

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Analýza termálních snímků z bezpilotního prostředku pro určení  
stresových faktorů a variability odrůd chmele**

diplomová práce

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

Autor: Bc. Ondřej Kubát

© 2022 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Ondřej Kubát

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Analýza termálních snímků z bezpilotního prostředku pro určení stresových faktorů a variability odrůd chmele**

Název anglicky

**Analysis of thermal images from an unmanned aerial vehicle to determine stress factors and variability of hop varieties**

---

### Cíle práce

- zpracovat rešerši k problematice bezpilotních prostředků, příslušenství, zpracování termálních snímků a jejich využití v zemědělství;
- vybrat a zpracovat vhodné zdroje dat;
- vzájemně porovnat výsledné modely a datové vrstvy z hlediska využitelnosti;
- ekonomicky zhodnotit využití datových sad pro účely zemědělství;

### Metodika

V rámci literární rešerše se autor seznámí a popíše problematiku využití bezpilotních prostředků pro účely monitorování zemědělských plodin. Dále se bude zabývat problematikou kamer, zpracování snímků a jejich využití pro zlepšení efektivity hospodaření na zemědělské půdě.

V praktické části se bude student zabývat kompletním zajištěním získání termálních dat pro zachycení stresových faktorů a variability porostů chmele od plánování letu, výběru kamer, stažení a zpracování snímků, jejich vyhodnocením a statistickou analýzou.

V diskuzi autor porovná výsledky své práce s dostupnou odbornou literaturou. Autor bude také diskutovat efektivitu a ekonomickou rentabilitu použití bezpilotních prostředků oproti jiným metodám získávání dat.

Řešení praktické části diplomové práce počítá s využitím bezpilotního prostředku eBeeX a jeho příslušenství, SW eMotion, Pix4D a QGIS.

## **Doporučený rozsah práce**

40 – 60 stran

## **Klíčová slova**

Bezpilotní prostředky, chmel, termální snímky, analýza obrazu

---

## **Doporučené zdroje informací**

- Comba, L., Gay, P., Primicerio, J., Aimonino, D.R. (2015). Vineyard detection from unmanned aerial systems images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 78-87.
- Gutierrez, S., Diago, M.P., Fernandez-Navales, J., Tardaguila, J. (2018). Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. *PLoS One* 13, e0192037.
- Mukherjee, A., Misraa, S., Raghuwanshi, N.S. (2019). A survey of unmanned aerial sensing solutions in precision agriculture. *Journal of Network and Computer Applications*. 148, 102461.
- 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:10.3390/agronomy9100581.
- Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas T., Moscholios I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172. 107148.

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2021/2022 LS – TF

## **Vedoucí práce**

doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

## **Garantující pracoviště**

Katedra využití strojů

---

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2021

**doc. Ing. Petr Šařec, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 19. 04. 2021

## Čestné prohlášení

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

V Praze dne

.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval doc. Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za poskytnuté rady, připomínky, ochotu a její pomoc při vedení práce. Své rodině za připomínky, trpělivost a pomoc při psaní mé práce.

# **Analýza termálních snímků z bezpilotního prostředku pro určení stresových faktorů a variability odrůd chmel**

## **Souhrn**

Diplomová práce se zabývá analýzou termálních snímků z bezpilotní platformy pro identifikaci stresových faktorů a variability mezi odrůdami chmele. Hlavním účelem bylo posoudit stav chmele v průběhu vegetačního období a určit využitelnost bezpilotní platformy a snímků z ní pořízených. Použitá metodika byla zajištění dat pomocí leteckých misí, jejich selekce, následné zpracování a jejich interpretace. Byly použity snímky z roku 2021 v oblasti chmelnic Stekník, které byly následně zpracovány v geoinformačním softwaru QGIS a hodnoty byly zobrazeny v MS Excel. Z výsledků lze interpretovat vyšší toleranci Žateckého poloraného červeňáku k teplotě než Premiant a také ze snímků zpracovaných v QGIS je vidět poškození v západní části biochmelnice, které bylo zapříčiněné podmáčením.

**Klíčová slova:** bezpilotní prostředky, chmel, termální snímky, analýza obrazu

## **Analysis of thermal images from an unmanned aerial vehicle to determine stress factors and variability of hop varieties**

## **Summary**

The topic of the master thesis is to analyze thermal images taken by unmanned platform to determine stress factors and variability of hop varieties. Main purpose was to compare hop state throughout the vegetation period and define usability of unmanned platform and images taken by it. Used methodology was acquisition of images, their selection, their postprocessing and presentation. Images of Stekník hop fields taken in 2021 were used after that they were processed in geographical information software QGIS and values were displayed via MS Excel. Outcomes can be described as Žatecký poloraný červeňák is more resistant against high temperatures than Premiant. There is crop damage in the western are of hop field caused by too much water in soil, what is seen in the image from QGIS software.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, hop, thermal images, image analysis

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE A METODIKA .....</b>	<b>2</b>
2.1	CÍL PRÁCE .....	2
2.2	METODIKA PRÁCE.....	2
<b>3</b>	<b>BEZPILOTNÍ PROSTŘEDKY .....</b>	<b>3</b>
3.1	KONSTRUKCE BEZPILOTNÍCH PROSTŘEDKŮ .....	3
3.1.1	<i>Multikoptéry .....</i>	<i>3</i>
3.1.2	<i>Bezpilotní letouny.....</i>	<i>5</i>
3.1.3	<i>Hybridní systémy .....</i>	<i>6</i>
3.1.4	<i>Pohon.....</i>	<i>6</i>
3.2	UŽITEČNÉ ZATÍŽENÍ .....	7
3.3	URČENÍ POLOHY .....	7
3.4	LEGISLATIVA .....	8
3.5	VYUŽITÍ V ZEMĚDĚLSTVÍ .....	9
<b>4</b>	<b>KAMERY.....</b>	<b>10</b>
4.1	TERMÁLNÍ KAMERA.....	11
4.1.1	<i>Detektor.....</i>	<i>11</i>
4.1.2	<i>Parametry.....</i>	<i>12</i>
4.1.3	<i>Tepelné záření.....</i>	<i>15</i>
4.2	MULTISPEKTRÁLNÍ KAMERA .....	15
<b>5</b>	<b>ANALÝZA OBRAZU .....</b>	<b>16</b>
5.1	GEOMETRICKÉ A RADIOMETRICKÉ KOREKCE.....	16
5.1.1	<i>Zdroje radiometrických chyb .....</i>	<i>16</i>
5.1.2	<i>Opravy radiometrických chyb.....</i>	<i>17</i>
5.1.3	<i>Zdroje geometrických chyb.....</i>	<i>17</i>
5.1.4	<i>Opravy geometrických chyb .....</i>	<i>17</i>
5.2	ZVÝRAZNĚNÍ OBRAZU .....	18
5.2.1	<i>Zvýraznění jednoho pásma.....</i>	<i>18</i>
5.2.2	<i>Zvýraznění pomocí více pásem .....</i>	<i>19</i>
5.3	KLASIFIKACE .....	19
5.3.1	<i>Segmentace obrazu .....</i>	<i>20</i>
5.3.2	<i>Klasifikační pravidla a příznaky .....</i>	<i>20</i>
5.3.3	<i>Druhy objektového rozpoznávání.....</i>	<i>21</i>
5.3.4	<i>Odhad přesnosti klasifikace.....</i>	<i>21</i>

5.4	TERMÁLNÍ SNÍMKY .....	22
5.4.1	<i>Vodní stres</i> .....	22
<b>6</b>	<b>CHMEL</b> .....	<b>23</b>
6.1	SKLIZEŇ .....	24
6.2	PĚSTOVÁNÍ.....	24
6.3	ŽATECKÝ POLORANÝ ČERVEŇÁK .....	25
6.4	SLÁDEK.....	25
6.5	PREMIANT.....	25
6.6	AGNUS .....	26
<b>7</b>	<b>VLASTNÍ PRÁCE</b> .....	<b>27</b>
7.1	PARAMETRY KŘÍDLA A TERMÁLNÍ KAMERY .....	29
7.2	ANALÝZA DAT .....	31
7.3	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	36
7.4	POROVNÁNÍ RŮZNÝCH DPZ.....	38
7.4.1	<i>Výhody a nevýhody satelitních snímků</i> .....	38
7.4.2	<i>Výhody a nevýhody leteckých snímků</i> .....	39
7.4.3	<i>Výhody a nevýhody bezpilotních snímků</i> .....	39
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>43</b>
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>46</b>



# 1 Úvod

Bezpilotní prostředky jsou jedním z inovativních prvků precizního zemědělství. V současnosti se zvyšují požadavky na výnosy, efektivitu a ekonomickou rentabilitu zemědělství, což vyžaduje inovativní přístup ve využívání nových technologií. Z těchto důvodů mají stále větší uplatnění bezpilotní prostředky a systémy. Bezpilotní prostředky rozhodně nejsou novinkou, používají se už několik desítek let a v zemědělství se především používají pro výzkumnou činnost a sběr dat. V této práci se seznámíme s tím, jak se tyto prostředky používají v praxi a čeho s nimi můžeme dosáhnout.

Tato práce se zabývá analýzou termálních snímků pro určení stresových faktorů a variability chmele. Termální snímky budou získány z platformy senseFly eBee X, kterým disponuje ČZU. Snímky jsou analyzovány pomocí vhodného geografického informačního softwaru. Výsledné informace mohou pomoci zlepšit výnosy určitých plodin, dále mohou přispět k optimalizaci používání zemědělských operací jako je aplikace hnojiva nebo prostředků na ochranu rostlin.

Druhá část práce obsahuje samotné zpracování, analýzu a porovnání termálních snímků. Ze zpracovaných dat lze vidět rozdílné teploty mezi odrůdami Žatecký poloraný červeňák a Premiant, které naznačují rozdíl v teplotní toleranci obou plodin. Dále budeme obeznámeni s dalšími možnostmi získávání snímků a porovnání efektivitu a ekonomické rentability použité platformy senseFly eBee X s dalšími bezpilotními prostředky.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Cílem je práce je vypracovat literární rešerši o problematice bezpilotních systémů, zpracování termálních snímků a jejich využití v zemědělství. Dále pak porovnat modely a datové vrstvy ze správných podkladových dat. Nakonec zpracovat ekonomické porovnání různých způsobů získávání snímků a zjistit výhodnost těchto způsobů pro zemědělství.

### **2.2 Metodika práce**

Informace a data pro teoretickou část jsou získána studiem odborné literatury, článků, prospektů, brožur atd. týkajících se dané problematiky.

Získávání termálních snímků pro praktickou část bude zajištěno pomocí bezpilotního prostředku senseFly eBee X na Žatecku. Následné zpracování a analýza snímků bude probíhat v softwarech eMotion, Pix4D a QGIS. Na závěr bude zpracováno ekonomické srovnání různého získávání snímků z bezpilotních prostředků a dalších zdrojů dat. V závěru budou porovnané výsledky z praktické části se získanými informacemi z teoretické části.

## 3 Bezpilotní prostředky

Jsou takové prostředky, které jsou ovládané na dálku a pilot není fyzicky přítomen na palubě. Tento fakt jim zajišťuje výhodu v jejich velikosti a hmotnosti, které jsou zpravidla o dost menší než u letadel s pilotem na palubě. Ovládání je dálkové a vyžaduje buď operátora, nebo pilota. Avšak některé lety jsou poloautonomní nebo autonomní, které jsou vykonávané pomocí připravené plně autonomní mise v softwaru bezpilotního prostředku, která je nastavena před letem a není tak potřeba aktivního pilotování během letu. (Karas, 2016), (Radoglou-Grammatikis, 2020)

První bezpilotní systém vyprojektoval anglický inženýr Archibald Montgomery Low v roce 1916 a pojmenoval ho Aerial Target. Ve vývoji bezpilotních systémů a prostředků dochází zejména ve zbrojním průmyslu. V dnešní době se, ale podílejí na vývoji i také společnosti mimo zbrojní průmysl a jejich bezpilotní prostředky jsou určeny ke komerčnímu a volnočasovému použití. Nejvíce známou firmou na trhu je čínská společnost DJI a jejich řady bezpilotních prostředků pro snímkování a aplikaci kapalných látek. (Karas, 2016)

### 3.1 Konstrukce bezpilotních prostředků

Konstrukce je tvořena různými druhy materiálů. Největší zastoupení mají kompozitní materiály např. karbonová vlákna nebo tvrzený plast, dalším často využívaným materiálem je EPP (extrudovaný polypropylen). Konstrukce rámu je nosný prvek, na kterém jsou připevněny další díly jako motory, kamera, řídicí jednotka nebo baterie, tudíž musí mít tyto materiály odpovídající tuhost a tvrdost. Komerční bezpilotní prostředky můžeme dělit podle typu konstrukce do tří hlavních kategorií multikoptéry, letouny neboli „křídla“ a hybridní systémy. (Karas, 2016)

#### 3.1.1 Multikoptéry

Multikoptéry jsou nejrozšířenějším typem bezpilotních prostředků a můžeme je dále dělit podle počtu vrtulí. Nejběžnějšími jsou kvadrokoptéry (4 motory a 4 vrtule), hexakoptéry (6 motorů a 6 vrtulí) a oktokoptéry (8 motorů a 8 vrtulí). Vyšší počet motorů a vrtulí zajišťuje vyšší výkon a stabilitu multikoptéry ve vzduchu. U některých multikoptér pomocí vyššího počtu motorů je zvýšena redundance, některé z nich jsou totiž schopné i po vysazení jednoho motoru bezpečně přistát bez většího poškození. Pro tuto konstrukci bezpilotních prostředků je typický kolmý vzlet a přistání. (Radoglou-Grammatikis, 2020)

Výhodou jejich použití je výkon, stabilita ve vzduchu a schopnost se vznášet nad jedním bodem. Vyšší výkon zajišťuje vyšší nosnost, tedy i větší užitečné zatížení a větší výběr příslušenství (zejména kamer, které mohou být připojeny ke stabilizátoru). Bezkonkurenční výhodou je lepší manévrovatelnost. Dále většina multikoptér určených pro profesionály je vybavena technologií vyhnutí se kolizi, která využívá sadu optických a infračervených senzorů, takové senzory lze vidět na obr. 1 na vrchu Matrice 300 RTK. (Karas, 2016)

Stabilizátor je další výhodou, je schopen redukovat nežádané změny směru a otřesy zavěšené kamery, což zvyšuje kvalitu pořízených snímků. Stabilizátory mají většinou stabilizaci ve všech třech osách, což znamená, že stabilizátor eliminuje jakékoliv nežádoucí vibrace a pohyby v osách x,y a z, zatím co kamera je zaměřena pořád na stejný bod. Dále pomocí stabilizátoru může být upravován úhel snímání plochy. Mají lepší ovladatelnost nežli křídla.

Nevýhodou multikoptér oproti letounům je nižší výdrž baterie, protože jejich princip vznášení je energeticky náročnější a s jejich větší hmotností, která negativně ovlivňuje výdrž baterie, nejsou schopné vydržet ve vzduchu stejně déle. Dále jejich odolnost proti nárazu je menší než u letounů, a to převážně kvůli hmotnosti a materiálům, ze kterých jsou multikoptéry vyrobeny. Materiály používané při výrobě konstrukce jsou tvrzené plasty, karbonová vlákna, která jsou extrémně pevná, ale také křehká. (Karas, 2016)



Obrázek 1 - kvadroptéra DJI Matrice 300 RTK

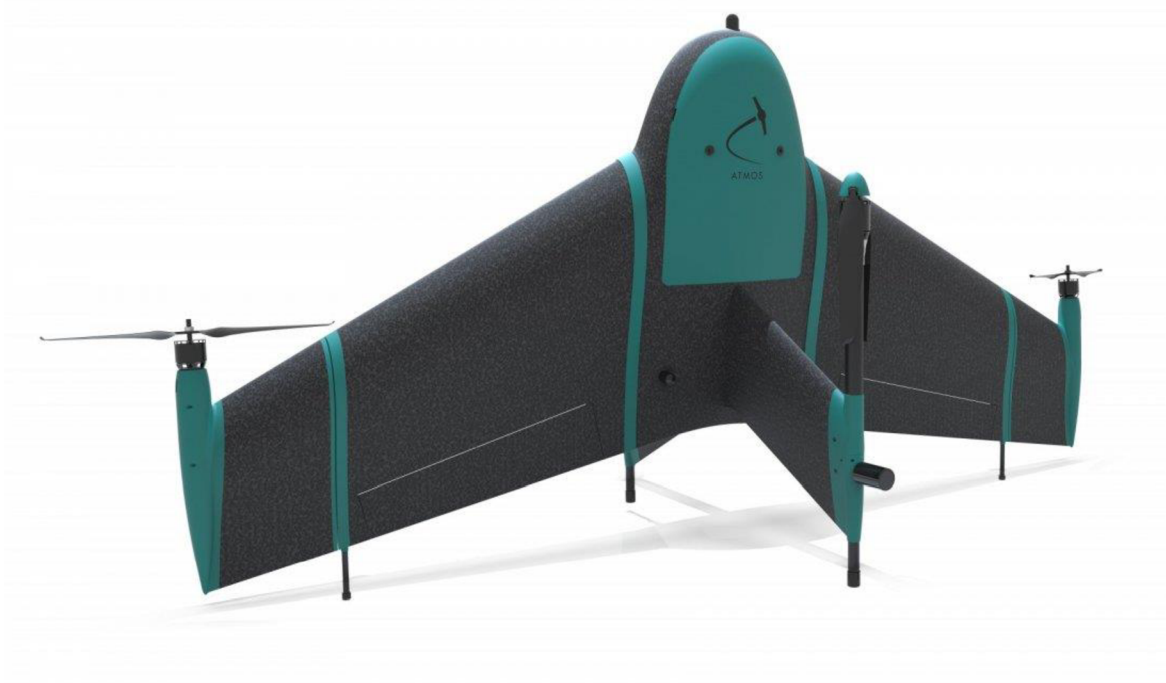
Zdroj: dji.com

### 3.1.2 Bezpilotní letouny

Drak bezpilotních letounů je tvořen většinou fixním křídlem, proto jsou někdy označovány jako „křídla“. Většina křidel pro svůj let používá jeden motor s vrtulí, ale mohou být i vybaveny 2 motory a 2 vrtulemi. Tento typ bezpilotních prostředků má zpravidla fixně zabudovanou kameru v těle bez využití zavěšení pomocí stabilizátoru (Karas, 2016).

