

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



Využitelnost IR kamery Optris TIM450 pro detekci zamokření půdy

Testing Optris TIM450 IR camera for detection of soil moisture

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

Praha, 2021

Bc. Tomáš Najman

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Najman Jméno: Tomáš Osobní číslo: 458863
Zadávající katedra: Katedra hydromeliiorací a krajinného inženýrství
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Využitelnost IR kamery Optris TIM450 pro detekci zamokření půdy
Název diplomové práce anglicky: Testing Optris TIM450 IR camera for detection of soil moisture

Pokyny pro vypracování:

Sestavte vhodný postup snímkování pro vytvoření IR ortofotomapy na územích o velikosti do 1 ha.

Popište postup vhodného zpracování dat pro přípravu termálního ortofota.

Vyhodnoťte několik testovacích náletů a posuďte využitelnost dané IR kamery, případně její parametry porovnejte s alternativními zařízeními dostupnými na trhu.

Popište možné nejistoty a chyby vyplývající z pořízení dat vzhledem k požadované přesnosti, navrhnete postupy pro další testování IR kamer k daným účelům.

Seznam doporučené literatury:

xdcSledz A, Unger J, Heipke C (2018) Thermal IR imaging: Image quality and orthophoto generation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives 42:413–420. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-413-2018>

Zumr D, David V, Jeřábek J, et al (2020) Monitoring of the soil moisture regime of an earth-filled dam by means of electrical resistance tomography, close range photogrammetry, and thermal imaging. Environmental Earth Sciences 79:1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09052-w>

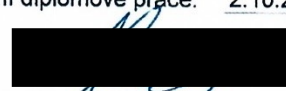
Petreje M. (2019) Teplotní režim zkušebních ploch zelených střech. Bakalářská práce, ČVUT v Praze

Jméno vedoucího diplomové práce: Josef Krása, doc. Ing Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

2.10.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Využitelnost IR kamery Optris TIM450 pro detekci zamokření půdy“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Krásky, Ph.D. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu panu doc. Ing. Josefu Krásovi, Ph.D. za jeho pomoc při pořizování zdrojových dat, odborné vedení a připomínky při zpracování mé diplomové práce.

Práce vznikla za podpory projektů DG16P02M036 – Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví, TITSMZP809 – Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období a SS01020366 – Využití dat dálkového průzkumu Země pro posouzení negativních dopadů přívalových srážek.

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší využitelnost IR kamery *Optris TIM450* pro detekci zamokření půd. Mezi hlavní cíle patřilo sestavení vhodného postupu termálního snímání, zpracování IR ortofotomapy a následná analýza. Vyhodnocení probíhalo na základě několika pokusů na ručním nosiči a několika náletech zemědělského pozemku nasnímaných pomocí bezpilotních systémů. První část se zabývá stručným úvodem do problematiky termografie, tepelné setrvačnosti aktivní části povrchu a popisem využití technologie termálního snímání. Další část práce je věnována postupu snímání a následnému zpracování surových termálních dat softwaru *Optris PI Connect*, *Agisoft Photoscan Pro* a *ArcMap*. V následující pasáži je zpracována podrobná analýza zmiňovaných pokusů a zpracovaných náletů v lokalitě Vavříneckého rybníka za účelem odhalení a případné prostorové distribuce zamokřených oblastí. V závěru jsou shrnuty výstupy pokusů na ručním nosiči a výstupy termálního šetření několika náletů v lokalitě Vavříneckého rybníka.

Na základě vyhodnocených termálních dat lze hodnotit využitelnost IR kamery *Optris TIM450* ve vztahu k detekci zamokření spíše jako pomocný nástroj. Vzhledem k mnoha faktorům ovlivňující snímání a následné zpracování dochází v termálních ortofotomapách k výskytu řady chybně stanovených úseků. Z tohoto důvodu je nevhodné hodnotit míru půdní vlhkosti přímou korelací s výsledně stanovenou povrchovou teplotou. K odhalení chybných oblastí IR ortofota je žádoucí provést detailní analýzu surových termálních dat s případným porovnáním RGB ortofota aktuální situace. Z prezentovaných výstupů lze potvrdit, že po odhalení a eliminaci chybných oblastí může tato metoda sloužit k vytvoření primární představy o lokalitách s potenciálním zamokřením.

Klíčová slova

termokamera, termografie, povrchová teplota, detekce zamokření

Abstract

This diploma thesis solves the utility of the IR camera *Optris TIM450* for the detection of land waterlogging. Among the main aims there belonged the composition of a suitable plan of thermal photography, orthophotomap processing and the subsequent analysis. The evaluation was running on the basis of a few experiments on the hand bearer and a few self-seedings of a rural piece of land scanned by pilotless systems. The first part deals with a brief introduction to the problems of thermography, thermal momentum of the active part of the surface and the description of the used thermal recording technology. Another part of the thesis focuses on the order of recording and the subsequent processing of raw thermal data by the softwares *OptrisPI Connect*, *Agisoft Photoscan Pro* and *ArcMap*. In the subsequent passage there is done a detailed analysis of the mentioned experiments and processed self-seedings in the area of Vavřínecký pond in order to reveal and possibly also prepare the space distribution of the waterlogged areas. In conclusion there are compiled the experiments on the hand bearer and the outputs of thermal investigation of a few self-seedings in the area of Vavřínecký pond.

On the basis of the evaluated thermal data it is possible to evaluate the utility of the IR camera *Optris TIM450* in the relationship to the detection of waterlogging more as a helpful instrument. Considering many factors influencing the scanning and the subsequent processing there occur quite a lot of erroneously designated sections in the thermal orthophotomaps. For this reason, it is inappropriate to evaluate the rate of soil humidity by a direct correlation with the eventually arranged surface temperature. To reveal the faulty areas of IR orthophoto it is desirable to carry out a detailed analysis of raw thermal data with a possible comparison to the RGB orthophoto of the current situation. From the presented outputs it can be confirmed that after revelation and elimination of the faulty areas this method can be used to create a primary conception of the locations with potential waterlogging.

Keywords

thermal camera, thermography, surface temperature, detection of waterlogging

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Cíle práce	9
2	Přenos tepla na rozhraní půda - atmosféra	10
2.1	Vztah půdní vlhkosti s povrchovou teplotou.....	11
3	Termografie	13
3.1	Radiometrické snímání	15
3.2	Rovnice termografie - parametry	16
3.2.1	Emisivita povrchu	17
3.2.1.1	Metody stanovení emisivity.....	19
3.2.1.2	Nejistota způsobená emisivitou.....	19
3.2.2	Odražená zdánlivá teplota	20
3.2.3	Vliv atmosféry.....	20
3.2.4	Poloha snímače	21
3.3	Termokamery	21
3.3.1	Optris TIM450.....	22
3.3.2	FLIR Duo Pro R	23
3.3.3	FLIR Duo R.....	23
3.3.4	DJI Zenmuse H20T	24
4	UAV snímání	25
5	Pořizování a zpracování termálních dat	27
5.1	Vhodné parametry termálního snímání	28
5.1.1	Geometrické rozlišení pro ideální měření teploty	28
5.1.2	Kalibrační body	29
5.1.3	Nastavení termokamery.....	30
5.2	Zpracování surových dat.....	30
5.2.1	Vytvoření snapshotů	31
5.2.2	Fotogrammetrické zpracování	31
5.3	Příprava dat k analýze.....	34
6	Stanovení povrchové teploty	35
6.1	Testování na ručním nosiči	35
6.1.1	Pokus č. 1 – teploty v rámci jednoho termogramu.....	35
6.1.2	Pokus č. 2 – teplotní diference totožného povrchu	38

6.1.3	Pokus č. 3 – vliv vzdálenosti snímače	46
6.1.4	Pokus č. 4 – vliv umělé závlahy	48
7	Vyhodnocení konkrétní lokality – Vavřínecký rybník.....	55
7.1	Analýza stanovených teplot.....	55
7.2	Problémy ve fotogrammetrickém zpracování termografických snímků.....	59
7.2.1	Teplotní zkreslení	59
7.2.2	Nezpracovatelnost rozsáhlých homogenních ploch	62
7.2.3	Rušivé vlivy způsobující šum ve zpracování	64
7.3	Detekce zamokření půd.....	66
7.3.1	Srovnání termálních ortofot.....	68
7.3.2	Výstup termální analýzy z pohledu detekce zamokření.....	71
8	Diskuze	75
9	Závěr.....	78
10	Seznam obrázků	80
11	Seznam grafů.....	83
12	Seznam tabulek	85
13	Seznam literatury	86

1 Úvod

V současné době je trend využívání dálkového průzkumu v mnoha odvětvích vědy, průmyslu, zemědělství apod. na významném vzestupu. Neinvazivní monitorovací techniky jsou moderní a relativně rychlé. Především v oblasti vzdušné termografie pomocí letadel či jiných pilotovaných prostředků je ovšem složité zajistit optimální podmínky snímání. Uskutečnit takový nálet vyžaduje vysoké plánovací úsilí. Pro detailnější analýzy menších území není využití těchto prostředků ekonomicky realizovatelné. Proto je i z důvodu vysoké flexibility snímání, výrazně vyššího rozlišení a nízkých nákladů i v souvislosti s termálními snímáním považováno za slibné řešení využití bezpilotních systémů (*UAV – Unmanned Aerial Vehicle*) (Colomina a Molina, 2014). Oproti klasické letecké fotogrammetrii bývá soubor takto pořízených snímků v neuspořádané překrývající se formě. Proto je využití obvyklých fotogrammetrických metod zpracování velice obtížné. V dnešní době je ovšem možné zásluhou dostupnosti vysoce výkonných počítačů použít metodu *SfM (Structure from Motion)*, která není náročná na obsluhu a vede k relativně přesným výsledkům.

Termální snímání bylo původně vyvinuto především pro vojenské účely. V dnešní době je ovšem hojně využíváno jako pomocný nástroj integrované záchranné služby, dozorové činnosti, pro zkoušky elektrického vedení či tepelné izolace budov a v mnoha dalších oblastech vědy, průmyslu a zdravotnictví. Obecně se dá říci, že termovizní snímání lze využít při řešení jakýchkoliv problémů s tepelným podpisem (Maset *et al.*, 2017).

Kombinace těchto technologií, tedy bezpilotních systémů a termálního snímání, umožňuje široké spektrum uplatnění. Mimo jiné je znalost povrchové teploty v daný moment za specifických podmínek možné využít k detekci zamokřené půdy.

1.1 Cíle práce

Cílem diplomové práce je sestavit vhodný postup IR snímání a popsat přijatelnou metodu následného zpracování termálního ortofota. Druhým cílem práce je posoudit využitelnost vybrané kamery *Optris TIM450* v oblasti detekce zamokřené půdy na základě vyhodnocení několika testovacích náletů. Dalším záměrem práce je popis nejistot a chyb vyplývajících z pořízení dat a navržení postupů pro případné další testování IR kamer k daným účelům.

2 Přenos tepla na rozhraní půda - atmosféra

Jednou ze základních vlastností všech organismů a ekosystémů je neustálá vzájemná energetická výměna. Jedná se o tzv. termodynamicky otevřené systémy, ve kterých je energie kontinuálně přijímána a odevzdávána v proměnlivých poměrech (Sazima, Kmoníček a Schneller, 1989). Energie záření se mění na teplo, a naopak teplo v energii vyzařování. Tento mechanismus přenosu tepla spočívá v pohlcování poměrné části sluneční energie, která přichází ve formě krátkovlnného záření. Zbytek je odražen v závislosti na albedu daného povrchu. V případě půdního substrátu se tato hodnota pochybuje proměnlivě okolo 10 % s vazbou na charakteristické vlastnosti a vlhkost půdy. Část pohlcené energie je v podobě dlouhovlnného záření vyzařena zpět (Berlin Environmental Atlas, 2001).

Energetická bilance povrchu je přímo závislá na střídání dne a noci. Přes den při dopadu slunečního záření dochází k odvodu tepla do půdy, čímž se aktivní zóna půdy zahřívá (kladná energetická bilance). V noci je tomu přesně naopak. Teplota okolí klesá, tok tepla směřuje ven z půdy a dochází k ochlazení aktivního povrchu (záporná tepelná bilance). V letních měsících bývá celková tepelná bilance kladná, zatímco v zimních měsících záporná (Petrová, 2009).

Aktivní zóna nebo lépe aktivní povrch, ve kterém dochází k popisovaným přenosům a přeměnám sluneční energie, je obtížně definovatelná styčná plocha mezi atmosférou a zemským povrchem, tedy litosférou a hydrosférou (Klabzuba a Kožnarová, 2011). Energetická bilance soustavy atmosféra – aktivní povrch úzce souvisí s lokálním mikroklimatem. Dle Nováka (1995) je příjem a výdej tepla závislý na kvantitativních a kvalitativních vlastnostech aktivního povrchu. Respektive hlavní vliv z mikroklimatologického pohledu má druh, množství a stav přítomného porostu.

Příjem a ztráty vyzařováním, biochemickými procesy apod. lze zjednodušeně popsat energetickou bilanční rovnicí:

$$R = L \cdot E + H + G + J + S, \quad (1)$$

kde

R – celková čistá radiace [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

L – tok latentního tepla výparu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],

E – intenzita výparu (evapotranspirace) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

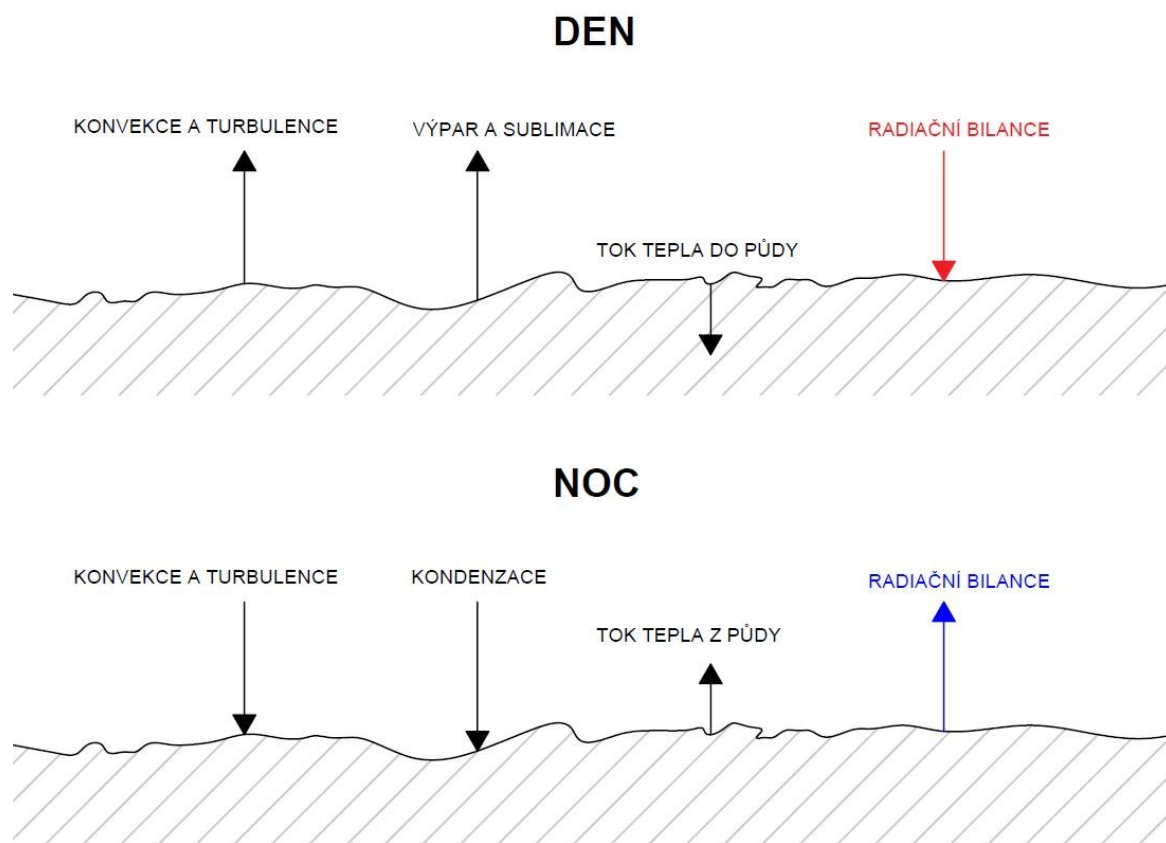
H – intenzita toku tepla odvedeného konvekcí z aktivního povrchu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

G – intenzita toku tepla do půdy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

J – energie spotřebovaná na ohřev porostu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

S – energie spotřebovaná na výpar [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Energie, která je spotřebována na výpar (S) a ohřev porostu (J) je z hlediska celé bilanční rovnice téměř zanedbatelná, tvoří zhruba 2 %. Z tohoto důvodu jsou tyto složky v rovnici (1) zpravidla vynechány (Klabzuba a Kožnarová, 2011).



Obrázek 1: Nejvýznamnější faktory bilance tepla v přírodě, upraveno z (Petrová, 2009)

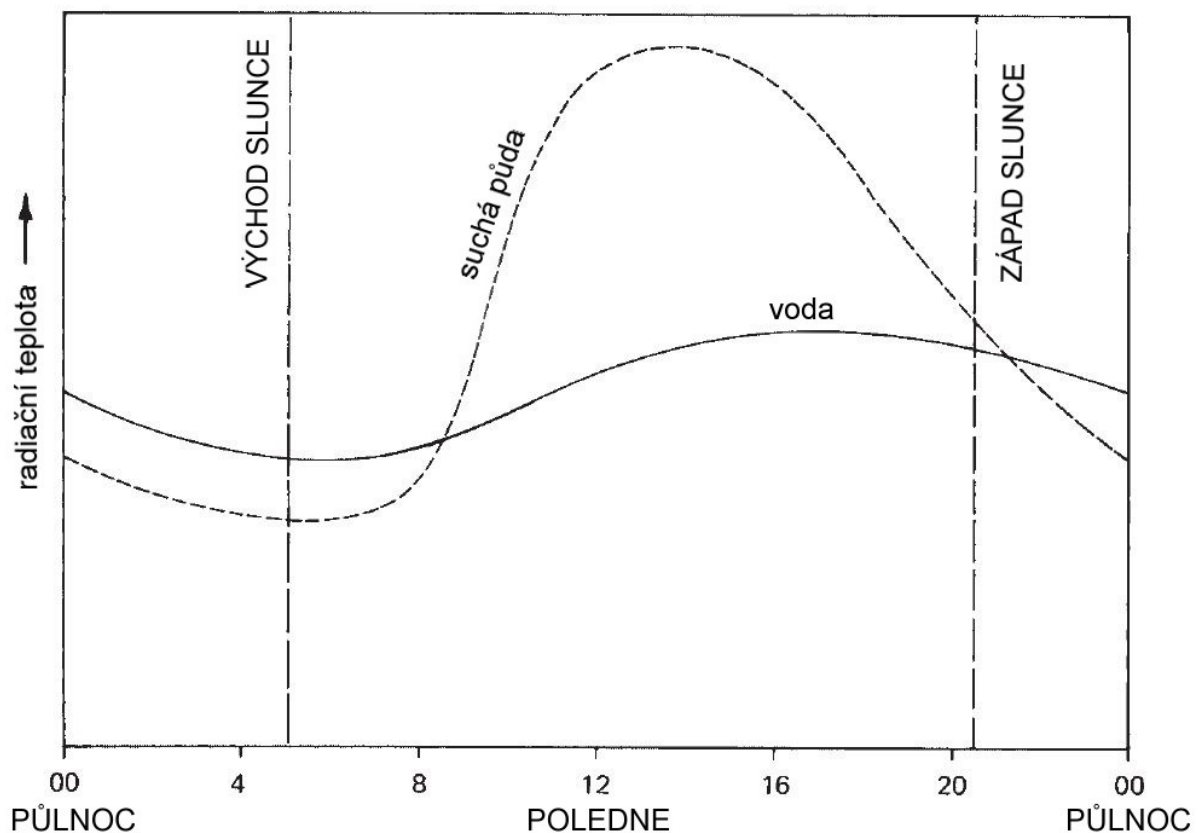
2.1 Vztah půdní vlhkosti s povrchovou teplotou

Vztah mezi povrchovou teplotou a vlhkostí půdy je popsán pomocí teorií tepelné setrvačnosti nebo bilance tepelných toků. Qiu (2006) k odvození podpovrchové vlhkosti využívá gradientu povrchové teploty. Povrchová část půdního prostředí reaguje na změnu okolní teploty různou rychlostí. Na vývoj povrchové teploty půdy v čase má klíčový vliv právě množství obsažené vody. Vrchní část půdy s vyšší vlhkostí se oproti sušší ochlazuje či ohřívá pomaleji. To je dáno vysokou tepelnou setrvačností vody. Pokud je půda suchá, má výrazně nižší setrvačnost, tedy reaguje na tepelnou změnu okolí mnohem rychleji (měrná tepelná kapacita vody: $4,2 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$; měrná tepelná kapacita půdy: cca $1,0 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$). Z tohoto důvodu je možné využít znalost povrchové teploty k detekci a definici zamokřených oblastí. Je ovšem nezbytné znát souvislosti a provést měření za správných okolností.

