vypočítá se jako normalizovaný poměr mezi infračerveným a červeným pásmem. (12) (15)

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (7)$$

Spektrální vegetační index NDVI popisuje vitalitu a zdraví vegetace. (17) Používá se také pro odhad listové plochy porostu. (18) Dosahuje hodnot od -1 do 1. Hodnoty běžné vegetace jsou od 0,2 do 0,8. Hodnoty NDVI jsou nižší v případě velmi vlhké půdy či mlhy. To znamená, že NDVI je ovlivněn řadou faktorů, jako je půda, oblačnost a atmosférické vlivy. Z výše uvedeného vyplývá, že není vhodný tam, kde je řídká vegetace. (19) Výhodou tohoto indexu je jeho využití pro řadu různých druhů porostů. Mezi jeho nevýhody naopak patří, že při vysokých teplotách nedokáže spolehlivě odlišit detailní rozdíly. (10)

5.2 RGB vegetační indexy

Vegetační indexy RGB využívají k zobrazení snímku pouze viditelné spektrum. Nespornou výhodou RGB kamer je jejich nižší pořizovací cena oproti multispektrálním kamerám, které jsou mnohem dražší. Zatímco multispektrální snímky jsou vhodnější při charakterizaci vegetace nebo holé půdy, RGB snímky jsou vhodné pro monitorování růstu

vegetace. To může být dokázáno následujícím příkladem. Vegetační index VARI měří intenzitu vegetačního pokryvu. U holé půdy je možné nalézt hodnotu VARI „0“, ale hodnota vegetačního indexu TGI, který je citlivý na obsah chlorofylu, udává na stejném snímku hodnotu například „0,12“. To znamená, že na poli lze najít určité procento chlorofylu, takže plodina je na počátku klíčení. (20) (21) Vegetační index TGI (Triangular Greenes Index) patří mezi nejvíce korelující indexy s přímým měřením obsahu chlorofylu v plodině. Proto se využívá pro odhad obsahu chlorofylu v plodině a nepřímo lze jím zjistit také obsah dusíku v dané rostlině. (22) Ovšem dle studie MacKinnona indexy VARI a TGI moc nekorelují s indexem NDVI a autor nepovažuje vegetační indexy jako spolehlivý indikátor zdraví plodin. (22)

Odhad biomasy na malých polích pomocí bezpilotního prostředku s RGB kamerou lze považovat za jednoduchou a včasnou alternativu k nákladným a složitým měřením odrazivosti. Indexy RGB vykazují lepší schopnost modelovat biomasu v ranných růstových fázích než v pozdně růstových fázích. (23)

5.3 Ostatní vegetační indexy

Vzhledem k velkému rozsahu spektrálních pásem si lze sestavit také vlastní vegetační indexy. Každé spektrální pásmo je citlivé na specifické parametry vegetace. V rámci DPZ se můžeme setkat s řadou vegetačních indexů, které již byly použity. V této kapitole bude uvedena pouze malá část příkladů dalších již prozkoumaných vegetačních indexů.

Červené spektrální pásmo a NIR se používá k zjišťování množství biomasy a hustoty vegetace z důvodu rapidního rozdílu odrazivosti mezi těmito pásmy. Toho využívají následující vegetační indexy jako je NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, které se používají k sledování listové plochy vegetace či identifikaci řádků plodin Pro odhad obsahu vody v listech se používají vlnové délky z pásma NIR a SWIR. Tuto kategorii reprezentují vegetační indexy jako je NDWI, SIWSI, GVMI, MSI využívané zejména k predikci a monitorování vodního stresu plodin. Pro zjištění koncentrace chlorofylu pásma RGB a Red-edge, predikci biofyzikálních parametrů pomocí zeleného, červeného a NIR pásma. Vegetační indexy na principu zjišťování biofyzikálních parametrů a hustoty vegetace mohou korelovat s reálným výnosem plodiny. (14)

Index listové plochy známý pod zkratkou LAI (Leaf Area Index) lze definovat jako listovou plochu vyskytující se nad určitou jednotkou povrchu půdy. Listová plocha je důležitým agronomickým parametrem, který souvisí s fotosyntetickou kapacitou, využitím vody, mikroklimatem, vitalitou koruny, ale i například s kvalitou hroznů u vinic. (24) LAI je možno stanovit některou z mnoha experimentálních metod, které jsou rozděleny do třech základních skupin: přímé metody, polopřímé metody, a nepřímé metody. Přímé metody spočívají v odstranění listů z rostliny. U listu se zjišťuje se plocha, tvar, úhel nasazení atd. Tyto metody jsou velmi přesné a slouží zejména jako srovnávací metody k metodám nepřímým nebo polopřímým. Mezi polopřímé metody patří například alometrických vztahy a nepřímé metody jsou založeny na interakci sluneční radiace se strukturou korunové vrstvy porostu. (25)

Následující studie se zabývala hodnocením listové plochy sóji a kukuřice. Porovnával se v ní index listové plochy LAI, který byl zjišťován destruktivním odběrem vzorků s vegetačními indexy SR, NDVI, EVI, GARI, WDRVI, Cl_{Green} , $Cl_{Red-edge}$ a MTCI. NDVI a GARI jsou nejlepšími indexy pro kvantitativní detekci změn hodnot LAI při obsahu porostu $2 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Vegetační indexy MTCI a $Cl_{Red-edge}$, byly původně používány k odhadu obsahu chlorofylu v plodinách, ovšem mohou dosahovat lepších výsledků LAI než jiné metody měření. Tyto indexy totiž objektivně reagují na změny listové plochy i obsah chlorofylu. Oba indexy při předpovídání LAI nejsou drasticky ovlivněny účinky půdního pozadí. Dle autorů MTCI je citlivý na typ plodiny a naopak $Cl_{Red-edge}$ je na typ plodiny necitlivý. Proto je $Cl_{Red-edge}$ vhodný, přesný, a přitom levný nástroj pro dálkový průzkum LAI u více druhů plodin. Je ovšem zapotřebí dalších studií k ověření odhadu LAI pomocí indexu $Cl_{Red-edge}$ v různých typech plodin, ale i v jiných typech vegetace. (26)

U středně hustých a hustých porostů dochází k přesycení a hodnoty NDVI mohou nabývat nepřesností. V následující studii bylo porovnáváno šest známých indexů (NDVI, MSR, Cl_{Green} , $NDVI_{Red-edge}$, $MSR_{Red-edge}$ a $Cl_{Red-edge}$) s autory vylepšenými indexy obsahující Red-edge pásmo. Red-edge vegetační indexy zlepšují odhad listové plochy, pokud jsou indexy aplikovány na plodiny s konzistentním obsahem chlorofylu. Pásmo Red-edge je totiž citlivé na obsah chlorofylu, malé změny porostu a podíl mezer v daném porostu. Vylepšené vegetační indexy stále využívají silný kontrast mezi pásmem červeným a NIR, které je citlivé na odhad listové plochy, ale využívají kombinaci pásma Red-edge a

červeného, které mohou zabránit rušivým vlivům na změny obsahu chlorofylu. Z výše uvedených indexů dosáhly k nejpřesnějšímu odhadu listové plochy vegetační indexy s červeným a Red-edge pásmem. Tyto vegetační indexy jsou totiž spojené s fyziologickým stavem rostliny a jsou stabilní pro odhad listové plochy plodin v širokém rozsahu druhu plodin a růstových fází. Velký potenciál mají tyto indexy pro monitorování v zemědělství se senzory Red-edge, které jsou také dostupné na družicových platformách jako je Sentinel 2 či RapidEye. (18)

6 Dálkový průzkum Země plodin s meziřádky

Monitorování chmelnic a vinic je pomocí DPZ velmi náročné. Z důvodu řádkové struktury pěstování chmele či vinné révy je na snímcích zobrazena jak holá půda, umístěná v meziřádcích mezi plodinou, tak i vegetační kryt plodiny. Horší podmínky pro DPZ u takto pěstovaných plodin tvoří také stíny vytvářené samotnými rostlinami. (27)

Největší výzvou pro pěstitele vinné révy je zlepšení jejího výnosu a kvality hroznů za přispění minimálních nákladů a minimálního dopadu na životní prostředí. Přítomnost travního porostu, holé půdy nebo stínu může velmi ovlivnit výpočet spektrálních indexů, což poté vede ke zkreslenému vyhodnocení stavu plodiny. (28)

Pro sledování stavu vinic se v DPZ hojně používají snímky z bezpilotních prostředků. Tyto snímky jsou schopny, díky velkému prostorovému rozlišení, rozlišit řádek vegetace od meziřádku. Jsou tak poskytnuty čisté pixely vegetace na rozdíl od družicových snímků, které díky nízkému rozlišení, zahrnují v pixelu jak vegetaci, tak i prostor mezi řádky vegetace. V případě holé půdy mezi řádky se hodnota vitality vegetace snižuje v případě travního prostoru se naopak zvyšuje. (29)

Z výsledků další studie vyplývá, že družicové snímky s hrubým rozlišením nelze přímo použít ke spolehlivému popisu variability vinic. Hodnoty NDVI nebyly v souladu s hodnocením odborníků v terénu. Na opačné straně snímky UAV měly větší souvislost hodnot NDVI s reálnou vitalitou vinné révy. Proto by se měly pro správné vyhodnocení plodin s meziřádky používat snímky s velkým prostorovým rozlišením v řádech centimetrů, které poskytují zejména snímky z UAV. (17)

Dle Junges NDVI koreluje s biofyzikálními parametry souvisejícími s listovou plochou vinné révy, a to zejména s průměrným počtem listů na větvi. Korelace jsou vyšší hlavně v počáteční a závěrečné fázi vegetačního cyklu. Průměrná hodnota NDVI v hodnoceném vegetačním období, zjištěná ručním senzorem umístěným 60 cm nad vegetačním krytem s červeným a NIR pásmy, se pohybovala v rozmezí od 0,45 do 0,85. (30) Rozmezí hodnot NDVI pro vinnou révu u výzkumu Matese et. al. se pohybovaly u bezpilotního prostředku

mezi 0,2 až 0,9, u letadla 0,3 až 0,7 a u družice 0,5 až 0,65. Konstatují, že u velkých vinic s hustou vegetací a velkými shluky poskytují různé platformy s různým prostorovým rozlišením podobné výsledky. (31)

Mapy vitality získané pomocí vegetačního indexu NDVI mohou zemědělcům přinést relevantní poznatky, které pomůžou pochopit stav vinic a umožnit tak včasná opatření problematických částí vinice nebo sledování reakce na změny hospodaření ve vinicích. Odfiltrování vegetace, která není vinnou révou, představuje lepší reprezentaci variability vinice. Průměrná hodnota odfiltrované vegetace, jen vinná réva, dosahuje vyšších hodnot NDVI v rozmezí o 0,12 až 0,18 oproti neodfiltrovaným hodnotám NDVI, s jinou vegetací a holou půdou. (11)

Dle Padua UAV s RGB kamerou jsou dostatečné pro detekci vegetace na vinici. Následující vegetační indexy měly při detekci vegetace na vinici přesnost přes 90 %. Jedná se o vegetační indexy G%, GLI, RGBVI, ExG a NGBDI. Tyto vegetační indexy doplněné Otsuovou metodou pro prahování měly vyšší celkovou přesnost. (32)

Ve výzkumu pro monitorování tří odrůd chmele Agnus, Premiant a Sládek použity dva bezpilotní prostředky s rozdílnými RGB kamerami. K odhadu listové plochy chmele byly porovnány následující vegetační indexy G%, ExG, GLI, VARI, RGBVI, NRGDI, TGI. V této studii vykazovaly nejvyšší shodu indexy ExG a TGI. Jedná se o RGB indexy, které jsou závislé na obsahu chlorofylu a dusíku v dané plodině. Vyšší hodnoty ve všech variantách vykazuje ovšem TGI, což může být způsobeno například barevnými odstíny stínu vegetace nebo odlišnou barvou listů. Autoři se shodují i s dalšími odkazovanými autory v dané studii, že pro odhad listové plochy je možné použít RGB kameru a není nutné pořizovat daleko dražší multispektrální kamery. (27)

7 Ekonomické zhodnocení DPZ

Odhaduje se, že američtí zemědělci čelí ročně ztrátám 20 miliard amerických dolarů v důsledku problémům s úrodností, chorobami a vodou. Plošné aplikace hnojiv a pesticidů, které neberou v úvahu variabilitu pozemku, zvyšují celkové náklady. Snímky dálkového průzkumu Země mají potenciál zvýšit zisky, jelikož je možno ze snímků vytvořit aplikační mapy. Ty se nahrají do traktoru a za přispění vhodných postřikovačů dochází k variabilnímu dávkování hnojiva a pesticidů dle aplikační mapy. V případě použití dusíkatých hnojiv u kukuřice se jejich spotřeba v případě variabilního dávkování může snížit o 6 až 60 %, u pšenice až o 10 %. Co se týče herbicidů a insekticidů přibližně až o 30 %. Náklady spojené s DPZ vznikají v souvislosti s pořízením a analýzou snímků, náklady z pořízení vstupů pro variabilní dávkování a školení k rozvoji dovedností při interpretaci snímků DPZ. V úvahu je potřeba vzít i riziko z důvodu nepřesnosti poskytovaných snímků či jejich nesprávné interpretaci. (33)

U pšenice ozimé došlo ke snížení dusíkatých hnojiv na pozemku o 21,7 hektarech z jednotné dávky 82,82 kg na variabilní dávku 64 kg. Jedná se o snížení spotřeby hnojiva o 25 %. Na výnosy zrna to nemělo až takový vliv, při jednotné dávce byl výnos 4,36 t/ha a při variabilní dávce 4,41 t/ha. (34)

U italských poskytovatelů služeb zaměřujících se na snímky DPZ v zemědělství jsou ceny za snímky z bezpilotních prostředků na jeden hektar nejdražší. Naopak průměrné ceny za snímky z družic jsou nejlevnější. Družice s prostorovým rozlišením 10 až 15 metrů jsou dostatečné pro přesné řízení variabilní dávky hnojiva pro pozemky větších než 2,52 hektar. V případě, že by byla potřeba vyššího prostorového rozlišení družice, tak by byly snímky rentabilní již od velikosti pozemku 13,2 hektar. V případě použití velmi vysokého rozlišení, se to tak vyplatí od 76,8 hektarů. Letadlové snímky jsou rentabilní od pozemků větších než 66,4 hektarů. Snímky NDVI pořízené bezpilotními prostředky nejsou rentabilní pro hnojení obilovin dusíkatými hnojivy v proměnlivé dávce, protože průměrná cena snímku za hektar byla vyšší než ekonomický přínos variabilního hnojení. Snímky z bezpilotních prostředků

jsou vhodné pro aplikace s vysokou přidanou hodnotou jako je například detekce variability pro přesný postřik herbicidy nebo pro aplikace u jiných plodin, než jsou obiloviny. (35)

Dle Matese jsou u vinic nákladově nejefektivnější snímky z bezpilotních prostředků na malých polích, přibližně o rozloze 5 hektarů. U pozemků vinic o rozloze větší než 50 hektarů jsou snímky z bezpilotních prostředků nejméně ekonomické. (31)

8 Vlastní práce

Pořizování snímků probíhalo v účelovém hospodářství Stekník, který je nedílnou součástí Chmelařského institutu v Žatci. Tato zemědělská farma se zabývá především pěstováním chmele. Pěstují se zde české odrůdy chmele jako je Žatecký poloraný červeňák, Premi-ant, Agnus a Sládek. Pro účely práce byla vybrána ke zkoumání pomocí dálkového průzkumu Země odrůda Premiant, která se pěstuje ve výše zmiňované zemědělské farmě na biochmelnici a klasické konvenční chmelnici. Tyto dvě chmelnice se od sebe liší agrotechnickými opatřeními. V biochmelnici se používají hnojiva a prostředky na ochranu plodin povolených v ekologickém zemědělství. Jedná se tedy chlévskou mrvu z biochovu, zelené hnojení či výtazky z různých rostlin a bioagens. V konvenční chmelnici probíhají agrotechnická opatření v souladu s běžnými pěstebními technologiemi tohoto typu. Obě chmelnice jsou vybaveny kapkovou závlahou. (36) (10)



Obrázek 3 Umístění chmelařského institutu Stekník na mapě ČR
(zdroj: <https://www.google.com/maps>)



Obrázek 2 Umístění konvenční chmelnice a biochmelnice ve Stekníku
(zdroj: <https://www.google.com/maps>)

K pořízení snímků byl použit bezpilotní prostředek křídlo senseFly eBee X s kamerou MicaSense RedEdge-MX, která zobrazuje snímky v 5 spektrální pásmech. Jedná se o pásma modré, zelené, červené, Red-edge a blízké infračervené.