Výhodou je vyšší rychlost a výdrž baterie, a tedy více času na snímkování daného objektu zájmu. V důsledku toho jsme schopni snímat větší plochu na jednu baterii nežli u multikoptéry. Materiál používaný pro výrobu trupu a křidel je ve většině případů extrudovaný polypropylen, který zaručuje nízkou hmotnost. Dále extrudovaný polypropylen by měl vydržet náročnější zacházení jako je tvrdší přistání nárazem do povrchu, případné nehody nebo selhání systémů a následný pád. Křídla jsou konstrukčně jednodušší nežli multikoptéry. (Karas, 2016)

Nevýhodou může být složité vzletnutí, které probíhá z rampy nebo z ruky a stejný problém je i u přistání, při kterém může dojít k poškození křídla při špatně vybrané přistávací lokalitě. U některých letounů je tento problém eliminován schopností kolmého vzletu a přistání, takové to letouny jsou označovány VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Letouny mají horší manévrovatelnost.



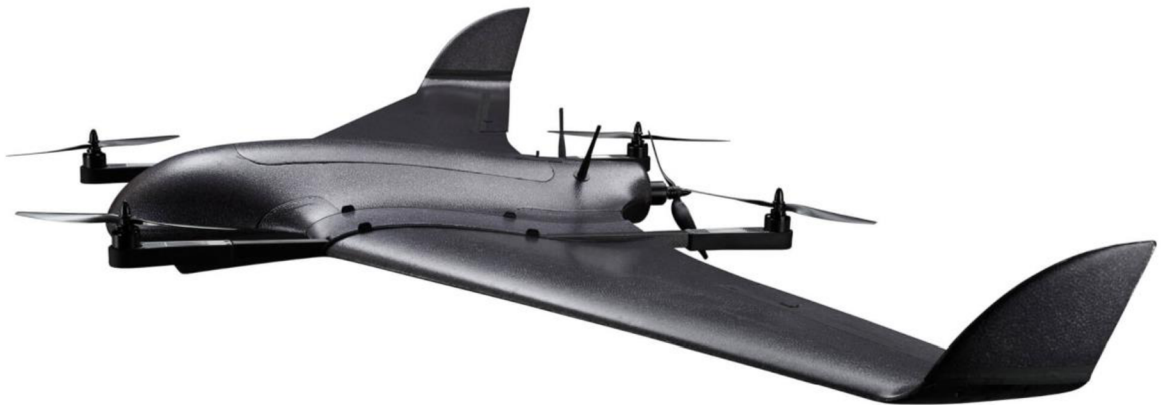
Obrázek 2 VTOL křídlo Atmos Marlyn UMC-R10C

Zdroj: [dronpro.cz](http://dronpro.cz)

### 3.1.3 Hybridní systémy

Hybridní systémy jsou spojením konstrukce multikoptéry a bezpilotního letounu. Toto řešení využívá výhody obou konstrukcí, které jsou kolmý start jako u multikoptér a vyšší rychlost a efektivita letu jako u letounů. Výdrž takového systému jako je na obrázku 3 je skoro 2 hodiny při příznivých podmínkách. (Saeed, 2018)

Nevýhodou je, že stabilita je oproti klasickým konstrukcím o něco horší a další, že hybridní konstrukce jsou pořád v raném stádiu vývoje oproti oběma konstrukcím, ze kterých vychází. Kombinace obou konstrukcí znamená větší konstrukční komplexitu i vyšší pořizovací náklady. (11 Hybrid Fixed-Wing/VTOL UAV Advantages & Disadvantages)



Obrázek 3 Hybridním systém DeltaQuad Pro #MAP

Zdroj: deltaquad.com

### 3.1.4 Pohon

Elektrický pohon je nejrozšířenějším typem pohonu, kdy se pohonné ústrojí skládá z akumulátoru a jednoho nebo více elektromotorů. Toto uspořádání často dosahuje polovinu hmotnosti bezpilotního prostředku. Výdrž baterie takového pohonu zpravidla dokáže udržet prostředek ve vzduchu po dobu 30 až 90 minut v závislosti na typu konstrukce, venkovní teplotě, zatížení, síle větru a dalších provozních podmínkách. Nevýhodou tohoto pohonu je výdrž ve vzduchu, protože baterie mohou nést v poměru k váze stroje méně uložené energie, než když je bezpilotní prostředek poháněn kapalným palivem jako je benzín. Dalším faktorem znevýhodňujícím elektrický pohon je doba dobíjení baterií oproti rychlému doplnění kapalného

paliva a také kolísání kapacity baterie podle venkovní teploty. Přesto většina výrobců dává přednost elektrickému pohonu. (Radoglou-Grammatikis, 2020)

V obou případech vychází použití spalovacího motoru jako pohonné jednotky lépe než elektro motor, navzdory jeho nevýhodám vyplývajících z použití spalovacího motoru jako je nižší spolehlivost a ovladatelnost, hlučnost a vznikající vibrace od motoru, které zhoršují kvalitu obrazu. Spalovací motory se používají v ojedinělých případech, kdy je kladen důraz na nosnost a výdrž ve vzduchu. Spíše se s nimi setkáme u modelářských použití a u bezpilotních systému o vyšší hmotnosti určených pro delší několikahodinové mise. (Karas, 2016)

### **3.2 Užitečné zatížení**

Užitečné zatížení je parametr, který určuje kolik toho je bezpilotní prostředek schopen unést, a přitom nepřekročí maximální vzletovou hmotnost. Zvýšením výkonu se navyšuje i užitečné zatížení. Vyšší užitečné zatížení umožňuje vybavit bezpilotní prostředek širokou nabídkou příslušenství, pokud má tu možnost měnit kamery. DJI Matrice 300 RTK může být díky své výkonosti vybaven dvěma stabilizátory se třemi různými kamerami lze vidět na obrázku1. Tento parametr je spíše důležitý pro bezpilotní prostředky, které jsou navrženy pro přepravní účely nebo aplikaci postřiků jako je DJI Agras T30, jež dokáže unést až 30 litrů kapaliny. (Karas, 2016)

### **3.3 Určení polohy**

Pro lepší stabilizaci bezpilotního prostředku ve vzdušném prostoru se používají systémy pro určení geografické polohy, nejvíce používanými systémy je GPS (Global Positioning System) a RTK (Real Time Kinematic), používání těchto systémů dále také upřesňuje pořízená data, která se používají pro účely precizního zemědělství, kde je přesnost získána z GPS nedostačující. (Říha, 2014)

#### **GPS (Global Positioning System)**

Je to systém satelitů, který je schopný v reálném čase určit polohu bezpilotního prostředku na základě času vyslání signálu, oběžné dráze satelitu a dalších faktorech. GPS se vyznačuje chybou do několika metrů, což je pro aplikaci, která vyžaduje centimetrovou přesnost, v precizním zemědělství nedostačující. Pro používání bezpilotních prostředků je zapotřebí přijímat signál minimálně ze čtyř satelitů pro určení polohy. Bez nutnosti určit

nadmořskou výšku stačí signál z minimálně tří satelitů. S větším počtem přijímaných signálů roste přesnost systému. (Karas, 2016)

### **RTK (Real Time Kinematic)**

Je to nejpresnější systém na určení polohy s přesností jednotek centimetrů. Tato přesnost už je pro precizní zemědělství dostačující. RTK využívá dvou přijímačů. Bezpilotní prostředek vybavený RTK přijímá signál ze satelitního systému, a dále pro upřesnění dostává signál z referenční stanice, která má známou polohu (Říha, 2014). Podle výroční zprávy ČÚZK systém referenčních stanic CZEPOS obsahuje 55 stanic z toho 28 stanice je na území České republiky zbylých 27 je v příhraničních oblastech sousedních států. (kolektiv ČÚZK, 2021)

## **3.4 Legislativa**

Jelikož bezpilotní prostředky jsou provozovány v kontrolovaném vzdušném prostoru s hustým provozem podléhají tedy i přísné legislativě. Jádro těchto legislativních opatření pochází ze společné evropské legislativy pro bezpilotní prostředky a systémy. V České republice má na starosti tuto problematiku bezpilotních prostředků Úřad pro civilní letectví, který dohlíží na dodržování evropských nařízení (EU) 2019/947 a nařízení (EU) 2019/945. Nařízení (EU) 2019/947 rozlišuje 3 kategorie provozu otevřená, specifická a certifikovaná.

Bezpilotní prostředek spadá do otevřené kategorie pokud:

- Je označen štítkem s třídou C0, C1, C2 nebo C4, výjimku mají soukromě zhotovené prostředky s menší hmotností, než je 25 kg, dále zakoupené před 1. lednem 2023.
- Nebude-li provozován nad lidmi.
- Bude-li provozován v neustálém vizuálním kontaktu nebo za pomoci pozorovatele.
- Nebude-li létat výše než 120 metrů nad povrchem.
- Nebude-li přepravovat jakýkoli nebezpečný materiál.

Otevřená kategorie se dále dělí na podkategorie provozu A1, A2 a A3. K létání v těchto podkategoriích je potřeba složit příslušné zkoušky a tím prokázat příslušnou znalost. Většina bezpilotních prostředků používaných při určitých úkonech v zemědělství bude spadat do této kategorie. Pro příklad senseFly eBee X s hmotností do 1,6 kilogramu bude spadat do otevřené kategorie a dále do podkategorie A3, když bude snímat pole mimo urbanistické oblasti. (Provoz v rámci „Otevřené“ (Open) kategorie)



Bezpilotní prostředek spadá do specifické kategorie, pokud nesplňuje podmínky pro otevřenou kategorii. Pro létání ve specifické kategorii musí být pilot držitelem osvědčení o teoretických znalostech dálkově řídicího pilota a akreditace na základě absolvování výcviku dovedností pro STS-0. Dále musí vypracovat několik studií o rizicích spojených s provozem daného bezpilotního prostředku v pilotem vybrané lokalitě. Úřad pro civilní letectví dále posoudí všechny dokumenty poskytnuté žadatelem a případně žadatelovi schválí provoz ve specifické kategorii. (Specifická kategorie (Specific))

Certifikovaná kategorie nemá prozatím jasně definovaná pravidla pro provoz. Měly by být uvedeny pravděpodobně v roce 2023. Ale prakticky tato kategorie bude sloužit pro certifikované bezpilotní prostředky, které prošly certifikací u Úřadu pro civilní letectví.

Důležitým dělením bezpilotních prostředků zejména pro regulační orgány jsou kategorie podle váhy, kdy většina komerčních bezpilotních prostředků určená k monitorování v zemědělství spadá do kategorie malých bezpilotních prostředků. Jejich hmotnost nepřekračuje 25 kilogramů, mohou být tedy provozovány v otevřené kategorii v A3 podkategorii. (Karas, 2016)

Všechny tyto pravidla a nařízení jsou stejná pro všechny členské státy Evropské unie, což znamená zjednodušený a unifikovaný přístup k provozu bezpilotních prostředků oproti Doplňku X a předešlým legislativním omezením. Složením zkoušky pro otevřenou kategorii u Úřadu pro civilní letectví dostane pilot oprávnění létat v zemích Evropské unie za dodržení pravidel kategorie, pro kterou dostal oprávnění. Avšak každá členská země může mít dodatečná nařízení nad rámec evropských, další odlišnosti už jsou jenom v rozdílných zakázaných zónách, proto je důležité, aby si sám pilot ověřil specifikace vzdušného prostoru vzletnutím.

### **3.5 Využití v zemědělství**

Snímkování zemědělských ploch je nejčastější činností, pro kterou jsou bezpilotní prostředky využívány v zemědělství, i když mohou být využity i pro aplikaci různých látek. Snímky z bezpilotních prostředků jsou velmi přesné a nezkreslené oproti satelitním snímkům, které mohou být zkresleny oblačností a dalšími faktory způsobenými atmosférou a jejím rušením. Dále přesnost snímků, kterých dosáhneme za použití bezpilotního prostředku může být okolo 2,5 centimetrů na pixel, zatímco snímky ze satelitu Sentinel 2 mají rozlišení 10 až 60 metrů na pixel v závislosti v jakém pásmu byly pořízeny.

Bezpilotní systémy slouží k získávání podkladových dat pro vegetační indexy jako jsou NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index) a REIP (Red Edge Index). Tyto indexy se používají zejména k určení stavu vegetace a na jejich základě se mohou stanovit další zemědělské činnosti jako je aplikace hnojiv a ochranných látek nebo zavlažení určené plochy. Dalšími aplikacemi je mapování vodního stresu rostlin a následného určení pomocí indexu CWSI, využití v živočišné výrobě a v lesnictví. V lesnictví mohou být mapovány kalamity, nově zalesněné pozemky, holiny nebo vertikální a horizontální struktura porostu. Bezpilotní prostředek využívaný v lesnictví může být dodatečně vybaven LIDARem pomocí, kterého určuje hustotu zalesnění, výšku a průměr jednotlivých stromů. (Surový, 2015)

Nasazení bezpilotních prostředků neurčuje jenom jejich využitelnost, ale také další parametry týkající se provozu samotného prostředku. Mezi tyto parametry patří atmosférické srážky a povětrnostní podmínky, protože při zhoršených podmínkách nejenom klesá rozloha nasnímané plochy, ale může se stát, že podmínky jsou natolik špatné, že bezpilotní prostředek nemůže ani vzlétnout. Mezi další parametry patří členitost terénu, vhodnost aplikace určitého typu bezpilotního prostředku a jako poslední specifikace vzdušného prostoru, ve kterém chceme létat. Některé vzdušné prostory jsou zakázané pro bezpilotní prostředky a může se v nich létat jenom na povolení Úřadu pro civilní letectví. Pokud nastanou tyto vyjmenované podmínky, efektivita bezpilotního prostředku klesá a jeho nasazení v té určité lokalitě a za daných podmínek nedává smysl, pokud nelze požadovaná data získat jinak. Podle Vávrovi studie bylo v roce 2017 možné létat v průměru 150 až 200 dní na území České republiky, přesto některé příhodné dny pro létání nemusejí splňovat podmínky pro snímkování kvůli hýbající se vegetaci ve větru. (Vávra, 2019)

Dále také provozovatel nebo zemědělský podnik musí zvážit kompatibilitnost platformy, protože ne všechny bezpilotní prostředky mají více měnitelných kamer od výrobce nebo třetích stran, což může způsobit pořízení dvou platforem pro různé snímkování. Někteří výrobci dovolují třetím stranám vývoj kompatibilních kamer a dalšího příslušenství.