Ideální čas pro detekci je taková část dne, kdy dochází k nejrychlejší tepelné změně okolí. V tento moment je možné sledovat největší rozdíl ve vývoji povrchové teploty. Jedná se tedy především o přelomové situace jako jsou východ či západ slunce, kdy dochází k prudkému oteplení nebo ochlazení. Pokud ovšem chceme zjistit informace o distribuci teplot v rozsáhlejších územích, není prakticky možné využívat kontaktní měření. Proto je vhodné využít techniky bezkontaktního měření povrchové teploty. Experimenty, které prováděli Sledz a kol. (2018) dokazují, že termální snímkování během noci poskytuje lepší tepelný kontrast.

Proto je z hlediska využití tepelného dálkového průzkumu výhodnější snímkovat po západu slunce, kdy není měření ovlivněno interferencí slunečního záření, jako tomu může být při snímkování po východu.

Problém nastává při výskytu pozemní vegetace, která brání průchodu tepelného záření povrchu. Pokud je vegetační kryt v zájmové oblasti tvořen z hustého vrcholíku vyšších rostlin a zakrývá více než 20 % povrchu půdy, nemusí mít výsledný obraz produkovaný tepelným dálkovým senzorem žádný vztah k teplotě zemského povrchu. V takovém případě by byly zjištěny tepelné vlastnosti vegetace. Jestliže se ale jedná převážně o nízkou trávu, je prokázána úzká souvislost s povrchovou teplotou země i přes to, že je povrch zpravidla zcela zakryt (Pratt a Ellyett, 1979).



Obrázek 2: Průběh radiční teploty v průběhu dne, upraveno z (Lillesand, Kiefer a Chipman, 2015)

Zumr a kol. (2020) ve své práci využili kombinaci elektrické odporové tomografie (*electrical resistivity tomography - ERT*), fotogrammetrie a termálního snímání pomocí bezpilotních letounů (*unmanned aerial vehicle – UAV*) k detekci specifické povrchové a vnitřní struktury historické zemní hráze. Jejich výzkum prokázal, že bezkontaktní termální snímání poskytlo informace o distribuci povrchové teploty, která přibližně, ne však průkazně, odpovídala prostorovému rozložení obsahu vody v půdě a elektrickému odporu.

3 Termografie

Základním předpokladem teorie bezkontaktního stanovení povrchové teploty je vyzařování těles. Každé těleso, které má vyšší teplotu než absolutní nula (0 K), vyzařuje elektromagnetické záření. Spektrum tohoto záření je rozděleno na sedm vlnových pásem (v pořadí: radiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, UV, rentgenové a gama záření). Z hlediska termografického snímání nás zajímá především infračervené záření neboli *infrared radiation* (dále jen IR záření). Tato část elektromagnetického spektra je vymezena vlnovou délkou ve smluveném intervalu od 0,75 do 100 μm . Ovšem pro samotnou detekci je využíváno především vlnových délek v rozmezí 8-14 μm . Tato skutečnost je dána zejména malou pohltivostí IR záření atmosférou ve zmiňovaných vlnových délkách elektromagnetického spektra (Štajnrt, 2014), (Langhammer a Tůmová, 2013). K tepelnému záření těles se vztahují čtyři základní fyzikální zákony:

Stefan-Boltzmannův zákon

Přenos tepla zářením lze vyjádřit pomocí Stefan-Boltzmannova zákona. Tento zákon popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa, která roste se čtvrtou mocninou jeho termodynamické teploty. Hlavním problémem Stefan-Boltzmannova zákona je, že není vymezen pro specifické pásmo vyzařování. Celková intenzita záření je dána vztahem

$$I = \sigma \cdot T^4, \quad (2)$$

kde

I – intenzita záření [W/m^2],

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2$),

T – termodynamická teplota [K].

V případě tzv. šedého tělesa, tedy tělesa s nižší emisivitou (poměrná zářivost) než 1, je intenzita záření přímo závislá na hodnotě emisivity daného objektu a platí

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (3)$$

kde

ε – emisivita objektu [-].

Wienův zákon

Wienův posunovací zákon popisuje vztah záření absolutně černého tělesa a vlnové délky, která se v závislosti na teplotě mění. Tato hypotéza definuje vlnovou délku při dané teplotě, ve které je vyzařována maximální energie. Vlnová délka je nepřímo úměrná teplotě, tedy s rostoucí teplotou se vlnová délka zkracuje. Tedy platí

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

kde

λ_{max} – vlnová délka při záření maximální energie (absolutně černé těleso) [mm],

b – Wienova konstanta 2,898 [mm·K],

T – termodynamická teplota [K].

Planckův vyzařovací zákon

Na základě teorie vyzařování těles po kvantech odvodil M. Planck svůj zákon, díky němuž jsme schopni stanovovat spektrální hustotu intenzity záření $I_{(\lambda)}$ jako funkci vlnové délky záření a teploty objektu (zářiče). Zjednodušeně řečeno se jedná o množství vyzářené energie v intervalu vlnových délek $\lambda_0 - \lambda_1$. Vzhledem k faktu, že z dopadající energie se pohlcuje pouze část a zbytek se odráží, je nutné zavést tzv. spektrální hustotu poměrné pohltivosti α , která je vyjádřena podílem pohlcené a odražené energie. M. Planck ovšem uvažoval absolutně černé těleso (veškerá energie je pohlcena, $\alpha = 1$), které nevyzařuje svou energii spojitě, ale v kvantech. Integrací Planckova zákona přes celé spektrum vlnových délek elektromagnetického záření dostaneme Stefan-Boltzmannův zákon. Dle Planckova zákona platí

$$I_{(\lambda)} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{ch}{\lambda kT}} - 1)}, \quad (5)$$

kde

$I_{(\lambda)}$ – intenzita vyzařování [W/m^2],

c – rychlost světla (ve vakuu) 3×10^8 [m/s],

k – Boltzmannova konstanta $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K],

T – termodynamická teplota [K],

λ – vlnová délka [m],

h – Planckova konstanta $6,625 \times 10^{-34}$ [J·s].

Kirchhoffův zákon o vyzařování

Předchozí uvedené zákony se týkají záření dokonale černého tělesa, které při libovolné teplotě pohlcuje veškeré dopadající záření. Při dopadu záření na reálné tělesa (šedé těleso) ale zpravidla nedochází pouze k absorpci zářivého toku Φ_a [W], ale také k odrazu Φ_r [W] a průchodu objektem Φ_t [W]. Pro celkový zářivý tok tedy platí

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_t, \quad (6)$$

nebo-li

$$1 = a + r + t, \quad (7)$$

kde

a – absorpance [-],

r – reflektance [-],

t – transmitance [-].

Tento vztah je označován jako I. Kirchhoffův zákon. II. Kirchhoffův zákon říká, že ve stavu tepelné rovnováhy je schopnost povrchu pohlcovat teplo rovna jeho schopnosti jej vyzařovat, a proto platí

$$a = \varepsilon, \quad (8)$$

kde

ε – emisivita objektu [-].

Při měření pomocí termokamery se infračervené záření skládá z vyslaného záření měřeného objektu, odrazu záření ostatních těles v okolí a prostupu záření měřeným tělesem. Jak napovídá předchozí rovnice (7), součet těchto složek je vždy roven 1 ($\cong 100\%$). Jelikož nebude mít prostup v praxi téměř žádný význam, můžeme tuto složku zanedbat (Testo, 2020). Tedy zjednodušíme tvar na

$$1 = \varepsilon + r. \quad (9)$$

3.1 Radiometrické snímání

Výsledkem radiometrického snímání jsou tzv. termogramy, což jsou obrazová data reprezentující distribuci povrchových teplot snímaného objektu. Termogram vzniká vizualizací stanovených hodnot (jednotlivých pixelů) povrchové teploty, tedy přiřazením barvy dle zvolené barevné škály představující konkrétní teploty. Tento klasifikovaný rastr nese číselné vyjádření povrchové teploty, která ovšem není měřena plošným snímačem termokamery, nýbrž je dopočítána na základě intenzity infračerveného záření a několika parametrů. Z toho plyne, že termokamera neměří povrchovou teplotu přímo, ale stanovuje ji výpočtem dle tzv. rovnice termografie. Výsledné hodnoty rastru jsou tedy funkcí intenzity tepelného záření, charakteristiky povrchu, snímače a okolních podmínek (Štajnrt, 2014).

3.2 Rovnice termografie - parametry

Bezkontaktní měření povrchových teplot s sebou přináší řadu výhod. Mezi ty největší patří relativně snadné stanovení povrchové teploty větších objektů a ploch, včetně její distribuce. Další předností je rychlost odezvy měření bez ovlivňování daného předmětu. Ovšem je třeba mít na mysli veškeré vlivy, které mají nezanedbatelný dopad na výsledná data. Pro správnou interpretaci naměřených hodnot je tedy nezbytné tyto faktory ovlivňující snímání znát a brát v potaz jejich význam (Langhammer a Tůmová, 2013).

Jak již bylo řečeno, výsledné hodnoty jednotlivých pixelů rastru radiometrického snímání jsou funkcí naměřené intenzity elektromagnetického záření a dalších parametrů. Tedy nereprezentují přímo naměřenou hodnotu. Měřené složky dopadajícího elektromagnetického záření jsou ovlivněny řadou faktorů. Neexistuje žádná metoda měření, jejíž výsledky budou odpovídat absolutní realitě. V každém případě měření se vyskytují negativní vlivy, které více či méně způsobují odchylky v naměřených hodnotách (Sova, 2017).

Tyto parametry ovlivňující měřené složky elektromagnetického záření mohou být stanoveny odhadem na základě konkrétní situace v oblasti měření, nebo doplněny lokálním testem. Zmíněnými parametry jsou:

- 1) emisivita
- 2) odražená zdánlivá teplota
- 3) atmosférická situace (teplota okolí, relativní vlhkost)
- 4) poloha snímače (vzdálenost snímače od zájmového objektu).

Všechny tyto parametry mají proměnlivý vliv závislý především na konkrétním meteorologickém scénáři, materiálu měřeného objektu apod. Složkami termografického snímání jsou:

- 1) záření vyzářené povrchem zájmového objektu (nejdůležitější hodnota), ovlivněné průchodem atmosférou: $\varepsilon \tau \Phi_{obj}$
- 2) záření okolních předmětů odražené od snímaného objektu, ovlivněné průchodem atmosférou: $(1-\varepsilon) \tau \Phi_{odr}$ (tzv. „šum“)
- 3) tepelné záření atmosféry mezi snímačem a zájmovým objektem: $(1-\tau) \Phi_{atm}$ („šum“).

Na detektor kamery pak dopadá celkový zářivý tok počítaný dle rovnice:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \tau \Phi_{obj} + (1-\varepsilon) \tau \Phi_{odr} + (1-\tau) \Phi_{atm}, \quad (10)$$

kde

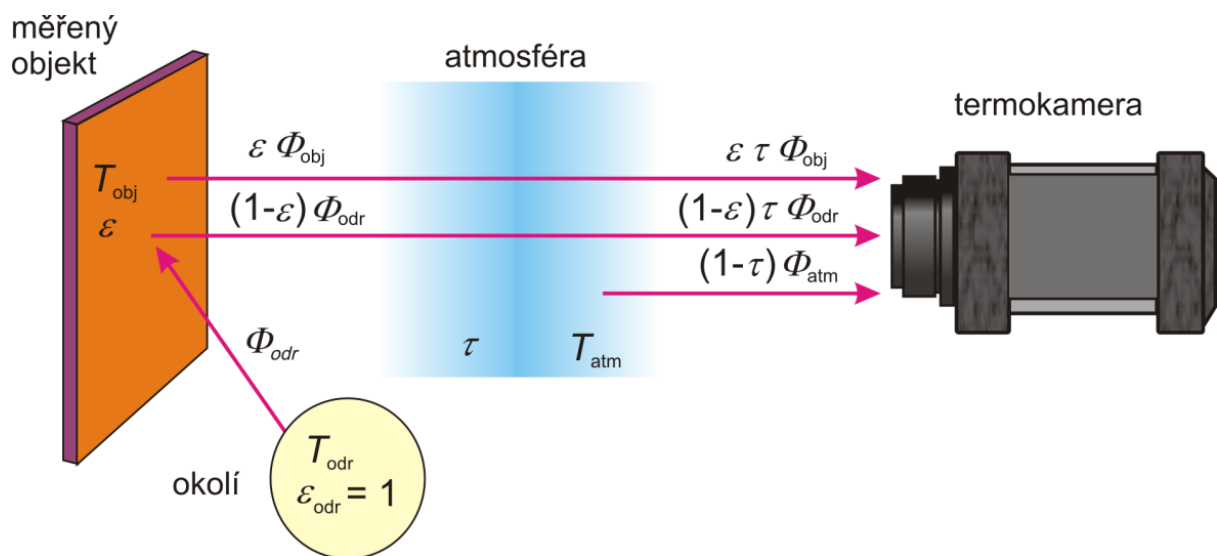
ε – emisivita měřeného povrchu,

τ – transmise atmosféry (propustnost atmosféry),

Φ – zářivý tok,

$(1-\varepsilon)$ – odrazivost povrchu,

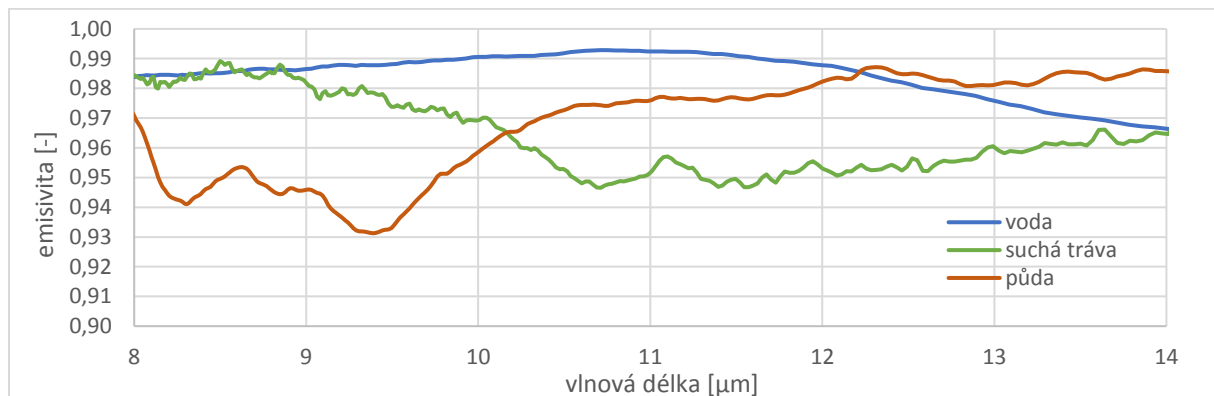
$(1-\tau)$ – emisivita atmosféry.



Obrázek 3: Popis složek termografického měření, převzato z (Sova, 2017)

3.2.1 Emisivita povrchu

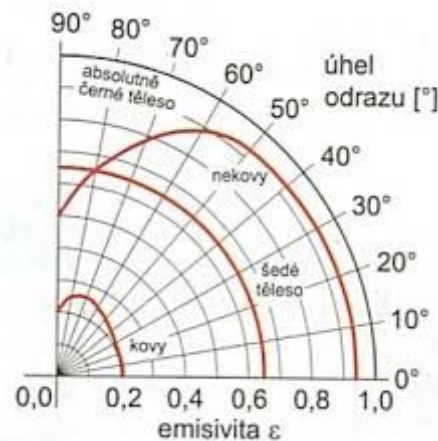
První z parametrů je tzv. emisivita povrchu, která vyjadřuje schopnost materiálu tepelně vyzařovat. Je popsána jako poměr množství záření emitovaného reálným objektem a záření dokonalého černého tělesa dle Stefan-Boltzmannova zákona. Hodnoty běžných materiálů/povrchů se pohybují v mezích 0,1 až 0,95. Nižší emisivitu než 0,1 může mít například silně vyleštěný povrch jako je například zrcadlo. Opakem jsou matné, silně oxidované nebo natřené povrchy, které mají hodnotu emisivity vysokou. Čím vyšší je hodnota emisivity, tím více tepelného záření při dané povrchové teplotě předmět vyzáří. Při měření je třeba zohlednit, že emisivita není pro měřený povrch konstantní. Předmětem této práce jsou ovšem povrchy přírodního charakteru (vegetace, půdní substrát, voda), které mají podobnou a hlavně vysokou hodnotu emisivity (kolem již zmiňované hodnoty 0,95). Především emisivita půdy může drobně kolísat v závislosti na množství obsažené vody. Pro suchou půdu jsou hodnoty nižší, kolem hodnoty 0,92 (Štajnrt, 2014). Příkladem může být následující graf, ve kterém jsou znázorněny hodnoty emisivity pro konkrétní vzorky (půdní vzorek z oblasti Concord Massachusetts).



Graf 1: Emisivita vybraných povrchů přírodního charakteru, zpracováno z (Zhang, 1999)

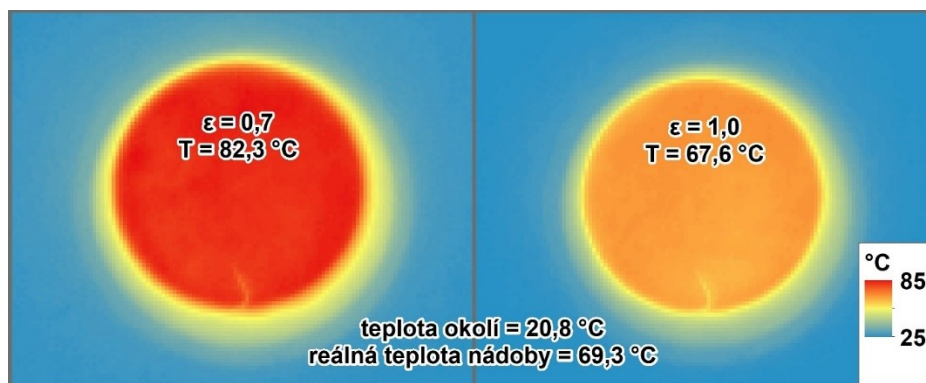
Na hodnotu emisivity konkrétního povrchu má vliv několik faktorů. První z nich je vlnová délka, se kterou se mění emisivita většiny materiálů. Zjednodušeně lze říci, že mají povrchy spektrálně závislou emisivitu. Což je ostatně vidět v grafu č. 1. IR zařízení pak integruje emisivitu v jeho pásmu, které je v našem případě 8 – 14 μm (Smetana, 2009).

Vlastnosti povrchu z hlediska emisivity se můžou měnit v závislosti na úhlu snímání. Ovšem pokud se jedná o nekovové materiály, do úhlu minimálně 45° je tato hodnota konstantní (Vollmer a Möllmann, 2010).



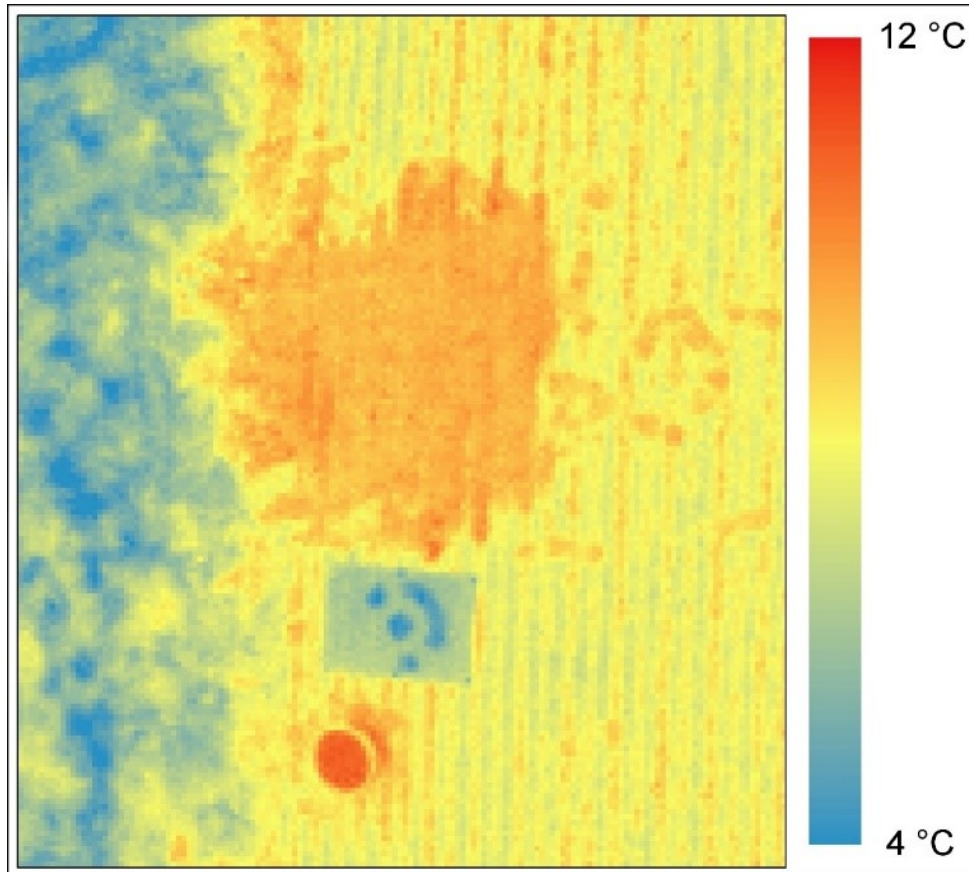
Obrázek 4: Směrová závislost emisivity, převzato z (Štajnrt, 2014)

Správné nastavení hodnoty emisivity povrchu je zvláště důležité především v případě výraznějšího rozdílu teplot mezi měřeným objektem a jeho okolím. Je-li reálná teplota povrchu měřeného objektu vyšší než okolní teplota, příliš vysoko nastavená hodnota emisivity způsobí příliš nízkou naměřenou teplotu povrchu. Pokud je v témže případě nastavená hodnota emisivity příliš nízká, způsobí příliš vysokou naměřenou teplotu povrchu. Je-li reálná teplota povrchu vůči teplotě prostředí nižší, platí tyto tvrzení obráceným způsobem (Testo, 2020). Jako příklad můžeme uvést nádobu s vodou při pokojové teplotě 20,8 °C. Voda v nádobě nabývala v čase měření hodnoty 69,3 °C. Již víme, že hodnota emisivity vody je ve snímaném pásmu 8 – 14 μm 0,98. Jak je vidět na obrázku č. 5, nastavení vyšší hodnoty emisivity způsobilo naměření o 1,7 °C nižší hodnotu. V opačném případě nastavením výrazně nižší hodnoty emisivity došlo k naměření významně teplejší hodnoty o 13,0 °C.