Odrůda Premiant, pěstovaná na biochmelnici, zaujímá v účelovém hospodářství plochu 1,152 hektarů a odrůda Premiant, pěstovaná klasickou konvenční technologií, zaujímá plochu 1,567 hektarů. Snímky byly pořízeny ve vegetační sezóně v roce 2022 v následujících termínech, které zobrazuje tabulka 1:

Odrůda Premiant pěstovaná na klasické konvenční chmelnici	Odrůda Premiant pěstovaná na biochmelnici
10.05.2022	10.05.2022
18.05.2022	18.05.2022
31.05.2022	31.05.2022
10.06.2022	10.06.2022
21.06.2022	21.06.2022
09.07.2022	09.07.2022
26.07.2022	02.08.2022
02.08.2022	11.08.2022
23.08.2022	23.08.2022

Tabulka 1 Termíny snímání bezpilotním prostředkem
(zdroj: vlastní zpracování)

8.1 Vegetační zpráva ze Žatecké oblasti za rok 2022

Zdrojem dat jsou vegetační zprávy od společnosti TOP HOP s.r.o., jejímž předmětem činnosti je obchod s žateckým chmelem nejvyšší kvality. Meteorologické údaje používají z vlastní meteorologické stanice v Deštnici u Žatce, která leží cca 16 km od účelového hospodářství Stekník. (37) V tabulce 2 jsou uvedeny teploty a srážky v chmelařské žatecké oblasti v průběhu vegetační období v roce 2021 a 2022.

Období od ledna roku 2022 do konce března bylo v žatecké oblasti srážkově podprůměrné. Dlouhodobý průměr v tomto období je 59,2 mm a v roce 2022 spadl pouze 35,8 mm srážek. Ke zlepšení vodní bilance na chmelnicích došlo v dubnu, kdy napršelo 40 až 50 mm vody. (38)

Květen byl v Žatecké chmelařské oblasti teplotně nadprůměrný, jelikož průměrná teplota dosáhla 15,3 °C. Ovšem srážkově byl květen nejsušší za posledních deset let.

Napršelo pouze 21,3 mm vody a oproti dlouhodobému průměru, který je 52,0 mm. (39)

Období června pokračovalo suché počasí, které doprovázely vysoké teploty v prvních dvou dekádách měsíce. Toto počasí negativně ovlivnilo růst chmele. V období od 24.6. do 30.6. napršelo 63,3 mm. Tyto srážky zapříčinily lokální bouřky, takže úhrn srážek byl nerovnoměrný. (40)

Červenec také nepřál růstu chmele, a to opět z důvodu malého počtu srážek a situace, že 17 dní nepršelo vůbec. V období od 18.7. do 25.7. se denní teploty pohybovaly okolo 30 °C, 19.7. dokonce teplota ve stínu vystoupala až k 35,1 °C. Některé okraje porostu chmele v Žatecké chmelařské oblasti měly kvůli tomuto počasí spálené listy od slunce. (41)

V srpnu situace byla opět stejná jako v předchozích měsících. Prvních vydatných dešťů se dostalo až 15.8., 21.8. a 26.8., tyto srážky růst a vývoj chmele neovlivnily. Dle pěstitelů v Žatecké oblasti, nepříznivé klimatické podmínky v letošním roce velmi negativně ovlivnily množství sklizeného chmele i obsah pivovarsky cenných látek v hlávkách. (42)

Termín	Prům. teplota (°C)	Srážky (mm)	30letý průměr teplota (°C)	30letý průměr srážky (mm)
1.4.–30.4.2022	7,5	52,8	9,1	30,7
1.4.–30.4.2021	6,1	19,4		
1.5.–31.5.2022	15,3	23,9	14,2	52
1.5.–31.5.2021	11,2	86,5		
1.6.–30.6.2022	19,5	82,2	17	59,1
1.6.–30.6.2021	19,6	150,4		
1.7.–31.7.2022	18,9	49,2	19	69,4
1.7.–31.7.2021	19,4	81,8		
1.8.–31.8.2022	19,5	72	18,3	70,8
1.8.–31.8.2021	17	60,6		

Tabulka 2 Teploty a srážky v Žatecké chmelařské oblasti ve vegetační období (zdroj: <http://www.hop.cz>)

8.2 Zpracování snímků

Pro hodnocení snímků chmelnic byly použity čtyři vegetační indexy. Jedná se o indexy NDVI, TGI, $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$. Index NDVI byl použit jako porovnávací index k ostatním vybraným vegetačním indexům. Je tomu tak proto, že NDVI patří k nejpoužívanějším vegetačním indexům pro hodnocení vegetace a jeho hodnoty souvisí s vitalitou a zdravím plodiny. Vegetační index TGI byl vybrán jako zástupce RGB spektrálních indexů. Poslední dva indexy $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$ obsahují pásmo Red-edge, které ukazuje náhlou změnu odrazivosti vegetace.

$$CI_{Red-edge} = \frac{NIR}{Red-edge} - 1 \quad (8)$$

$$CI_{Red\&Red-edge} = \frac{NIR}{0,6*Red+0,4*Red-edge} - 1 \quad (9)$$

$$TGI = Green - 0,39 * Red - 0,61 * Blue \quad (10)$$

Výpočet vegetačních indexů probíhal v softwaru Pix4D mapper. V softwaru ENVI bylo použito prahování pomocí Otsovy metody k odlišení plodiny od půdy. Následné zpracování snímků s vypočtenými vegetačními indexy proběhlo ve volně přístupném softwaru QGIS, kde byly mimo jiné vytvořeny, pomocí nástroje „Zonální statistiky“, statistiky jednotlivých chmelnic a vegetačních indexů, které byly poté zpracovávány v MS Excel.

8.3 Výsledky

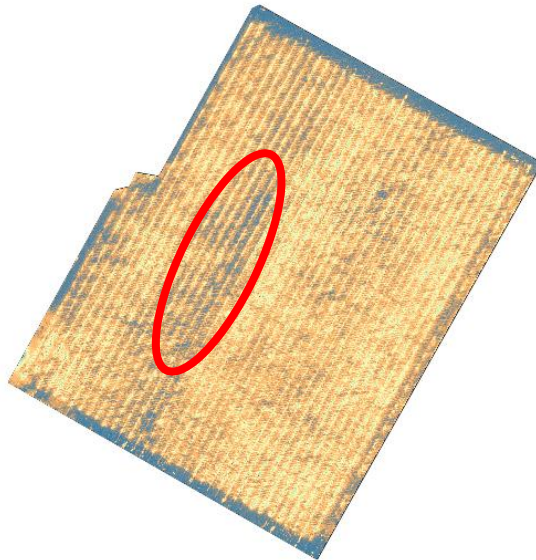
Všechny vegetační indexy detekovaly rostliny po celé vegetační období. V přílohách číslo 1 až 18 jsou zobrazeny všechny mapy vegetačních indexů na zkoumaných chmelnicích.

8.3.1 Variabilita chmelnic

Konvenční chmelnice

10.5.

U všech indexů na konvenční chmelnici jsou hodnoty indexu rozvrženy rovnoměrně. V části, která je vyznačená na obrázku 4 u indexu $CI_{red-edge}$, jsou vidět nižší hodnoty indexu, které jsou v pozdějším období vidět i u snímků jiných vegetačních indexů.



Obrázek 4 Nižší hodnoty indexu $CI_{red-edge}$ na konvenční chmelnici ze dne 10.5.2022 (zdroj: vlastní zpracování)

18.5.

V místě, kde na předchozím snímku 10.5. byly vidět nižší hodnoty u indexu $CI_{red-edge}$, jsou v tomto místě vidět u všech vegetačních indexů vyšší hodnoty oproti ostatní části chmelnice. Jinak není na snímcích vidět žádná větší variabilita.

30.5.

U všech vegetačních indexů není vidět žádná výrazná variabilita na chmelnici.

10.6.

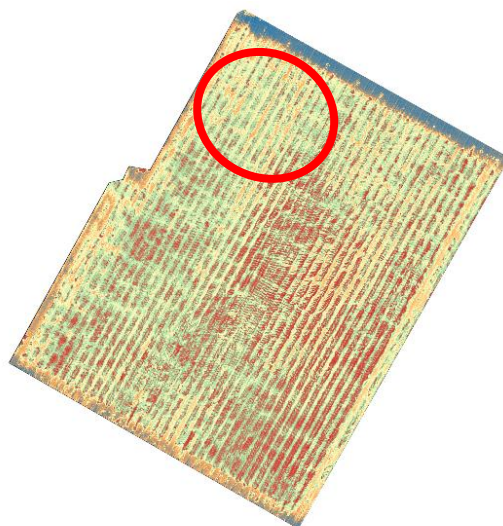
U vegetačních indexů $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$ a NDVI jsou již v zmiňovaném místě vidět nižší hodnoty. U vegetačního indexu TGI v tomto místě není tento problém tolik vidět.

21.6.

Ve zmiňovaném středním místě chmelnice je identifikovatelný pás, kde jsou vidět nižší hodnoty všech zkoumaných vegetačních indexů.

9.7.

U vegetačního indexu TGI není vidět žádná velká variabilita chmelnice. U indexů $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$ a NDVI jsou vidět stále nižší hodnoty pásu ve střední části chmelnice. Nižší hodnoty se začaly v tomto termínu objevovat i v levém horním rohu chmelnice z pohledu snímku, jak je vidět na obrázku 5.



Obrázek 5 Nižší hodnoty indexu $CI_{Red-edge}$ u konvenční chmelnice ze dne 9.7.2022 (zdroj: vlastní zpracování)

26.7.

U vegetačního indexu TGI opět není vidět žádná velká variabilita chmelnice. U ostatních již nejsou vidět nižší hodnoty ve střední části chmelnice. Nižší hodnoty v levém horním rohu z pohledu snímku jsou ovšem výraznější.

2.8.

Žádné výrazné změny oproti snímkům z posledního období.

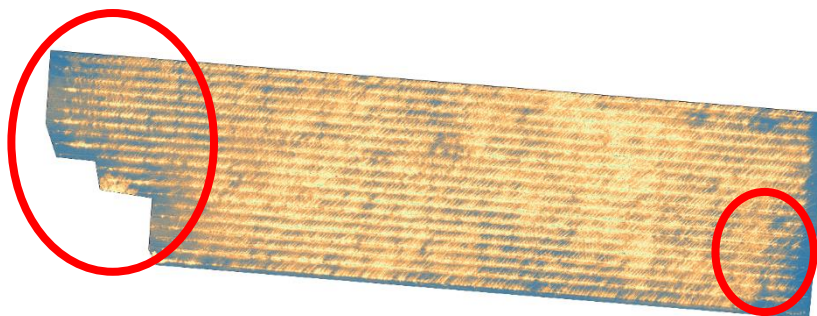
23.8.

Žádné výrazné změny oproti snímkům z posledního období.

Biochmelnice

10.5.

Na biochmelinci jsou hodnoty indexů rozloženy v celku rovnoměrně. V západní části chmelnice vykazuje index $Cl_{Red-edge}$ nižší hodnoty, jak je zobrazeno na obrázku 6. Ostatní zkoumané indexy naopak v tomto místě ukazují vyšší hodnoty. A v dolním pravém rohu snímku index $Cl_{Red-edge}$ vykazuje také nižší, ostatní zkoumané vegetační indexy nevykazují žádnou variabilitu v tomto místě.



Obrázek 6 Nižší hodnoty vegetačního indexu $Cl_{Red\&Red-edge}$ na biochmelnice ze dne 10.5.2022
(zdroj: vlastní zpracování)

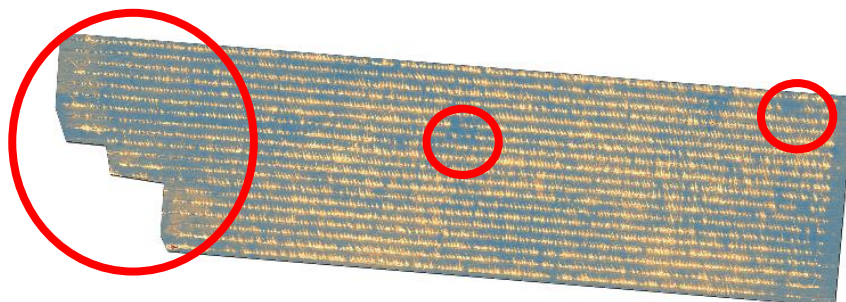
18.5.

O osm dní později jsou hodnoty všech zkoumaných indexů rovnoměrné v celé části chmelnice.

31.5.

V západní části biochmelnice jsou vidět nižší hodnoty jak u indexu $Cl_{Red-edge}$, tak i u $Cl_{Red\&Red-edge}$. Hodnoty indexů NDVI a TGI, který je zobrazen na obrázku 7, takto výraznou variabilitu v této části nevykazují. Naopak u všech vegetačních indexů jsou vidět

nižší hodnoty ve střední části chmelnice a pravé horní části chmelnice z pohledu snímku, které jsou níže vyznačeny.



Obrázek 7 Nižší hodnoty vegetačního indexu TGI na biochmelnici ze dne 31.5.2022 (zdroj: vlastní zpracování)

10.6.

Podobný průběh indexů $Cl_{Red-edge}$ a $Cl_{Red\&Red-edge}$ jako 31.5. U indexů NDVI a TGI jsou vidět taktéž nižší hodnoty v západní části chmelnice, ale ne tak výrazné jako u indexů $Cl_{Red-edge}$ a $Cl_{Red\&Red-edge}$.

21.6.

K vegetačním indexům $Cl_{Red-edge}$ a $Cl_{Red\&Red-edge}$ se připojil i vegetační index NDVI, který zobrazuje podobnou variabilitu. Index TGI nevykazuje tak výraznou variabilitu ve zmiňovaných místech, tak jako ostatní vegetační indexy.

9.7.

Žádné výrazné změny oproti snímkům z posledního období.

2.8.

Žádné výrazné změny oproti snímkům z posledního období.

11.8.

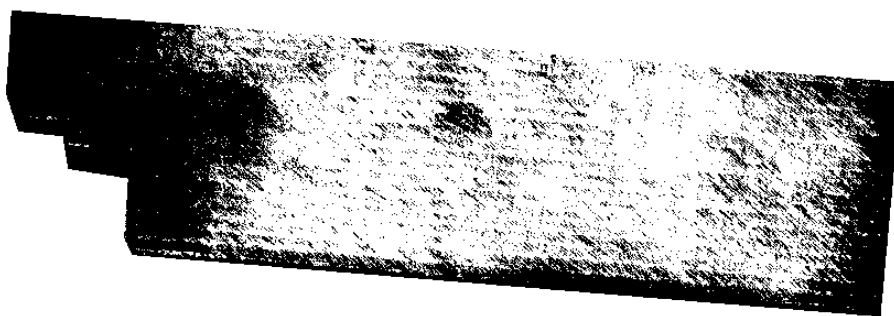
Žádné výrazné změny oproti snímkům z posledního období. Jen se nižší hodnoty indexu na západní straně rozrůstají více do středu chmelnice.