## **4 Kamery**

Kamera je jedno z možných příslušenství, kterým se dají vybavit bezpilotní prostředky. Mezi nejpoužívanější řadíme termální a multispektrální kamery. Použití kamer se dělí podle toho, co chceme snímat a jaké vlnové délky je kamera schopna zachytit. Rozdíl mezi RGB kamerou a multispektrální kamerou je, že RGB kamera zachycuje pásmo červené, zelené a modré elektromagnetického záření, zatím co multispektrální kamera je navíc schopna zachytit

pásmo NIR (near infrared) a SWIR (short wave infrared). Další kamery, které mohou být připojeny k bezpilotnímu prostředku jsou hyperspektrální, VIS a NIR kamery.

## **4.1 Termální kamera**

Termální kamery zaznamenávají intenzitu tepelného záření, které vyzařuje povrch snímaných objektů. Kamera je schopna na základě intenzity záření stanovit povrchovou teplotu. Výsledkem takového měření je termogram. Termogram je digitální snímek, jehož pixely obsahují informaci o povrchové teplotě snímaných objektů. Většina používaných termálních kamer snímá záření ve vlnovém pásmu přibližně 7 až 14  $\mu\text{m}$ . Mezi hlavní části kamery patří detektor a použitá čočka. (Princip a funkce)

### **4.1.1 Detektor**

Detektor infračerveného záření převede dopadající záření na elektrický signál, který je následně převeden do výsledného termogramu. Rozlišujeme dva základní typy detektorů na základě jejich principu fungování, a to tepelné a fotonové neboli kvantové.

#### **Tepelné detektory**

Tepelný detektor funguje na principu změny intenzity absorbované energie ze záření. Takto absorbovaná energie mění teplotu detektoru, která dále ovlivňuje elektrické vlastnosti detektoru zejména vnitřní odpor. Tepelné detektory dále dělíme podle materiálu, ze kterého jsou tvořeny, čímž je ovlivněn vznik vnitřního odporu.

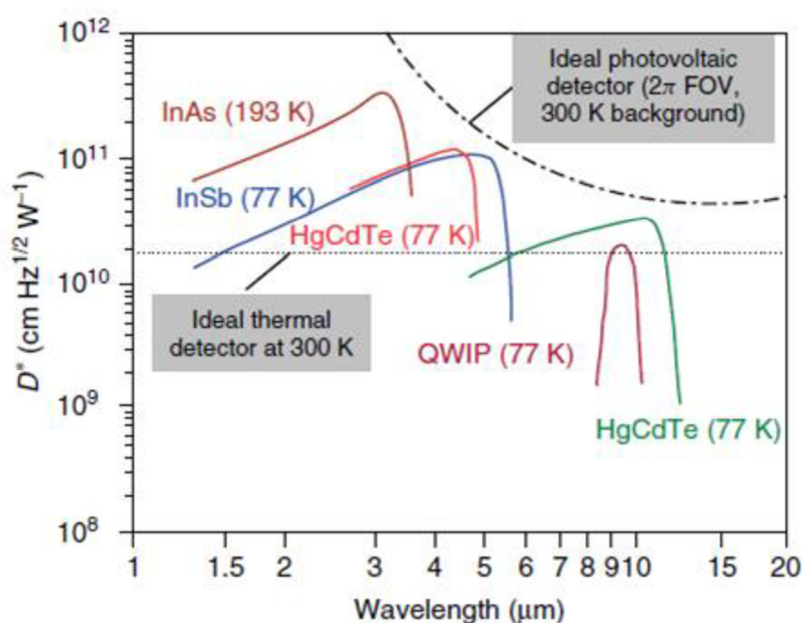
- Bolometry,
- termistory,
- pyroelektrické detektory.

V dnešní době je většina termálních kamer osazena těmito detektory, protože jsou lehčí a levnější než fotonové detektory. Nejpoužívanějším typem tepelného detektoru je bolometr. Jejich výhodou je, že zachycují široké pásmo vlnových délek. Naopak mají pomalou odezvu a nízkou citlivost. (Halounová, 2009)

#### **Fotonové detektory**

Fotonové detektory využívají princip počtu dopadajících fotonů, které přímo ovlivňují vodivost polovodičových materiálů. Vodivost je způsobena volnými elektrony v zóně, jež se uvolňují dopadem fotonu záření. (Halounová, 2009)

Výhodou je, že jsou citlivější a s rychlejší odezvou na změnu záření. Fotonové detektory je zapotřebí chladit, aby nedocházelo ke vzniku šumu a chyb zachycením záření ze samotného detektoru. Přidané chlazení zapříčiňuje vyšší hmotnost fotonového detektoru oproti tomu tepelnému, avšak čím účinnější je chlazení tím je i měření přesnější, a kromě toho mají vyšší energetickou náročnost. Zvýšení hmotnosti detektoru a kamery způsobuje, že tento typ kamer je pro bezpilotní prostředky nepoužitelný aspoň ne pro ty konvenční s nižším užitečným zatížením. Další nevýhodou je vyšší cena a schopnost zachytit úzké pásmo vlnových délek. Avšak mohou být i širokopásmové za použití účinnějšího chlazení a trojných sloučenin k výrobě polovodiče. Změnou poměru složek ve sloučenině jsme schopni měnit zachycované pásmo vlnových délek v relativně širokém intervalu. (Messina, 2020)



Obrázek 4 Vliv sloučenin polovodiče na vlnové délky

Zdroj: Termokamera.cz

#### 4.1.2 Parametry

Stejně jako jiné měřicí přístroje mají i termální kamery řadu parametrů, které mají vliv na její použitelnost pro příslušnou aplikaci a také na pořizovací cenu.

Mezi základní parametry termální kamery patří:

- Teplotní citlivost,
- teplotní rozsah,
- rozlišení obrazu,

- přesnost měření,
- spektrální citlivost.

## **Teplotní citlivost**

Teplotní citlivost udává, jaký rozdíl teplot je kamera schopná zachytit. Stanovuje se pomocí parametru NETD (noise equivalent temperature difference). Čím menší rozdíl mezi teplotami tím je výsledný termogram přesnější. Většina termálních kamer se vyrábí s citlivostí mezi 100 mK až 30 mK, tj. 0,1°C až 0,03 °C nižší hodnota je lepší. Pro stanovení vodního stresu je zapotřebí minimálně citlivosti 50mK, lépe však 30 mK. (Parametry termokamery)

## **Teplotní rozsah**

Teplotní rozsah určuje, jaké teploty je senzor termální kamery schopný zachytit. Největší z rozsahů má americká firma FLIR, který je od - 40 °C až do 2000 °C, což je zbytečně velký rozsah, který je v komerčním zemědělství nevyužitelný. Kamera Duet T od švýcarské firmy senseFly, která je určena k zemědělským pracím, má rozsah od - 40 °C až do 160 °C. U některých kamer jako je FLIR E95, můžeme vybírat ze tří pracovních rozsahů (-20 °C až 120 °C; 0 °C až 650 °C; 300 °C až 1500 °C). Pokud u je takovéto kamery špatně zvolen rozsah výsledný termogram bude zkreslený, musí se přenastavit rozsah a znovu opakovat měření. (Parametry termokamery)

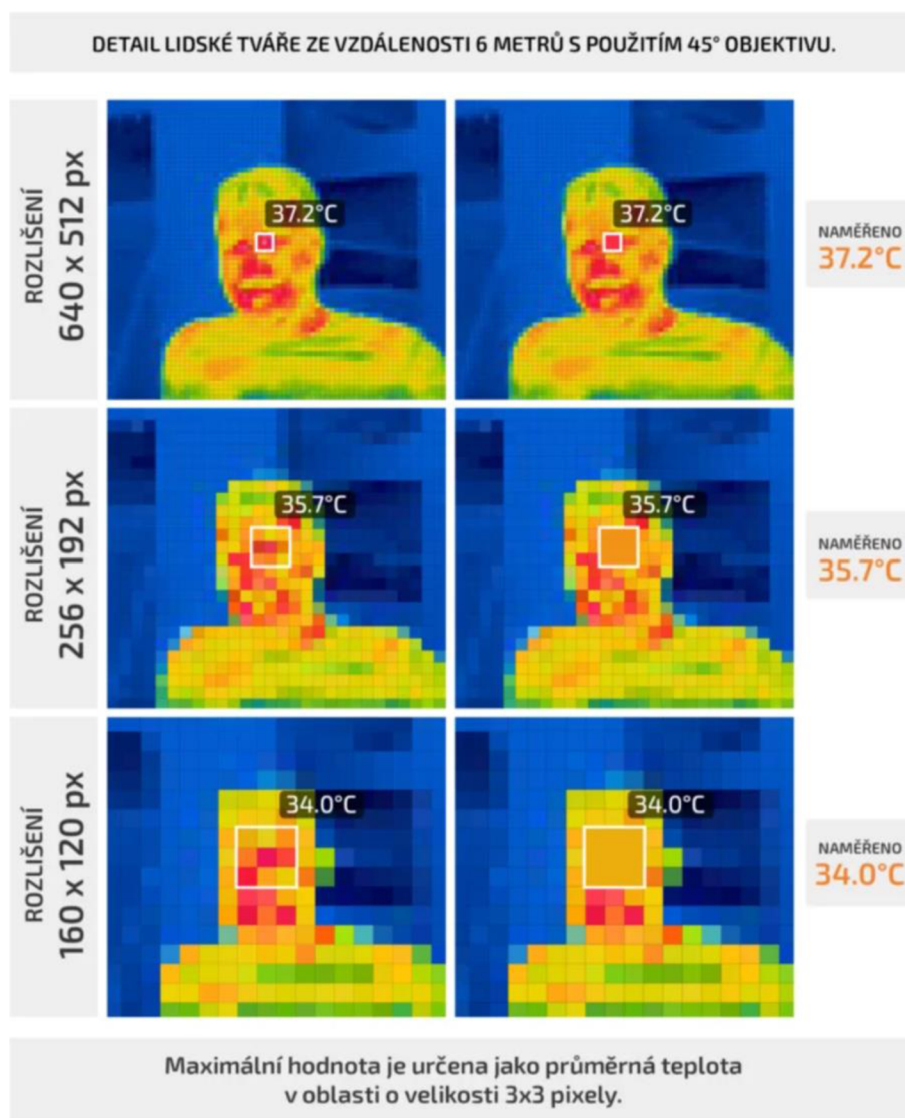
## **Přesnost měření**

Jako každý měřicí přístroj i termální kamera a její měření je ovlivňováno nepřesností, která se projevuje výslednou odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledovaného parametru. (Parametry termokamery)

Odchylka u nejběžněji produkovaných kamer je  $2\text{ °C} \pm 2\%$  z rozsahu, u měření používáme vždy horší z obou údajů. Můžeme se dostat i na odchylku  $1\text{ °C} \pm 1\%$  z rozsahu. Logicky nižší hodnota chybovosti je žádaná, ale tato míra chybovosti je zaručena u složitějších termálních kamer MWIR, které jsou těžší a mají vysokou pořizovací cenu. (Lukáš, 2019)

## Rozlišení obrazu

Rozlišením obrazu je udávána kvalitu obrazu v pixelech. Nejrozšířenějším rozlišením kamer určených pro bezpilotní prostředky je 640x512 pixelů. Toto rozlišení kamery je i potom rozlišení výsledného snímku termogramu. Použitím většího rozlišení se zpřesňuje výsledný termogram, protože při větší vzdálenosti a omezeném počtu pixelů se zhoršuje kvalita výsledného termogramu kvůli tomu, že kamera už není schopna dokonale zachytit a správně vykreslit drobné rozdíly. (Lukáš, 2019)



Obrázek 5 Různá kvalita obrazu podle rozlišení kamery

Zdroj: Termokamera.cz

## **Spektrální citlivost**

Určuje rozsah vlnových délek, ve kterém je termální kamera schopna měřit infračervené záření. Termální kamery vybavené tepelným detektorem měří ve vlnových délkách 8 až 14  $\mu\text{m}$ . Kombinace různých složek v sloučeninách ovlivňuje rozsah zachycených vlnových délek fotonovým detektorem. (Parametry termokamery)

### **4.1.3 Tepelné záření**

Všechna tělesa ve známém vesmíru vyzařují energii ve formě elektromagnetického záření. Toto záření nazýváme tepelné záření, protože pohyb částic tělesa emituje teplo. Povrchová teplota tělesa ovlivňuje intenzitu vyzářeného elektromagnetického záření na jejímž základě je schopna termální kamera bezdotykovým měřením stanovit povrchovou teplotu tělesa. Bezdotykové měření využívá vlnových délek 0,4  $\mu\text{m}$  až 14  $\mu\text{m}$  elektromagnetického záření. Emitované elektromagnetické záření definují fyzikální zákony. (Halounová, 2005)

#### **Wienův posunovací zákon**

Wien definoval rovnici, která popisuje posun vlnových délek. Jeho rovnice určuje vlnovou délku, ve které těleso vyzařuje maximum. Při rostoucí teplotě se záření posouvá do viditelného pásma kratších vlnových délek. Tento jev můžeme demonstrovat na zahříváním kovu ten sice vyřazuje elektromagnetické záření, ale pro lidské oko neviditelné až po překročení určité teploty kov začne vyzařovat viditelné světlo. (Halounová, 2005)

#### **Stefanův-Boltzmannův zákon**

Definuje celkový vyzářený výkon ve wattech. Pro spočítání rovnice potřebujeme znát emisivitu, teplotu a povrch tělesa. (Tepelné záření)

#### **Planckův vyzařovací zákon**

Max Planck v roce 1900 úplně definoval tepelné záření těles. Pomocí Planckovy rovnice můžeme zjistit množství vyzařované energie v jednotlivých pásmech. (Tepelné záření)

## **4.2 Multispektrální kamera**

V dnešní době jsou multispektrální kamery vybaveny digitálními senzory CCD a CMOS, které disponují miliony míst citlivých na fotony. To umožňuje spolu s vysokým rozlišením senzoru získat snímky s vysokou obrazovou kvalitou nejenom ve viditelném pásmu

ale i v infračerveném pásmu. Multispektrální kamery se využívají pro získávání dat k určení vegetačních indexů a jsou jedny z nejvyužívanějších druhů kamer v zemědělství (Gupta, 2018).

## **5 Analýza obrazu**

Digitální obrazová data získaná z bezpilotního prostředku jsou dále zpracovávána nejčastěji za pomoci geografických informačních systému jako QGIS, SNAP atd. nebo také různých softwarů na zpracování obrazových dat.

### **5.1 Geometrické a radiometrické korekce**

Data naměřená různými systémy mohou zahrnovat geometrické chyby i radiometrické chyby, které se projevují špatnou polohou, respektive špatnými hodnotami pixelů. Korekce takovýchto chyb jsou prováděny s odlišující se přesností. Ve většině případů stačí odstranit hlavní chyby a drobné chyby potom není zapotřebí odstraňovat.

#### **5.1.1 Zdroje radiometrických chyb**

Hlavním zdrojem radiometrických chyb je atmosféra, která obsahuje různé plyny a částice, jež mohou reagovat s procházejícím zářením. Mezi tyto jevy patří rozptyl, absorpce, emisivita a lom. Předpovídat tyto jevy je velmi náročné z důvodu, že atmosféra je nestálé prostředí.

Nehomogenita atmosféry způsobuje rozptyl elektromagnetického záření. Aerosoly či molekuly plynů vytváří nehomogenitu atmosféry, kvůli které se potom záření láme, odráží či absorbuje na jejich povrchu. Rozptyl je složen z odrazu a lomu záření na částicích v atmosféře.

Při absorpci elektromagnetického záření částicemi obsaženými v atmosféře se mění jejich vnitřní energie. Vnitřní energie částice určuje její teplotu a tím také její emisivitu. K největší absorpci záření dochází u plynných složek, aerosoly mají zanedbatelnou absorpci záření oproti plynům. V infračerveném a mikrovlnném pásmu dochází k nejsilnější absorpci. Druh a objemová koncentrace absorbující molekuly určují míru absorpce. (Halounová, 2005)

Mezi další chyby, patří ty, které jsou zapříčiněny morfologií terénu. Předpokladem je, že stejný povrch je v obraze definován stejnými digitálními hodnotami. Další chyba je způsobena samotnou měřicí aparaturou, kdy naměřené hodnoty záře stejných detektorů neodpovídají jejím digitálním hodnotám. (Halounová, 2005)



### **5.1.2 Opravy radiometrických chyb**

Metoda odečtení černého tělesa nabízí různé relativní modely rozptylu. Modely mají následující hodnoty velmi jasno, jasno, polojasno, oblačno a zataženo. Relativní model určuje hodnotu oparu ve spektrálních pásmech. Je důležité, aby hodnoty oparu odpovídaly atmosférickým podmínkám v době pořízení snímku.

Další metodou je 5S, která používá naměřené hodnoty vodních par, ozónu a kyslíku k odstranění záře atmosféry. Pokud nejsou tyto hodnoty k dispozici využívá se standardního modelu atmosféry vztaženého na roční období a klimatickou zónu.