Obrázek 5: Vliv chybně zadané emisivity při výraznějším rozdílu teplot, nádoba s vodou (vlastní zpracování)

Dalším příkladem vlivu emisivity může být následující obrázek č. 6, kde je snímáný vlíčovací bod s relativně homogenní povrchovou teplotou. Na termogramu se ovšem zaměřovací znak jeví až o 2 °C chladnější. Tato chyba měření je způsobena odlišnou emisivitou barvy znaku oproti emisivitě materiálu vlíčovacího bodu. Emisivita tohoto konkrétního měření byla nastavena pro snímání půdy na výše zmíněnou hodnotu 0,95.



Obrázek 6: Vliv emisivity na výsledný termogram (vlastní zpracování)

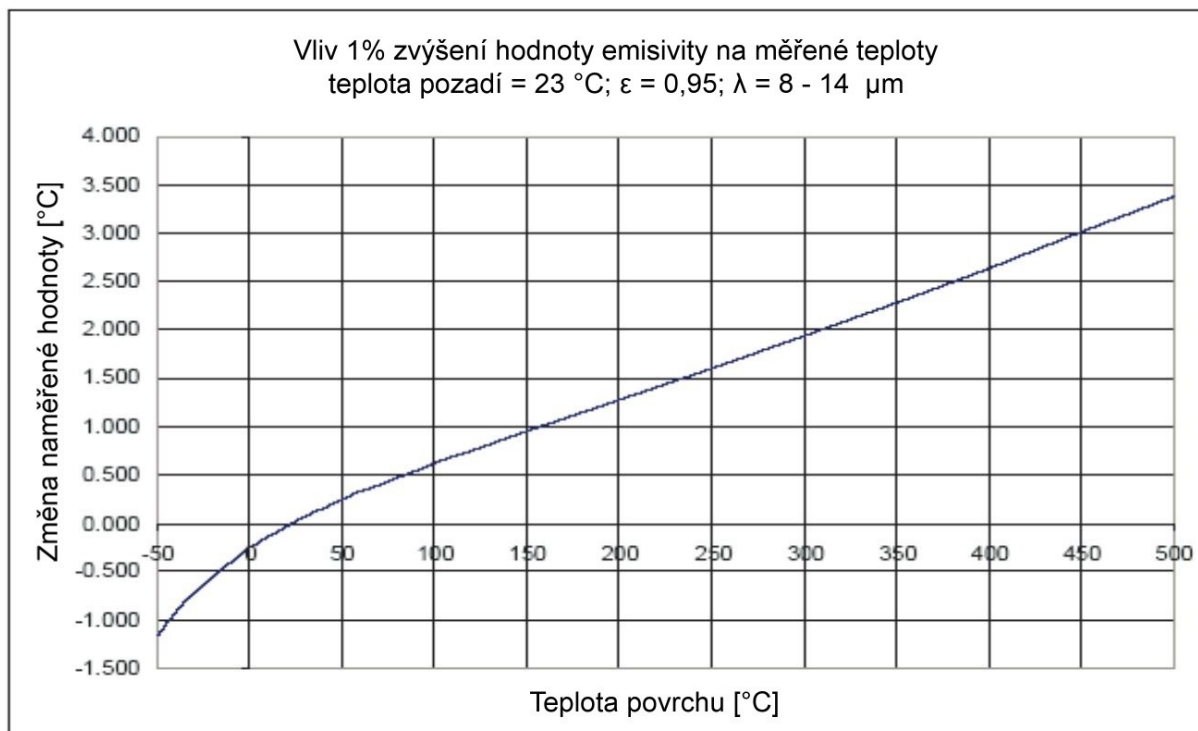
3.2.1.1 Metody stanovení emisivity

Samotné hodnoty emisivity pro dané objekty lze stanovit například pomocí známé hodnoty povrchové teploty materiálu objektu. Pak je možné měnit emisivitu jako parametr kamery do chvíle, kdy se měřená teplota shoduje s teplotou reálnou. Nebo lze hodnotu získat zjednodušeně, odečtením z obecných tabulek. Je třeba uvažovat, že tabulkové hodnoty jsou zpravidla vydané pro určitou teplotu okolí a pro konkrétní stav materiálu (stupeň koroze, míra saturace apod.).

3.2.1.2 Nejistota způsobená emisivitou

Pokud budeme při kalibraci IR zařízení postupovat špatně, respektive pokud nebudeme znát emisivitu kalibrační desky přesně, může mít naměřená teplota fatální odchylku od skutečné teploty. Například pokud uvažujeme emisivitu povrchu kalibrační desky 0,95 a skutečná hodnota je 0,93, způsobená odchylka zapříčiní chybu 6,6 °C na povrchu o teplotě 500 °C (Smetana, 2009). V případě povrchu o standardních teplotách charakteristických pro životní prostředí (-20 až 40 °C) by nemělo docházet k výrazným chybám. Dle následujícího grafu č. 2 lze říci, že 1 % navýšení hodnoty emisivity vygeneruje v extrémním případě 20stupňového

rozdílu (vůči teplotě pozadí) chybu do 0,25 °C. Pokud pro snímání půdy, vegetace apod. nastavíme hodnotu emisivity 0,95, víme, že potenciální chyba emisivity bude přibližně do 3 %. Při stejném teplotním rozdílu (20 °C) okolí a měřeného povrchu by tato chyba zkreslovala výslednou hodnotu o 0,75 °C. Lze tedy předpokládat, že v případě malého rozdílu teploty povrchu a okolí (např. do 5 °C), bude chyba v relativním rozdílu sledovaných teplot dané lokality i vzhledem k přesnosti měřícího zařízení zanedbatelná.



Graf 2: Vliv nejistoty emisivity, upraveno z (Smetana, 2009)

3.2.2 Odražená zdánlivá teplota

Zdánlivá odražená teplota, někdy také teplota pozadí, charakterizuje odražené tepelné záření od povrchu měřeného objektu. Základní souvislost odrazivosti a emisivity povrchu je vidět na příkladu tělesa s nepropustným povrchem, kde platí $\rho = 1 - \varepsilon$ (ρ – odrazivost, ε – emisivita). Z této rovnice lze v praxi vyvodit závěr, že s rostoucí hodnotou emisivity klesá vliv odražené zdánlivé teploty. Z toho plyne, že je vždy méně obtížné měřit povrchy s vysokou emisivitou (Sova, 2017). Pokud by se těleso chovalo jako dokonalý reflektor ($\varepsilon = 0$), odrážel by 100 % pozadí. Měřící zařízení by pak nestanovovalo povrchovou teplotu, ale teplotu pozadí. Jestliže budeme uvažovat povrch s emisivitou 0,95, víme tedy, že 5 % energie je odraženo jak určuje Kirchhoffův zákon. Odražená energie je závislá na teplotě pozadí (Smetana, 2009).

3.2.3 Vliv atmosféry

Atmosféra, především parametry jako teplota okolí nebo relativní vlhkost, mohou obtížně definovatelným způsobem ovlivňovat termální snímání. Hlavním důvodem je fakt, že není spektrálně zcela propustná. Její propustnost se odvíjí od obsahu molekul vody, které jsou pro IR záření nepropustné. Přítomnost vyššího procenta vodních částic v atmosféře způsobí snížení zachycené intenzity záření, což vede ke stanovení nižších povrchových teplot, než jsou reálné. Ve většině dnešních termografických systémech včetně využití termokamery TIM450

Lze tento vliv kompenzovat zadáním součinitele propustnosti, neboli transmise τ_{atm} [-], který je závislý především na relativní vlhkosti vzduchu a vzdálenosti snímače od měřeného objektu. V atmosférickém prostředí se ovšem vyskytují i částice, které se samy o sobě chovají jako tělesa, tedy samy vyzařují energii. Pokud jsou nahromaděny v místě snímání ve větší koncentraci, mohou způsobit opačný efekt, tedy zesílení zachycené intenzity záření, což samozřejmě vede ke stanovení vyšší povrchové teploty. Většina dnešních termokamer, opět včetně využití *TIM450*, umožňuje eliminaci tohoto vlivu zadáním teploty okolí (Štajnrt, 2014).

3.2.4 Poloha snímače

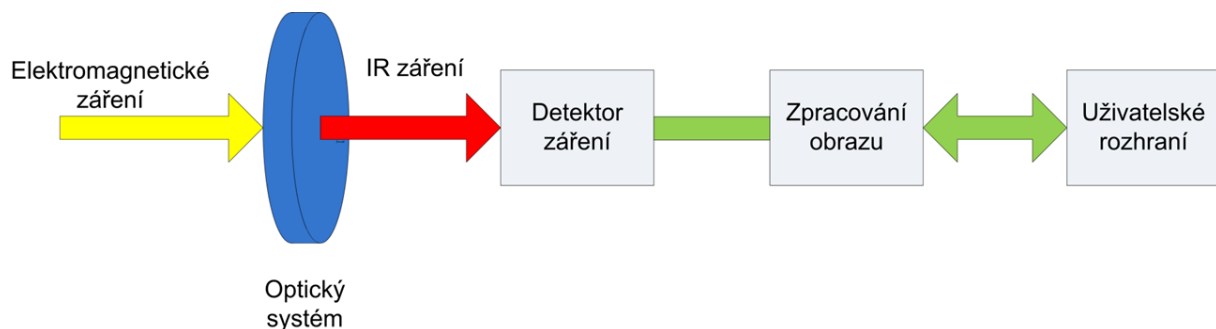
Poloha snímače je důležitá z několika důvodů. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, na výsledně stanovené teploty má vliv propustnost atmosféry. Se zvětšující se vzdáleností objektivu termokamery a měřeného objektu se zvyšuje mocnost atmosférické vrstvy, kterou musí signál projít. Logicky se tedy především při nižší propustnosti přímo úměrně snižuje množství zachyceného záření, a tedy i stanovená teplota oproti teplotě skutečné.

Další zásadní vliv má poloha nebo lépe řečeno vzdálenost snímače na rozlišení prezentovaných dat. V případě příliš velké vzdálenosti, tedy velmi nízkého rozlišení termografických dat, mohou být některé objekty těžko definovatelné, nebo dokonce úplně zanikat (rozměr tělesa je menší než velikost pixelu). Tento faktor je třeba brát v úvahu a přizpůsobit tomu samotné snímání.

3.3 Termokamery

Využívání termokamer je v dnešní době běžné v mnoha odvětvích průmyslu, vědy, vojenství nebo dokonce zdravotnictví apod. Konstrukce těchto zařízení se příliš neliší od klasického digitálního fotoaparátu či kamery. Elektromagnetické záření prochází skrze objektiv, který ho dále promítá na detektor. Ten je tvořen 2D maticí mikrobolometrů, které jsou schopny měřit intenzitu záření. Následně je tato informace digitalizována v již zmiňovaný termogram.

Pro správné bezdotykové měření teploty je nutné selektovat pouze část elektromagnetického spektra dopadajícího záření. To je zajištěno optikou termokamery, která je dnes v naprosté většině případů vyráběna jako spojka z germania s absencí optického zoomu. Důležitou vlastností germania je propustnost infračerveného záření pouze v intervalu vlnových délek, který je důležitý z hlediska termálního snímání (8 až 14 μm). Od klasické skleněné čočky se liší pouze použitým materiálem, optické vlastnosti jsou identické. Povrch čočky je upraven tenkou antireflexní vrstvou z důvodu zamezení odrazu infračerveného záření.



Obrázek 7: Blokové schéma termokamery, převzato z: <http://www.termokamera.cz>

V drtivé většině případů se dnes používají tzv. tepelné detektory, které identifikují změnu elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího infračerveného záření. V závislosti na změně intenzity záření mění každý mikrobolometr matice detektoru elektrický odpor. Zjednodušeně lze říci, že se na základě množství dopadajícího záření ohřívá. V méně početné skupině termokamer mohou zařízení disponovat tzv. fotonovým detektorem, který funguje na principu počítání množství fotonů (kvant elektromagnetického záření) a je schopen detekovat záření ve výrazně užším rozsahu vlnových délek. Oproti tepelnému detektoru je fotonový výrazně citlivější, ovšem jeho provoz je limitován nutností dodatečného chlazení. Rozlišení dnes používaných detektorů se výrazně liší v závislosti na třídě kamery. Nejlevnější kamery nižších tříd disponují sadami 100 x 100 pixelů (snímačů), jejichž cena se pohybuje v řádu desítek tisíc korun. Termokamery střední třídy jsou ve většině případech vybaveny sadami o rozlišení 320 x 240 pixelů a jejich cena se pohybuje kolem sto tisíc korun. Nejvyšší třídy kamer dosahují rozlišení 1280 x 960 pixelů a jejich cena se pohybuje v řádu několika stovek tisíc korun. Přesnost měřicího systému dnešních termokamer se standardně uvádí jako \pm hodnota $^{\circ}\text{C}$ nebo \pm hodnota %, přičemž směrodatnou hodnotou je větší z nich (Termokamera.cz, 2020).

3.3.1 Optris TIM450

V současnosti je v nabídce celá řada termokamer různých tříd a typů pro širokou škálu využití. Od stacionárních běžně dostupných kontrolních kamer po vysoce přesné termokamery určené pro vědecké účely apod. Termokamera *TIM450* od společnosti *Optris* je určena především pro průmyslové využití a je rozměrově nejmenší ve své kategorii (46 x 56 x 90 mm, 320 g). Tepelný detektor FPA (nechlazený – 25 x 25 μm) o pixelovém rozlišení 382 x 288 dosahuje citlivosti až 40 mK. Radiometrické snímání dokáže zachycovat teploty v rozsahu -20 až 900 $^{\circ}\text{C}$ s frekvencí až 80 Hz (80 snímků za vteřinu). Kamera je chráněna proti vniknutí prachových částic a vody stupněm krytí IP67. Konstrukce kamery umožňuje výměnu tří typů objektivů (standartní 38°, širokoúhlý 62° a teleobjektiv 13°). Přesnost měření zařízení je uváděna $\pm 2^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ (HotSet, 2020). Aparaturu lze snadno upevnit na klasický stativový závit, je tedy kompatibilní s většinou ručních i bezpilotních nosičů. Součástí balíčku je i volně stažitelný software *Optris PI Connect*.

Tato kamera byla především z důvodu dostupnosti zvolena pro pořizování dat, které jsou předmětem testování této práce.



Obrázek 8: Termokamera Optris TIM 450, převzato z <http://www.hotset.cz>

3.3.2 FLIR Duo Pro R

Další možností termokamery je *FLIR Duo Pro R* od společnosti *FLIR Systems*. Tento produkt je vybaven vysokorychlostním radiometrickým tepelným snímačem (dvě varianty zařízení s rozlišením 640x512 nebo 336x256). Teplotní rozsah kamery je od -40 do +550 °C s termální citlivostí ≤ 50 mK. Další částí zařízení je barevná kamera s rozlišením 4000x3000 pixelů, plus sada palubních snímačů. Jeho součástí je i plně integrovaný GPS přijímač, IMU, magnetometr a barometr, díky nimž zařízení ukládá všechna metadata jednotlivých statických snímků. Je tedy vhodný pro vytváření přesných termálních i barevných ortomozaik. Snímky (termální data a data ve viditelném spektru) lze ukládat na dvě MicroSD paměťové karty. Celý komplet o rozměrech 85,0x81,3x68,5 mm váží 325 g (W-TECHNIKA, 2020b).



Obrázek 9: Termokamera FLIR Duo Pro R, převzato z <http://www.flir.com>

3.3.3 FLIR Duo R

Výrobce *FLIR Systems* nabízí i další variantu termokamery, která umožňuje radiometrické snímání a tou je *FLIR Duo R*. Toto zařízení je menší sestrou již zmiňované *FLIR Duo Pro R*. Kamera má rozměry 41,0x59,0x29,6 mm a váží pouhých 84 g. Tato skutečnost je vykoupená přesností radiometrického snímače, který disponuje teplotním rozsahem jen 0 až 50°C a rozlišením pouhých 160x120 pixelů (W-TECHNIKA, 2020c)



Obrázek 10: Termokamera FLIR Duo R, převzato z <http://www.flir.com>

3.3.4 DJI Zenmuse H20T

Novinkou na trhu je právě představená termokamera *DJI Zenmuse H20T* od společnosti *DJI*, která doprovází hybridní kameru *DJI Zenmuse H20* a nový dron *DJI M300 RTK*. Zmiňovaná termokamera disponuje čtyřmi snímači: Zoomovací kamera (rozlišení 20 MPx) s optickým 23 násobným zoomem s možností digitálního 200 násobného zoomu, širokoúhlá kamera (rozlišení 12 MPx) s úhlem záběru 82,9°, laserový dálkoměr od 3 do 1200 metrů (odchylka $\pm (0,2 \text{ m} + D \times 0,15\%)$) a termosnímač pro radiometrické snímkování (rozlišení 640x512 pixelů, termální citlivost: $\leq 50 \text{ mK}$). Konkrétně pro účely pozemního snímkování povrchové teploty je poslední ze zmiňovaných snímačů schopen pořizovat radiometrické fotky, což umožňuje tvorbu termo-ortofota rozsáhlejšího území, tedy fotogrammetrické zpracování termálních dat. Dále je třeba zmínit, že tato termální kamera umí pracovat i v dalších režimech. Jedním z nich je automatické vyhledávání teplotního minima a maxima, z nichž je počítána průměrná teplota snímku, nebo je možné spustit měření teploty v konkrétním bodu snímku. Kamera také podporuje režim tzv. teplotních izoterm, což umožňuje nastavit teplotní rozmezí zobrazování, které je využitelné například pro vizuálně zřetelnou detekci určitých teplotních zón ještě před zpracováním. Tento typ kamery je dle dostupných informací integrovatelný pouze na již zmíněný dron *DJI M300 RTK* (W-TECHNIKA, 2020a).



Obrázek 11: Termokamera *DJI Zenmuse H20T*, převzato a upraveno z: <http://www.dji.com>

4 UAV snímkování

Obecná definice zkratky *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicle*) neboli bezpilotního letadla zní jako letadlo bez posádky, které umožňuje vzdálené řízení, nebo dokonce samostatný let dle předem naprogramovaných letových plánů. Definice dle Úřadu pro civilní letectví (ÚCL) zní jako „letadlo určené k provozu bez pilota na palubě“ (Úřad pro letectví ČR, 2014).

Pro zařízení tohoto typu se ve světě užívá mnoho dalších názvů. Již zmíněný *UAV* nebo jednoduše „dron“ patří mezi ty nejpobulárnější. Úřadem pro civilní letectví Spojeného království a Ministerstvem obrany Spojených států amerických byl zaveden termín *UAS* (*Unmanned Aerial System*). V roce 2011 zavedla Mezinárodní organizace pro civilní letectví (*ICAO – International Civil Aviation Organization*) koncept *RPAS* (*Remotely-Piloted Aerial System*). Tuto dílčí část *UAS* lze dle *ICAO* jako jedinou začlenit do mezinárodního systému civilního letectví (Colomina a Molina, 2014).

Pořízení dat lze dosáhnout pomocí celé řady typů bezpilotních systémů. Mezi komerčně nabízené zařízení patří především multirotorové systémy a letadla s fixním křídlem, které disponují snadnou ovladatelností a širokou manipulační schopností. V případě kvadro, hexa nebo oktokoptyer můžeme počítat i s možností statického snímání.

V případě této práce byl pro RGB snímkování využit běžně dostupný dron *DJI Phantom 4*. Kompletní sestava je vybavena RGB snímačem vysokého rozlišení (4096x2160 pixelů) s tříosým stabilizovaným závěsem. *Phantom 4* je velice lehký (1380 g) a flexibilní s maximální dobou letu 28 minut (CZC.cz, 2020).

IR snímání probíhalo na hexakoptéře Tarot X6, na kterou je možné upevnit fotoaparát nebo kameru s klasickým stativovým závěsem na stabilizovaný držák. Dron je vybaven kompletním systémem pro přenos obrazu ze snímacího zařízení. Tento UAV aparát váží 8000 g. Maximální doba letu je uváděna v rozmezí 8 – 15 minut (AEROVISION k.s., 2019).