23.8.

Žádné výrazné změny oproti snímkům z posledního období.

8.3.2 Metoda prahování

V softwaru ENVI bylo provedeno prahování podle Otsovy metody, která je založena na tvaru histogramu. Její další zpracování již však nebylo uděláno, jelikož v západní části biochmelnice, kde můžeme najít nižší hodnoty indexů bez použití metody prahování, nebyl zobrazen porost u indexů $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$, které můžeme vidět na obrázcích 8 a 9. Nezobrazení porostu můžeme u výše zmiňovaných indexů pozorovat od snímků z 2.8.2022 až do konce vegetačního období. Vegetační index NDVI tak ztatečně problém nedetekoval a TGI index tento problémy nedetekovaly vůbec.



Obrázek 8 Snímek biochmelnice z 11.8.2022 s vegetační indexem $CI_{Red\&Red-edge}$ s použitím Otsovy metody (zdroj: vlastní zpracování)

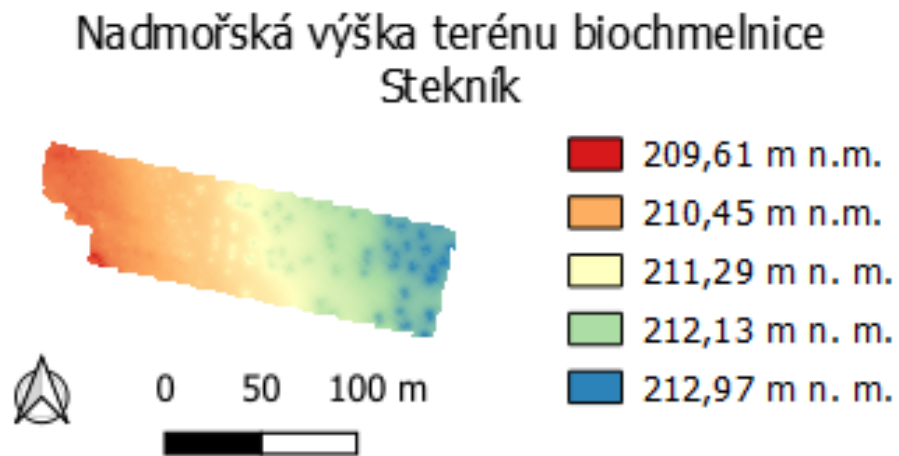


Obrázek 9 Snímek biochmelnice z 11.8.2022 s vegetační indexem NDVI s použitím Otsovy metody (zdroj: vlastní zpracování)

Výše zmiňované problémy v západní části biochmelnice, kde jsou viděny největší rozdíly variability zkoumané odrůdy Premiant na chmelnici ve Stekníku, můžeme odůvodnit žlutými listy chmele, které značí napadení plísní a podmáčenou půdou v těchto částech chmelnice, viditelné na obrázku 10.



Obrázek 10 Snímek biochmelnice – problémová západní část z 2.8.2022
(zdroj: foto doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.)

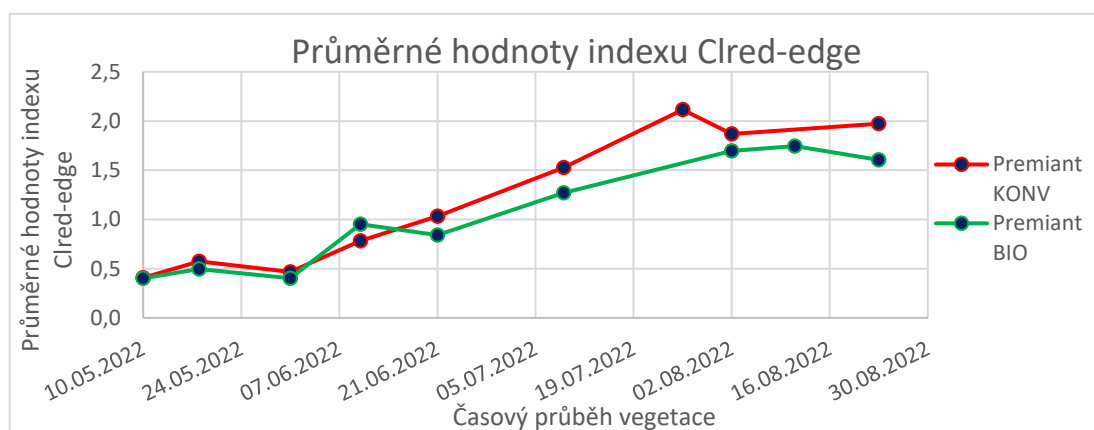


Obrázek 11 Nadmořská výška terénu biochmelice Stekník
(zdroj: vlastní zpracování)

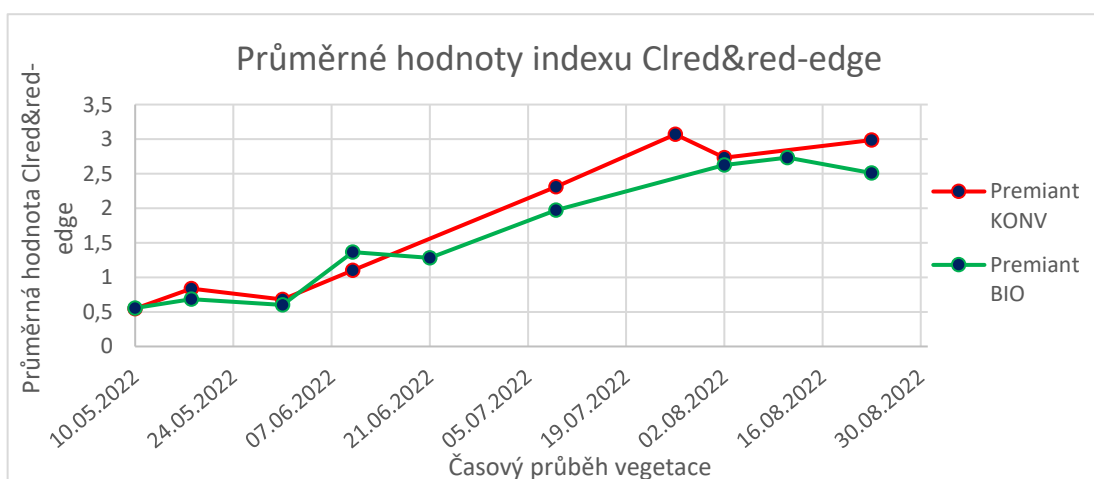
Již zmiňovaný problém může také souviset se spádem terénu biochmelnice. Obrázek 11 ukazuje, že v místě, kde dochází k podmáčení terénu, je nejnižší nadmořská výška chmelnice. Tento problém na klasické konvenční chmelnici nenajdeme, jelikož terén je zde víceméně rovinný.

8.3.3 Porovnání konvenční chmelnice a biochmelnice

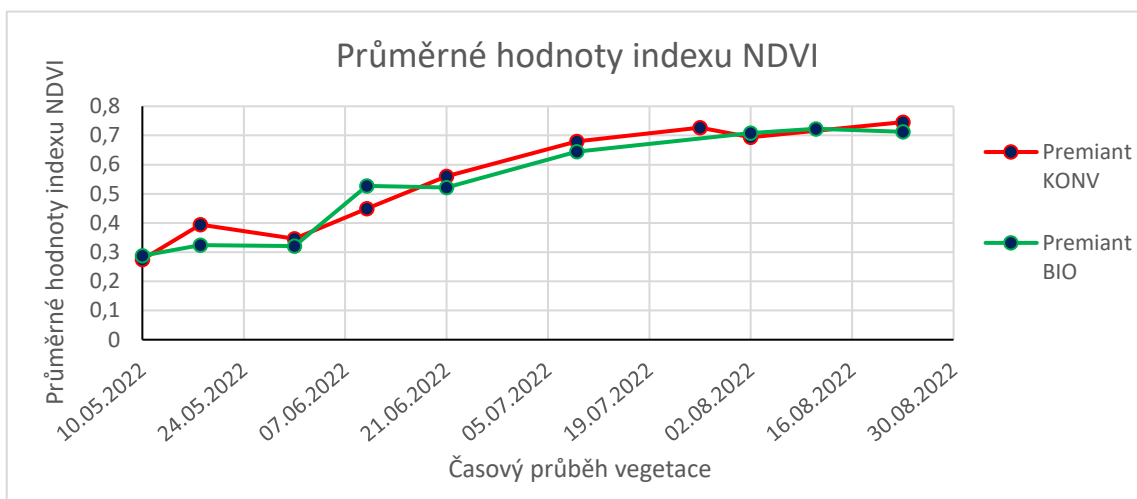
Jak můžeme vidět na grafech 1, 2 a 3 u vegetačních indexů $Cl_{red-edge}$, $Cl_{red\&red-edge}$ mají průměrné hodnoty chmele na konvenční chmelnici vyšší hodnoty než u chmele na biochmelnici po celé vegetační období až na 10.6. 2022, kde je průměrná hodnota chmele na biochmelnici vyšší. U indexu NDVI jsou průměrné hodnoty chmele na biochmelnici ve třech termínech vyšší než průměrné hodnoty chmele v konvenční chmelnici. U RGB indexu TGI mají průměrné hodnoty chmele na biochmelnici a konvenční chmelnici střídavou tendenci.



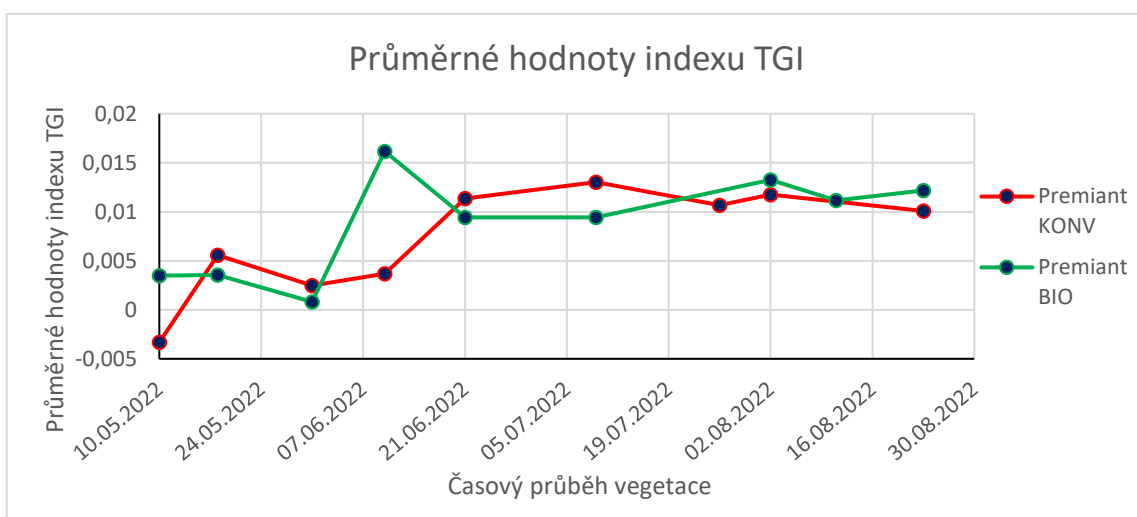
Graf 2 Průměrné hodnoty indexu $Cl_{red-edge}$ na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022 (zdroj: vlastní zpracování)



Graf 1 Průměrné hodnoty indexu $Cl_{red\&red-edge}$ na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022 (zdroj: vlastní zpracování)



Graf 3 Průměrné hodnoty indexu NDVI na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022 (zdroj: vlastní zpracování)



Graf 4 Průměrné hodnoty indexu TGI na konvenční chmelnici a biochmelnici za vegetační období v roce 2022 (zdroj: vlastní zpracování)

Z výše uvedených grafů vyplývá a všechny zkoumané vegetační indexy potvrzují, že k největšímu růstu vegetace chmele dochází od začátku června do konce července.

8.3.4 Korelace vybraných vegetačních indexů s NDVI

Korelace vybraných indexů s nejvíce používaným vegetačním indexem NDVI má následující hodnoty dle průměrných hodnot je zobrazena v tabulce 3:

Vegetační indexy	Funkce Correl dle průměrných hodnot
CI _{Red-edge}	0,966
CI _{Red&Red-edge}	0,978
TGI	0,836

Tabulka 3 Korelační koeficient vybraných vegetačních indexů s indexem NDVI za vegetační období v roce 2022 pro odrůdu Premiant (zdroj: vlastní zpracování)

S vegetačním indexem NDVI nejvíce koreluje vegetační index CI_{Red&Red-edge}. Naopak nejmenší korelaci z vybraných vegetačních indexů má RGB index TGI. I když hodnotu 0,836 lze považovat za vysokou korelaci s porovnávaným indexem.

8.4 Ekonomické srovnání bezpilotních prostředků a družic

Pro co nejpřesnější monitorování porostu chmele jsou zapotřebí snímky s co největším prostorovým rozlišením. Proto snímky pořízené ze satelitů jako je Sentinel-2A či Landsat s prostorovým rozlišením maximálně 10 metrů neudají tak přesnou hodnotu spektrálního indexu jako snímky z dronů či komerčních družic, které mají větší prostorové rozlišení. Pořízení snímku z komerčních družic však volně dostupné není, musí se za něj zaplatit. To samozřejmě platí také na pořízení dronů s kamerou, případně najmutí si firmy, která snímání a zpracování provede.

V tabulce 4 jsou uvedeny pořizovací ceny dronu a kamer, které byly poptány v lednu 2023 od různých firem. Z tabulky vychází, že RGB kamery pro bezpilotní prostředky jsou až čtyřikrát levnější než multispektrální kamery, které využívají pásmo blízkého infračerveného a Red-edge pásma. V případě využití vhodných RGB spektrálních indexů pro monitorování porostu, lze zvýšit rentabilitu využití bezpilotního prostředku a k nim navazujícím agrotechnickým opatřením.

Model	Geotronics Praha s.r.o. cena bez DPH	DroneFly (v USA) cena převedena na koruny při kurzu: 1USD = 21,8 Kč	E-shop GEOpriestor.sk cena převedena na koruny při kurzu 1EUR = 23,8 Kč	DronPro, s.r.o. včetně DPH
Křídlo eBee X	157 950 Kč	x	x	cca 500 000 Kč
Kamera MicaSense RedEdge MX	145 600 Kč	113 251 Kč	118 976 Kč	
Aktivace eBee X RTK/PPK	40 000 Kč	x	x	
Kamera Duet M	124 020 Kč	x	x	x
RGB kamera S.O.D.O.	x	39 240 Kč	39 984 Kč	x

*Tabulka 4 Srovnání cen bezpilotních prostředků a kamer
(Zdroj: Geotronics Praha s.r.o., DronPro, s.r.o., www.dronefly.com, www.geopriestor.sk)*

Dále je potřeba si uvědomit, že bezpilotní prostředek má omezenou dobu létání z důvodu kapacity baterie. Při použití klasické baterie připojené je schopen létat 59 minut a dle výrobce tím pokryje až 220 hektarů při letu ve výšce 122 metrů. Také je možné zakoupit baterii s prodlouženou výdrží s dobou letu až 90 minut, kterou Geotronics Praha s.r.o. nabízí za 8 190 Kč bez DPH. Z omezené doby letu u bezpilotních prostředků je vhodné je využívat snímání menších ploch.