Opravy chyb způsobené topografií terénu jsou u menších měřítek nepodstatné, ale naopak u větších měřítek než 1:100 000 nabývají na důležitosti. Metody pro opravu topografie jsou děleny do dvou skupin. První skupina využívá poměru pásem a druhá DEM (Digital elevation models). Metoda poměru pásem je nevýhodná kvůli ztrátě spektrálního rozlišení, což ji eliminuje pro použití u multispektrální analýzy. (Gupta, 2018)

Chyby způsobené měřicí technikou jsou lehce opravitelné, pokud se pravidelně opakují. Korekce mezi detektory je provedena tak, že jeden z detektorů je standardní a hodnoty pixelů z ostatních detektorů jsou kalibrovány tak, aby odpovídaly průměrné hodnotě a směrodatné odchylce z výchozího detektoru. (Halounová, 2009)

### **5.1.3 Zdroje geometrických chyb**

Vlivem otáčení Země se snímky liší, protože mezi prvním snímkem a druhým se Země nepatrně otočí. Chyba způsobena zakřivením Země je nepodstatná u snímků s vysokým rozlišením.

„Panoramatická distorze je chyba, kdy velikost okamžitého zorného pole je stálá, jenž se se zvyšující vzdáleností od ohniska optiky velikost pole zobrazovaného jedním pixelem směrem od kolmice zvětšuje.“ (Halounová, 2009)

Dalšími chybami jsou vliv změny polohy nosiče, distorze způsobená poměrem stran pixelu a nelinearity při skenování.

### **5.1.4 Opravy geometrických chyb**

Při použití polynomů pro geometrické korekce musíme mít k dispozici mapové podklady nebo jiná obrazová data ve vybraném souřadnicovém systému. Nejsnazší na hledání

vlíčovacích bodů je použití jiného snímku téhož území, kdy se porovnávají dvě pásma R a G snímku se správnými souřadnicemi oproti pásmu B upravovaného snímku. Rozdíl mezi RG a B pásmem je snadno rozpoznatelný. Oproti tomu je náročnější transformace, která využívá rastrovou mapu. V tomto případě je hledání vlíčovacích bodů relativně náročné. (Halounová, 2005)

Převzorkování má procesy dvojího typu, kdy každý pixel narovnaného snímku musí mít pixel z původního snímku anebo se nová hodnota vypočte pomocí 3 dostupných způsobů. Tyto způsoby jsou princip nejbližšího souseda, kde vstupuje hodnota z nejbližšího pixelu. Dále bilineární interpolace, která je založena na váženém průměru 4 nejbližších pixelů z distorzní matice. Posledním způsobem je kubická konvoluce, které za pomoci 16 pixelů uspořádaných do matice určí novou pixelovou hodnotu.

## **5.2 Zvýraznění obrazu**

Zvýrazněním obrazu lze získat lepší vizuální pojem o naměřených datech. Tímto procesem se maximalizuje množství informací, které lze získat z naměřených dat. Zvýraznění je rozděleno do dvou skupin podle počtu použitých pásem k zvýraznění dat. Zvýraznění jedním pásmem se dělí na bodová a lokální zvýraznění. Zvýraznění pomocí více pásem je děleno na barevnou syntézu a dělení obrazu obrazem.

### **5.2.1 Zvýraznění jednoho pásma**

Mezi bodová zvýraznění řadíme prahování, při kterém se převádí hodnoty obrazové funkce do množiny o nižším počtu prvků. Počet prvků je jenom dva a zpravidla nabývají hodnot 0 a 1. Prahování se používá pro tvoření masek zvoleného území.

Původní digitální snímek ve většině případů neobsahuje digitální hodnoty, jež by nabývaly všech možných hodnot rozsahu určeného kódováním. Když bude většina digitálních hodnot jenom v třetině celkového rozsahu, tedy blíže nule (černá barva) bude výsledný obraz sestaven z tmavých pixelů, které obsahují menší množství informací než při využití celého rozsahu, což způsobí špatnou čitelnost dat pro uživatele. Tento jev může být eliminován různými metodami roztažení histogramu jako je lineární roztažení histogramu, obecná úprava histogramu, vyrovnání histogramu a metoda ztotožnění histogramu. (Halounová, 2005)

K lokálním zvýrazněním patří proces filtrace, při kterém se přepočítávají hodnoty pro pixely obrazu. Výpočet je realizován pomocí pohybující se masky, pro kterou se vypočte

hodnota středového pixelu z okolních pixelů v masce. Výpočty pro stanovení středového pixelu jsou poměrně lehké s malým množstvím dat. Masky mají většinou velikost 3 x 3 nebo 5 x 5 pixelů. Prostorová frekvence udává rozdíly mezi okolními pixely a vybraným pixelem. Vysoká frekvence znamená velké rozdíly a nízká frekvence naopak. (Halounová, 2005)

Fourierova analýza umožňuje přechod z prostorového souřadnicového systému do frekvenčního souřadnicového systému za pomoci Fourierovy transformace. Transformací vznikne Fourierovo spektrum, kde vyšší četnosti jsou směrem ven a nízké četnosti uprostřed souřadnicového systému.

Hodnocení textury pomocí filtru je další metoda lokálního zvýraznění. Pro popis textury se používají gradientové operátory nebo statistické momenty. Textura je hodnocena zejména u radarových obrazových dat, mohou tak být hodnoceny i letecké snímky. Zbývajícími metodami lokálního zvýraznění jsou porovnání se vzorem, odstranění pruhu, ztenčování hran a filtrace pro zvýraznění hran obrazu. (Halounová, 2005)

### **5.2.2 Zvýraznění pomocí více pásem**

Dělení obrazu obrazem má výhodu, že výsledek zobrazuje spektrální nebo barevné charakteristiky bez ohledu na změnu ozáření. Dělení obrazu obrazem se využívá pro zobrazení jemných spektrálních změn. Zdravá vegetace má vysoký poměr odrazivosti v infračerveném a červeném pásmu a poškozená vegetace naopak má nízký. (Halounová, 2005)

Vegetační indexy vyjadřují poměr mezi pásmy, které charakterizují stav vegetace podle různých vlnových délek. Podle výpočtu se dělí na diferenční, poměrové a ortogonální. Mezi nejpoužívanější vegetační indexy patří NDVI (Normalizovaný rozdílový vegetační index), dále jsou používány IPVI, TVI, RVI a PVI.

Barevná syntéza je zobrazení založené na třech základních barvách R, G a B. Je to zobrazení nepravých nebo pravých barev, kdy současně vizualizujeme tři barvy RGB (červená, zelená a modrá). Mezi metody barevné syntézy patří metoda hlavních a obecných komponent, transformace Martin – Taylor, transformace Tasseled Cap a transformace IHS. (Halounová, 2009)

## **5.3 Klasifikace**

Při procesu klasifikace je získán obrazový soubor, ve kterém každý pixel nabývá určité hodnoty, jenž ho zařadí do předem stanovené klasifikační třídy. Nutnost používat klasifikaci

přišla se snímky, které mají vyšší rozlišení, protože některé objekty při vyšším rozlišení jsou tvořeny větším počtem pixelů, ale pořád se jedná o jeden objekt.

### 5.3.1 Segmentace obrazu

Metoda narůstající plochy určuje výslednou plochu za pomoci souboru pixelů, které jsou zmenšeny o hodnotu určenou uživatelem. Metoda může být použita i pro výběr trénovacích ploch.

Baatz a Schäpe vynalezli metodu segmentace obrazu s multirozlišením, která je založená na výpočtu heterogenity pro stanovení rozsahu segmentu. Jednou ze vstupních hodnot je hodnota měřítka.

### 5.3.2 Klasifikační pravidla a příznaky

Na základě klasifikačního pravidla lze přiřadit každému obrazovému údaji vnitřní parametr, pomocí něhož můžeme údaj klasifikovat do jedné z hledaných tříd. Vnitřní parametry dělíme na druhové (druh objektu – les, borovice, pšenice) a stavové (teplota, vlhkost atd.). Výběrem vnitřních parametrů určujeme rozsah zpracování a jeho náročnost, tedy čím vyšší počet vnitřních parametrů je k dispozici, tím se zvyšuje i informační podrobnost. Vnějšími parametry jsou technické parametry přístroje, intenzita měřeného záření, stav atmosféry a geometrické uspořádání měření. Jsou to parametry nezávislé na vlastním objektu měření. (Halounová, 2009)

K vytvoření klasifikačního pravidla je potřeba změna radiační veličiny v závislosti na změně stavového nebo druhového parametru. Když je taková změna význačná a charakteristická, klasifikační pravidlo nazýváme příznakem. Na základě toho, zda je příznak spojen se změnou prostorových souřadnic nebo se změnou naměřeného údaje u obrazové složky, rozlišujeme tyto příznaky:

- Prostorový příznak – plošná homogenita je prostorovým příznakem, který určuje hranice objektu jeho velikostí a tvarem. Parametry vyjadřující vnitřní texturu jsou dalším důležitým prostorovým příznakem.
- Spektrální příznak – vyjadřuje vyzařovací a odrazivé vlastnosti měřeného povrchu. Mezi tyto parametry patří intenzita záření v jednotlivých pásmech nebo celková intenzita záření.

- Časový příznak – zjišťování změn prostorových a spektrálních příznaků způsobených nestálostí. Dále je nutné separovat výskyt sledovaných změn od náhodných změn.

Nejvíce používané příznaky jsou ty spektrální, protože spektrální projevy jsou ve viditelném pásmu tradičním jevem. Prostorové příznaky se používají, pokud jsou k dispozici vypočtené kanály, které nesou informace o textuře obrazu. (Halounová, 2005)

### 5.3.3 Druhy objektového rozpoznávání

Řízená klasifikace se vyznačuje stanovením klasifikačních parametrů pro obrazový soubor dat zvaný trénovací množina nebo trénovací soubor. Mezi klasifikační parametry tzv. „klasifikátory“ patří klasifikátor maximální pravděpodobnosti, Bayesovo kritérium, klasifikátor minimální vzdálenosti a klasifikátor rovnoběžnostěnů. Celková přesnost této klasifikace je možná za pomoci testovacích ploch, jež nejsou stejné jako trénovací plochy. (Green, 2017)

Neřízená klasifikace nevyužívá trénovacích ploch místo toho jsou vytvářeny shluky na základě objektové podobnosti. Shluky jsou vytvářeny metodami hierarchické a nehierarchické shlukové analýzy. Nehierarchická analýza může být použita jako základ řízené klasifikace. (Gupta, 2018)

Neuronové sítě jsou algoritmy, které vytvářejí, matematickými prostředky, chování podobné neuronům. Vytvářejí se vrstvy a každý jednotlivý neuron z vrstvy má spojení se všemi neurony v další vrstvě. V poslední vrstvě má každý neuron jeden výstup, kterým je definována výsledná funkce. Funkce mají předem stanovený limit, který vyloučí hodnoty převyšující limit. (Halounová, 2009)

### 5.3.4 Odhad přesnosti klasifikace

Obecně je těžké určit přesnost klasifikace, ale důležitým faktorem je velikost a kvalita datového souboru obsahující pozemní data. Jedním z nejvíce používaných přístupů je porovnávání v testovacích plochách, které mají známé referenční plochy. Druhý způsob, porovnání celého výsledku, je nejlepším způsobem, avšak velice finančně a časově náročné. (Halounová, 2009)

Posouzení na základě tvrdých klasifikátorů, takové klasifikátory jsou jednoznačné a schopné přiřadit objekt do klasifikované třídy. Existují různé přesnosti, a to celková přesnost,

tvůrčí přesnost, uživatelská přesnost, Helldenova přesnost, kappa index, součin přesností a minimum přesností. (Green, 2017)

## 5.4 Termální snímky

Pomocí termálních snímků můžeme určit, jestli rostlina není pod vlivem stresových faktorů. Ze snímku lze zejména určit vodní stres, a to nedostatek nebo přebytek vláhy, protože ani jeden stav neprospívá růstu rostliny, je nezbytné identifikovat takovéto stavy. Mezi další druhy stresu, které mohou být sledovány přímo u chmele jsou choroby houbovitého typu. Pro chmel je charakteristická peronospora chmelová a padlí chmelové. Dalším využitím může být indikace poškození škůdci jako je sviluška chmelová a mšice chmelová. (Holý, 2017)

Využitím termálních snímků z bezpilotního prostředku jsme schopni provádět rychlým a nedestruktivním způsobem rostlinnou fenotypizaci, která popisuje znaky a vlastnosti rostliny v závislosti na prostředí, kde je pěstovaná. Tyto informace mohou být použity ke zvýšení výnosu nebo ke zlepšení ochrany rostliny. (Messina, 2020)

### 5.4.1 Vodní stres

Je jedním z limitujících faktorů pro rostliny. Voda je přiváděna na pole v rámci koloběhu vody, což je nepravidelný proces, který může vyústit k dlouhým obdobím bez dešťových a srážek. Tento problém nepravidelnosti srážek může být eliminován instalovaným závlahovým systémem, který je zpravidla používán pro rostliny náročné na vodu nebo v místech s minimálními dešťovými srážkami.

Nedostatečné množství vody způsobuje zpomalení růstu rostliny, což vede ke snížení výnosů z rostliny a může dojít až k extrémnímu stavu, a to uvaření listů rostliny. Rostlina při delší době vodního stresu ztrácí schopnost fotosyntézy a následkem toho celá rostlina odumírá. Do určité fáze vodního stresu je možné rostlinu zachránit při včasném doplnění vody, obnovení všech původních funkcí rostliny může trvat několik dní.

Pro určování vodního stresu u rostlin se používá záření o přibližné vlnové délce od 7 až 14  $\mu\text{m}$ . Pro toto pásmo jsou typicky nejpoužívanější dlouhovlnné infračervené termální kamery s termálním detektorem. Když vodní stres působí na rostlinu, rostlina uzavře svoje průduchy na listech, aby neztrácela vodu vypařováním a tím nedochází k ochlazení listů, které potom mají zvýšenou teplotu, a kterou sledujeme pomocí infračerveného pásma. (Lukáš, 2019)

Hlavním problémem měření vodního stresu je, že naměřená teplota je ovlivněna environmentálními faktory zvláště teplota vzduchu ovlivňuje měření. Klíčové bylo stanovení normalizace mezi teplotou nadzemní části rostliny a teplotou vzduchu. Na základě toho vyšla definice CWSI (Crop Water Stress Index) indexu. Avšak určování vodního stresu u rostlin je velmi komplexní a složité měření, které ovlivňuje mnoho faktorů a zejména podstata měření samotného, která spočívá v nepřímém způsobu měření. (Jones, 2010)

Dalším způsobem je měření teplotní variability rostlin po celém poli. Teplotní rozdíly by se měly zvýšit po uzavření průduchů rostliny. Tento efekt se ještě navyšuje tím, že záření emitované listy, které jsou na slunci a ve stínu, je rozdílné. Nakonec zvýšení teplotních rozdílů při uzavřených průduších není u všech rostlin, což tenhle způsob měření limituje a nepoužívá se často. (Jones, 2010)

CWSI a další podobné indexy indikují hodnoty stomatální vodivosti listů nebo nadzemní části rostliny bez viditelné půdy. Čím je hodnota stomatální vodivosti vyšší, tím jsou průduchy více otevřené. S malým zachycením pixelů půdy je index spíše ovlivňován teplotou půdy než uzavřením průduchů. Proto je pro většinu dálkového snímkování lepší používat kombinaci CSWI s vegetačními indexy. (Jones, 2010)

## 6 Chmel

Chmel je trvalá rostlina z čeledi konopovitých a jejím plodem je chmelová hlávka. Chmel otáčivý je nejrozšířenějším druhem chmelu, který je převážně pěstován pro potřeby pivovarnictví jako hlavní složka piva, kde se používá chmelová hlávka. Výsledný produkt zpracování chmelových hlávek jsou chmelové granule nebo extrakty, které se z velké části používají v pivovarnictví pro chmelení piva, ale nacházejí uplatnění i ve farmacii a kosmetice. Existují dva druhy, a to chmel japonský a chmel oplétavý, který se pěstuje pro pivovarnictví. Odrůdy chmelu dělíme podle jeho vůně na jemné aromatické, aromatické, jemné hořké, hořké a vysokoobsažné. Dále podle délky vegetačního období je dělíme na rané, polopozdní a pozdní (Odrůdy chmele). Odrůdy chmele otáčivého pěstované v České republice:

- Žatecký poloraný červeňák
- Sládek
- Premiant
- Agnus
- Kazbek
- Bohemie
- Vital
- Harmonie
- Bor
- Saaz late