Obrázek 12: DJI Phantom 4, převzato z (CZC.cz, 2020)



Obrázek 13: Tarot X6, převzato z (UAV Systems International, 2020)

5 Pořizování a zpracování termálních dat

V případě homogenních objektů může být při znalosti faktorů vlivu na snímání bezkontaktní termografie velice přesná metoda. Pokud ovšem chceme tuto metodu využít pro určení povrchové teploty lokalit životního prostředí, kde se vyskytuje vegetace a řada dalších proměnlivých vlivů, je využití obtížné. Pro správnou interpretaci je nutné chápat souvislosti faktorů prostředí a parametry termálního snímání. Přírodní povrchy jsou ve významné míře heterogenní. Jak již bylo řečeno, pro vyhovující určení povrchové teploty je zásadní správné nastavení termokamery. To by ale bylo potřebné nastavit zvlášť pro každou homogenní část povrchu a meteorologickou situaci v místě snímače. To je v případě využití dálkového průzkumu nemožné. Například enormní vliv nastavené emisivity prezentuje ve své bakalářské práci Petreje (2019). V rámci jednoho termogramu docházelo vlivem rozdílné emisivity hliníkového rámu a povrchu zelené střechy k rozdílným ve stanovené teplotě v řádu jednotek až desítek stupňů Celsia (v závislosti na atmosférickém scénáři). Proto je vhodné ke každému zpracovanému termálnímu ortofotu přistupovat individuálně.

Je zapotřebí oddělit vybrané oblasti (antropogenní objekty apod.), pro které bude stanovená povrchová teplota při jednotném nastavení kamery chybná. K takovému případu dojde, pokud budeme například snímat povrch půdy a ve snímané lokalitě bude objekt s výrazně nižší emisivitou, než má půda (například plechová střecha budovy). Zbylé území s velmi podobnou emisivitou je přesto nutné rozdělit na pokud možno homogenní segmenty (rozdílné sklony, typ vegetace apod.). Tyto jednotlivé segmenty je ve vztahu k povrchové teplotě třeba hodnotit zvlášť, s individuálním přístupem.

Je tedy jasné, že pro celý nálet jsou parametry kamery fixně nastaveny, a tedy i při znalosti meteorologické situace, vzdálenosti snímače apod. není možné nastavit kameru tak, aby měřené teploty odpovídaly realitě všech povrchů v celé lokalitě snímání.

I kdybychom ignorovali heterogenitu snímané oblasti a zaměřili bychom se pouze na její homogenní část, je nutné provést kontrolu či případnou kalibraci nasnímaných dat. Proto je vhodné provést kontaktní měření jako ověření snímaných teplot. V případě nesouladu reálné a snímané hodnoty, je možné celou stupnici o daný rozdíl posunout. Nejlepší způsob kalibrace je využití dokonale černého tělesa. Takové zařízení ovšem z praktického hlediska není použitelné. Jako nejvhodnější byly proto zvoleny nádoby s vodou, které zajišťují ideální homogenní plochu s vysokou hodnotou emisivity a lze je snadno měřit kontaktní metodou.

Pravdou je, že pokud takto zjednodušeně posuneme škálu celého ortofota, mohou vznikat prostorově proměnlivé chyby, především z důvodů variabilní emisivity v ploše povrchů. Tabulky obecně stanovených hodnot emisivity pro rozsah vlnových délek 8 až 14 μm udávají při okolní teplotě 20 °C hodnoty pro půdu, trávník a vodu okolo 0,95 (Optris, 2020a). Již víme, že při fixním nastavení emisivity na tuto průměrnou hodnotu charakteristickou pro přírodní povrchy (0,95) budou vznikat chyby přibližně do 3% (přírodní povrchy se pohybují přibližně v intervalu 0,92 – 0,98). Tato prostorově proměnlivá chyba může generovat odchylky ve stanovené teplotě v řádu několika desetin stupně Celsia (viz kapitola 3.2.1.2). Rozdíly způsobené odlišnou emisivitou budou v tomto konkrétním případě minimální a vzhledem k charakteru snímaných povrchů a chybám přístroje by bylo určování s přesností na dvě desetinná místa apod. nesprávné. Jelikož se jedná o vysokou hodnotu emisivity a platí, že

s rostoucí emisivitou se snižuje vliv odražené energie, neměl by ani tento faktor ve stanovení povrchové teploty oblastí přírodního prostředí hrát významnou roli. Okolnost, která výrazně ovlivňuje množství odražené energie je interference slunečního záření. Ovšem i vzhledem k teorii vztahu vlhkosti s teplotním gradientem půdního povrchu budou veškeré nálety probíhat až po západu slunce, ideálně při vysoké oblačnosti. Pokud ovšem dojde k významnějšímu ovlivnění teplotou pozadí (např. chladné záření jasné oblohy), bude vzhledem k velice podobným hodnotám emisivity přírodních povrchů mít téměř prostorově konstantní vliv a bude ho možné eliminovat zmiňovaným posunem teplotní škály celého IR ortofota.

Dalším problémem je teplotní proměnlivost povrchu v čase během snímání. Z důvodu nižšího rozlišení IR kamery nelze pokrýt plochy o tisících metrech čtverečních s rozumnými letovými časy, které je nutné minimalizovat. Pokud by nálet trval příliš dlouho, teplota na snímcích ze závěru snímání by se mohla významně lišit od teploty, která zde byla v počátku snímání. Je třeba vybrat rozumný kompromis mezi podrobností výstupů, časovým omezením a dostupností konkrétního snímání.

Zpracování IR dat není i vzhledem k popisovaným nesnázím pořizování jednoduchá záležitost. V porovnání s klasickým RGB snímkem (kontrast, šum apod.), je vzhledem k nízkému geometrickému rozlišení termální kamery a nízké kvalitě IR obrazu rekonstrukce termálního ortofota problematická. Díky horší kvalitě snímků dochází k chybám při rekonstrukci digitálního modelu terénu (DSM – Digital Surface Models), které viditelně ovlivňují generovanou ortofotografii (Sledz, Unger a Heipke, 2018).

5.1 Vhodné parametry termálního snímání

Před samotným termálním snímáním je vhodné ideálně v co nejkratší časové ose provést též snímání RGB. Důvodem je žádoucí znalost aktuálního stavu zájmové oblasti ve vysokém rozlišení (RGB ortofoto, přesný digitální model terénu). Neméně důležitým faktorem je georeference. RGB ortofota lze snadno referencovat pomocí geodeticky zaměřených vlíčovacích bodů. Následně je možné snáze umístit a referencovat výsledné termální ortofoto.

5.1.1 Geometrické rozlišení pro ideální měření teploty

Ideální výška letu, tedy i vzdálenost snímače od měřeného objektu, se odvíjí od technických parametrů použité termokamery, především od optické specifikace (objektiv). Stejně jako u klasických fotoaparátů i termokamery mají na výběr širokou škálu objektivů, které umožňují snímání v různých vzdálenostech. Parametry objektivu mají přímou souvislost mezi vzdáleností měřeného objektu a oblastí vidění (*FOV – field of view*). Na obrázku č. 14 lze ilustrativně demonstrovat vliv vzdálenosti na výslednou specifikaci snímku (Optris, 2020b).

HFOV – horizontal field of view – délka viděné horizontální hrany

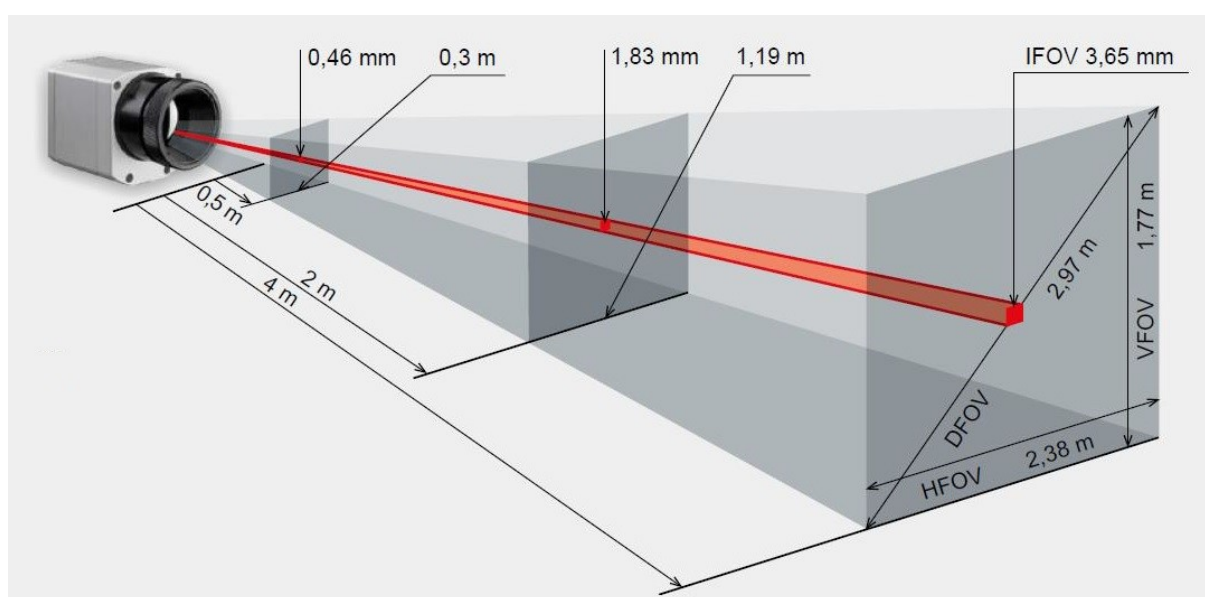
VFOV – vertical field of view – délka viděné vertikální hrany

DFOV – diagonal field of view – délka diagonály viděné oblasti

IFOV – instantaneous field of view – velikost pixelu v dané vzdálenosti

Tabulka 1: Podrobný přehled vlivu vzdálenosti snímače pro jednotlivé typy objektivů, převzato z prospektu (HotSet, 2020)

PI400/450 382 x 288 px	Ohnisk. vzdále- nost	Úhel	Minimální vzdálenost*	Vzdálenost od objektu [m]												
					0.02	0.1	0.2	0.3	0.5	1	2	4	6	10	30	100
O38 Standardní objektiv	15 mm	38° 29° 49° 1.81 mrad	0.2 m	HFOV [m]	0.014	0.07	0.14	0.21	0.35	0.69	1.39	2.77	4.16	6.9	20.8	69.3
				VFOV [m]	0.010	0.05	0.10	0.15	0.25	0.51	1.02	2.03	3.05	5.1	15.2	50.8
				DFOV [m]	0.018	0.09	0.18	0.28	0.46	0.92	1.84	3.68	5.52	9.2	27.6	92.0
				IFOV [mm]	0.1	0.2	0.4	0.5	0.9	1.8	3.6	7.3	10.9	18.1	54.4	181.3
O13 Teleobjektiv	41 mm	13° 10° 17° 0.61 mrad	0.5 m	HFOV [m]					0.12	0.23	0.47	0.94	1.40	2.3	7.0	23.4
				VFOV [m]					0.09	0.17	0.35	0.70	1.05	1.7	5.2	17.5
				DFOV [m]					0.15	0.29	0.58	1.17	1.75	2.9	8.8	29.2
				IFOV [mm]					0.3	0.6	1.2	2.5	3.7	6.1	18.4	61.2
O62 Širokoúhlý objektiv	8 mm	62° 49° 74° 3.14 mrad	0.5 m	HFOV [m]	0.024	0.12	0.24	0.36	0.60	1.20	2.40	4.80	7.20	12.0	36.0	119.9
				VFOV [m]	0.018	0.09	0.18	0.27	0.45	0.90	1.80	3.60	5.41	9.0	27.0	90.1
				DFOV [m]	0.030	0.15	0.30	0.45	0.75	1.50	3.00	6.00	8.99	15.0	45.0	149.9
				IFOV [mm]	0.1	0.3	0.6	0.9	1.6	3.1	6.3	12.6	18.8	31.4	94.2	314.0



Obrázek 14: Měřicí pole (termokamera optris PI640 s objektivem 33° x 25°), převzato z manuálu (Optris, 2020a)

Při termálním snímání je velice důležitá kvalita kontrastu detailů, s nimiž lze objekt v konkrétním snímku znázornit. Pro přesné stanovení povrchové teploty je zapotřebí přijímat minimálně 90 % energie. Tento limit je v případě využití vysoce výkonných termálních senzorů dosažen, pokud je konkrétní objekt reprezentován plochou minimálně 3 x 3 pixely ($3 \times IFOV$). U méně opticky kvalitních systémů bývá za určitých okolností zapotřebí plocha až 10 x 10 pixelů. Toto omezení je u jednotlivých optických systémů standardně popsáno jako *MFOV* – *measurement field of view* nebo *SMO* – *small measurable object* (Optris, 2020a).

Pro účely termálního dálkového průzkumu je tedy vhodné zvolit takovou výšku snímání, jejíž rozlišení bude zajišťovat dostatečnou kvalitu kontrastu zájmových objektů. Zjednodušeně řešeno, požadavek na snímání povrchové teploty nejmenšího detailu je plocha o počtu 3 x 3 pixelů.

5.1.2 Kalibrační body

Jak již bylo řečeno, před zahájením snímání je vhodné rozmístit kalibrační body s jasně definovanou teplotou. Respektive pokud není možné udržovat konstantní teplotu

tohoto kalibračního objektu, je v případě možnosti žádoucí kontinuální kontaktní měření po celou dobu snímání. Jestliže takové zařízení není k dispozici, je nutné provést měření časově co nejlépe před zahájením a po ukončení náletu. V případě změny teploty je pak možné interpolovat hodnotu pro konkrétní čas letu. Při zpracování je následně možné tyto body využít pro kontrolu či úpravu výsledných dat, nebo alespoň pro vytvoření základní představy o potenciálních chybách snímání. Jako nejvhodnější byly zvoleny nádoby s vodou.

5.1.3 Nastavení termokamery

Pro přesné určení povrchové teploty objektu je zásadní správné nastavení konkrétních parametrů termokamery (tzv. *Fixed radiometric values*), kterými jsou teplota okolí, emisivita a případně transmisivita. Proto je nezbytné nastavit parametry kamery při každém individuálním snímání. Problém nastává při nastavení emisivity, kterou je nutné stejně jako ostatní parametry nastavit fixně pro celou dobu náletu. Jak již bylo řečeno, emisivita je proměnlivý parametr. Je tedy vhodné nastavit hodnotu, která charakterizuje procentuálně nejvíc zastoupený povrch zájmové oblasti. Vzhledem k účelům této práce je jasné, že ve většině případů se bude jednat o kombinaci povrchů přírodního charakteru (půdní substrát, vegetace, voda), pro které jsou hodnoty emisivity vysoké a velice podobné (0,92 – 0,98).

5.2 Zpracování surových dat

Snímání termální kamerou *Optris TIM 450* probíhá ve formě videa (.ravi). Pro vytvoření základní představy o konkrétní lokalitě jsou data vizualizována v barevné škále, přizpůsobující se proměnlivému intervalu minima a maxima v daný moment záběru kamery. Pro fotogrammetrické zpracování je nutné vytvořit sadu snímků s dostatečnými překryvy. To je možné provést tzv. snapshoty, které lze exportovat jako obrazová data .tiff nebo ve formě souboru .csv. Obrazová data jsou pro následné zpracování nevhodná, protože zobrazují aktuální vizualizaci záběru. Jak již bylo řečeno, barevná škála je proměnlivá vůči hodnotám maxima a minima. Tedy na každém dalším snímku budou identické hodnoty interpretovány v jiné barevné škále, tedy jinou hodnotou pixelu. Snímky v této formě je možné použít především pro užší analýzu jednoho snímku, nikoliv ke spojování se snímky dalšími. Druhá možnost snapshotu ve formátu .csv je pro širší analýzy vhodná. Každý snapshot generuje soubor .csv, ve kterém jednotlivé buňky reprezentují jednotlivé hodnoty pixelů v daném čase pořízení. Problém nastává při samotném zpracování ve vybraném softwaru *Agisoft Photoscan pro*, který není schopen s tímto formátem pracovat. Proto je nutné tyto soubory zpětně převrátit do formátu .tiff. Další problém, který je při zpracování pomocí softwaru *Agisoft Photoscan pro* nutné vyřešit, jsou záporné hodnoty a desetinná místa. Ty též není software schopen vyhodnotit. Z těchto zmíněných důvodů bylo nutné vytvořit funkční skript¹, který převrací .csv data do formátu .tiff s úpravou dle následující rovnice:

$$(\text{hodnota} + 100) * 100$$

Ke každé hodnotě je přičtena 100 (eliminace záporných hodnot) a dále je též hodnotou vynásobena (eliminace desetinné čárky). Následně je možné takto upravené snímky spojit, tedy vytvořit termální ortofoto jako podklad pro další analýzy.

¹ Vytvořil Alexey Pasumansky (technická podpora Agisoft), upravil Ing. Jan Devátý, Ph.D.

5.2.1 Vytvoření snapshotů

Pro primární zpracování termálního videa je zapotřebí konkrétní software, v tomto případě volně dostupný *Optris PI Connect*. Zde je možné pomocí klávesové zkratky Alt+C otevřít okno *Configuration*, kde je v záložce *Trig. Recording / Snapshots* nutné nastavit formát a místo uložení generovaných snapshotů. Následně lze jednotlivé snapshoty vytvářet během videa ručně pomocí klávesy F1. V daném softwaru lze spustit automatické snapshoty v konkrétním intervalu pořizování. Ovšem z hlediska kvality snímků pro další zpracování je vhodné tuto možnost nevyužít. Během snímání dochází k otřesům, vychýlení a dalším faktorům, které by v případě automatického pořizování generovaly určité množství nepoužitelných snímků, a tedy potenciální vznik šumu. Z tohoto důvodu je lepší varianta ručního pořizování snapshotů, kde se lze těmto chybným úsekům vyhnout, problematická místa nasnímkovat v kratším intervalu apod.

5.2.2 Fotogrammetrické zpracování

Z oblasti stereofotogrammetrie byl pro zpracování jako jeden z nejpoužívanějších softwarů vybrán *Agisoft Photoscan pro*, který využívá metodu *Structure-from-motion (SfM)*. *Agisoft Photoscan pro* je schopen pokročilé rekonstrukce 3D modelů založené na neuspořádané sbírce obrázků. Jednotlivé snímky lze pořídit z libovolné pozice, ovšem je nutné zajistit viditelnost zájmového objektu minimálně na dvou snímcích. Zarovnání obrazu je plně automatizované (Agisoft, 2018). Metoda *SfM* je založena na principu průsekové fotogrammetrie, tedy na pořízení snímků zájmového objektu v dostatečném překryvu. Respektive aby mohl software detekovat charakteristické body objektu, musí být zachyceny na několika snímcích současně. K nalezení těchto významných bodů (tzv. *Features*) je využíváno lokálních extrémů v jednotlivých snímcích, které jsou zpravidla určeny pomocí algoritmu *SIFT - The Scale Invariant Feature Transform* (Lowe, 2004). Parametry a pozice snímku jsou následně na základě těchto bodů automaticky vypočteny. K vyrovnání vypočtených parametrů (pozice a rotace kamery, souřadnice bodů) software využívá metodu *Bundle Adjustment*, česky tzv. svazkové vyrovnání (Snavely, Seitz a Szeliski, 2007).

V tomto kroku je nutné využít již zmíněný skript.py pro převod .csv souborů do zpracovatelné formy ve formátu .tiff. Ten lze spustit přímo v softwaru *Agisoft*. V panelu nástrojů v záložce *Tools* vybereme možnost *Run script*, nebo můžeme pro tentýž krok využít klávesovou zkratku Ctrl+R. Po otevření dialogového okna je nutné vybrat příslušný skript a následně zvolit cílovou složku obsahující .csv soubory konkrétního náletu. Posléze se vytvoří tzv. *Chunk*, který již obsahuje snímky v požadovaném formátu, vhodném ke zpracování dle následujícího postupu.

1) Řídké mračno bodů

Pro tvorbu řídkého mračna bodů vybereme možnost *Align Photos* (v panelu nástrojů záložka *Workflow*). V předprocesovém dialogovém okně nastavíme přesnost odhadu orientace vnějších prvků *Accuracy*. V případě volby nejvyšší přesnosti *Highest* pracuje software s plným rozlišením snímků, což je v naší situaci žádoucí (termální snímky sami o sobě nemají vysoké rozlišení). Mezi další volitelné parametry patří tzv. *Generic preselection*, který zrychluje proces výpočtu odhadem sousedících párů snímků. Dále lze nastavit maximální množství klíčových bodů *Key point limit* a maximální počet spojovacích bodů *Tie point limit* (Agisoft, 2018).

2) Husté mračno bodů

Proces vytváření hustého mračna bodů spustíme funkcí *Build Dense Cloud* (opět v panelu *Workflow*). V dialogovém okně opět nastavíme několik parametrů výpočtu. Kvalitu hloubkových map *Quality* a *Depth filtering*. První ze zmíněných opět určuje, s jakým rozlišením jednotlivých snímků bude software pracovat. Druhý parametr filtruje mračno a odlehlé body (*Mild* – členité objekty, *Aggressive* – hladké objekty, *Moderate* – kompromis) (Agisoft, 2018).