Družice	Cena snímků za 1km²
Pleiades	Cca 300 Kč
Geoeye-1	od 545 do 872 Kč
WorldView	od 545 do 872 Kč

*Tabulka 5 Ceny vybraných družicových snímků za 1 km²
(zdroj: ARCDATA PRAHA, s.r.o.)*

Ceny jednotlivých snímků družic, které jsou uvedeny v tabulce 5, se odvíjejí zejména od prostorového a spektrálního rozlišení, jak jsou data stará a dle konkrétních požadavků zákazníka. Ve výše uvedené tabulce jsou přibližné ceny snímků z komerčních družic. Podstatnou informací při nákupu snímků z komerčních družic, které mají prostorové rozlišení 1 až 2 metry, je že se musí pořídit minimálně území o rozloze 25 km² u archivních snímků. Snímky z družice Pleiades jsou nejlevnější, jelikož zahrnují pouze čtyři spektrální

pásma, a to modré, zelené, červené a blízké infračervené. Družice Geoeye-1 nabízí prostorové rozlišení u multispektrálního snímku 1,65 metrů. Družice WorldView nabízí sérii čtyř družic, který se liší jednotlivými spektrálními pásmy a spektrálním rozlišením. Například družice WorldView-3 nabízí také Red-edge pásmo a prostorové rozlišení 1,24 metrů.

V případě této práce, by bylo zapotřebí snímky právě z družice WorldView- 3 z Žatecké oblasti, konkrétně polygon, který by zahrnoval chmelařský institut Stekník. Těchto snímků by muselo být pořízeno devět v průběhu vegetačního období, tak jak tomu bylo v případě použití snímání pomocí bezpilotního prostředku. To by znamenalo, že by devět snímků stálo v rozmezí od 122 625 Kč do 196 200 Kč za jedno vegetační období.

Možné snížení nákladů zemědělského podniku při využívání dálkového průzkumu Země je v případě využití informací ze snímků dané plochy porostu a vhodnými agrotechnickými opatřeními. Zpracovanou mapu lze využít jako aplikační, která se nahraje do traktoru a v případě vhodných technických řešeních traktoru a připojených strojů lze provést variabilní agrotechnické operace. To znamená, že například u postřikovače lze variabilním postřikem ušetřit za materiál v místech, kde to není potřeba a v místech, kde je potřeba, lze dát větší dávku. V případě této práce, nižší hodnoty indexu s Red-edge pásmem v západní části biochmelnice byly viděny již na začátku vegetačního období a mohla být provedena vhodná agrotechnická opatření, která by mohla zvýšit výnos chmele v těchto místech. To samé platí u konvenční chmelnice, kde byly viděny nižší hodnoty u indexů $CI_{Red-edge}$, $CI_{Red\&Red-edge}$, a NDVI na počátku července. Tedy v čase, kdy vhodná agrotechnická opatření mohla pomoci k vyššímu výnosu.

Průměrný výnos chmele na českých chmelnicích mezi lety 2017 až 2021 je 1,4 tuny na hektar. Při průměrné realizační ceně chmele 227 836 Kč za rok 2021 se v průměru tržby chmele pohybovaly okolo 32 337 Kč/ha. V roce 2021 byly průměrné celkové náklady na pěstování chmele 365 826 Kč/ha, z toho bylo 267 358 Kč/ha na přímé náklady a 98 468 Kč/ha na nepřímé náklady. Mezi přímé náklady řadíme náklady na osivo, hnojiva, ochranné prostředky, ostatní pomocný materiál, jako například drátky, a mzdové náklady. Nepřímé náklady zaujímají odpisy, režie a náklady na vlastní mechanismus. Největší zastoupení s 34,3 % mají náklady na mzdy. Náklady na hnojiva zaujímají pouze 2,8 % a na

postřiky 6,1 %. Z toho vychází, že průměrné náklady na hnojiva jsou 10 234 Kč/ha a na ochranné prostředky 22 315 Kč/ha. (43)

Dle velmi odhadovaných hodnot je možné variabilní aplikací snížit spotřebu hnojiva o 25 % a ochranných prostředků o 30 %. To by znamenalo celkové náklady na hnojiva 7 675 Kč/ha a na ochranné prostředky 15 620 Kč/ha. Celkový rozdíl mezi jednotnými dávkami hnojiva a ochranných prostředků a variabilní aplikací je 9 254 Kč/ha. V případě Chmelařského institutu Stekník, který zaujímá celkovou plochu konvenční chmelnice a biochmelnice 7,74 ha, by mohlo dojít k snížení nákladů o 71 626 Kč.

Společnost EASYmap nabízí multispektrální snímání a zpracování snímků za 12 600 Kč do 6 ha. V případě snímání ploch nad 6 ha se připočte za další hektar 600 Kč. Chmelařský institut Stekník by vyšlo jedno snímání na 13 800 Kč. V případě pořízení vlastního bezpilotního prostředku včetně kamery, jehož cena se pohybuje okolo 500 000 Kč, je zapotřebí započítat cenu za práci pro člověka, který bude snímání provádět a zpracovávat. Na první pohled je zřejmé, že variabilní aplikace dle map z bezpilotních prostředků či komerčních družic není pro chmelnice do 10 hektarů tolik rentabilní.

9 Hodnocení výsledků a diskuse

Všechny použité vegetační indexy prokazují dobrou detekci porostu v průběhu celého vegetačního období. Jedinou výjimku tvoří vegetační indexy obsahující Red-edge pásmo, které při použití Otsovy metody nedetekovaly v západní části biochmelnice chmel, jenž byl napaden plísní. Jinak zpracované snímky s indexy $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$, kde nebyla provedena Otsova metoda detekovaly porost chmele dobře, jen v místech napadení porostu chorobou ukazovali nižší hodnoty. Lze tedy souhlasit s Xie, et al. (18), že tyto vegetační indexy jsou spojené s fyziologickým stavem rostliny.

Vegetační index NDVI detekuje dobře porost chmele jak na konvenční chmelnici, tak i na biochmelnici po celé vegetační období. Nižší hodnoty na západní straně biochmelnice zobrazuje v průběhu vegetačního období o něco později než indexy $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$. Lze tedy souhlasit s Padua et. al. (11), který ovšem shrnul poznatky na případu vinic, že mapy vitality pomocí NDVI mohou zemědělcům získat relativní poznatky, na základě kterých můžou pochopit stav pole a udělat tak včasné opatření problematických částí. Lze tedy potvrdit, že index detekuje dobře listovou plochu, ale v místech, kde je nějaký problém ukazuje nižší hodnoty indexu nebo to, že porost není v daném místě tak hustý. Průměrné hodnoty NDVI se na klasické konvenční chmelnici a biochmelnici Stekník pohybují ve vegetačním v roce 2022 v rozmezí od 0,3 do 0,76. Když to srovnáme s Jungese et. al. (30), tak ten naměřil ve vegetačním období vinice ručním senzorem 60 cm nad porostem hodnoty NDVI od 0,45 do 0,85. Což dle mého názoru není až takový rozdíl. Zjištěná průměrná hodnota 0,3 může být zkreslena půdou mezi řádky chmele. Matese et. al. (31) pomocí bezpilotní prostředku zjistil průměrné hodnoty NDVI za vegetační období vinice v rozmezí od 0,2 do 0,9.

Zpracované snímky pomocí RGB indexu TGI, který se používá pro odhad obsahu chlorofylu, velmi dobře detekuje řádky porostu. I proto má nižší průměrné hodnoty z důvodu, že je na snímcích dobře vidět holá půda v meziřádcích téměř po celé vegetační období. Dle McKinnona (22) vegetační index TGI nekoreluje s vegetačním indexem NDVI. V diplomové práci byl korelační koeficient mezi TGI a NDVI vypočítán s hodnotou 0,84. McKinnon (22) uvádí, že TGI není spolehlivý indikátor zdraví plodin. Na biochmelnici, kde

je porost chmele napadený plísní, vegetační index TGI nevykazuje žádnou velkou variabilitu oproti ostatním místům na chmelnici.

Když srovnáme cenu za pořízení bezpilotního prostředku s multispektrální kamerou a dalším příslušenstvím, která bude cca 500 000 Kč a snímků z komerčních družic, které budou s větším počtem spektrálních pásem a prostorovým rozlišením, za celé vegetační období může dosáhnout až 196 200 Kč. Samozřejmě u bezpilotního prostředků je zapotřebí započítat práci při snímání jednotlivých snímků za celé vegetační období. V případě snímání malých ploch, tak jak bylo provedeno v této práci, je efektivnější využití snímků z bezpilotních prostředků. Dle Matese et. al. (31) jsou nákladově nejefektivnější snímky z bezpilotních prostředků vinic přibližně o rozloze 5 hektarů. Naopak nejméně ekonomické jsou snímky z bezpilotních prostředků pro plochy větší než 50 hektarů.

10 Závěr

První část práce se zabývala základními poznatky o chmelu a dálkovém průzkumu Země. Pomocí dostupných zdrojů byla popsána stavba a složení chmele otáčivého, životní cyklus plodiny, vlivy, které působí na výnos a jednotlivé odrůdy pěstované v České republice. Dále byla popsána základní podstata dálkového průzkumu Země, elektromagnetické spektrum, družice a bezpilotní prostředky. Zejména pomocí odborných článků byly popsány vybrané spektrální indexy a vhodné metody snímání a zpracování snímků speciálních plodin jako je chmel a vinná réva, která má podobný princip pěstování.

Pro praktickou část práce byly použity snímky z bezpilotního prostředku s multispektrální kamerou z chmelařského institutu Stekník, který leží v žatecké chmelařské oblasti. Snímky byly pořízené ve vegetačním období na klasické konvenční chmelnici a biochmelnici v roce 2022. Pro porovnání byla vybrána odrůda Premiant, která se pěstuje jak na klasické konvenční chmelnici, tak i na biochmelnici. Zjištěné poznatky z rešeršní části práce byly využity k výběru čtyř vhodných spektrálních indexů pro monitorování porostu chmele otáčivého.

Mezi vybranými spektrálními indexy, které měly zkoumat variabilitu chmelnic, byl nejpoužívanější index NDVI, který sloužil primárně k porovnávání s ostatními vybranými indexy. Dále pak RGB index TGI a indexy, které obsahují Red-edge pásmo, $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$. Spektrální indexy byly vypočítány v softwaru Pix4D mapper. Další zpracování snímků probíhalo v softwaru ENVI, kde byla provedena operace prahování Otsovou metodou, která měla zachytit na snímku pouze porost chmele bez půdy meziřadí. Po tomto zpracování nebylo se snímky dál pracováno z důvodu nedetekování porostu u vegetačních indexů $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$ v západní části biochmelnice od snímků pořízených začátkem srpna. V těchto místech byla biochmelnice promáčená, listy zbarvené žlutě a porost byl napaden plísní.

Snímky s vypočtenými spektrálními indexy byly poté zpracovány a vyhodnocovány ve volně přístupné softwaru QGIS. Indexy $CI_{Red-edge}$ a $CI_{Red\&Red-edge}$ ukazovaly nižší hodnoty v západní části biochmelnice již ze začátku vegetačního období. Nižší hodnoty jsou vidět i v jiných částech biochmelnice, ale i v částech konvenční chmelnice v průběhu vegetačního

období. U spektrálního indexu NDVI se tento problém projevuje později, a ne tak výrazně jako u předešlých indexů používající Red-edge pásmo. Lze tedy konstatovat, že spektrální indexy $CI_{\text{Red-edge}}$, $CI_{\text{Red\&Red-edge}}$ a NDVI dobře detekují porost chmele, a tedy odhad listové plochy, ale i zdraví plodiny. Spektrální index TGI využívající pouze pásma RGB detekuje porost chmele také dobře, ale zdraví plodiny je detekovatelné velmi těžko. Znamená to, že levnější kamery využívající pouze pásem RGB jsou pro odhad listové plochy chmele vhodné.

Z hlediska ekonomického využití snímku těchto dvou chmelnic po delší časové období jsou rentabilnější snímky z bezpilotních prostředků než z komerčních družic. Ovšem v případě větších pozemků či většího zemědělského podniku je určitě na zvážení, co je výnosnější, zda snímky z bezpilotních prostředků, komerčních družic či volně dostupných družic. Jelikož je pak důležité, jakým způsobem se naloží se získanými informacemi, jaká agrotechnická opatření budou provedena, a jestli to případně povede k snížení spotřeby hnojiva, ochranných prostředků či k zvýšení výnosu.

Pro zjištění nejvhodnější metody monitorování chmele jak z hlediska technického, ekonomického, ale i ochrany životního prostředí je zapotřebí dalších výzkumů. Tyto výzkumy by měly porovnávat snímky z volně dostupných družic, komerčních družic a bezpilotních prostředků a vhodných spektrálních indexů ve spolupráci s chmelaři, kteří budou zaznamenávat variabilně provedená agrotechnická opatření na chmelnicích po daném monitorování chmelnice po několika vegetačních sezón. Tím se zjistí o kolik se sníží spotřeba hnojiva a ochranných prostředků, tedy náklady, a jakým způsobem se zvýší výnosnost chmele.

11 Seznam použitých zdrojů

1. **Čapounová, Kateřina a kol.** *Réva vinná a chmel - Obrázková statistika o vinohradech, chmelnicích*. Národní zemědělské muzeum. [Online] 2021 [cit: 22. Listopad 2022]. ISBN 978-80-88270-21-8. Dostupné z: <https://www.nzm.cz/file/9a87f9d4b8577506b010b67741ecf292/34664/NZM%20vino%20a%20chmel%20n%C3%A1hled.pdf>..
2. **Rybáček, Václav.** *Chmelařství*. 2.vydání. Chrástany: Agrosience spol. s r.o., 2020. ISBN 978-80-906121-4-3.
3. **Ježek, Josef.** *Chmel 2015 Příručka pro pěstitele*. Žatec, 2015. ISBN 978-80-86836-98-0.
4. **Dobrovolný, Petr.** *Dálkový průzkum Země*. Brno : Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Katedra Geografie, 1998. ISBN 80-210-1812-7.
5. **Svatoňová, Hana a Lauermann, Lubomír.** *Dálkový průzkum Země - aktuální zdroj informací*. Brno: Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, 2010. ISBN 978-80-210-5162-1.
6. **Halounová, Lena a Pavelka, Karel.** *Dálkový průzkum Země*. Praha : ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1
7. **Zwinkels, Joanne.** Light, Electromagnetic Spectrum. In: *LUO, Ronnier, ed. Encyclopedia of Color Science and Technology* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, 2015-09-09, s. 1-8 [cit. 5. Listopad 2022]. ISBN 978-3-642-27851-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-27851-8_204-1
8. **Baronski, G. V. G; Rokne, J. G. .** A practical approach for estimating the red edge position of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2007, 26(3), 503-521 [cit: 5. Listopad 2022.] ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431160512331314029..

9. **Segarra, Joel, et al.** Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy* [online]. 2020, 10(5) [cit. 12. Říjen 2020]. ISSN 2073-4395. Dostupné z: doi:10.3390/agronomy10050641.
10. **Žížala, Daniel; Lukas, Vojtěch; Kumhálová, Jitka.** Dálkový průzkum Země a precizní zemědělství. [online] 2021 [cit: 12. Říjen 2022]. Dostupné z: <https://www.ctpz.cz/publikace/dalkovy-pruzkum-zeme-a-precizni-zemedelstvi-1068>.
11. **Pádua, Luís, et al.** Vineyard Variability Analysis through UAV-Based Vigour Maps to Assess Climate Change Impacts. *Agronomy* [online]. 2019, 9(10) [cit: 27. Listopad 2022]. ISSN 2073-4395. Dostupné z: doi:10.3390/agronomy9100581.
12. **Xue, Jinru; Su, Baofeng.** Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors* [online] 2017, 1-17 [cit: 30. Říjen 2022]. ISSN 1687-725X. Dostupné z: doi: 10.1155/2017/1353691.
13. **Lukas, Vojtěch; Kren, Jan.** *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství: metodika pro praxi*. Brno: Mendelova univerzita v Brně [Online] 2011. [cit: 5. Zář 2022]. ISBN 978-80-7375-562-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/234842888_Mapovani_variability_pudy_a_porostu_v_preciznim_zemedelstvi_Metodika_pro_praxi. 978-80-7375-562-1.
14. **Giovos, Rigas, et al.** Remote Sensing Vegetation Indices in Viticulture: A Critical Review. *Agriculture* [online]. 2021, 11(5) [cit: 30. Říjen 2022]. ISSN 2077-0472. Dostupné z: doi: 10.3390/agriculture11050457.
15. **Klem, Karel.** *Využití měření spektrální odrazivosti a odvozených specializovaných vegetačních indexů v pěstební technologii jarního ječmene: (metodika pro zemědělskou praxi)*. Kroměříž: Agrotest fyto, 2014. ISBN 978-80-87555-12-5.
16. **Vegetation Indices.** *Geospatial Solutions & Analytics*. Harris Geospatial Solutions Inc. [online]. 2022. [cit: 30. Říjen 2022]. Dostupné z: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/vegetationindices.html>.