Obrázek 6 Chmelovová hlávka a její průřez

Zdroj: bohemiahop.cz

## 6.1 Sklizeň

Chmel otáčivý se sklízí v České republice ve třech chmelařských oblastech. Žatecká chmelařská oblast je největší s plochou 3 873,73 ha za rok 2021, další dvě jsou oblast Tršicko a Ústěcko. Za rok 2021 se v těchto oblastech sklídilo 8 306,72 tun s hektarovým výnosem 1,67 tuny, což je rekordní hektarový výnos. Meziročně se zvýšila sklizeň o 47,09 %. Žatecký poloraný červeňák měl 80,22 % podíl na celkové sklizni (Kršková, 2021). Ve světě pro rok 2020 USA vystřídalo Německo v roli největšího producenta chmele s 47 540,6 tuny celkové sklizně. Česká republika je třetím největším producentem. Mezi světové producenty se dále řadí Čína, Polsko, Slovinsko, Anglie, Španělsko, Nový Zéland a Austrálie. (BartHaas report hops 2020/2021, 2021)

## 6.2 Pěstování

Chmel je náročná rostlina na světlo, vodu, teplotu a půdní podmínky. Chmel má vyšší požadavky na vodu oproti ostatním rostlinám, protože vytváří velké množství biomasy a velká listová plocha při teplém počasí může dosahovat značného výparu vody přes listy, proto je náchylný na vodní stres a nejvíce při vegetačním období, což může způsobovat značné hektarové ztráty. Největší požadavky na vodu jsou v červenci a srpnu. Rostlina je schopna



vydržet delší období bez srážek za využití hlubokého kořenového systému, který je schopný získat vláhu ze spodních vod. Při dlouhodobější absenci vody se využívá umělého zavlažování pomocí moderních způsobů jako je mikropostřik a kapková závlaha, které redukuje náklady na vodu oproti starším způsobům zavlažování, také jsou pracovně méně náročné, automatizované a dále předchází přehřátí rostliny. Při správně řízeném zavlažování v suchých vegetacích můžeme navýšit výnos až o 60 % při průměrné spotřebě 450 až 550 litrů vody na rostlinu. (Pokorný, 2022)

### **6.3 Žatecký poloraný červeňák**

Tato odrůda chmelu má největší zastoupení mezi pěstovanými odrůdami v České republice, za rok 2021 byl pěstován na rozloze 211,23 ha. Žatecký poloraný červeňák slouží ke šlechtění hybridních odrůd chmele a je pěstován v devíti klonech. Je to typický jemný aromatický chmel s nižším výnosem na hektar. Pro jeho vlastnosti je vhodný k vaření velmi chuťově kvalitního piva. Z Českých pivovarů ho používají téměř všechny. Hektarový výnos za rok 2021 činil 1,59 tuny. (Krkošková, 2021)

Žatecký poloraný červeňák má délku vegetačního období 122 až 128 dní, patří mezi rané odrůdy. Hektarový výnos se pohybuje v rozmezí od 0,8 do 1,5 tuny.

### **6.4 Sládek**

Vznikl křížením odrůd Žatecký poloraný červeňák a North Brewer. Je druhou nejvíce pěstovanou odrůdou na území České republiky. Celková sklizeň za rok 2021 byla 901,92 tun s hektarovým výnosem 2,41 tuny. Je to odrůda s příjemným chmelovým aroma a s vegetačním obdobím od 133 až 140 dní, čím ho můžeme zařadit mezi pozdní odrůdy. (České chmelové odrůdy)

### **6.5 Premiant**

Byl získán křížením Žateckého poloraného červeňáku s dalším šlechtitelským materiálem. Hlávky mají příjemné chmelové aroma. Premiant je třetí nejpěstovanější odrůdou na území České republiky podle celkové sklizně, která byla v roce 398,81 tuny a hektarový výnos činil 1,84 tuny.

Řadí se mezi polopozdní odrůdy s vegetační dobou 128 až 134 dní. Premiant vytváří větší hektarový výnos 1,8 až 2,5 tuny. Tato odrůda má nižší toleranci na nedostatek vláhy během vegetačního období. (České chmelové odrůdy)

## **6.6 Agnus**

Vznikl křížením odrůd Žatecký poloraný červeňák, Sládek, Bor, Northern Brewer, Fuggle a dalšího šlechtického materiálu. Je čtvrtou nejvíce pěstovanou odrůdou, co se týče celkové sklizně, která za rok 2021 činila 108,4 tun. Jeho vegetační období má délku 132 až 138 dní a patří mezi polopozdní odrůdy. (České chmelové odrůdy)

## 7 Vlastní práce

Pro pořizování termálních snímků bylo použito křídlo eBee X vyráběno ve Švýcarsku firmou senseFly a bylo vybaveno kamerou senseFly Duet T. Měření probíhalo v oblasti chmelnic u vesnice Stekník ve Středočeském kraji, a to během léta 2021. Dohromady proběhlo 22 měření a z toho bylo 12 měření na bio chmelnici. Chmelnice jsou rozděleny na dvě, a to bio a konvenční chmelnici. Téměř všechny lety byly absolvovány mezi 11:00 a 15:00, kdy jsou nejlepší světelné podmínky. V tabulce 1 jsou zobrazeny podmínky, za kterých se létalo. Dále bylo potřeba mít pro všechny lety stejné atmosférické podmínky bezoblačné dny a bezvětří pro stabilitu bezpilotního prostředku a minimálního pohybu snímaných rostlin. Všechny chmelnice jsou zavlažovány kapkovou závlahou dle potřeby. Na bio chmelnici je pěstována odrůda Premiant a Žatecký poloraný červeňák, chmelnice má výměru 2 250 m<sup>2</sup>. Obě odrůdy zhruba zaujímají polovinu plochy bio chmelnice. Odrůdy Agnus, Sládek a Premiant jsou pěstovány na konvenční chmelnici s využitím umělého zavlažování. Odrůda Agnus je pěstována na 14 535 m<sup>2</sup>, odrůda Sládek je pěstována na 16 612 m<sup>2</sup> a odrůda Premiant je pěstována na 23 784 m<sup>2</sup>.

Tabulka 1 Naměřené rozmezí teplot a teplota vzduchu v době měření

Datum a čas letů	Teplota vzduchu [°C]	Naměřené rozmezí teplot [°C]
10.5.2021 13:01	26,07	17,434 - 34,967
19.5.2021 16:50	16,88	13,893 - 21,902
24.5.2021 15:17	20,69	12,398 - 22,638
1.6.2021 13:32	22,33	19,074 - 32,392
8.6.2021 11:37	Není k dispozici	23,928 - 45,785
14.6.2021 11:28	Není k dispozici	18,496 - 39,934
21.6.2021 11:28	31,49	28,784 - 49,184
28.6.2021 14:32	29,33	20,300 - 37,795
7.7.2021 14:43	23,47	18,002 - 25,994
22.7.2021 11:03	22,82	15,631 - 28,333
4.8.2021 16:49	19,96	12,652 - 21,942
25.8.2021 12:18	21,88	14,196 - 24,195

Zdroj: Environmental measuring systems s.r.o, doc. Mgr, Jitka Kumhálová, Ph.D.

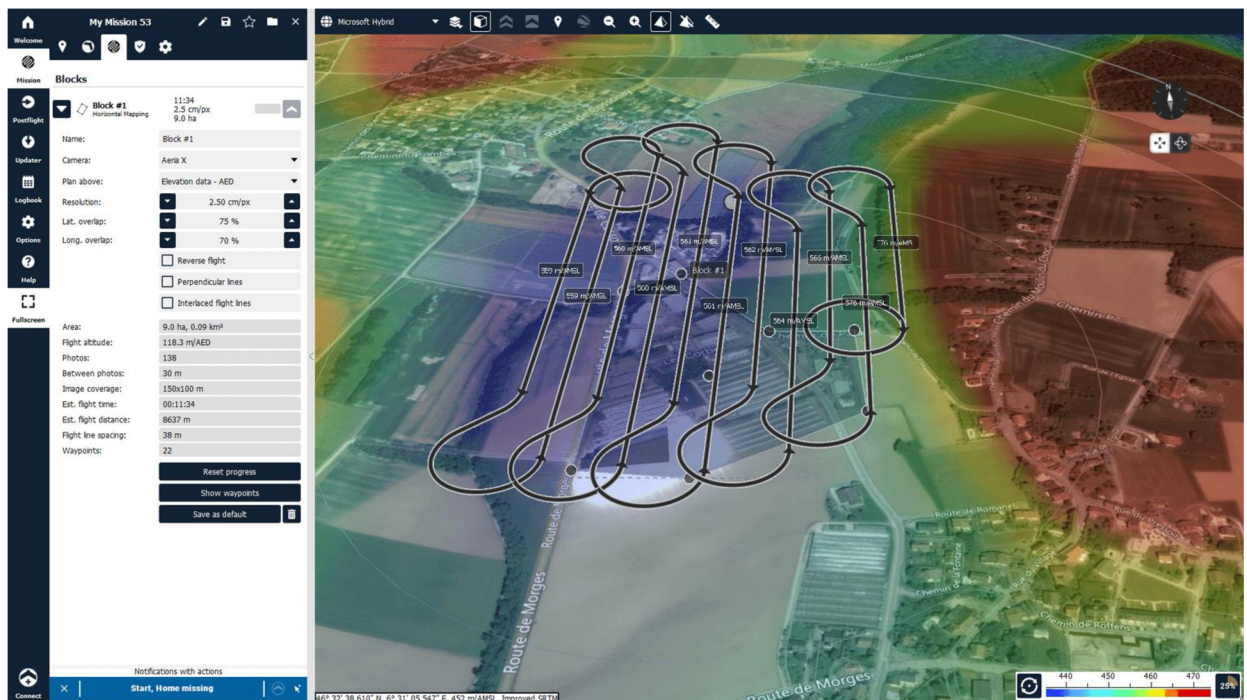
Kvůli dostatečným dešťovým srážkám za rok 2021 nebylo téměř zapotřebí využití umělého zavlažování. Konvenční a bio chmelnice byly zavlažovány dvakrát během června. V tabulce jsou znázorněna data pro jednu rostlinu. Z těchto dat a naměřených teplot lze usoudit, že rostliny nebyly ovlivňovány dlouhodobým vodním stresem z nedostatku vody, který by snížil výnosy chmelu.

Tabulka 2 Objem umělé závlahy na jednu rostlinu 2021

Datum	Chmelnice	Délka [hod]	Celková závlaha [l]
7.6.	bio	18	36
17.6.	bio	20	40
8.6.	konvenční	20	40
15.6.	konvenční	20	40

Zdroj Ing. Jaroslav Pokorný, Ph.D.

Samotné měření bylo provedeno pomocí termální kamery senseFly Duet T a autonomní mise, která byla přednastavena v softwarovém rozhraní křídla eBee X. Předletová příprava u takového typu bezpilotního prostředku zabere maximálně 5 minut, následné vzletnutí je za pomoci pilota poté už není potřeba zásahu ze strany pilota jenom kontrola, jestli je dodržována autonomní mise nebo případná pohotovost pro nenadálé situace až do ukončení autonomní mise a přistání, kdy zase aktivně pilot zasahuje do letu. Dále následovala selekce správných dat z kamery senseFly Duet T a jejího termálního senzoru.



Obrázek 7 Softwarové rozhraní autonomní mise senseFly

Zdroj: senseFly.com

## 7.1 Parametry křídla a termální kamery

Křídlo senseFly eBee X je vyrobeno z extrudovaného polypropylenu a osazeno jedním elektromotorem. eBee X může být osazeno širokým výběrem kamer od senseFly a dalších výrobců. Parametry použitého bezpilotního prostředku jsou zobrazeny v tabulce 3.

Tabulka 3 Parametry křídla senseFly eBee X

Parametr	Hodnota
Hmotnost	1,3 kg až 1,6 kg (liší se podle použité baterie a kamery)
Doba letu	až 90 min (s použitím endurance balíčku)
Odolnost proti větru	až 46 km/h
Dosah vysílače	až 8 km
Provozní rychlost	40 km/h až 110 km/h
Pokrytí terénu	500 ha (kamera S.O.D.A. 3D za 90 min letu)
Horizontální a vertikální přesnost	až 3 cm (při použití RTK)
Cena	309 690 Kč bez DPH

Zdroj: sensefly.com, DronPro s.r.o.



Obrázek 8 Křídlo senseFly eBee X

Zdroj: senseFly.com

Kamera senseFly Duet T je kombinace termální a RGB kamery v jednom na obrázku 8. U této termální kamery není potřeba kalibrace před každým letem. Parametry termální kamery jsou zobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Parametry termální kamery senseFly Duet T

Parametr	Hodnota
Rozlišení obrazu	640x512 pixelů
Rozsah měřených teplot	-40 °C do 160 °C
Teplotní citlivost	50 mK
Spektrální rozsah	7,5 μm do 13,5 μm
Cena	243 000 Kč bez DPH

Zdroj: sensefly.com, DronPro s.r.o.



Obrázek 9 Kamera senseFly Duet T

Zdroj: senseFly.com

## 7.2 Analýza dat

K analýze obrazu byl použit geografický informační systém QGIS a pro zobrazení naměřených hodnot Microsoft Excel. Před samotným grafickým zobrazením termálních snímků byly vyjmuty naměřené hodnoty průměrné teploty. Tyto hodnoty byly s větší odchylkou v minimech a maximech naměřeného intervalu hodnot. Vyřazené hodnoty lze považovat za chyby měření nebo změření jiných objektů nežli vegetace. Vzhledem k tomu, že jejich četnost na jednu měřenou chmelnici byla v nižších jednotkách hodnot, tedy tato manipulace s daty by neměla zkreslit výsledky měření, protože na jednu chmelnici byly naměřeny nižší desítky tisíc hodnot.

Dále následovalo určení teplotní stupnice s ohledem na naměřené teploty. Počet použitých tříd byl 5 až 10 v závislosti na rozsahu naměřených teplot. Na výsledných mapách jsou v legendě zobrazeny pouze ty hodnoty, které lze vyčíst z mapy.

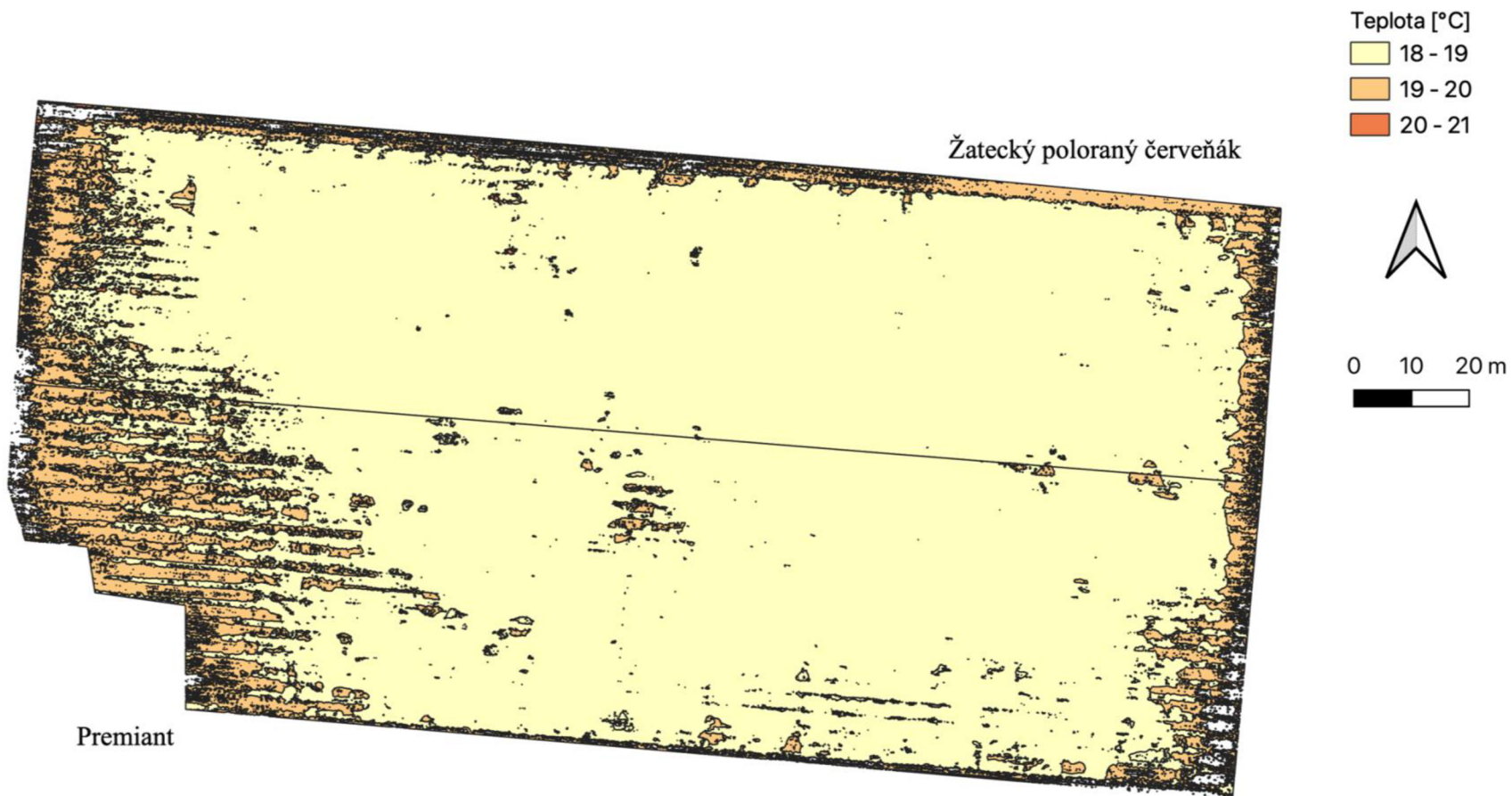
Na obrázku 10 lze rozpoznat větší poškození vegetace v západní části chmelnice. Poškozená vegetace má teplotu povrchu v intervalu 19 °C až 20 °C. Z velké části toto poškození bylo způsobeno podmáčením půdy, které je zobrazeno na obrázku 11. Dále uprostřed chmelnice, kde je vysazen Premiant lze vidět plochu s větší teplotou, než je průměr, což může indikovat nějaký stres.