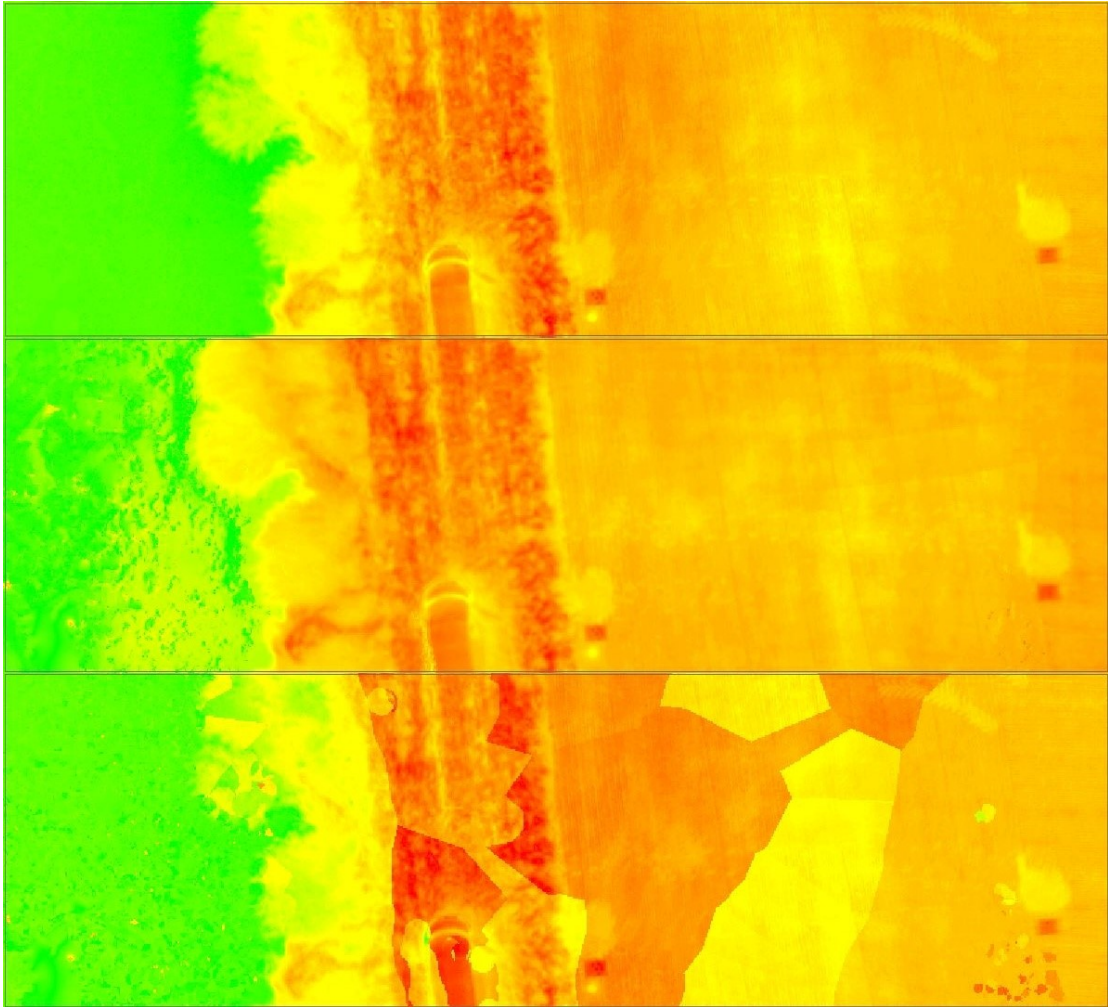
3) Polygonová síť

Při tvorbě jakéhokoliv ortofota je jako jedna z možností zdrojových dat polygonová síť. Tu vytvoříme pomocí funkce *Build Mesh* v panelu *Workflow*. Důležitým procesním nastavením je typ zpracovávaného povrchu (*Surface type*). Možnost *Arbitrary* je volena pro uzavřené objekty (3D tělesa), zatímco druhá možnost *Height field* je vhodná pro tvorbu leteckých snímků apod. (Agisoft, 2018).

4) Tvorba termální ortomozaiky

Vytvoření ortomozaiky je zpravidla založeno na digitálním modelu terénu (*DEM*), což je efektivní především u zpracování dat leteckého průzkumu (úspora času, není nutné generovat polygonovou síť). Alternativou zdrojové plochy je tedy polygonová síť, která se běžně využívá například pro fasády budov či jiné modely. Jelikož lze *DEM* vypočítat pouze pro referencované modely, je v případě termálních dat nutné využít zmiňovanou polygonovou síť. Jednotlivé snapshoty (termogramy) totiž nenesou žádnou georeferenční informaci a rozmístěné vlíčovací body obvykle nejsou na termálních snímcích softwarově detekovatelné (Agisoft, 2018).

Dalším důležitým předprocesovým parametrem je režim prolnutí (*Blending mode*). Defaultně se používá možnost *Mosaic*. Tento přístup rozdělí data do několika frekvenčních domén, které jsou dále míchány nezávisle. Složka s nejvyšší četností je míchána pouze podél linie švu. Každý další krok od linie švu vede k menšímu počtu domén, které jsou předmětem míchání. Další možností je *Average*, tedy míchání dle váženého průměru všech hodnot pixelů na jednotlivých snímcích. Software také umožňuje volbu, kdy k žádnému míchání nedochází, tzv. režim *Disabled*. Ten vytváří ortomozaiku jednoduchým převzetím hodnoty přímo ze snímku, při kterém je pro konkrétní bod pohled kamery v pozici kolmo k rekonstruovanému povrchu (Agisoft, 2018). Nejvhodnější nastavení v případě termálních snímků je jednoznačně první z možností, tedy *Mosaic*. Jak je vidět na obrázku č. 15, volba *Average* generuje značné chyby především v homogenních oblastech. Režim *Disabled* je pro tyto účely zcela nepoužitelný.



Obrázek 15: Porovnání fotogrammetricky zpracovaných termálních ortomozaik s rozdílným režimem prolnutí (shora Mosaic, Average, Disabled)

Rozlišení ortomozaiky je defaultně přiřazeno dle tzv. *Ground sample distance (GSD)*. Jedná se o vzdálenost středů pixelů měřených na zemi při dálkovém průzkumu. Ve své podstatě je to omezení rozlišení vzorkováním. Tato výchozí hodnota lze v rámci předprocesového dialogového okna měnit. Smysl to má ovšem pouze v situaci, kdy je pro dané účely dostatečné nižší rozlišení, než je hodnota *GSD*. Pokud budeme nastavovat vyšší rozlišení, než je defaultně nastavené dle *GSD*, zvýšíme počet pixelů, ale efektivní rozlišení zůstává stejné.

Export vygenerované termální ortomozaiky lze provést pomocí několika jednoduchých kroků: Pravý klik na ortomozaiku, *Export Orthomosaic*, *Export JPEG/TIFF/PNG*.

5.3 Příprava dat k analýze

Veškeré analýzy a podružné zpracování termálního ortofota jsou provedeny pomocí softwaru *ArcGIS Desktop*, přesněji jeho aplikací *ArcMap*. Zpracované termální ortofoto je vhodné nejprve upravit dle kalibračního bodu do teplotní škály odpovídající alespoň přibližné realitě. Dalším postupem je zkoumání takto upravených dat spolu s RGB ortofotem, případně s digitálním modelem terénu, na základě kterého jsou identifikovány již zmiňované homogenní části lokality, kde je dále možné zjistit a analyzovat teplotní oblasti.

1) Georeferencing

Jelikož rozlišení a další faktory neumožňují automaticky rozeznat geodeticky zaměřené vlčovací body, je nutné finálně zpracované ortofoto ručně georeferencovat. Pokud lze vlčovací body na termosnímku vizuálně rozpoznat, můžeme tyto body označit a přiřadit jim souřadnice. Jestliže tyto body nelze vizuálně stanovit, je nutné hledat jiné objekty, které lze referencovat vůči RGB ortofotu. Samotný referencing je možné provést pomocí nástroje *Georeferencing*, kde lze v několika jednoduchých krocích tyto body přiřadit.

2) Úprava zpracovaného ortofota

Pro primární úpravu termálního ortofota lze využít *Raster Calculator*, pomocí něhož převrátíme zpět hodnoty pixelů do reálných teplot. Výpočet rastru bude probíhat dle rovnice $hodnota/100 - 100$. Do tohoto kroku lze rovnou zahrnout již zmíněné posunutí škály vůči kalibračnímu tělesu jednoduchým přičtením či odečtením konkrétní hodnoty rozdílu (reálná x snímaná teplota kalibračního bodu).

3) Editace segmentů snímané lokality

Dále je nutné ruční editací stanovit oblasti, které budou a které nebudou předmětem zkoumání. Oblasti zkoumání je následně nutné rozdělit dle charakteru povrchu, tedy například lokality s homogenním typem vegetace, sklonem apod.

6 Stanovení povrchové teploty

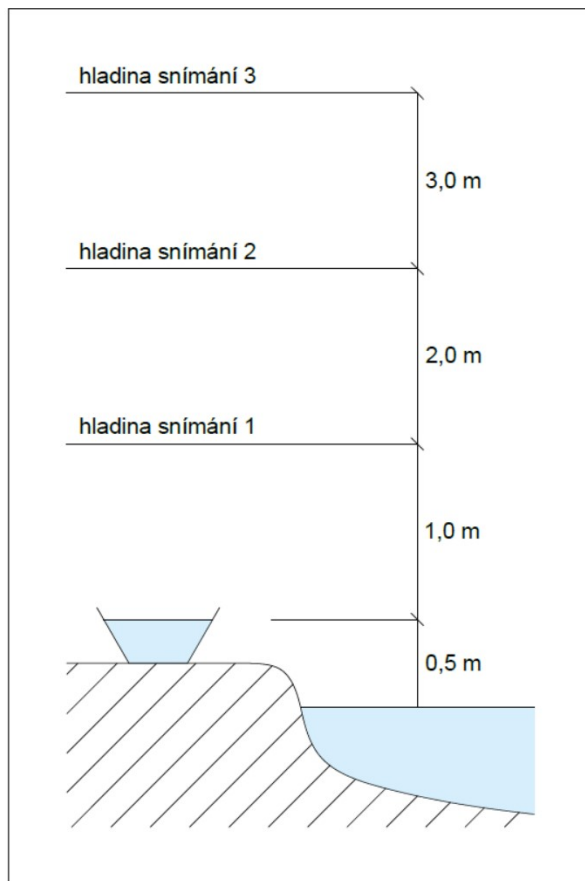
K vytvoření relevantního termálního ortofota jsou zásadní jednotlivé snímky, tedy termogramy. K jejich pořízení je důležitá lokální znalost meteorologické situace a dalších podmínek ovlivňující výsledky snímání.

6.1 Testování na ručním nosiči

Pro zkoumání vlivů na přesnost pořizování a následné zpracování jednotlivých termálních snímků včetně ověření souvislosti zamokření a tepelného vývoje byly postupně provedeny čtyři testy na dvou lokalitách. Jednotlivé pokusy probíhaly na ručním nosiči. První dva pokusy za účelem analýzy vlivů probíhaly dne 9.10.2020 v lokalitě Vavříneckého rybníka. Ve třetím pokusu dne 23.10.2020 byla kamera testována v zahradě několikapodlažní budovy rodinného domu v obci Železná Ruda. V téže lokalitě byl dále uskutečněn čtvrtý pokus dne 13. a 14.11.2020, kde byla snímána testovací plocha dvou identických obdélníků o rozměrech 1 x 1,5 m za účelem zjištění vlivu zamokření na výsledný termogram.

6.1.1 Pokus č. 1 – teploty v rámci jednoho termogramu

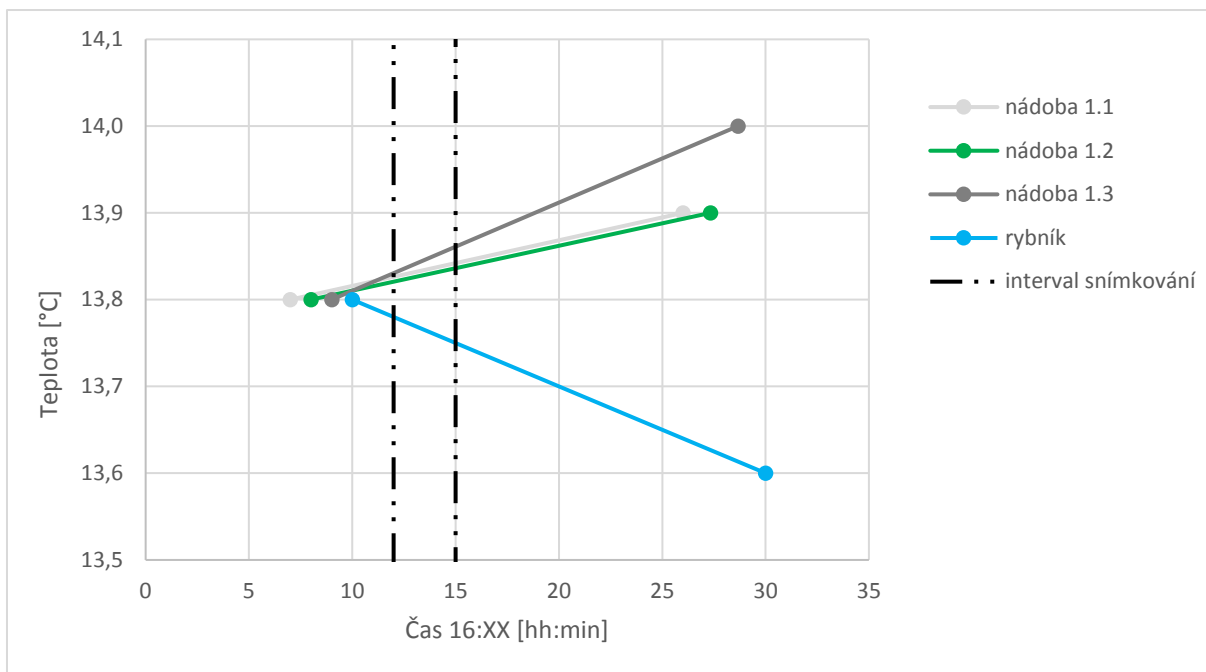
V prvním případě byly snímány tři nádoby v těsné blízkosti vodní hladiny rybníka v různých výškách (1, 2 a 3 m). Účelem tohoto pokusu bylo zjistit, zda kamera zobrazuje stejné hodnoty pro identické povrchy s identickou teplotou v rámci jednotlivého snímku. Nádoby byly zvoleny z různých materiálů a barev pro zjištění případného vlivu na termální snímek. Snímané médium, v tomto případě voda z rybníka, byla ve všech nádobách stejná, odebraná bezprostředně před zahájením testu. Z důvodu určení co nejpřesnější reálné teploty snímaného média v době snímání byly tyto hodnoty změřeny před zahájením testu a následně po jeho ukončení. Pro lepší ilustraci je vývoj teploty zobrazen v grafu č. 3, z něhož vyplývá, že teploty před zahájením byly identické s teplotou vody v rybníku a nabývaly hodnoty 13,8 °C. V průběhu snímání se teplota vody v nádobách 1.1, 1.2 a 1.3 oproti rybníku, kde se voda ochladila o 0,2 °C, mírně oteplila. Tato skutečnost je dána především teplotou okolí, která v době snímání nabývala konstantní hodnoty 18,7 °C. Zdánlivé ochlazení rybníka může být způsobeno mícháním. Největší nárůst byl zaznamenán u nádoby 1.3, kde z důvodu menších rozměrů a kovového materiálu nádoby byla umožněna rychlejší tepelná výměna s okolím. Celý pokus probíhal za neměnné meteorologické situace: Mírné poryvy větru, vysoká oblačnost (bez interference slunečního záření), relativní vlhkost 72 %.



Obrázek 16: Ilustrace snímání - pokus č. 1 (na snímku z leva Ing. Václav David, Ph.D., doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.)



Obrázek 17: Nádoby 1.1, 1.2 a 1.3 při pokusu č. 1



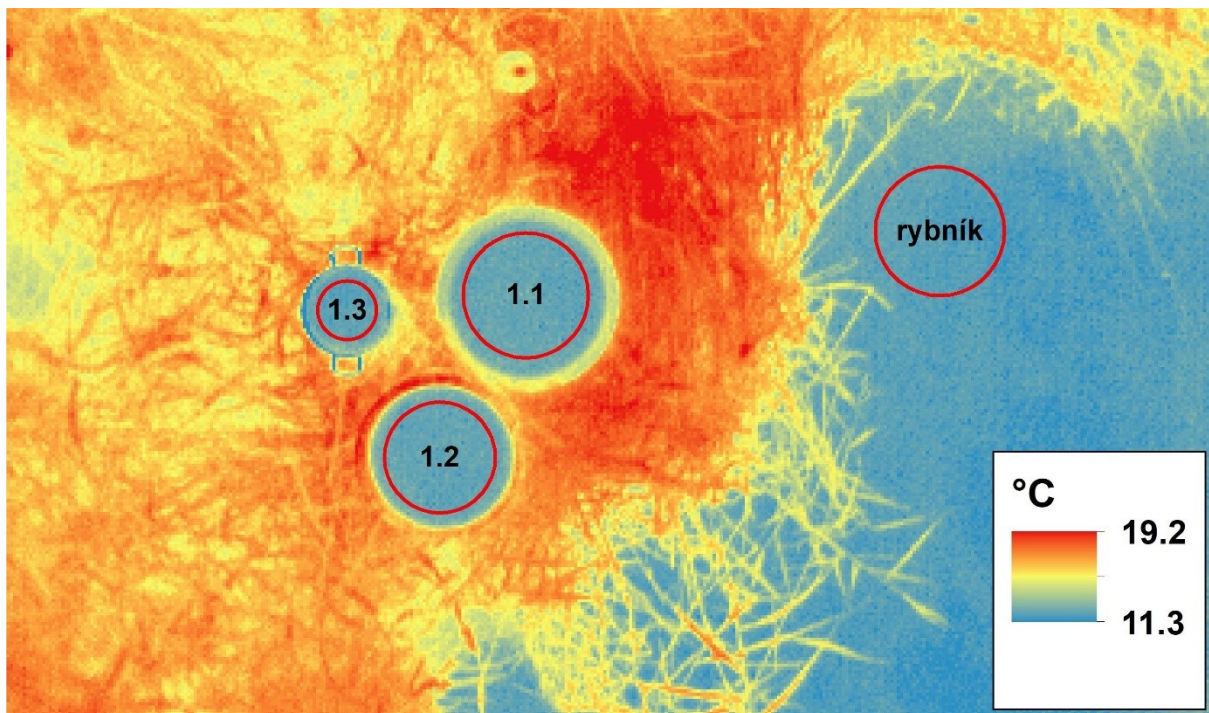
Graf 3: Vývoj teplot v testovacích nádobách - pokus č. 1

Pro účely porovnání reálných teplot vody v nádobách a snímku z termální kamery byly jako reprezentativní hodnoty zvoleny teploty uprostřed intervalu snímání. Hodnoty se sice začaly v čase rozcházet, ovšem v době měření nebyl jejich rozdíl větší než 0,05 °C. Vzhledem k přesnosti měřicího čidla, které bylo využito pro stanovení reálných teplot, jsou veškeré teploty uváděny pouze s přesností na jedno desetinné místo. Pro všechny nádoby (1.1, 1.2 a 1.3) včetně rybníka byla z grafu č. 3 odečtena a zaokrouhlena hodnota 13,8 °C (viz tabulka č. 2).

Z jednotlivých termálních snímků (ve třech hladinách) byl k porovnání zvolen zonální statistikou určený teplotní průměr hladin vybraných oblastí (viz obrázek č. 18). Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v již zmíněné tabulce č. 2. Pokud budeme ignorovat fakt, že je vlivem chybného nastavení teplotní škála z termální kamery vůči reálným teplotám posunuta přibližně o 1 °C, můžeme potvrdit, že se teploty snímané z hladiny 1 a 2 metrů shodují s rozdílem maximálně 0,1 °C (rozdíly jsou srovnatelné s nejistotou měření termokamery). Pokud se ovšem zaměříme na hodnoty z 3metrové hladiny snímání, můžeme pozorovat přibližně o 0,2 °C nižší hodnoty než u hodnot z nižších hladin snímání.

Tabulka 2: Souhrn naměřených a nasnímaných teplot v jednotlivých nádobách - pokus č. 1

	reálná teplota [°C]	teplota v hladině snímání [°C]		
		1 m	2 m	3 m
nádoba 1.1	13,8	14,9	14,9	14,7
nádoba 1.2	13,8	14,9	14,9	14,7
nádoba 1.3	13,8	14,8	14,8	14,6
rybník	13,8	14,8	14,7	14,5



Obrázek 18: Termogram z výškové hladiny 2 m s vyznačenými oblastmi pro zonální statistiku

Na základě tohoto pokusu lze potvrdit, že barva ani materiál nádob nehrají žádnou roli v určení povrchové teploty média pomocí termografie. Dle prezentovaných dat lze předpokládat, že rostoucí vzdálenost snímače má skutečně vliv na výsledné stanovení povrchové teploty. Proto bude tento fakt předmětem dalšího testování této práce.