17. Khaliq, Aleem, et al. Comparison of Satellite and UAV-Based Multispectral Imagery for Vineyard Variability Assessment. *Remote Sensing* [online]. 2019, 11(4) [cit: 15. Listopad 2022]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi: 10.3390/rs11040436.

18. Xie, Qiaoyun, et al. Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [online]. 2018, 11(5) [cit: 15. Listopad 2022]. ISSN 1939-1404. Dostupné z: doi:10.1109/JSTARS.2018.2813281.

19. Ayanlade, Ayansina. Remote sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques. *Geoinformatica Polonica* [online]. 2017, 16, 7-17 [cit: 15. Listopad 2022]. ISSN 16422511. Dostupné z: doi: 10.4467/21995923GP.17.001.7188.

20. Furukawa, Flavio, et al. Comparison of RGB and Multispectral Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Vegetation Coverage Changes on a Landslide Area. *Drones*. [online]. 2021, 5(3) [cit: 17. Listopad 2022]. ISSN 2504-446X. Dostupné z: doi:10.3390/drones5030097.

21. Hamdon, Alaa, Aljawwadi, Taha, Al-Qubaa, Abdalrahman. Using uavs/drones and vegetation indices in the visible spectrum to monitoring agricultural lands. *The Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. [online]. 2022, 52(3):601-610 [cit: 17. Listopad 2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/361536156_USING_UAVsDRONES_AND_VEGETATION_INDICES_IN_THE_VISIBLE_SPECTRUM_TO_MONITORING_AGRICULTURAL_LANDS.

22. McKinnon, Tom and Hoff, Paul. Comparing RGB-Based Vegetation Indices with NDVI for Drone Based Agricultural Sensing. [online].2017 [cit: 30. Říjen 2022]. Dostupné z: <https://docplayer.net/54910810-Comparing-rgb-based-vegetation-indices-with-ndvi-for-drone-based-agricultural-sensing.html>.

23. Bendig, Juliane, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation [online]. 2015, 39, 79-87 [cit: 27. Listopad 2022]. ISSN 1569-8432. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jag.2015.02.012. ISSN 1569-8432.

24. Drissi, Rachid, et al. Nondestructive Measurement of Grapevine Leaf Area. *Agronomy Journal* [online]. 2009, 101(1), 226-231 [cit: 19. Listopad 2022]. ISSN 0002-1962. Dostupné z: doi: 10.2134/agronj2007.0167.

25. Pokorný, Radek. Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních. *Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.* [online] 2014 [cit: 17. Listopad 2022]. ISBN 978-80-87902-08-0. Dostupné z: <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180899>.

26. Viña, Andrés, et al. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2011, 115(12), 3468-3478 [cit: 17. Listopad 2022]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi: 10.1016/j.rse.2011.08.010.

27. Starý, Karel; Jelínek, Zdeněk; Kumhálová, Jitka, Chyba, J.; Balážová, K. Comparing RGB-based vegetation indices from uav imageries to estimate hops canopy area. *Agronom Research* [online]. 2020, 8(4):2592-2601 [cit: 28. Červenec 2022.] Dostupné z: doi: 10.15159/AR.20.169.

28. Pastonchi, Laura, et al. Comparison between satellite and ground data with UAV-based information to analyse vineyard spatio-temporal variability. *OENO One* [online]. 2020, 2020, 54(4), 919-934 [cit: 27. Listopad 2022]. ISSN 2494-1271. Dostupné z: doi:10.20870/oeno-one.2020.54.4.4028.

29. Matese, Alessandro; Di Gennaro, Salvatore. Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture. *Agriculture* [online]. 2018, 8(7):116 [cit: 15. Listopad 2022]. ISSN 2077-0472. Dostupné z: doi:10.3390/agriculture8070116.

30. Junges, Amanda; Fontana, Denise; Lampugnani Cristian. Relationship between the normalized difference vegetation index and leaf area in vineyards. *Bragantia*

[online]. 2019, 78(2), 297-305 [cit: 19. Listopad 2022]. ISSN 1678-4499 Dostupné z: doi: 10.1590/1678-4499.2018168.

31. Matese, Alessandro, et al. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing* [online]. 2015, 7(3), 2971-2990. [cit: 27. Listopad 2022.] ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs70302971.

32. Pádua, Luís, et. al. Vineyard properties extraction combining UAS-based RGB imagery with elevation data. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2018, 39(15-16), 5377-5401 [cit: 27. Listopad 2022]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2018.1471548.

33. Tenkorang, Frank; Lowenberg-DeBoer, James. On-Farm Profitability of Remote Sensing in Agriculture. *Journal of Terrestrial Observation* [online]. 2008 [cit: 4. Prosinec 2022.] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/27235703_On-Farm_Profitability_of_Remote_Sensing_in_Agriculture.

34. Brant, Václav a Kroulík, Milan a kol. *Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby*. České Budějovice : Kurent, 2020. ISBN 978-80-87111-81-9.

35. Sozzi, Marco, et al. Economic Comparison of Satellite, Plane and UAV-Acquired NDVI Images for Site-Specific Nitrogen Application: Observations from Italy. *Agronomy* [online]. 2021, 11(11) [cit: 4. Prosinec 2022]. ISSN 2073-4395. Dostupné z: doi: 10.3390/agronomy11112098.

36. Výzkum a ochrana chmele a chmelové sadby / Chmelařský institut Žatec. [Online] Chmelařský institut s.r.o. [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: <http://www.chizatec.cz/ucelove-hospodarstvi-steknik/?arc=37&>.

37. Bohemia Top Hop. [Online] Bohemia Top Hop. [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: <http://www.hop.cz/home.php?pg=obchod&lg=cz>.

38. VEGETAČNÍ ZPRÁVA č. 1 ŽATECKÁ CHMELAŘSKÁ OBLAST Duben, 2022. [Online] Bohemia Top Hop . [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: http://www.hop.cz/home.php?pg=vegetacni_db&id=64&lg=cz.

39. VEGETAČNÍ ZPRÁVA č. 2 ŽATECKÁ CHMELAŘSKÁ OBLAST Květen, 2022. [Online] Bohemia Top Hop . [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: http://www.hop.cz/home.php?pg=vegetacni_db&id=65&lg=cz.

40. VEGETAČNÍ ZPRÁVA č. 3 ŽATECKÁ CHMELAŘSKÁ OBLAST Červen, 2022. [Online] Bohemia Top Hop . [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: http://www.hop.cz/home.php?pg=vegetacni_db&id=66&lg=cz.

41. VEGETAČNÍ ZPRÁVA č. 4 ŽATECKÁ CHMELAŘSKÁ OBLAST Červenec, 2022. [Online] Bohemia Top Hop . [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: http://www.hop.cz/home.php?pg=vegetacni_db&id=67&lg=cz.

42. VEGETAČNÍ ZPRÁVA č. 5 ŽATECKÁ CHMELAŘSKÁ OBLAST Srpen, 2022. [Online] Bohemia Top Hop . [cit: 9. Leden 2023]. Dostupné z: http://www.hop.cz/home.php?pg=vegetacni_db&id=68&lg=cz.

43. Ministerstvo Zemědělství. Situační a výhledová zpráva chmel, pivo 2022. [Online] Praha, 2022 [cit:19. Březen 2023] ISBN 978-80-7434-678-1. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/715991/Chmel_2022_Web.pdf

12 Přílohy

Příloha 1 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 10.5.2022

Příloha 2 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 18.5.2022

Příloha 3 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 31.5.2022

Příloha 4 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 10.6.2022

Příloha 5 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 21.6.2022

Příloha 6 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 9.7.2022

Příloha 7 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 26.7.2022

Příloha 8 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 2.8.2022

Příloha 9 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 23.8.2022

Příloha 10 Biochmelnice odrůda Premiant 10.5.2022

Příloha 11 Biochmelnice odrůda Premiant 18.5.2022

Příloha 12 Biochmelnice odrůda Premiant 31.5.2022

Příloha 13 Biochmelnice odrůda Premiant 10.6.2022

Příloha 14 Biochmelnice odrůda Premiant 21.6.2022

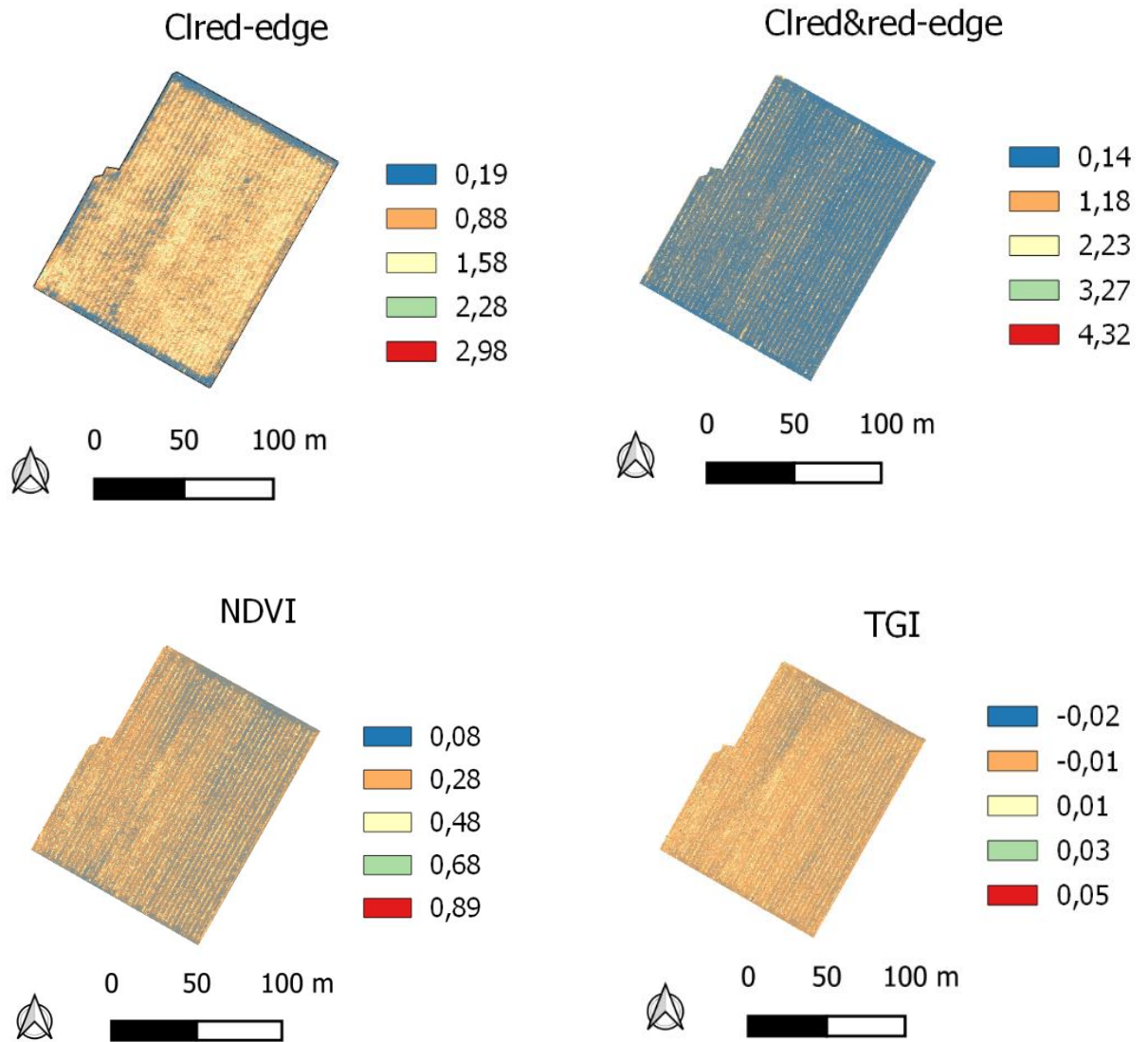
Příloha 15 Biochmelnice odrůda Premiant 9.7.2022

Příloha 16 Biochmelnice odrůda Premiant 2.8.2022

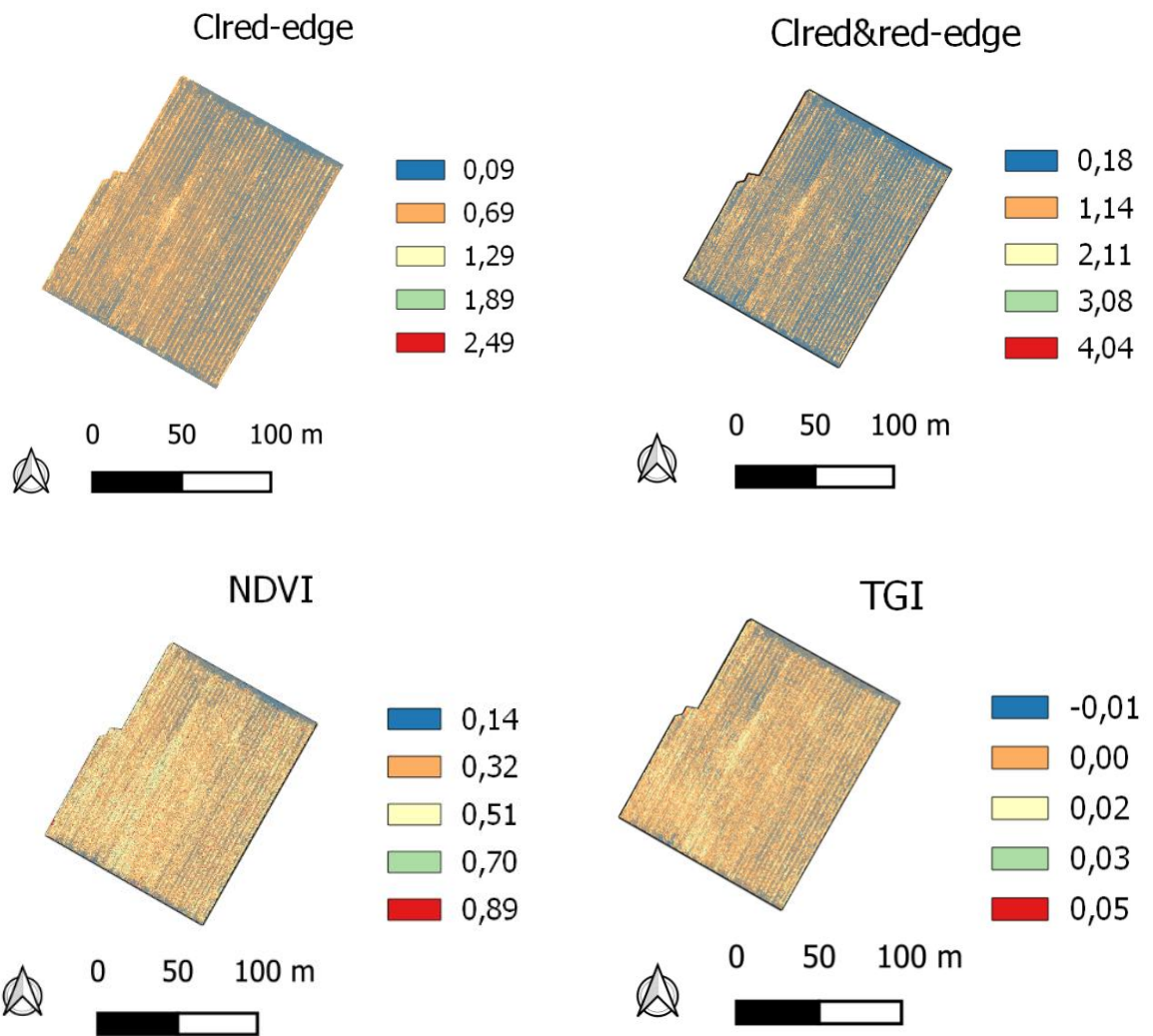
Příloha 17 Biochmelnice odrůda Premiant 11.8.2022