# Termální mapa biochmelnice Stekník 4.8.2021

Obrázek 10 Termální mapa biochmelnice

Zdroj: Autor





Obrázek 11 Poškození biochmelnice podmáčením půdy

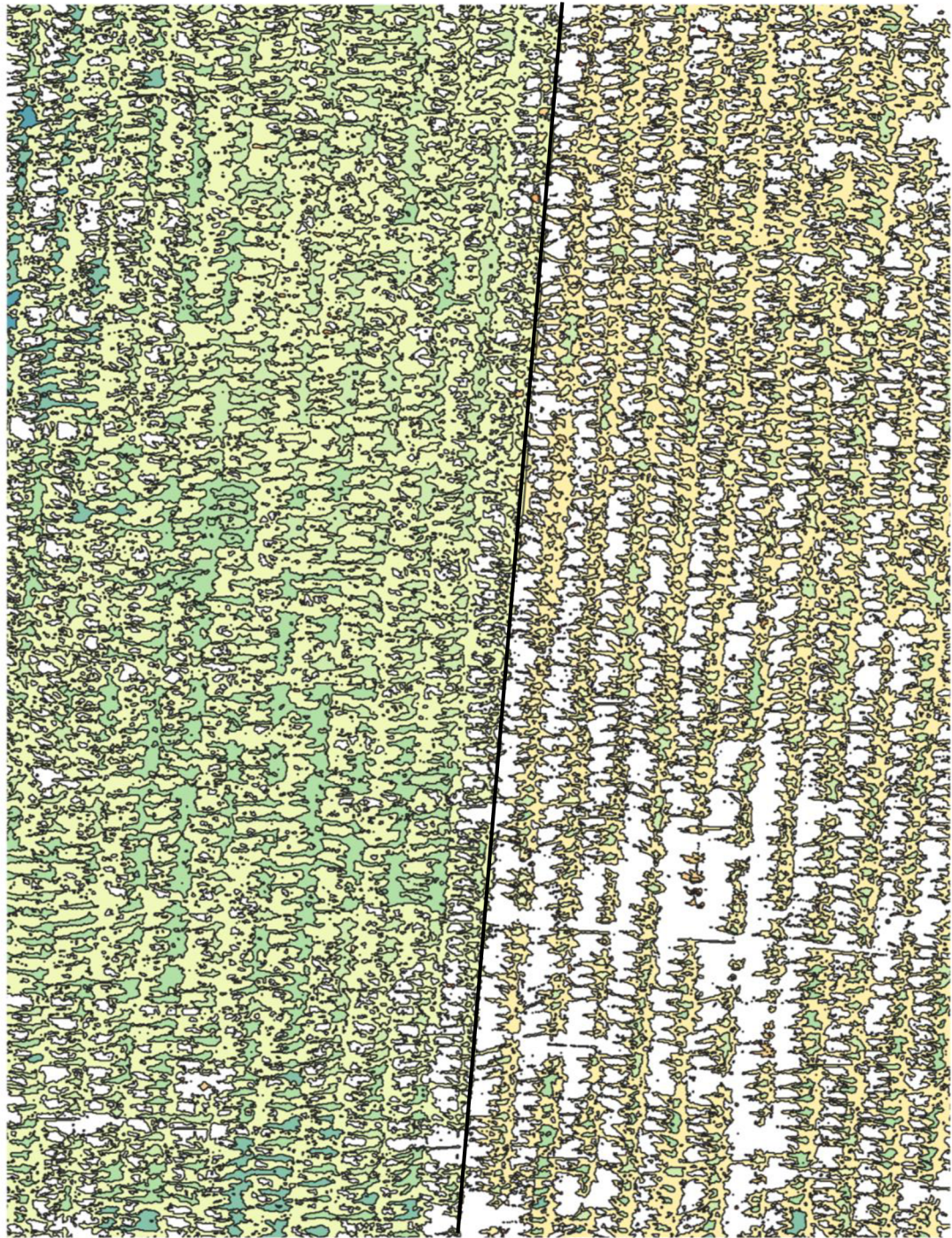
Zdroj: doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

Na obrázku 12 lze vidět teplotní rozdíl mezi odrůdami Žatecký poloraný červeňák a Premiant z biochmelnice. Měření bylo z 14.6.2021 v 11:28 a teplota vzduchu nebyla meteorologickou stanicí naměřena. Na detailu mapy je vidět, že větší část plochy Premiantu je zbarvená odstínem barvy, která indikuje, že teplota u Premiantu je vyšší než u Žateckého poloraného červeňáku. Tento trend lze pozorovat i v přílohách 1 až 4, kde též vychází většina naměřené plochy Žateckého poloraného červeňáku chladnější. Přílohy 5 až 8 zobrazují detail termální, na kterých je snadné rozpoznat teplotní rozdíl mezi odrůdami obzvlášť na měřeních, které byly uskutečněny 21. a 28. června.

Na grafu 1 vidíme, že Žatecký poloraný červeňák má více plochy chladnější než Premiant. Na ose x je zobrazena bezrozměrná jednotka, kdy naměřená plocha byla převedena na procenta v Microsoft Excel. Z tohoto můžeme vyvodit, že se Žatecký poloraný červeňák dokáže lépe vypořádat s vyšší teplotou. Pravděpodobně se dokáže lépe ochlazovat pomocí výparu přes otevřené průduchy na listech.

Detail termální mapy biochmelnice Stekník 14.6.2021

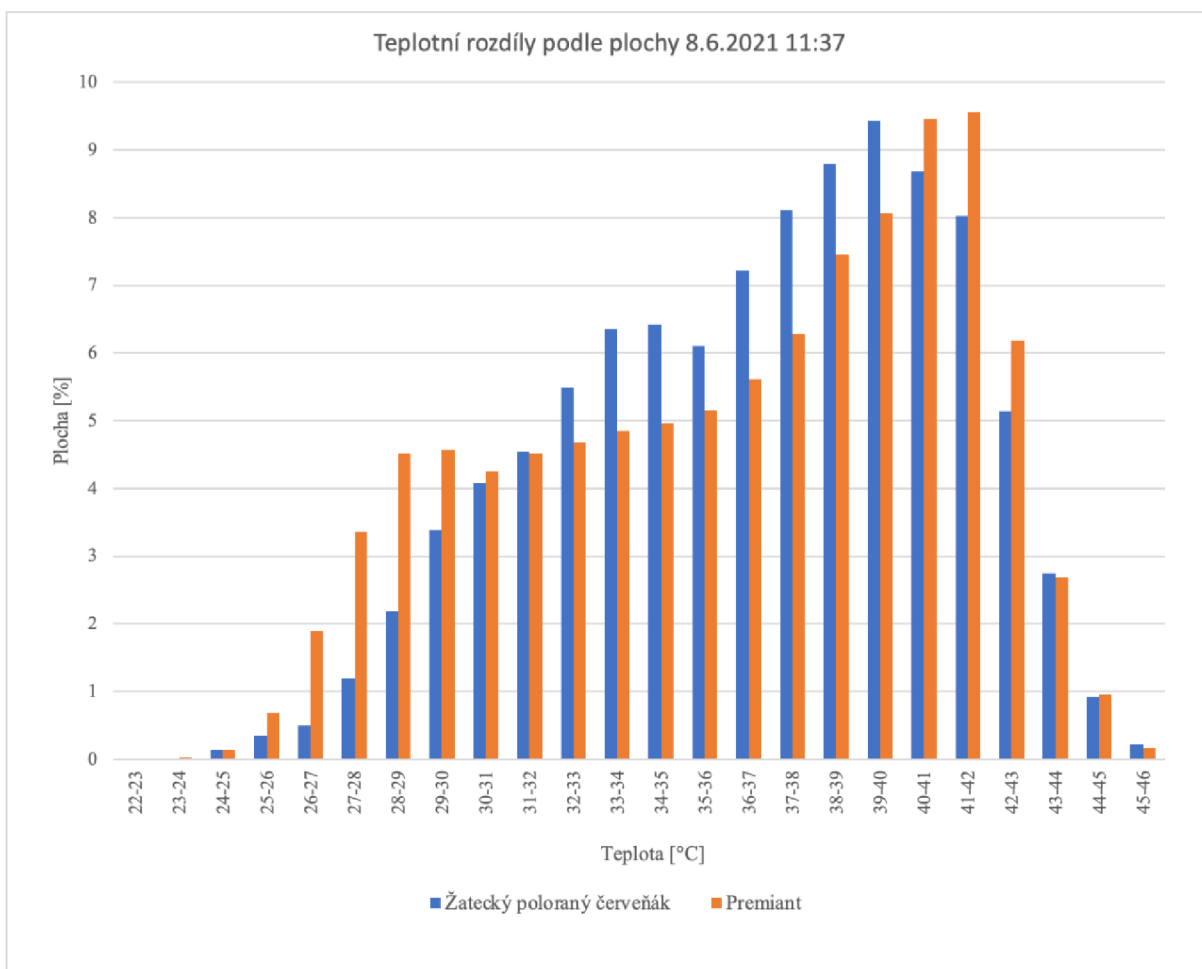
Žatecký poloraný červeňák



Premiant

Obrázek 12 Detail termální mapy biochmelnice

Zdroj: Autor



Graf 1 Porovnání teplot podle plochy odrůd na biochmelnici

## 7.3 Ekonomické zhodnocení

Vývoj v technologiích umožňuje pořídit relativně dostupné bezpilotní prostředky a senzory pro agronomy. Tento trend se také promítá ve snižování cen služeb, které nabízejí snímkování a zpracování následných výstupů. Porovnáme-li ceny služeb a pořízení celého systému, který i u volby levnějších komponentů může stále přinášet relevantní data. Potřebné softwary (QGIS a SNAP), ve kterých se zpracovávají snímky jsou zcela zdarma.

Přehled cenových nabídek pro počátek roku 2022. Ceny jsou spíše orientační. Každý z dotázaných poskytovatelů leteckých prací nebyl schopen určit konkrétní cenu vzhledem k počtu okolností, které ovlivňují celkovou nasnímanou plochu a v konečném důsledku i cenu. Můžeme tedy vzít v potaz, že máme nadmíru příznivé podmínky a počítat s dolní hranicí ceny.

Tabulka 5 Porovnání cen leteckých prací

Firma	Cena
EASYmap a.s.	Do 6 ha 12 600 Kč Nad 6 ha 12 600 Kč + 600 Kč/ha
Laboratoř GIS a DPZ, FŽP	6 000 Kč bez DPH za hodinu snímkování, minimálně 5 hodin
DronPro s.r.o.	25 až 40 tisíc korun za letecký den

Zdroj: EASY mapa.s., Ing. Jan Komárek Ph.D., DronPro s.r.o.

V roce 2018 byly podprůměrné dešťové srážky, které v kombinaci s vysokými teplotami zapříčinily podprůměrný výnos 1,02 tuny na hektar a celkovou sklizeň 5 126,42 tun. Kdybychom použili správně vyhodnocené snímky o vodním stresu rostlin a použili umělé zavlažování, pokud je k dispozici mohli bychom dosáhnout celkové sklizeň 8 306,72 tun jako v roce 2021, což je 62% nárůst, takovýto nárůst bychom mohli zajistit, když budeme správně indikovat vodní stres a následně použijeme umělou závlahu. Avšak většina chmelnic v České republice nejsou uměle zavlažovány. Při ceně okolo 230 000 korun za tunu chmele to mohou být mnohamilionové ztráty. Dalším snížením nákladu by bylo použití snímků z RGB nebo multispektrální kamery pro analýzu stavu vegetace pro aplikování hnojiv nebo ochranných prostředků. Financování bezpilotního prostředku z více zemědělských podniků a tím zvýšené využití, může zkrátit dobu návratnosti investice. Určování vodního stresu se více uplatní v zemědělských oblastech s nedostatkem atmosférických srážek a nižší hladinou podzemních vod, kdy používání dat o vodním stresu může ušetřit náklady na umělou závlahu nebo navýšit výnos. (Krkošková, 2021)

Pořízení bezpilotního prostředku pro měření samotného vodního stresu v České republice nedává ekonomický smysl kvůli dostatečným atmosférickým srážkám a zásobám podzemní vody mezi další faktory patří absence systémů umělého zavlažování, které nejsou v České republice rozšířené.

Náklady na pořízení bezpilotního prostředku pro monitorování stavu vegetace vybaveného kamerou se pohybují od vyšších desítek tisíc až po vyšší stovky tisíc korun. Samotná kamera někdy bývá stejně ne-li dražší než samotná bezpilotní platforma.

Tabulka 6 Porovnání cen bezpilotního prostředku s kamerou

Výrobce a model	Pořizovací cena [Kč]
senseFly eBee X a senseFly Duet T	552 690 Kč bez daně
DJI Matrice 300 RTK a DJI H20T	589 980 Kč bez daně
DJI Matrice 30T	272 720 Kč bez daně

Zdroj: DronPro s.r.o., Telink.cz

V roce 2020 činila cena povrchové vody z povodí Ohře 5,17 Kč za 1 m<sup>3</sup>. Při výběru senseFly eBee X a senseFly Duet T by se mělo ušetřit 106 903 m<sup>3</sup>, aby se investice zaplatila. Kdybychom pořídili DJI Matrice 30T stačilo by ušetřit poloviční množství vody na zaplacení investice, avšak Matrice 30T má poloviční dobu letu než eBee X. Tento výsledek nezahrnuje další náklady na provoz bezpilotního prostředku a softwaru ke zpracování snímků. (Výroční zpráva 2020, 2020)

Další snížení návratnosti investice může být pomocí vegetačních indexů, které lze vypočítat na základě dat z RGB kamer, kterou mají všechny v tabulce zmíněné bezpilotní prostředky. V roce 2017 náklady na chmel za ochranu rostliny byly 17 795 Kč za hektar a hnojiva byly vyčísleny na 8 323 Kč za hektar (Janotová, 2019). Použití vegetačních indexů může ušetřit okolo 3 až 5 % nákladů. Při 3 % úspoře a obhospodaření 706 hektarů by se investice do senseFly eBee s senseFly Duet T zaplatila.

## 7.4 Porovnání různých DPZ

Zkratka DPZ znamená dálkový průzkum země, do kterého spadají nejenom snímky pořizované bezpilotními prostředky, ale i satelitní snímky a snímky pořizované letadly s pilotem na palubě.

### 7.4.1 Výhody a nevýhody satelitních snímků

#### Výhody:

- Nulové náklady pro uživatele na získání snímků ze satelitu Sentinel 2, evropská kosmická agentura je poskytuje zcela zdarma.
- Snímkování velké plochy v jeden čas, šíře záběru 290 km.
- Přelety i za nepříznivých povětrnostních podmínek.