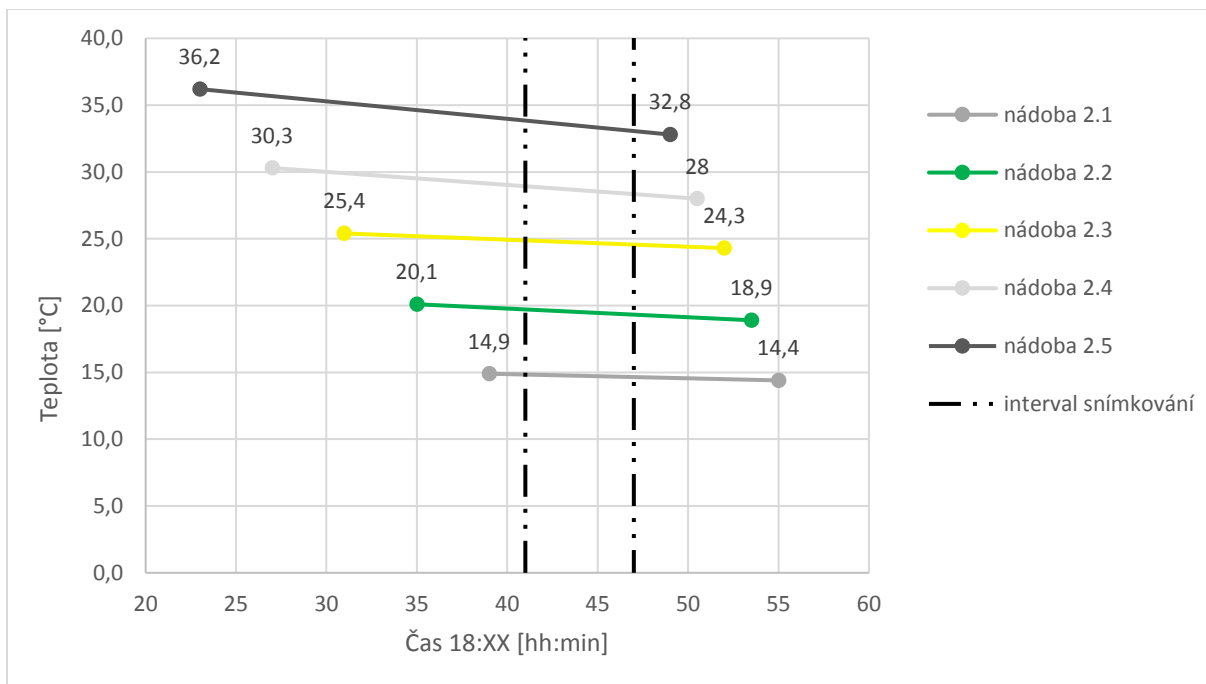
6.1.2 Pokus č. 2 – teplotní diference totožného povrchu

Ve druhém pokusu bylo snímáno pět nádob se stejným médiem, v tomto případě pitnou vodou z barelu. Systémem nádob byla snaha vytvořit co nejpřesnější teplotní škálu po 5 °C (od 15 do 35 °C). Vzhledem k závěrům předešlého pokusu nebylo nutné velikost a materiál nádob zjednotit. Tyto parametry ovlivňují pouze rychlost tepelné výměny s okolím, nemají žádný vliv na termální snímání. Cílem druhého pokusu bylo zjistit vliv rozdílné teploty identického povrchu. Teplota okolí klesla v průběhu snímání z 12,4 °C na 11,7 °C. Celý pokus jinak opět probíhal za neměnné meteorologické situace: Mírné poryvy větru, mírná oblačnost (po setmění), relativní vlhkost 86 %.

Teplotní škála byla vytvořena mícháním studené a horké vody v daných poměrech. Pro nádoby byly namíchané následující teploty: Nádoba 2.1 – 14,9 °C; 2.2 – 20,1 °C; 2.3 – 25,4 °C; 2.4 – 30,3 °C; 2.5 – 36,2 °C. Obdobně jako v předchozím pokusu byly teploty postupně změřeny před samotným snímáním a následně hned po jeho ukončení. Doba ustalování pro teplotní čidlo byla opět přibližně 1 minuta. Na vývoj teplot v nádobách lze opět nahlédnout do grafu č. 4. V případě pokusu č. 2 byla reálná teplota vody v čase pořízení snímku stanovena i vzhledem k delšímu intervalu snímání metodou interpolace.



Obrázek 19: Systém testovaných nádob - pokus č. 2

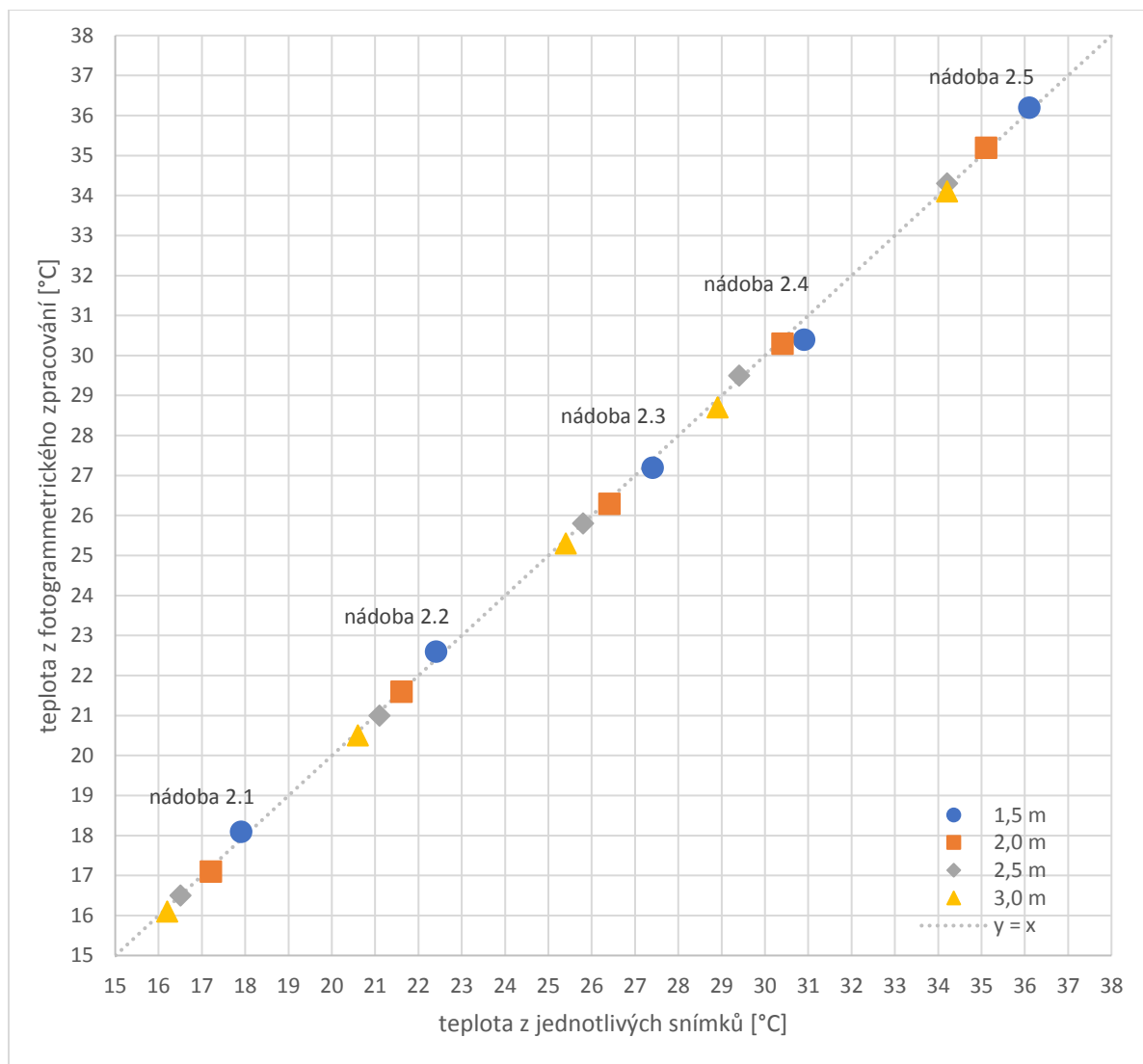


Graf 4: Vývoj teplot v sérii testovacích nádob - pokus č. 2

Z ručního snímání bylo pořízeno co nejvíce použitelných snapshotů, tedy termogramů a ty byly následně fotogrammetricky zpracovány dle postupu v kapitole 5.2. Průměrné teploty hladin z těchto dat byly zjištěny obdobným způsobem jako u vyhodnocení jednotlivých snímků, tedy zonální statistikou vybraných oblastí (teplotní průměr hladin nádob). Aby bylo možné porovnávat výsledná data, bylo nutné provést teplotní korekci snímaných teplot.

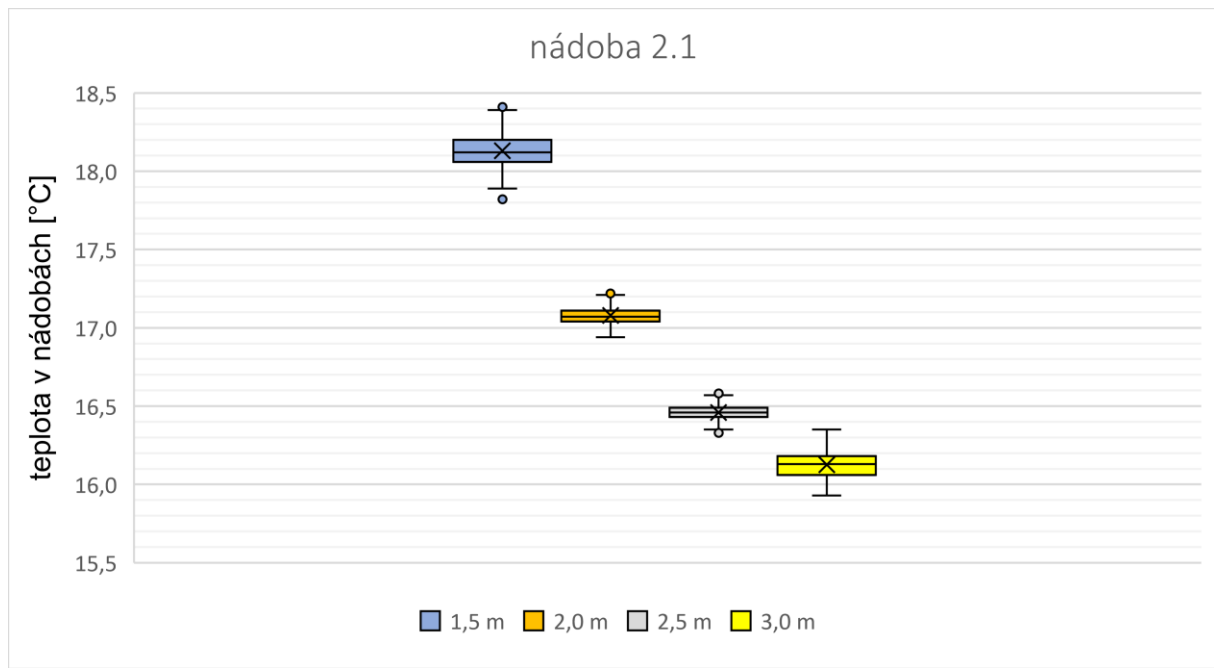
Pro konkrétní čas a konkrétní výškovou hladinu snímání byla, jak již bylo řečeno, interpolována reálná teplota vody v každé nádobě. Nyní při znalosti vývoje, respektive rozdílu teplot od teploty počáteční, bylo možné provést teplotní korekci vypočtených průměrných teplot každé nádoby v každém snímku zvlášť.

Pro kontrolu byly ze souboru zpracovávaných dat vybrány snímky, kde byly jednotlivé nádoby situovány co nejvíce na středu snímku. Opět byla vypočtena zonální statistika hladin nádob a výsledné hodnoty porovnány s fotogrammetricky zpracovanými termálními daty. Z následujícího grafu č. 5 je patrné, že teploty nádob na výsledném termálním ortofotu dobře odpovídají jednotlivým termogramům (s nádobou ve středu snímání). Hodnoty průměrů mají vůči sobě drobné odchylky maximálně do 0,2 °C, což jsou opět rozdíly srovnatelné s nejistotou měření kamery. Výjimku tvoří druhá nejteplejší nádoba 2.4 v hladině snímání 1,5 m, ve které je významnější rozdíl 0,5 °C. Lze tedy předpokládat, že zde došlo k chybě při fotogrammetrickém zpracování, pravděpodobně z důvodu výskytu významného množství chybných termogramů.

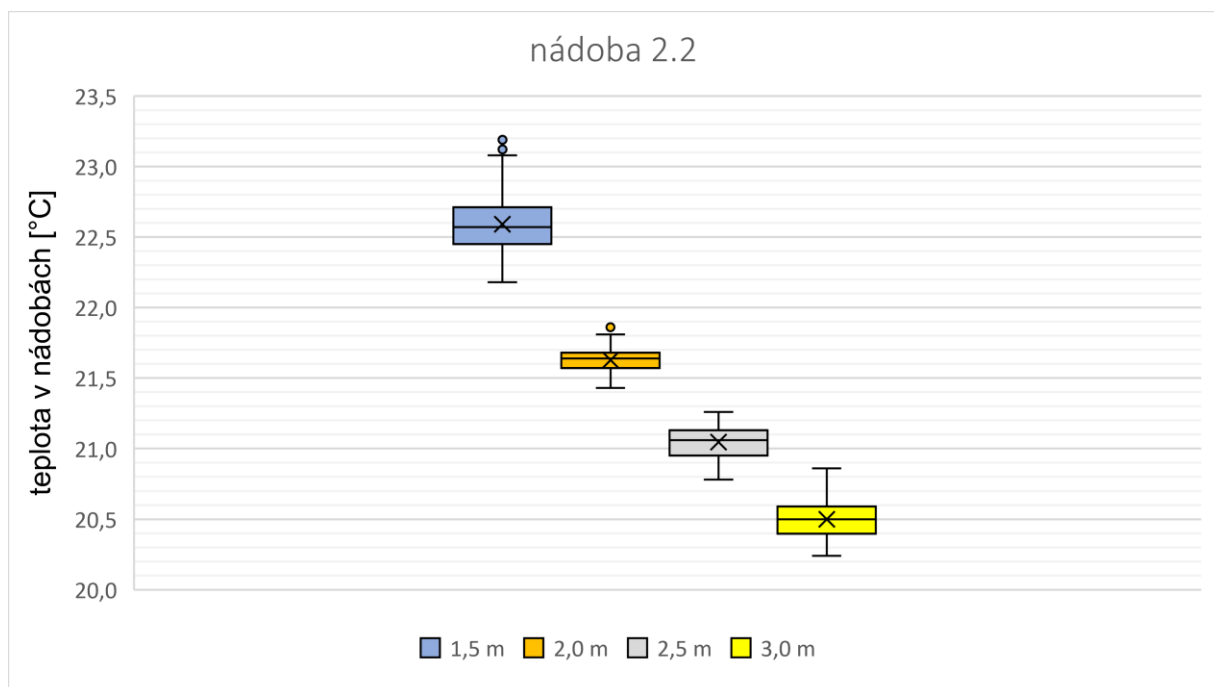


Graf 5: Porovnání průměrných hodnot získaných z fgt. zpracovaných dat a z jednotlivých termogramů

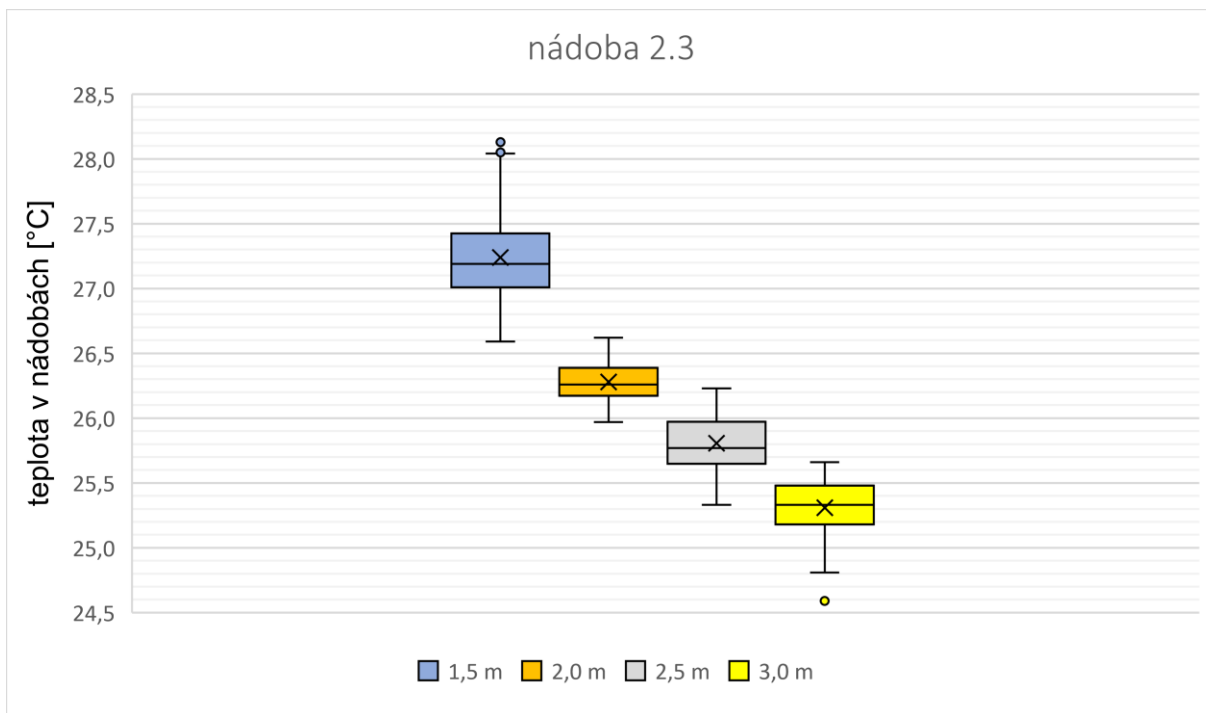
Při pohledu na všechny snímané hodnoty pixelů hladin nádob (v oblastech určených pro zonální statistiku) v následujících krabicových grafech (č. 6, 7, 8, 9 a 10) je zřejmé, že i v případě homogenních oblastí jsou měřeny proměnlivé hodnoty. Mezikvartilové rozpětí dosahuje v nejhorším případě hodnoty 0,4 °C (nádobka 2.3 – 1,5 m). Je tedy jasné, že v tomto případě hodnoty pixelů měřených detektorem kamery kolísají v maximálním rozptylu $\pm 0,2$ °C, což opět přibližně odpovídá nejistotě měření kamery.



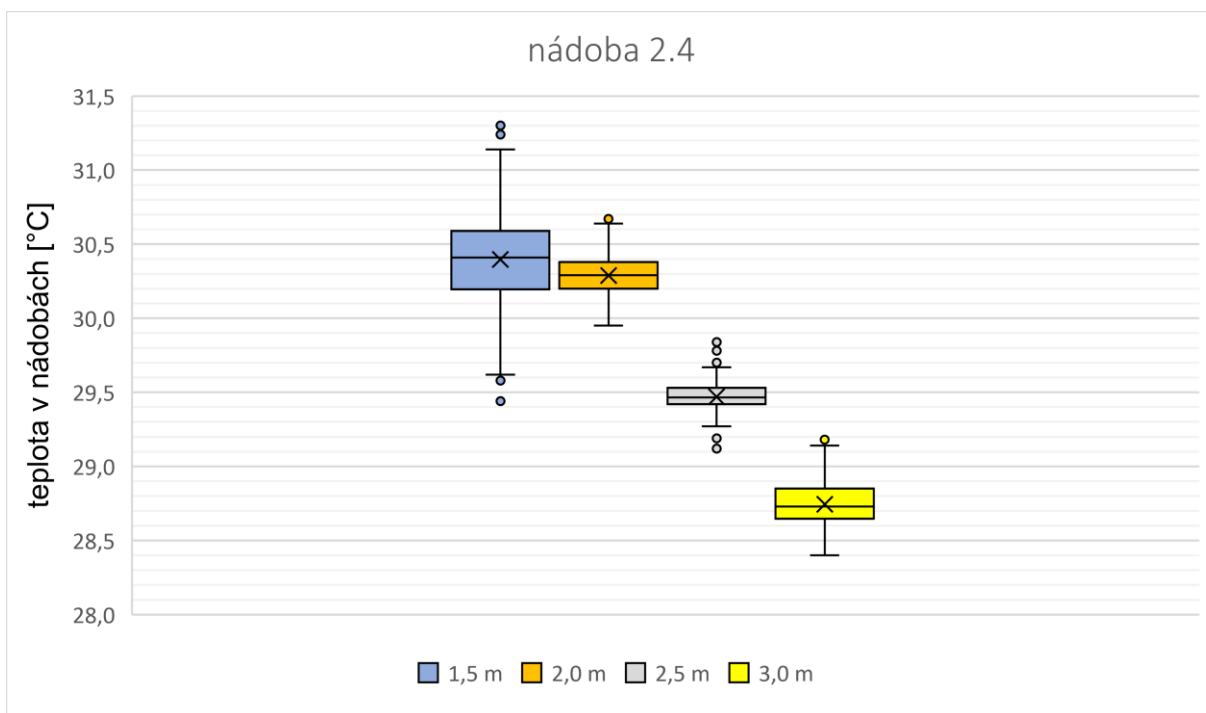
Graf 6: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádobka 2.1)