Příloha 18 Biochmelnice odrůda Premiant 23.8.2022

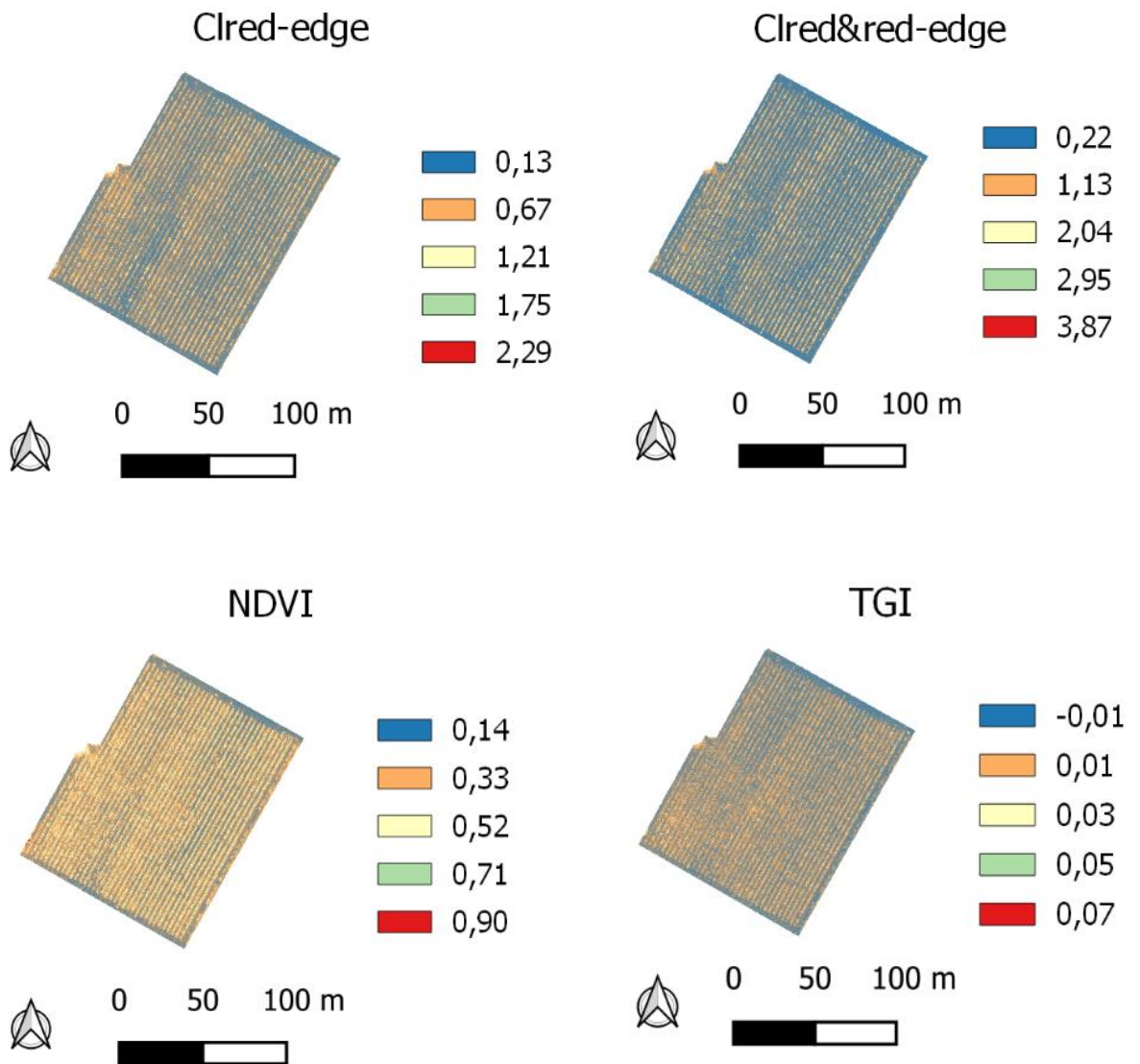
Příloha 1 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 10.5.2022

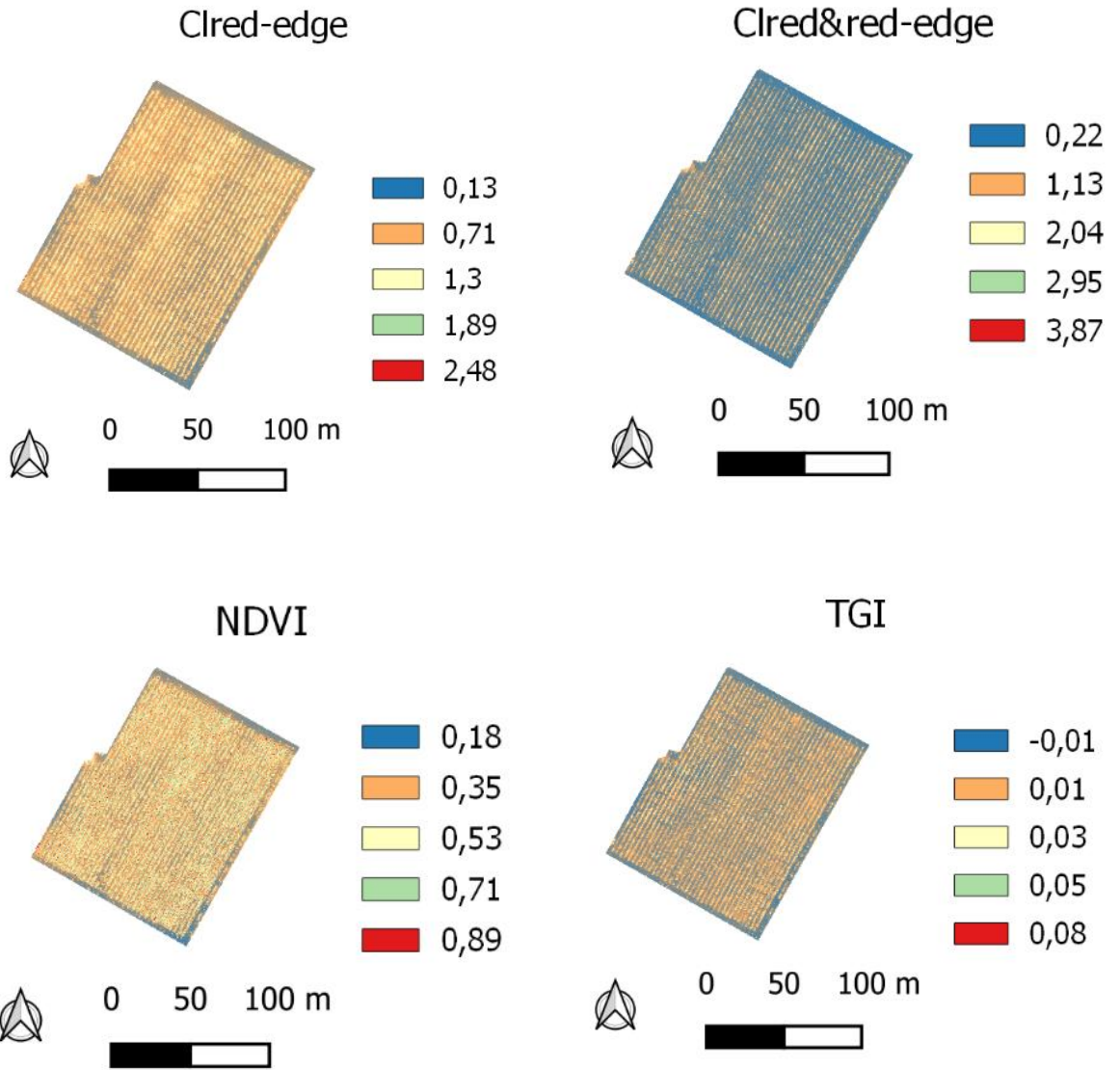


Příloha 2 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 18.5.2022

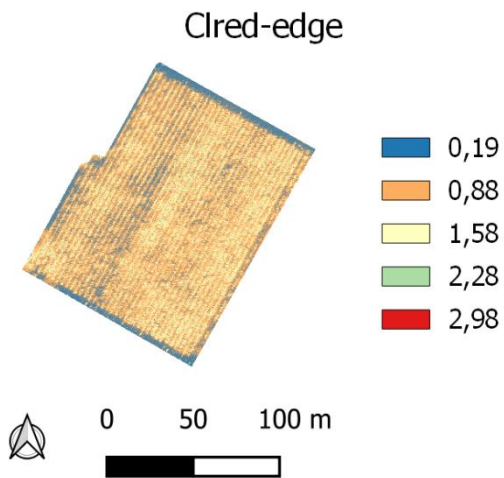


Příloha 3 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 31.5.2022

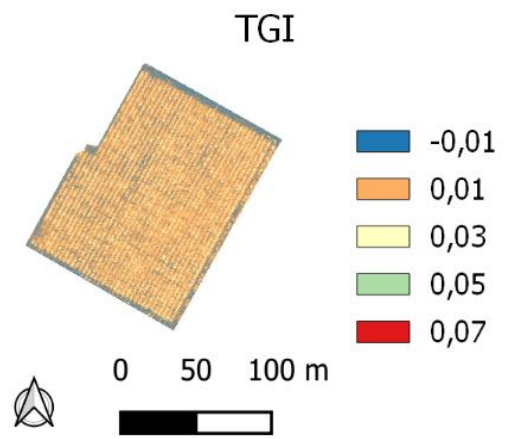
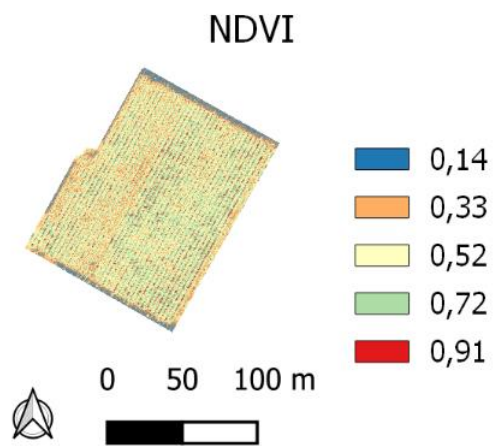




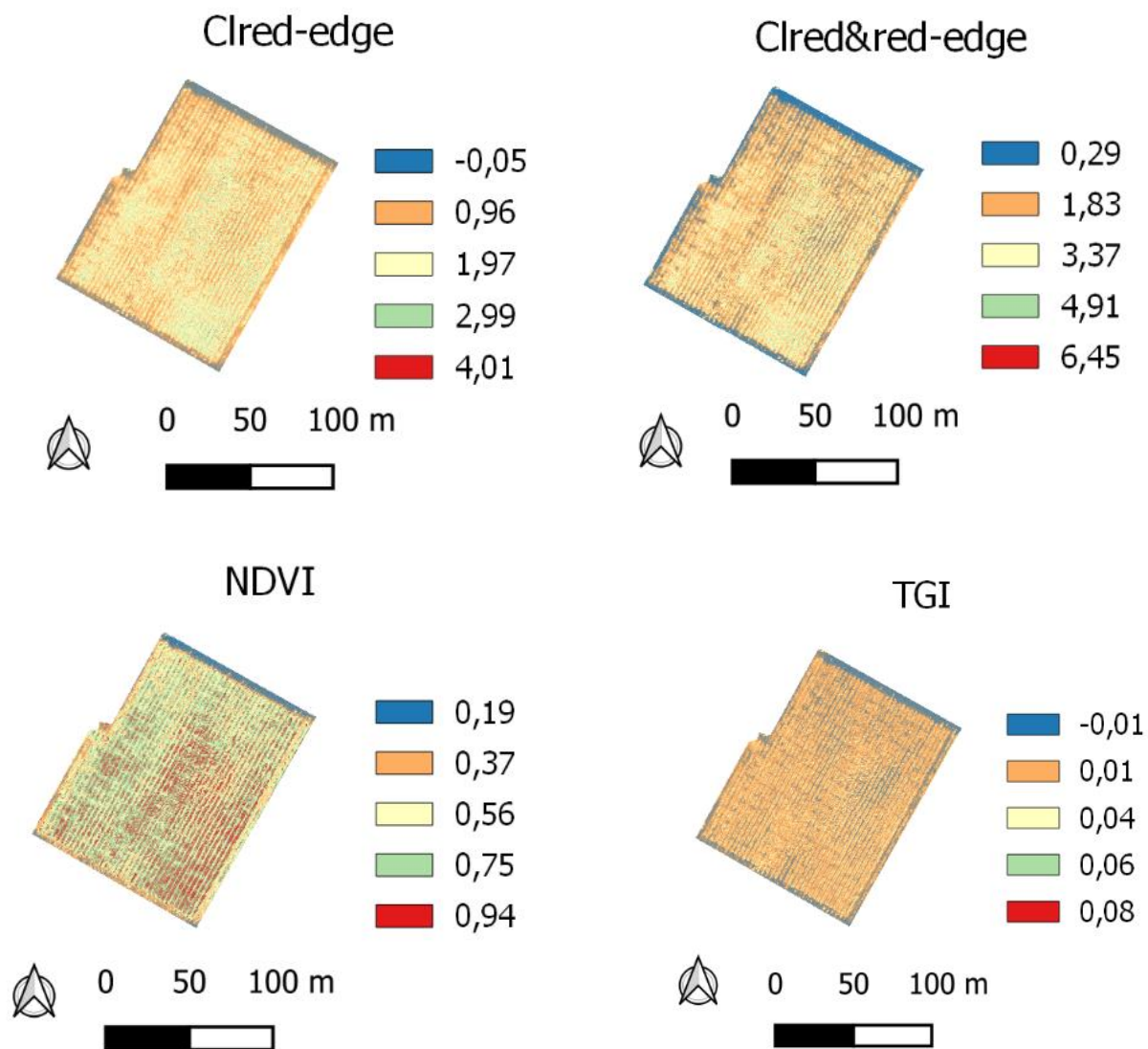
Příloha 5 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 21.6.2022