**Nevýhody:**

- Vysoké náklady pro provozovatele, spuštění dvou satelitů Sentinel 2 roce 2016 stálo 350 miliónů eur. (Clark, 2015)
- Snímky zkreslené atmosférou nebo oblačností.
- Snímky pořízené jenom v určitou dobu, družice Sentinel 2a přelétne nad stejným místem jednou za 10 dní, respektive snímky jsou pořizované každých 5 dní ve spojení s družicí Sentinel 2b. (Sentinel-2 operations)
- Nízké rozlišení 10 až 60 m na pixel podle pásma. (Sentinel-2 operations)

**7.4.2 Výhody a nevýhody leteckých snímků****Výhody:**

- Vyšší rozlišení snímků.
- Lepší odolnost proti nepříznivým podmínkám.
- Snímkování středně velké plochy, větší než u bezpilotních prostředků menší než u družic.
- Bez atmosférického zkreslení.

**Nevýhody:**

- Vyšší náklady na pořízení snímků než u bezpilotních prostředků.
- Středně velká snímkovací plocha.
- Nízký počet poskytovatelů leteckých prací.

**7.4.3 Výhody a nevýhody bezpilotních snímků****Výhody:**

- Aktuální data.
- Velmi vysoké rozlišení, kamera senseFly Aeria X dosahuje 2,5 cm na pixel ve 120 metrech nad povrchem.
- Bez atmosférického zkreslení.
- Použití i v členitějším terénu.
- Vysoká variabilita aplikací.

**Nevýhody:**

- Horší odolnost proti nepříznivým podmínkám, zejména větru a dešti.
- Pořízení snímků za nestejných světelných podmínek při větší snímkovací ploše.
- Nedořešená legislativa.
- Nejnižší snímková plocha, nejkratší operační výdrž.
- Středně velké náklady na pořízení snímků.
- Zakázané oblasti letů bezpilotních prostředků, povolení přeletů od Úřadu pro civilní letectví.



## 8 Závěr

V této diplomové práci byla popsána problematika na základě studia odborné literatury věnující se využití termálních snímků z bezpilotních prostředků v zemědělství konkrétně k určení variability chmele. V práci jsou rozděleny konstrukce bezpilotních prostředků a na základě jejich limitujících faktorů a druhu úkolu je doporučen výběr typu konstrukce.

V praktické části práce došlo ke sběru dat pomocí měření v terénu s bezpilotním prostředkem senseFly eBee X vybaveného termální kamerou senseFly DUET T. Proběhlo 22 letů za pomoci autonomní mise na pozemcích Chmelařského institutu pracoviště Stekník. Následná data byla zpracována v geografickém informačním systému QGIS, kde jsou graficky znázorněny různé teplotní oblasti vegetace. Rok 2021 s vysokými průměrnými srážkami nebyl vhodný pro měření vodního stresu z nedostatku vody, ke kterému se primárně používají termální kamery. Celkově lokalita chmelnic okolí Stekníku není vhodná na zkoumání nedostatku vody a vzniku vodního stresu kvůli umělé závlaze a žádného omezení čerpání vody ze strany povodí Ohře při sušších obdobích. Pro další měření se doporučuje zkoumat rok s nižšími průměrnými srážkami a porovnávat naměřené hodnoty nejenom ze zavlažované chmelnice, ale i z chmelnice bez umělé závlahy. Doplněním o data z multispektrální kamery se může zpřesnit určení vodního stresu a další variability chmele a jeho odrůd.

Výsledky měření a analýzy obrazu odhalily poškození v západní části biochmelnice, které byly potvrzeny fyzickým prozkoumáním biochmelnice. Dále byl zjištěn teplotní trend mezi Žateckým poloraným červeňákem a Premiantem, kdy při všech čtyřech měřeních během června vyšlo, že z větší části naměřená plocha Žateckého poloraného červeňáku je chladnější než naměřená plocha Premiantu. Tyto výsledky napovídají o lepší toleranci k vyšší teplotě a vodnímu stresu, kdy se Žatecký poloraný červeňák efektivněji chladí pomocí výparů vody z průduchů. Tím lze stanovit i lokality příhodné pro pěstování různých odrůd chmele na základě naměřených průměrných teplot v určité lokalitě.

Podle rozdílných výsledků naměřených teplot mezi odrůdami je doporučeno rozsáhlejší polní měření pro potvrzení výsledků měření zmíněných ve vlastní práci. Pro stanovení přesnějších výsledků je potřeba vybavit chmelnici více senzory a pro porovnání snímat i chmelnici bez závlahy po dobu alespoň tří let.

V poslední části praktické části je ekonomické zhodnocení leteckých služeb a pořízení platformy pro letecké snímkování spolu s termální kamerou. Návratnost investice do platformy s termální kamerou není příliš dobrá aspoň ne v České republice, ale při dodatečném pořízení

multispektrální kamery se doba návratnosti snižuje. Zemědělský podnik je díky oběma kamerám schopný ušetřit náklady na pěstování plodin a zvýšit výnos. Největším přínosem jsou nasbíraná data na jejichž základě můžeme dlouhodobě rozhodovat o zemědělských postupech a zpřesňovat rozhodnutí. Na konci ekonomického zhodnocení je porovnání různých platform pro dálkový průzkum Země, kde jsou rozebrány jejich výhody a nevýhody. Největší výhodou bezpilotních prostředků je jejich přesnost, kvalita obrazových dat a nízké náklady na pořízení. S vyvíjeným tlakem na přesnost a kvalitu dat už nelze jenom využívat obrazová data ze satelitních systémů. Závěrem lze říct, že bezpilotní prostředky budou více a více využívány v různých zemědělských aplikacích. Zatímco jejich užití v různých zemědělských aplikacích budou potvrzovat různé výzkumy a projekty.

## 9 Seznam použité literatury

11 Hybrid Fixed-Wing/VTOL UAV Advantages & Disadvantages [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.thecoronawire.com/hybrid-fixed-wing-vtol-advantages-disadvantages/>

BarthHaas report hops 2020/2021 [online]. 2021 [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: <https://www.hops.com.au/downloads/news-events/BarthHaas-Hop-Report-2020-2021.pdf>

CLARK, Stephen, 2015. 'Europe's Landsat' in the starting blocks [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://spaceflightnow.com/2015/06/21/europes-landsat-in-the-starting-blocks/>

České chmelové odrůdy [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.hop.cz/home.php?pg=about&page=odrudy&lg=cz>

EASYMAP A.S. CENÍK VYBRANÝCH SLUŽEB A PRODUKTŮ EASYMAP A.S [online]. [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.easymap.cz/ceny/>

Environmental measuring systems s.r.o., Kociánka 85/39, Brno

GREEN, Kass, Russell G. CONGALTON a Mark TUKMAN, 2017. *Imagery and GIS: best practices for extracting information from imagery*. Redlands, California: Esri Press. ISBN 9781589484542.

GUPTA, Ravi P, 2018. *Remote Sensing Geology*. Third. Berlin: Springer. ISBN 978-3-662-55874-4.

HALOUNOVÁ, Lenka a Karel PAVELKA, 2005. *Dálkový průzkum Země*. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-01-03124-1.

HALOUNOVÁ, Lenka, 2009. *Zpracování obrazových dat*. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04253-3.

HOLÝ, Kamil a kolektiv, 2017. *Integrovaná ochrana chmele*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby. ISBN 978-80-7427-265-3

JANOTOVÁ, Bohdana a Marcela REMEŠOVÁ. *Sledování a analýza nákladů a rentability chmele* [online]. Ústav zemědělské ekonomiky a informatiky v Praze, 8.4.2019 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.zsch.cz/news/sledovani-a-analyza-nakladu%CC%8A-a-rentability-chmele/>

JONES, Hamlyn G. a Robin A. VAUGHN, 2010. *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. New York: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-920779-4.

KARAS, Jakub a Tomáš TICHÝ. *Drony*. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.

Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>

LUKÁŠ, Jan a kolektiv, 2019. *Metodika detekce vodního stresu polních plodin termokamerovým systémem*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby. ISBN 978-80-7427-304-9.

Messina, G.; Modica, G. (2020). *Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook*. *Remote Sens.* 12, 1491. <https://doi.org/10.3390/rs12091491>

*Odrůda Žatecký poloraný červeňák* [online]. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <http://www.bohemiahop.cz/cz/odrudy-chmele/87-odruda-zatecky-polorany-cervenak>

*Odrůdy chmele* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <http://www.chmelarskemuzeum.cz/cz/odrudy-chmele.htm>

*Parametry termokamery* [online]. *Termokamera.cz* [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>

POKORNÝ, Jaroslav Chmel, (2022)

*Požadavky chmele na stanovištní podmínky* [online]. [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: [https://agrobiologie.cz/SMEP3/Chmel/chmel/php/skripta/kapitola310b.html?titul\\_key=17&id\\_kapitola=14](https://agrobiologie.cz/SMEP3/Chmel/chmel/php/skripta/kapitola310b.html?titul_key=17&id_kapitola=14)

*Princip a funkce* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>

*Provoz v rámci „Otevřené“ (Open) kategorie* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/otevrena-kategorie-open/provoz-v-ramci-otevrene-open-kategorie/>

Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172. 107148

Saeed, A. S., Younes, A. B., Cai, C., Cai, G. (2018). *A survey of hybrid Unmanned Aerial Vehicles*. *Progress in Aerospace Sciences*, 98, 91-105

SENSEFLY.COM. *Compare drones* [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.sensefly.com/drones/compare-drones/>

*Sentinel-2 operations* [online]. [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Operations/Sentinel-2\\_operations](https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations)

*Specifická kategorie (SPECIFIC)* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/specificka-kategorie-specific/>

SUROVÝ, Peter, 2015. *Drony a jejich využití v lesnictví* [online]. 16.4.2015 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.silvarium.cz/lesnictvi/drony-a-jejich-vyuziti-v-lesnictvi>

*Tepelné záření* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>

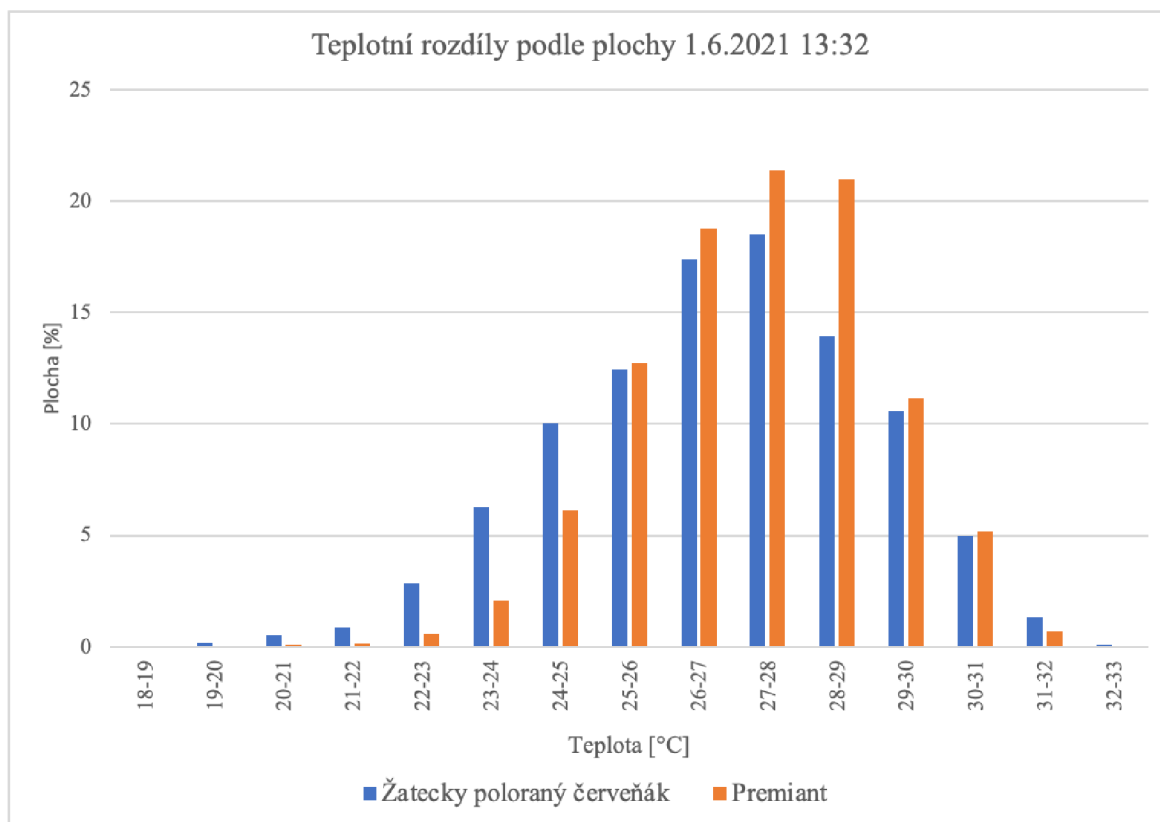
VÁVRA, Martin, 2019. *Kolik dní v roce se dají sbírat data pomocí bezpilotních leteckých systémů*. Praha. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Jan Komárek.

*Výroční zpráva 2020* [online]. Povodí Ohře, 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://www.poh.cz/assets/File.ashx?id\\_org=200341&id\\_dokumenty=7279](https://www.poh.cz/assets/File.ashx?id_org=200341&id_dokumenty=7279)

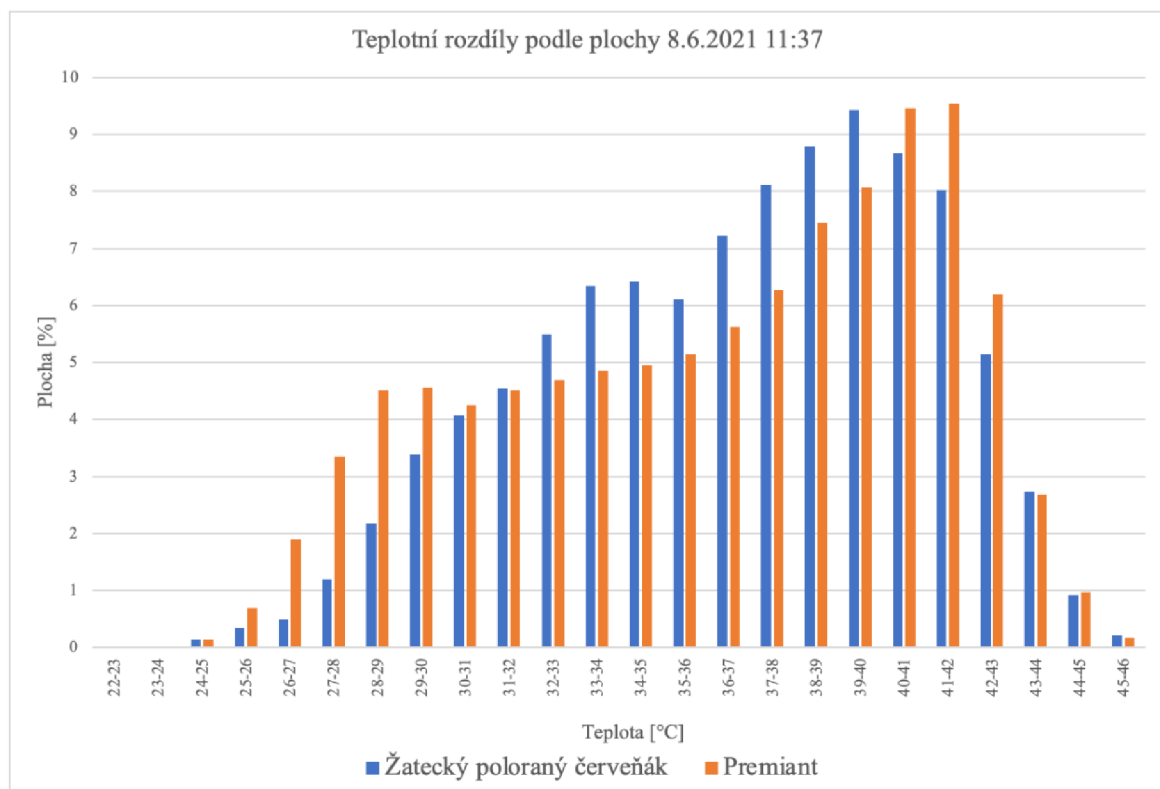
*Závlaha chmele* [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: [https://agrobiologie.cz/SMEP3/Chmel/chmel/php/skripta/kapitola6f68.html?titul\\_key=17&id\\_kapitola=58](https://agrobiologie.cz/SMEP3/Chmel/chmel/php/skripta/kapitola6f68.html?titul_key=17&id_kapitola=58)