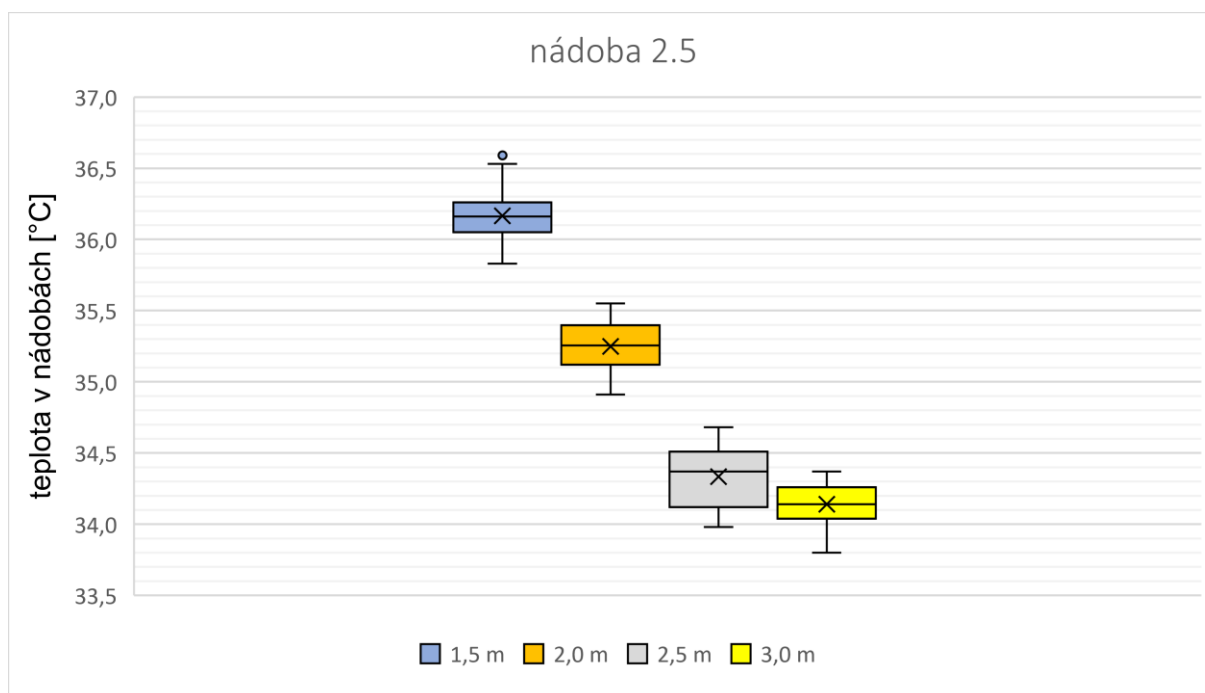
Graf 7: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádobka 2.2)



Graf 8: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádoba 2.3)



Graf 9: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádoba 2.4)



Graf 10: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádobka 2.5)

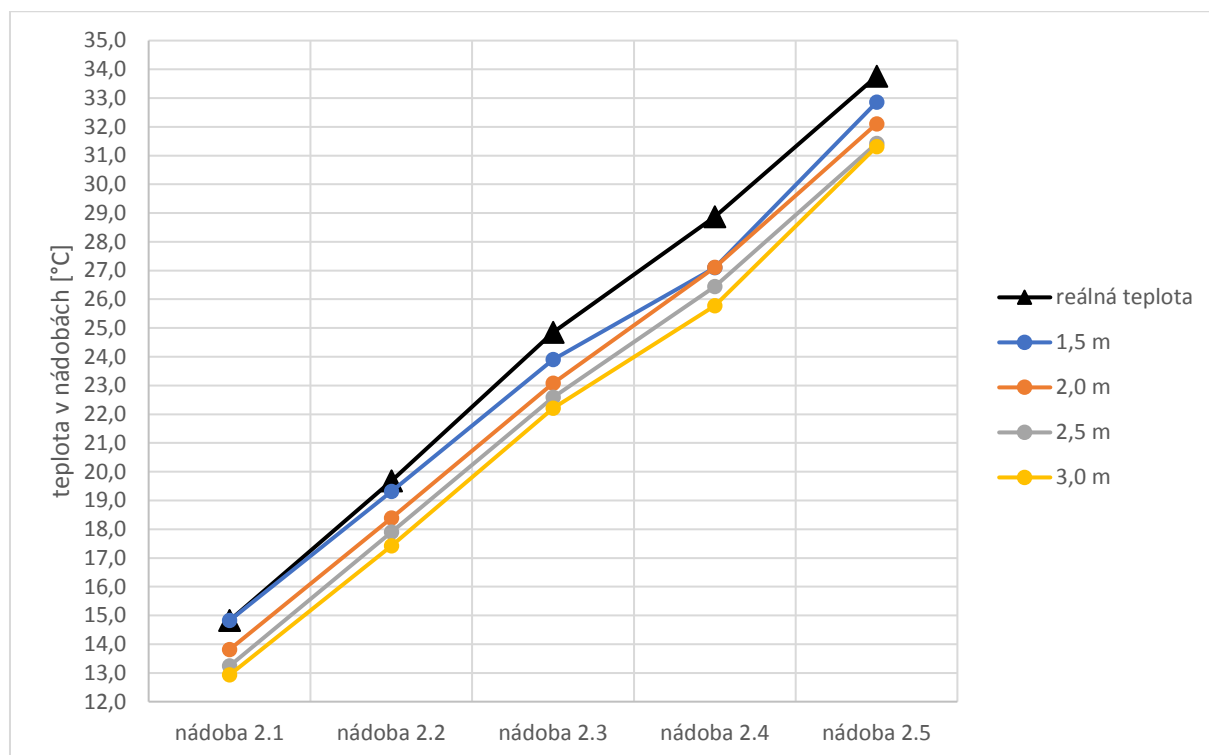
Pro lepší prezentaci vlivu výšky snímání je vhodné provést další teplotní korekci nejen vůči tepelnému vývoji, ale i vůči reálným teplotám. Průměrné hodnoty nádob, které byly naměřeny v nejnižší hladině, tedy přibližně v 1,5 m, byly až o 3,3 °C vyšší. Pokud budeme nádobu 2.1 uvažovat jako kalibrační bod a snímání ve výškové hladině 1,5 m za referenční, můžeme všechna data posunout o rozdíl nasnímané a reálné hodnoty této nádoby.

Nyní se můžeme zaměřit pouze na rozdíl výsledků snímání z různých hladin. V grafu č. 11 můžeme pozorovat, že i tento minimální rozdíl ve snímání hladině (0,5 m) má i vzhledem k požadované přesnosti vliv na výsledná data. Respektive s každým zvětšením vzdálenosti kamery od zájmového povrchu dochází k poklesu snímaných hodnot, v tomto konkrétním případě dokonce až o 1,8 °C. Obecně lze říci, že rozdíl hodnot je ve všech hladinách snímání v relativně lineárním trendu, pouze s mírným posunem křivky (průměrný pokles nasnímaných teplot o 0,5 °C). Výjimku tvoří druhá nejteplejší nádobka 2.4, ve které byla z 1,5 m nasnímaná nižší hodnota (o zmiňovaných 1,8 °C), než udává trend vyplývající z ostatních hodnot. Tato vychýlená hodnota je pravděpodobně způsobena již zmíněným fotogrammetrickým zpracováním, které dokládá výraznější rozdíl oproti hodnotě z jednotlivého termogramu (0,5 °C, v grafu č. 5). Graf č. 12 ilustruje pokles snímaných teplot jednotlivých nádob v závislosti na výšce snímání. Průměrně dochází k poklesu 1,0 °C/m.

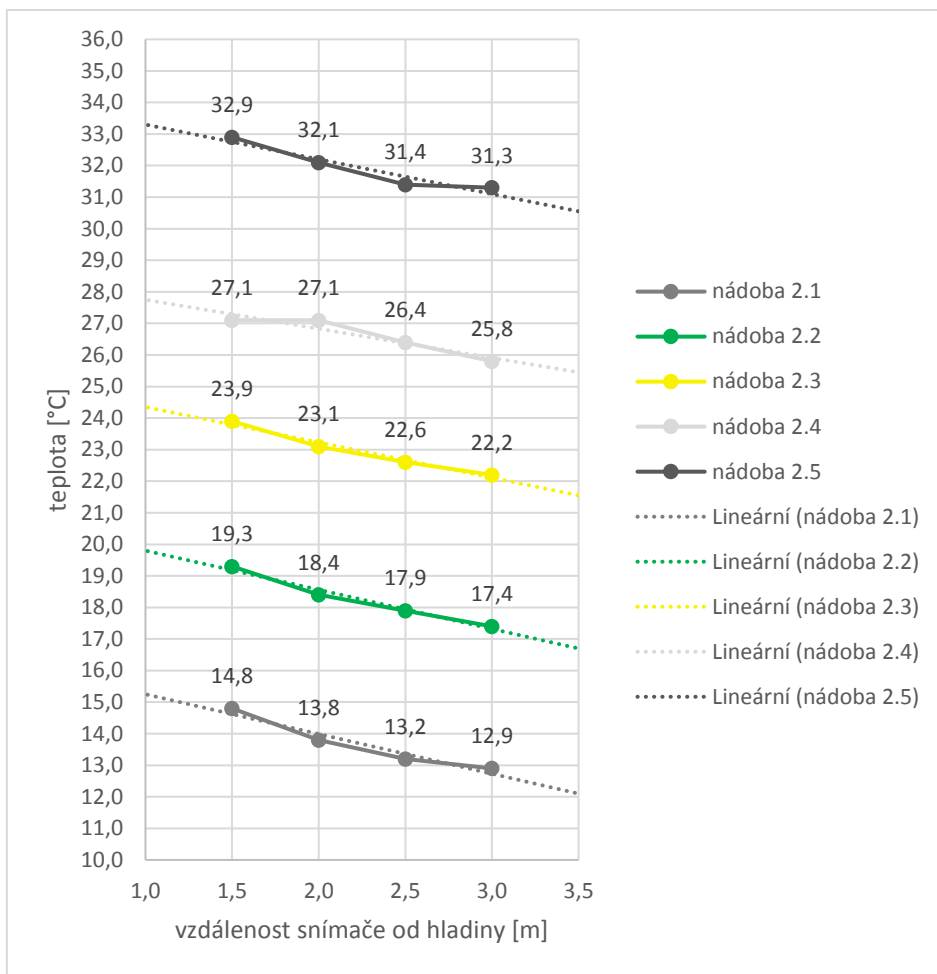
Jelikož křivka reálné teploty prezentuje hodnoty v čase snímání v nejnižší hladině 1,5 m, měla by se shodovat s křivkou výsledných hodnot z téže hladiny. Z grafu č. 11 je ale patrné, že se hodnoty mírně rozcházejí. Srovnáme-li škály teplot ze všech hladin snímání dle nádoby 2.1 do stejného výchozího bodu, je tato skutečnost potvrzena (viz graf č. 13). Především u teplejších nádob (2.3, 2.4 a 2.5) je patrný rozdíl naměřené a reálné teploty, respektive nasnímané teploty jsou nižší než reálné. Krom průměrné hodnoty pro zmiňovanou nádobu 2.4 z hladiny snímání 1,5 m, ve které byl nasnímán výraznější rozdíl (dvojnásobný vůči ostatním), je vidět rozchod do 1,0 °C.

Rozchod nasnímaných a reálných teplot s rostoucí teplotou nádob může být dán významnějším rozdílem mezi teplotou zájmového povrchu a teplotou okolí. Pokud se například zaměříme na nejteplejší nádobu 2.5 (uvažovaná teplota po korekci 33,8 °C), můžeme pozorovat až o 0,9 °C nižší nasnímané hodnoty. V čase snímání nabývala teplota okolí hodnoty 11,9 °C. Snímaný povrch je tedy teplejší o 21,9 °C. V tomto pokusu byla nastavena fixní hodnota emisivity 1,0. Pokud se nastavená emisivita vůči reálné lišila do 3 % (nižší), mohlo při takovém tepelném rozdílu k této chybě dojít (viz obrázek č. 5). Pokud se ovšem podíváme na nádoby 2.3 a 2.4, pozorujeme téměř identický rozdíl (mimo chybné stanovení nádoby 2.4 z hladiny snímání 1,5 m). V těchto případech je rozdíl oproti okolní teplotě nižší (pro nádoby: 2.3 – 12,9 °C; 2.4 – 17,0 °C). Při stejné chybě v nastavené emisivitě by byla teoretická chyba až dvakrát nižší. Proto důvody rozchodu nelze s jistotou přisoudit tomuto vlivu.

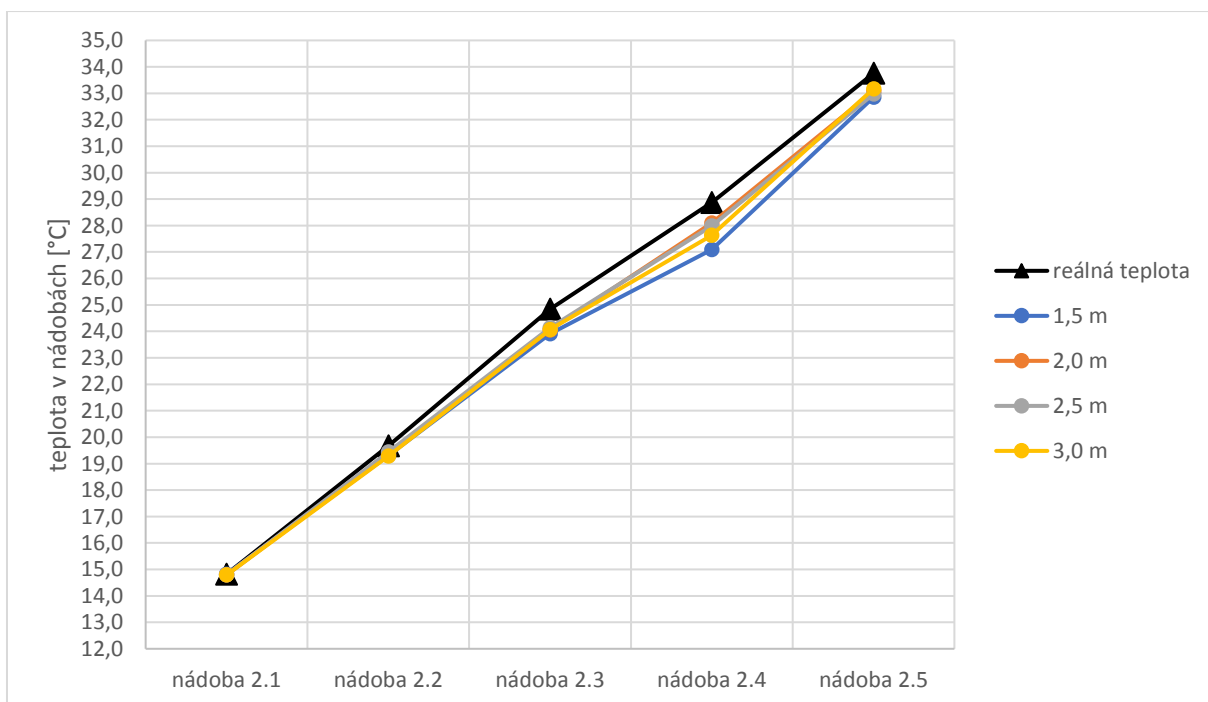
Lze tedy předpokládat, že při pořizování termických dat vzniká mnoho nepřesností obtížně definovatelného původu. Jelikož jsou ale rozdíly mezi snímáním z různých hladin relativně konstantního charakteru, můžeme při uvažování potenciální chyby v řádu desetin stupňů Celsia kalibrovat data se stejným povrchem vůči jednomu kalibračnímu bodu.



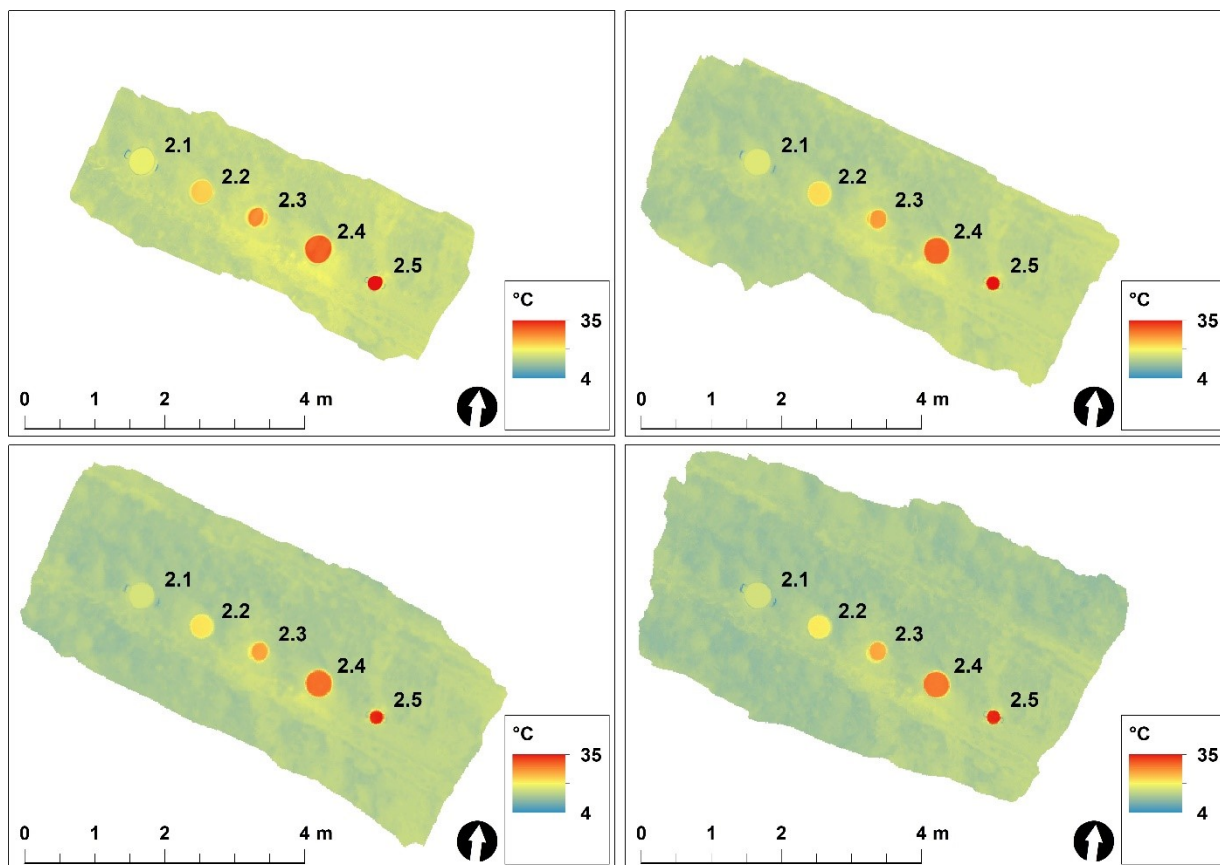
Graf 11: Porovnání reálných a snímaných teplot v nádobách (průměrné teploty po teplotní korekci)



Graf 12: Pokles snímaných teplot hladin v jednotlivých nádobách v závislosti na vzdálenosti snímače (pokus č. 2)



Graf 13: Porovnání reálných a snímaných teplot v nádobách (posun škály všech hladin snímání do stejného výchozího bodu nádoby 2.1)



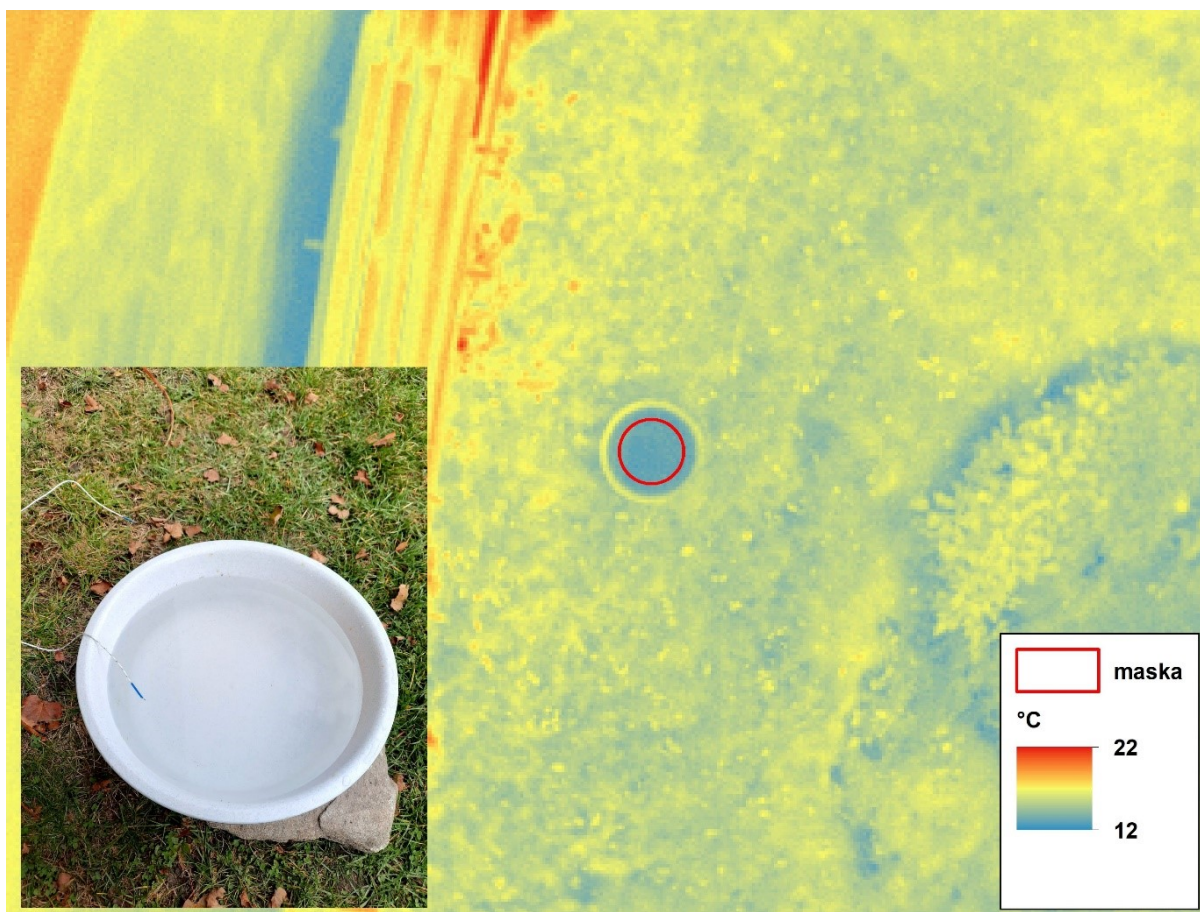
Obrázek 20: Výsledná fotogrammetricky zpracovaná série nádob ze snímaných výšek zleva nahoře 1,5m; 2,0m; 2,5m a 3,0m