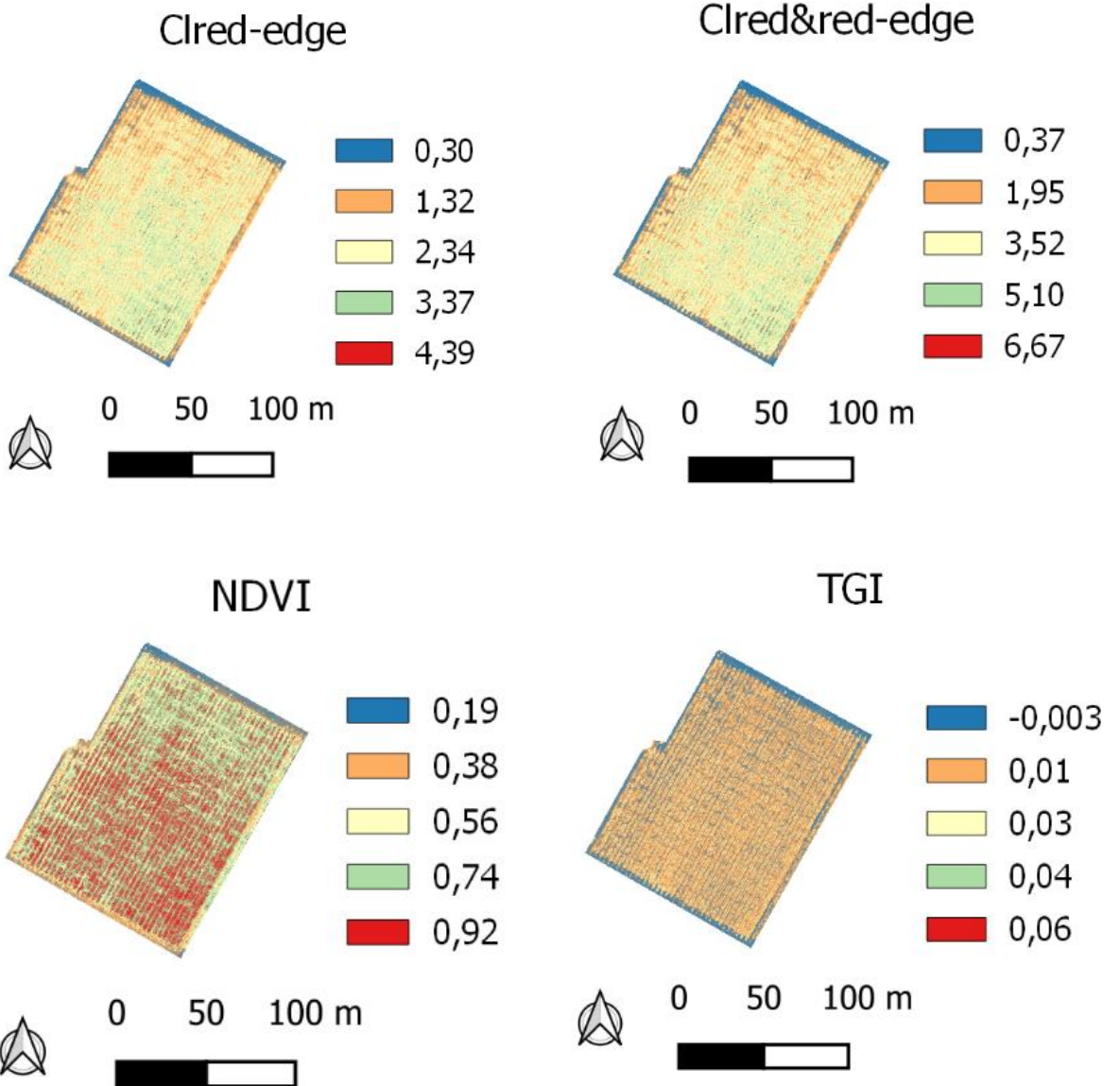


Z důvodu technických problémů
snímek z
Cred&red-edge chybí.

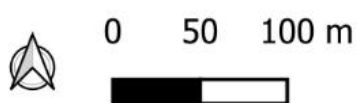
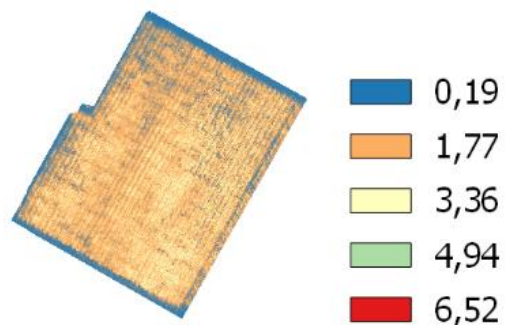


Příloha 6 Konvenční chmelnice odrůda Premiant 9.7.2022

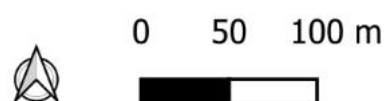
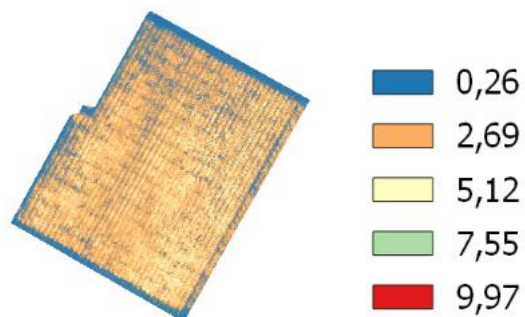




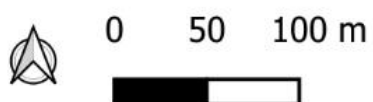
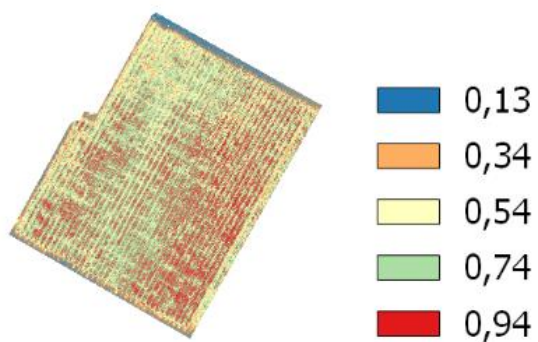
Clred-edge



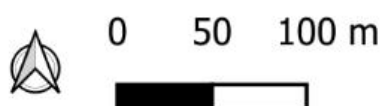
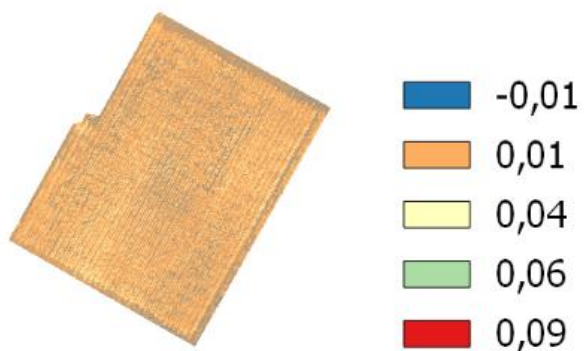
Clred&red-edge