## 10 Přílohy

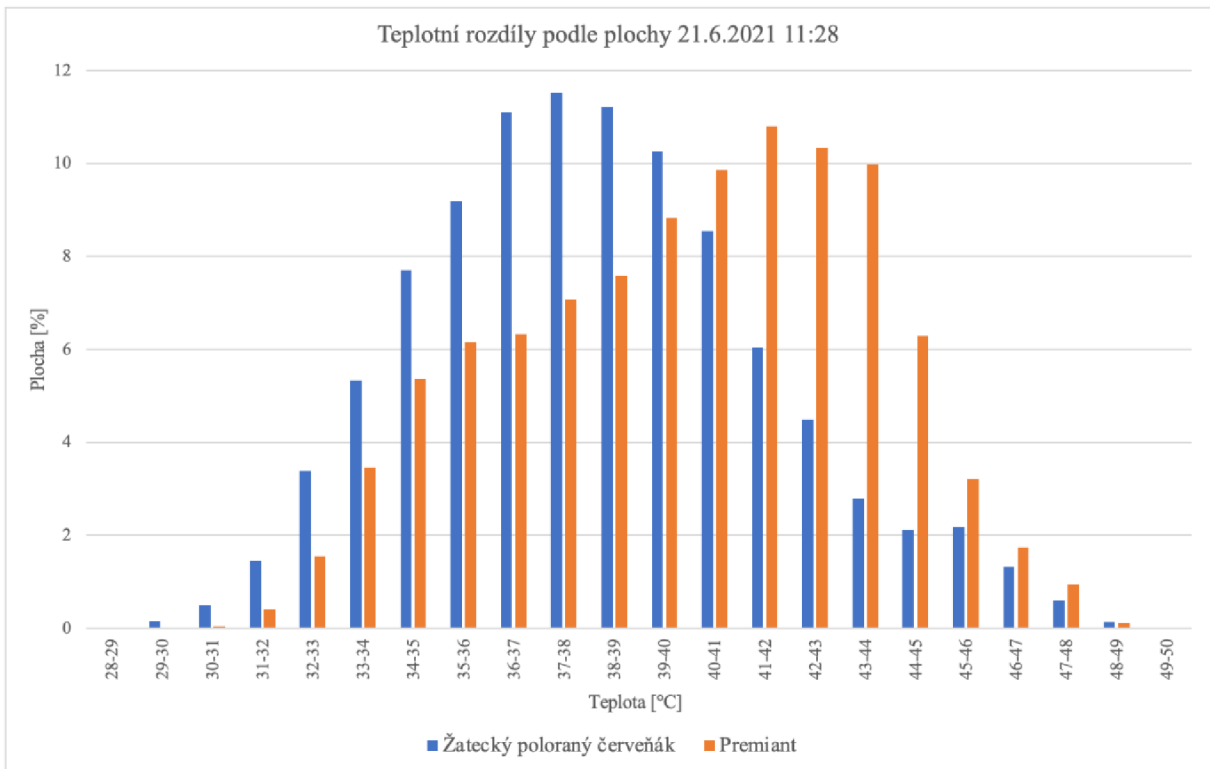
Příloha 1 Graf porovnání teplot podle plochy odrůd na biochmelnici



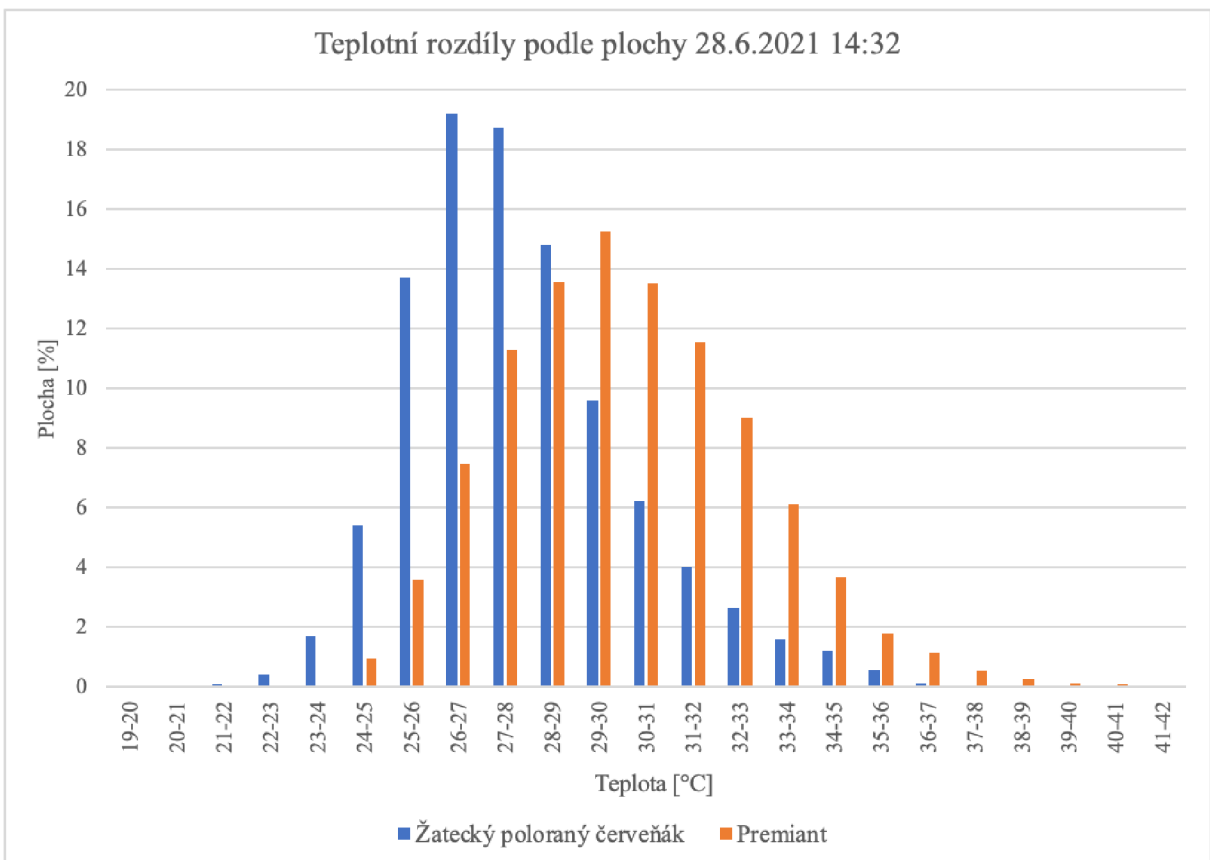
Příloha 2 Graf porovnání teplot podle plochy odrůd na biochmelnici



Příloha 3 Graf porovnání teplot podle plochy odrůd na biochmelnici



Příloha 4 Graf porovnání teplot podle plochy odrůd na biochmelnici



Detail termálnej mapy biochmelnice Stekník 1.6.2021

Žatecký poloraný červenač

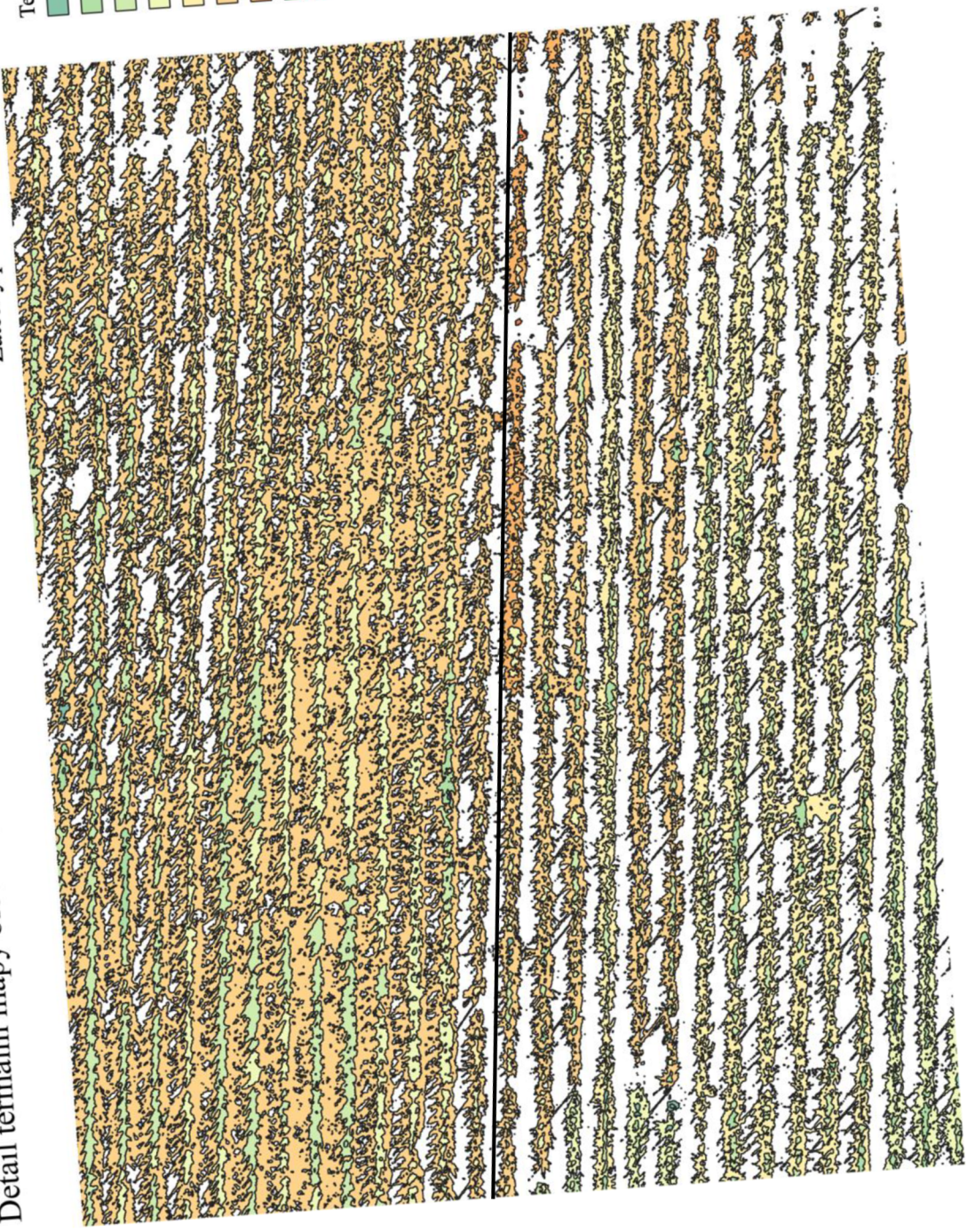


Premiant



Detail termální mapy biochmelnice Stekník 8.6.2021

Žatecký poloraný červeňák



Teplota [°C]

26 - 28
28 - 30
30 - 32
32 - 34
34 - 36
36 - 38
38 - 40
40 - 42
42 - 44



Premiant

Detail termální mapy biochmelnice Stekník 21.6.2021

Žatecký poloraný červeňák



Teploata [°C]

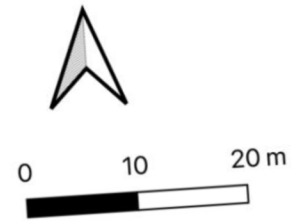
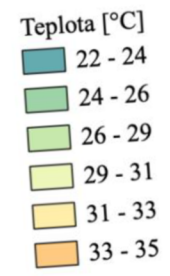
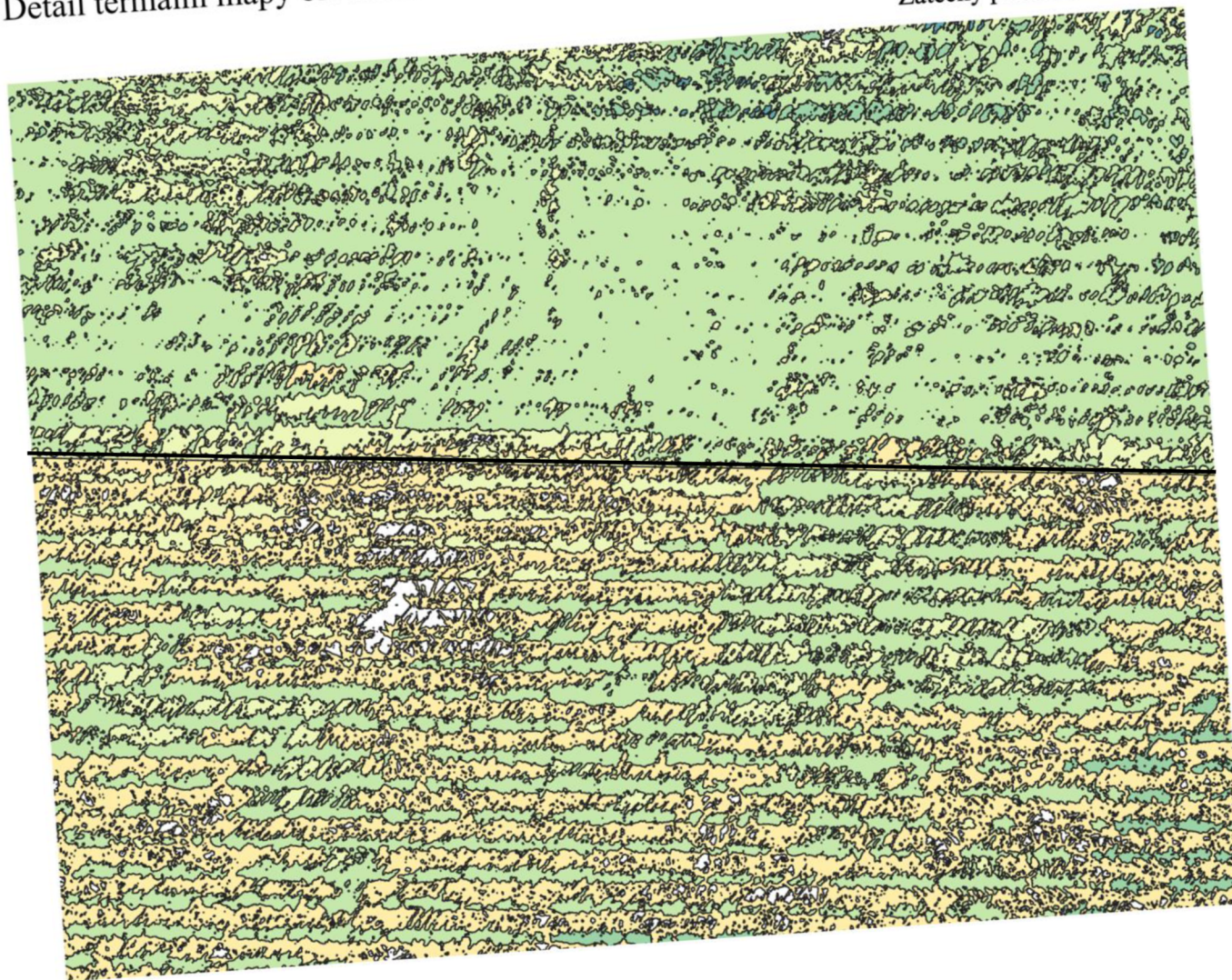
31 - 33
33 - 35
35 - 37
37 - 39
39 - 41
41 - 43
43 - 45



Premiant

Detail termální mapy biochmelnice Stekník 28.6.2021

Žatecký poloraný červeňák



Príloha 8 Detail termální mapy z 28.6.2021

Premiant

## Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 - kvadroptéra DJI Matrice 300 RTK .....	4
Obrázek 2 VTOL křídlo Atmos Marlyn UMC-R10C .....	5
Obrázek 3 Hybridním systém DeltaQuad Pro #MAP.....	6
Obrázek 4 Vliv sloučenin polovodiče na vlnové délky .....	12
Obrázek 5 Různá kvalita obrazu podle rozlišení kamery .....	14
Obrázek 6 Chmelovová hlávka a její průřez.....	24
Obrázek 7 Softwarové rozhraní autonomní mise senseFly .....	29
Obrázek 8 Křídlo senseFly eBee X.....	30
Obrázek 9 Kamera senseFly Duet T .....	31
Obrázek 10 Termální mapa biochmelnice .....	33
Obrázek 11 Poškození biochmelnice podmáčením půdy .....	34
Obrázek 12 Detail termální mapy biochmelnice .....	35
Tabulka 1 Naměřené rozmezí teplot a teplota vzduchu v době měření .....	28
Tabulka 2 Objem umělé závlahy na jednu rostlinu 2021 .....	28
Tabulka 3 Parametry křídla senseFly eBee X.....	30
Tabulka 4 Parametry termální kamery senseFly Duet T .....	31
Tabulka 5 Porovnání cen leteckých prací .....	37
Tabulka 6 Porovnání cen bezpilotního prostředku s kamerou.....	38