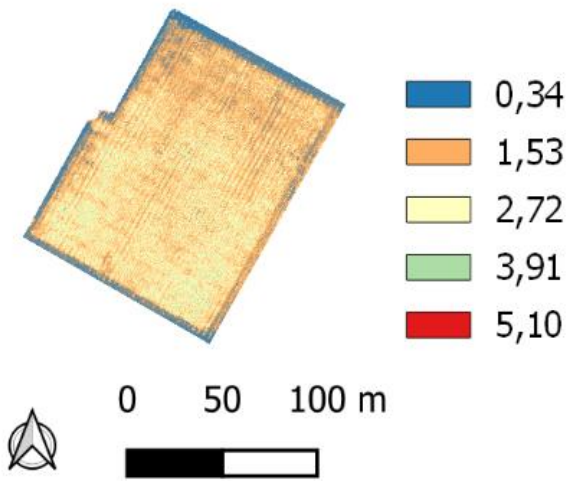
NDVI



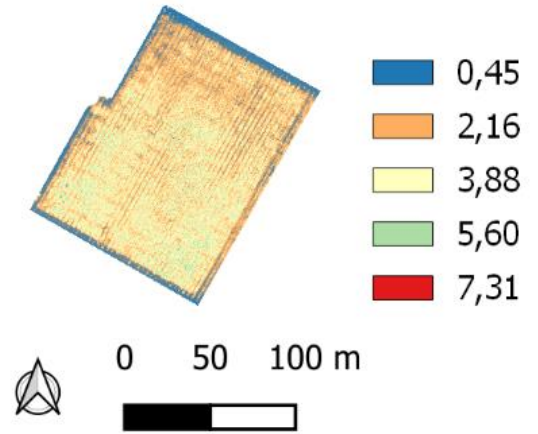
TGI



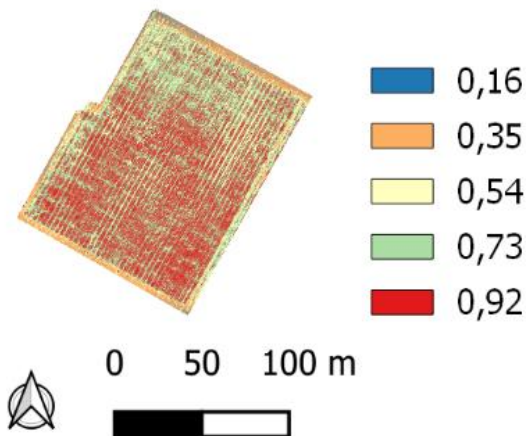
Clred-edge



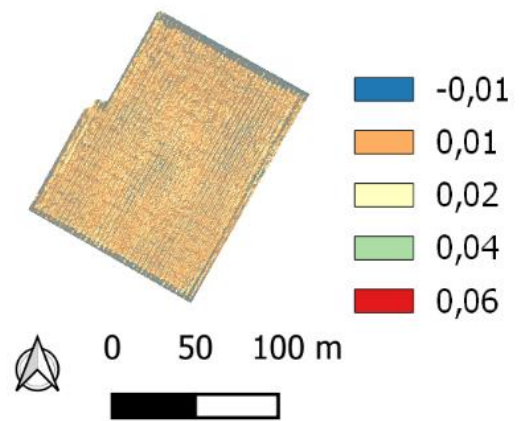
Clred&red-edge



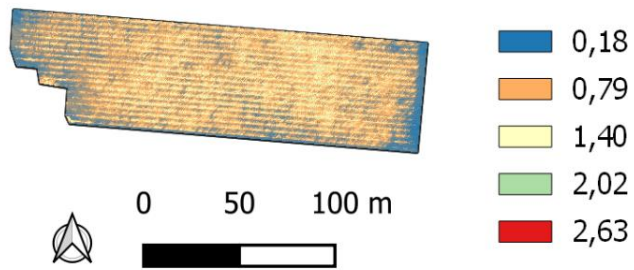
NDVI



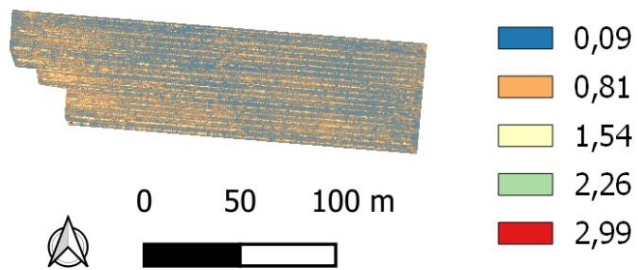
TGI



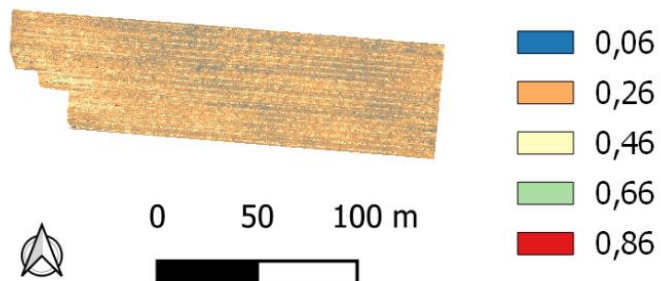
Clred-edge



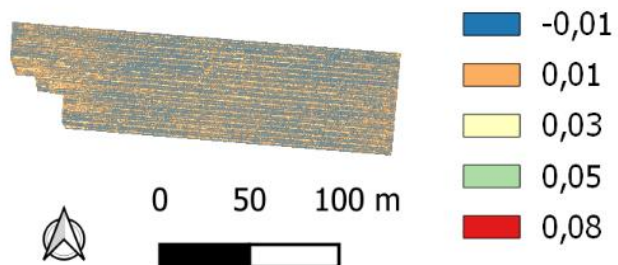
Clred&red-edge



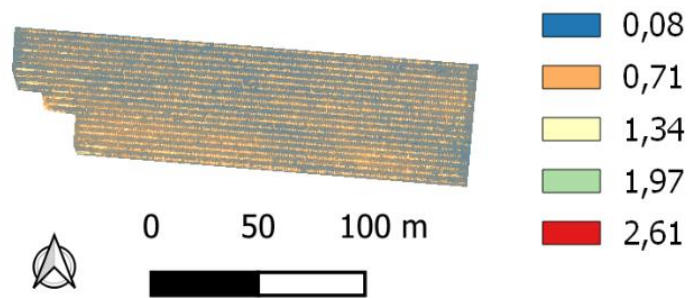
NDVI



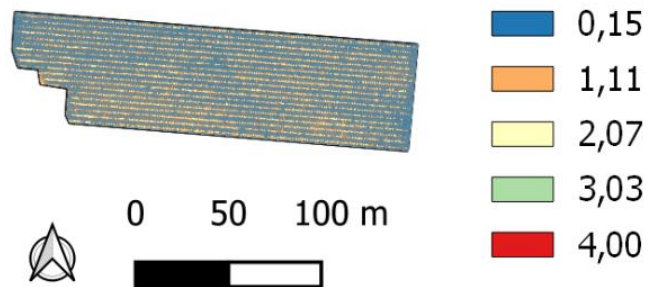
TGI



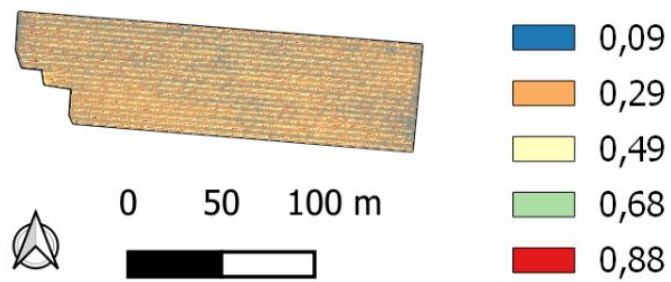
Clred-edge



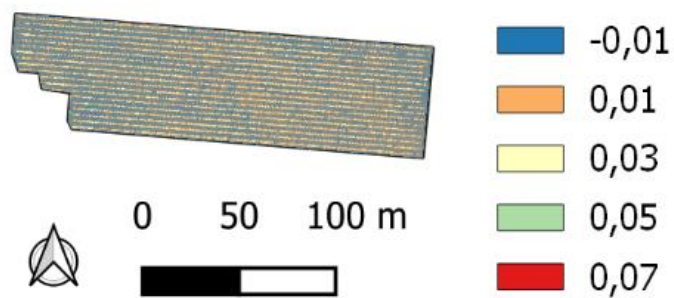
Clred&red-edge



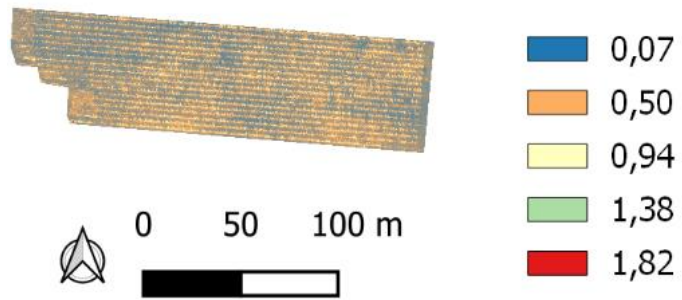
NDVI



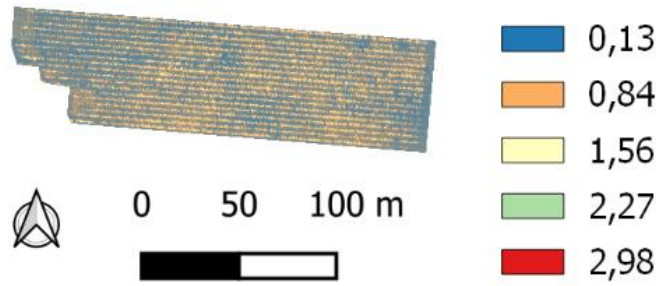
TGI



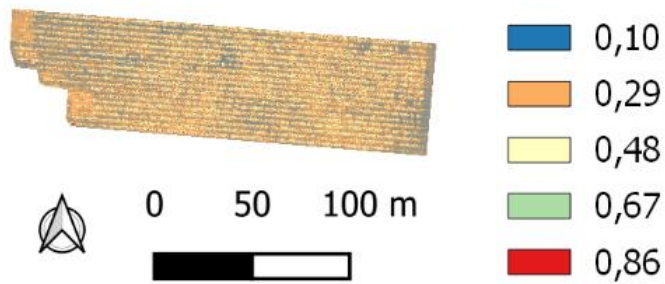
Clred-edge



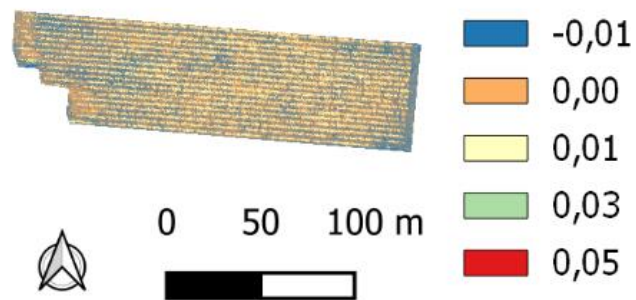
Clred&red-edge



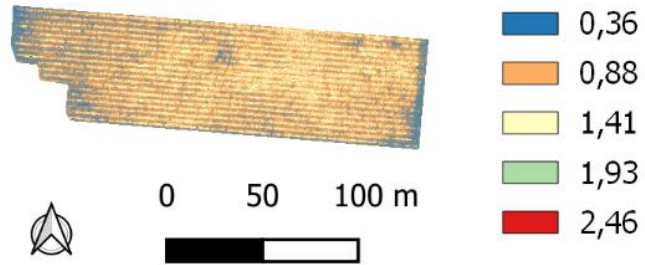
NDVI



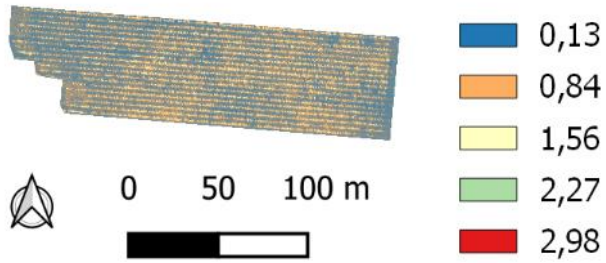
TGI



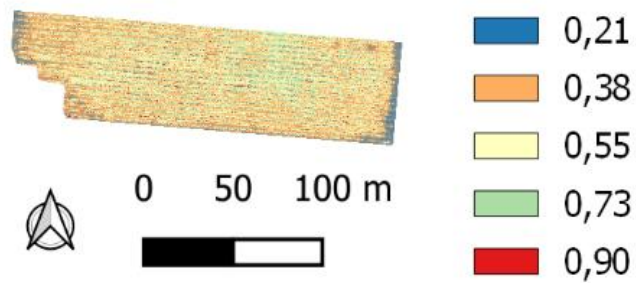
Clred-edge



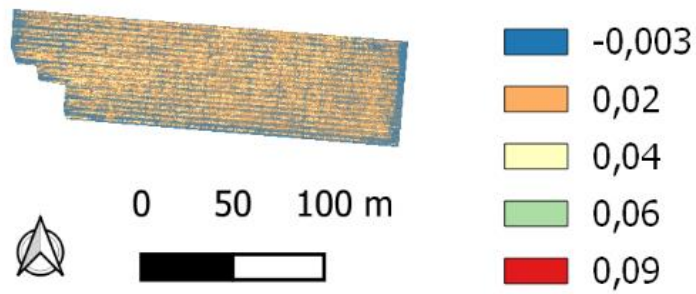
Clred&red-edge



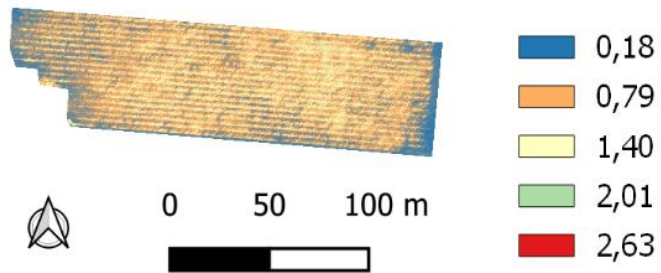
NDVI



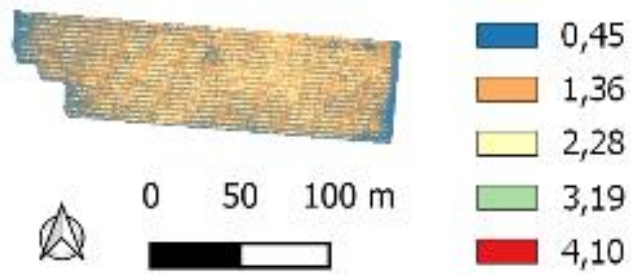
TGI



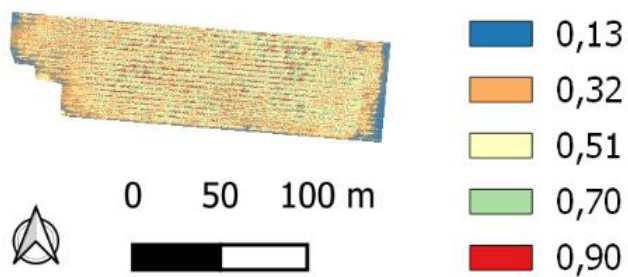
Clred-edge



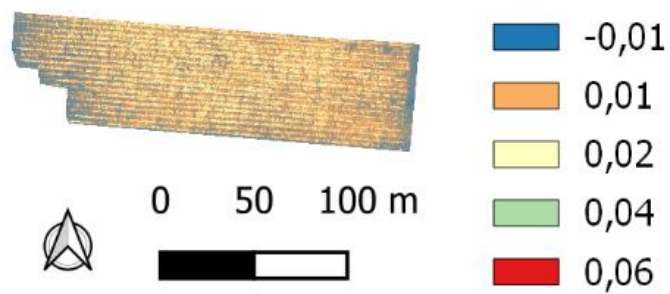
Clred&red-edge



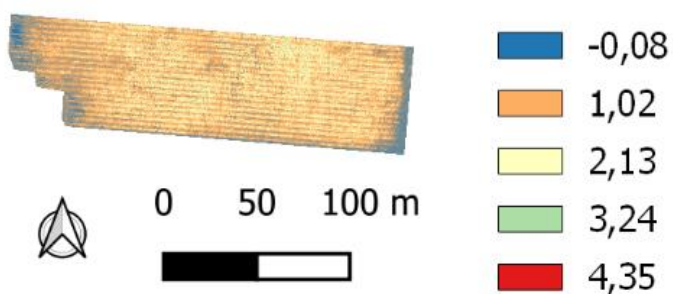
NDVI



TGI



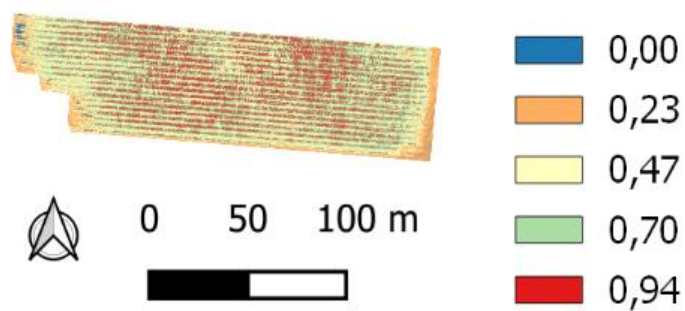
Clred-edge



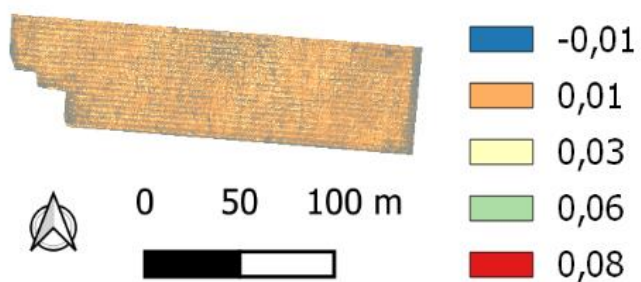
Clred&red-edge



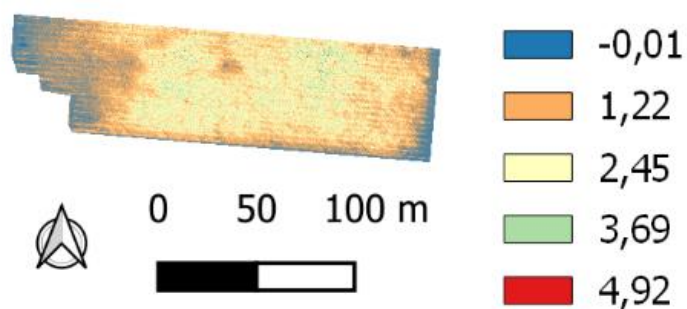
NDVI



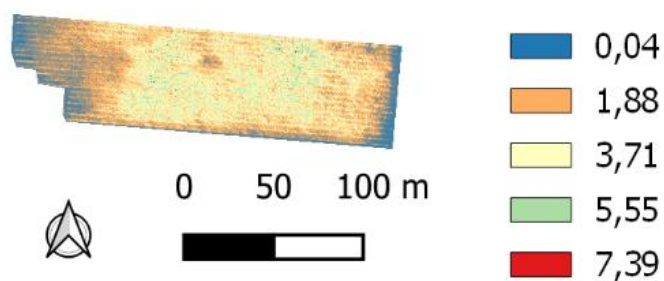
TGI



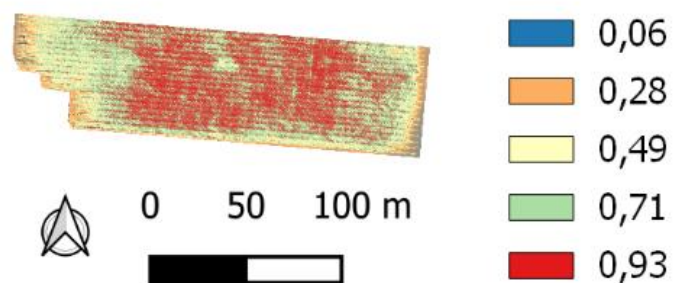
Clred-edge



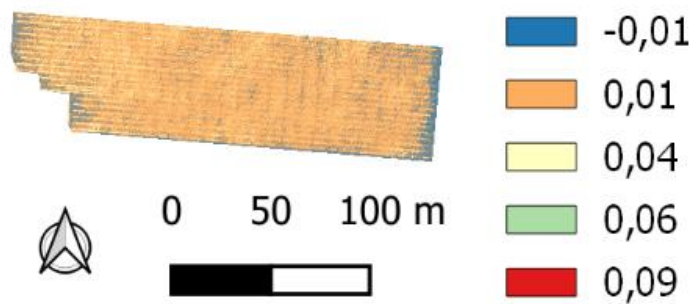
Clred&red-edge



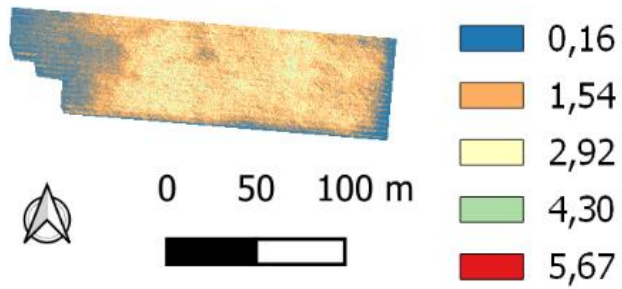
NDVI



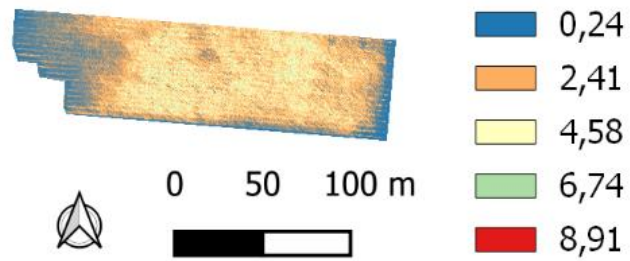
TGI



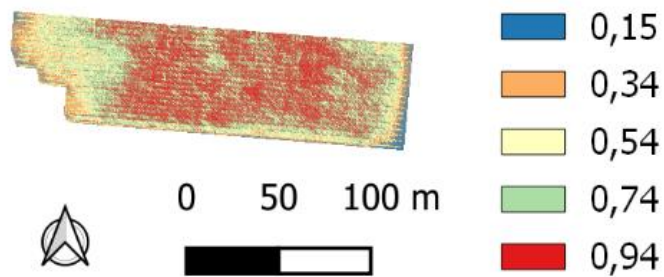
Clred-edge



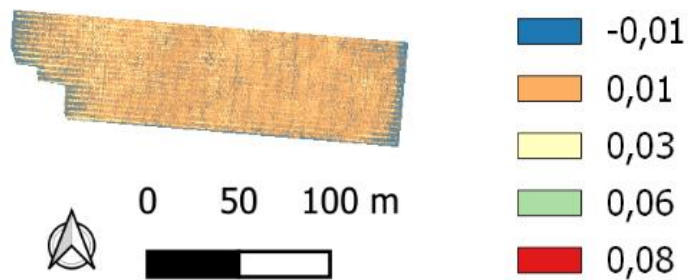
Clred&red-edge



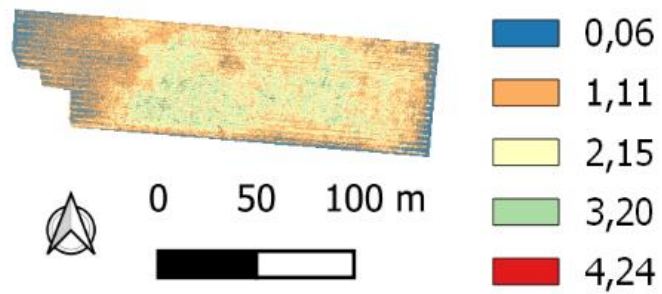
NDVI



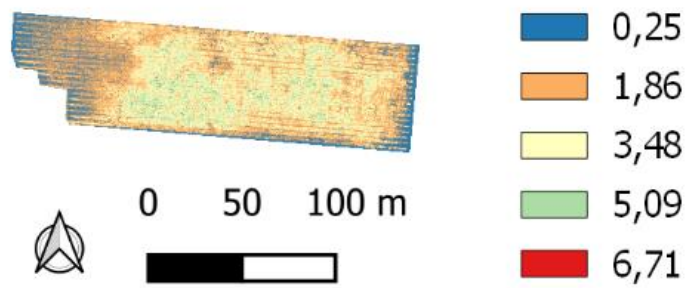
TGI



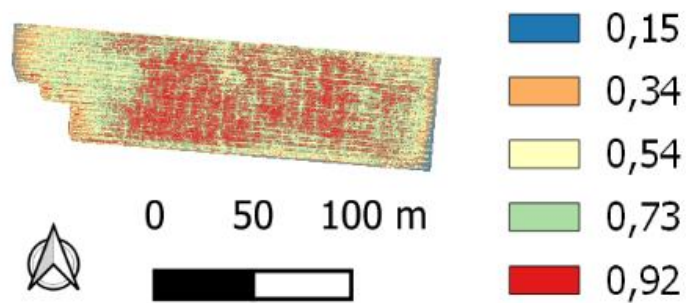
Clred-edge



Clred&red-edge



NDVI



TGI