6.1.3 Pokus č. 3 – vliv vzdálenosti snímače

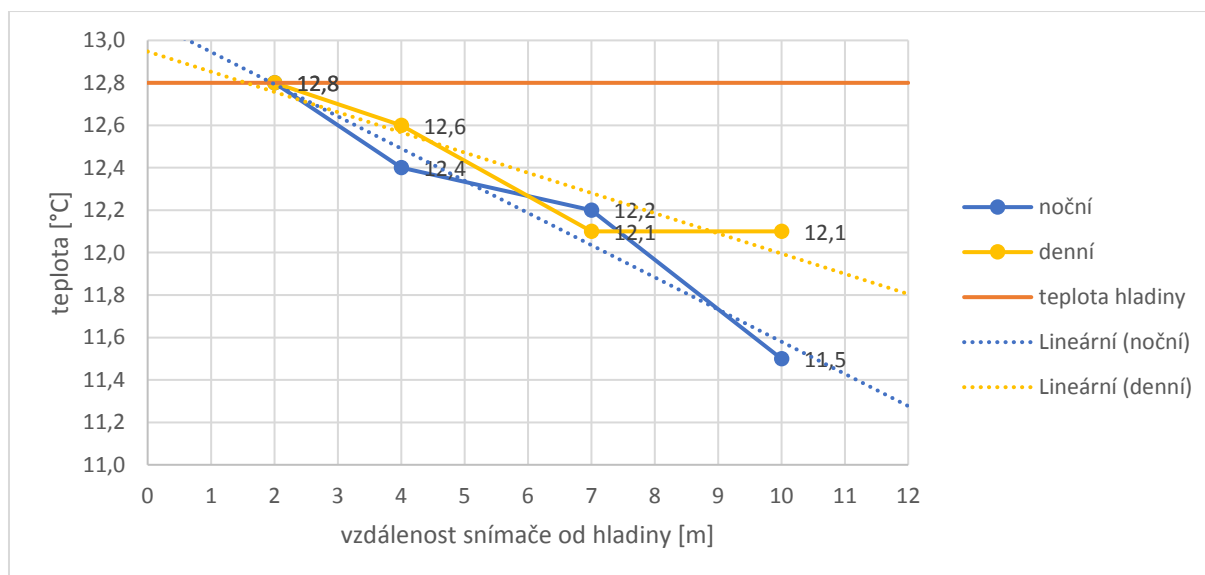
Vliv vzdálenosti snímače na výsledná data má z předchozích pokusů prokazatelně vliv. Z tohoto důvodu byl proveden další test ve třípatrovém domě, který zde nahrazuje například bezpilotní nosič. Obdobně jako u předchozích pokusů byla jako testovací objekt zvolena nádoba s vodou o známé teplotě. Snímání bylo provedeno za známé meteorologické situace. Dané snímání probíhalo ve dvou denních režimech. První za denního světla, ovšem za vysoké oblačnosti bez přímé interference slunečního záření. Druhý pokus byl proveden ve večerních hodinách za úplné tmy.

Snímání probíhalo v několika rovinách vždy v identickém intervalu 15 vteřin. První hladina snímání byla ze země ve výšce 2 m. Další snímání probíhalo vždy z okna jednotlivých pater. První nadzemní patro je ve výšce 4 m, další jsou vždy o 3 metry výše. Celkem byla tedy provedena 4 snímání ve 2, 4, 7 a 10 m. Po celou dobu snímání byla měřena teplota okolí, teplota hladiny nádoby a relativní vlhkost.

Denní snímání probíhalo za konstantní vysoké oblačnosti bez interference slunečního záření při teplotě okolí 14,4 °C a relativní vlhkosti 74 %. Noční snímání probíhalo při teplotě okolí 12,7 °C a relativní vlhkosti 84 %. V nastavení kamery se měnila pouze teplota okolí, jinak zůstalo při obou pokusech identické.



Obrázek 21: Testovací nádoba, Pokus č. 3 - první patro (4m)



Graf 14: Porovnání vlivu vzdálenosti snímače (denní x noční)

Pokud provedeme korekci teploty posunutím do výchozího bodu (teplota hladiny), můžeme v grafu č. 14 pozorovat, že se vzrůstající vzdáleností nosiče se snímané teploty snižují. V případě nočního snímání je viditelný nepatrně strmější pokles (denní – 0,10 °C/m, noční – 0,15 °C/m). Vzhledem k tomu, že se teploty okolí zásadně nelišily, teplota testovaného objektu byla identická a v obou případech byla přítomna vysoká oblačnost, je tato skutečnost

z nejpravděpodobnějšího hlediska způsobena vyšší relativní vlhkostí. V případě vyšší relativní vlhkosti je mezi měřeným objektem a snímačem vyšší procento vodní páry. Jak již bylo řečeno, voda je pro IR záření neprostupná. Z těchto důvodů bude s vyšším procentem relativní vlhkosti růst vliv vzdálenosti snímače, respektive bude slábnout signál snímaného záření.

Jestliže hodnoty porovnáme s daty z předchozího pokusu, můžeme pozorovat diametrálně nižší pokles. Pokud se zaměříme především na hodnoty nočního snímání, ve kterém byla v čase snímání téměř identická relativní vlhkost, můžeme pozorovat až sedmkrát nižší pokles na metr výšky. V předchozím pokusu dosahoval průměrný pokles 1,0 °C/m (viz graf č. 12). Vzhledem k podobným atmosférickým podmínkám a stejnému nastavení termokamery (minimální rozdíl v teplotě prostředí), je velice obtížné definovat příčinu rozdílného poklesu. Lze předpokládat, že je pokles závislý na mnoha faktorech specifických pro konkrétní snímání. Proto je vhodné dodržovat v celém čase snímání konstantní hadinu letu.

6.1.4 Pokus č. 4 – vliv umělé závlahy

Jako další test na ručním nosiči byl proveden konkrétní pokus týkající se vlivu zamokření. V blízkosti budovy byly definovány dvě identické oblasti (krátký travní porost) o plochách 1 x 1,5 m. Jedna plocha byla v průběhu dvou dnů intenzivně zavlažována. Každá závlaha byla provedena aplikací sady pěti postupných dávek o 5 litrech vody, která byla vždy dávkována při horní hraně druhé části testovací plochy (viz obrázek č. 22). Intenzita dávkování byla regulována dle rychlosti infiltrace, aby nedocházelo ke ztrátě závlahy povrchovým odtokem mimo testovací plochu.

První den byly provedeny dvě závlahy ve 14 a 15 hodin. Průměrné denní teploty se pohybovaly kolem 11,0 °C za stavu mírné oblačnosti a bezvětří. Voda použitá pro závlahu byla brána z externího rezervoáru s teplotou 8 °C. Přibližně 30 minut po západu slunce bylo v 16:50 provedeno první kontrolní snímání ze třetího patra budovy (celková vzdálenost snímače - 10 m). Teplota okolí v čase prvního snímání nabývala hodnoty 6,1 °C. Následně byla provedena další dvě kontrolní snímání v 17:20 při teplotě okolí 5,5 °C a v 18:00 při teplotě 4,9 °C.

Druhý den byly na plochu 2 aplikovány další 4 sady závlah (10:15 – teplota okolí 13 °C; 12:30 – 13,3 °C; 14:10 – 14,5 °C; 15:00 – 14,3 °C). Vzhledem k relativně negativním výsledkům prvního kontrolního snímání v pohledu na termální rozdíl ploch, byla ve druhém dni závlah aplikována teplejší voda o teplotě cca 13,0 °C (podobná teplotě okolí). Tímto krokem byla zamýšlena simulace prohřátého povrchu. Meteorologická situace byla celý den konstantní (jasno, bezvětří). První snímání bylo provedeno bezprostředně po zapadnutí slunečního kotouče za obzor v 16:10, následováno sérií celkem čtyř dalších snímání v intervalech přibližně po 10 minutách. Série byla doplněna o pozdní snímání v rozestupu půl hodiny od posledního v řadě (viz tabulky č. 3, 4 a 5).

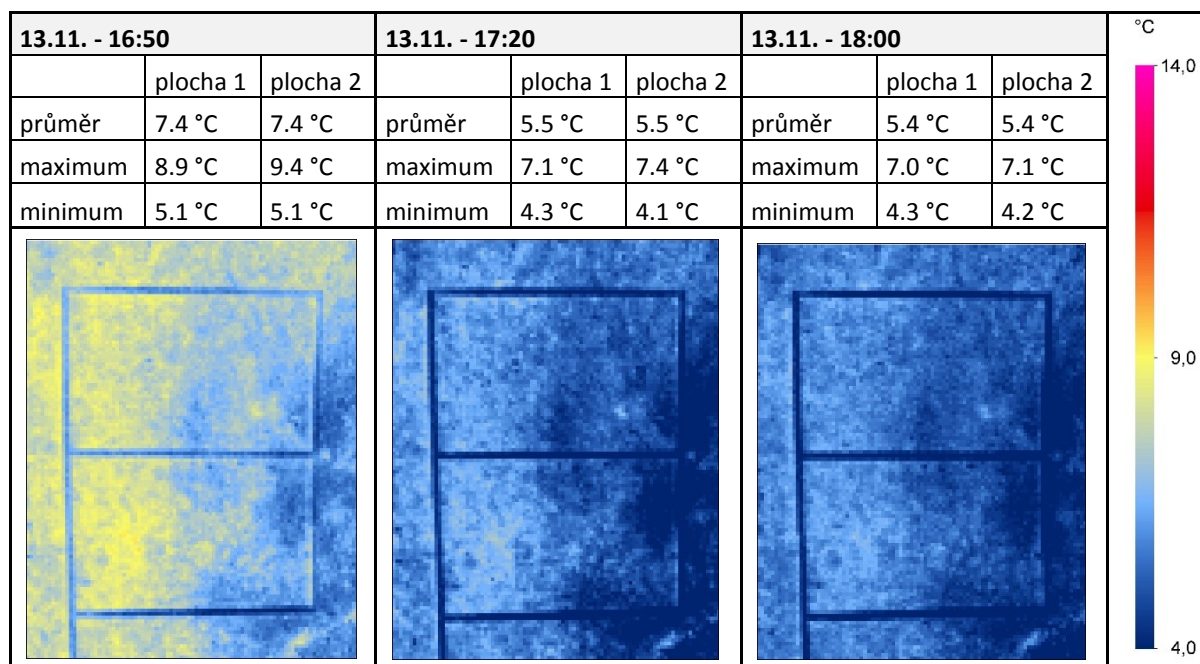


Obrázek 22: Testovací plocha vlivu vlhkosti na termální odezvu za přítomnosti nízké vegetace (v čase závlahy)

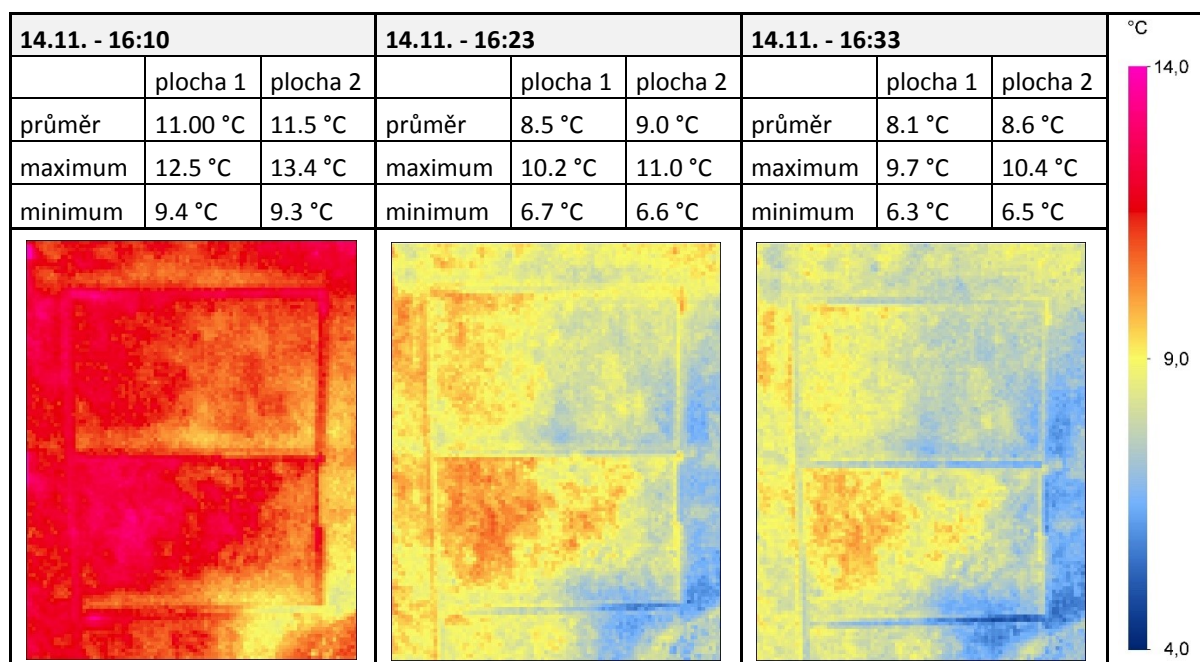


Obrázek 23: Detail testovací plochy včetně vyznačení oblasti výpočtu zonální statistiky

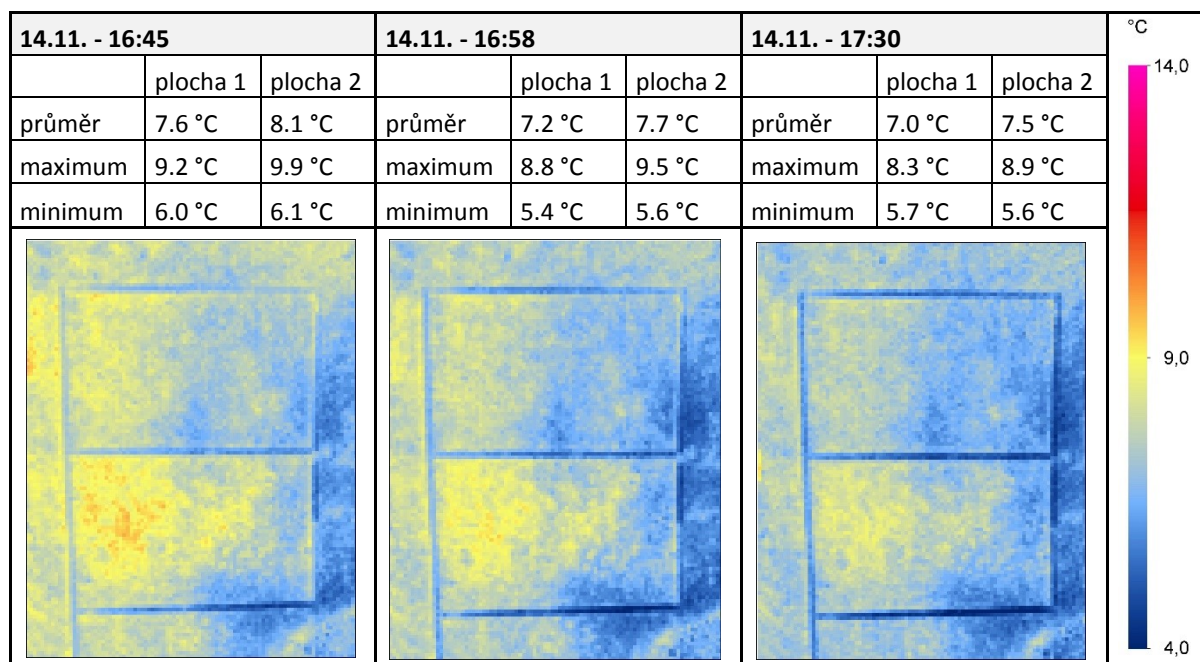
Tabulka 3: Jednotlivé termogramy testovací plochy pokus č. 4 - 1. část



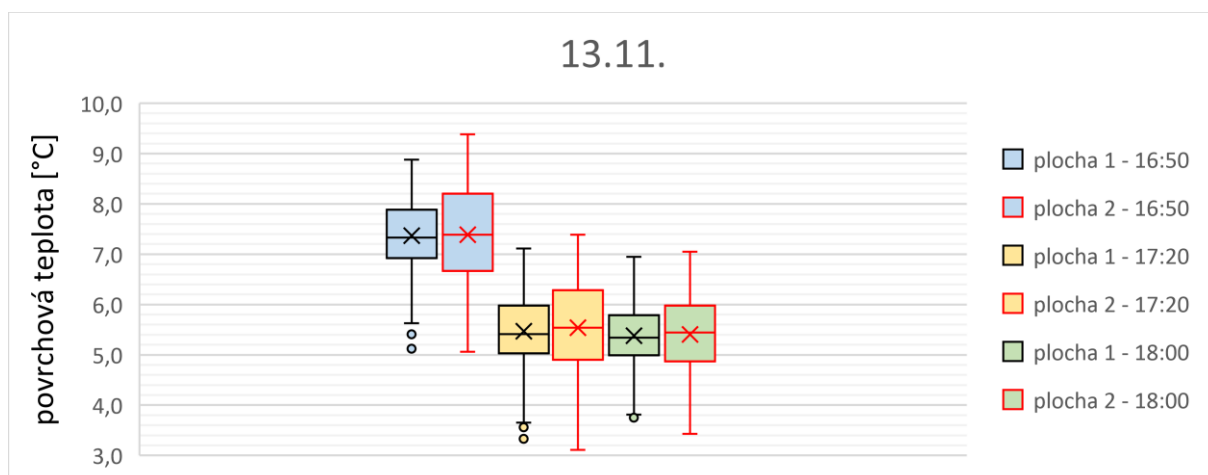
Tabulka 4: Jednotlivé termogramy testovací plochy pokus č. 4 - 2. část



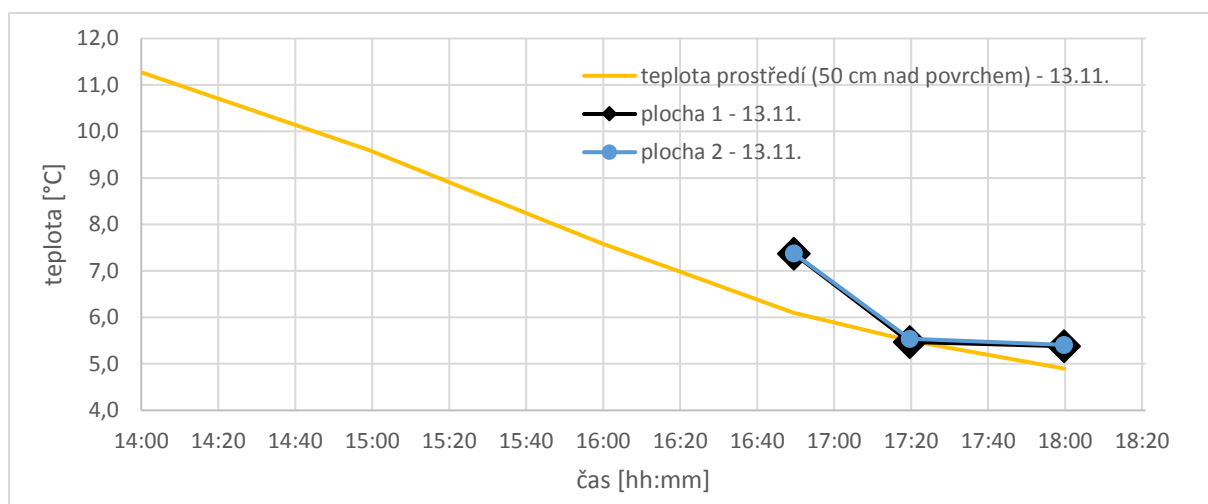
Tabulka 5: Jednotlivé termogramy testovací plochy pokus č. 4 - 3. část



Z přehledu termogramů jsou patrné teplotní rozdíly především ve druhém dni snímání. Kontrolní snímání první den vykazuje téměř identické průměry teplot ploch v čase. Vizuální kontrola termogramů též neprokazuje významné ovlivnění předchozími závlahami. Z grafu č. 15 lze pozorovat pouze nepatrně vyšší rozptyl dat v zavlažované části. Důvodem zanedbatelných rozdílů může být příliš malý rozdíl v procentuální vlhkosti polygonů. Před zahájením umělé závlahy dosahovala vstupní objemová vlhkost v dané oblasti průměrné hodnoty 35,2 %. V důsledku závlah prvního dne byla v zavlažované oblasti (plocha 2) vlhkost zvýšena na hodnotu 37,8 %. V druhé řadě lze tuto skutečnost potenciálně přisoudit malému poklesu okolní teploty v čase. Denní teploty dosahovaly maxima pouhých 11,6 °C a v průběhu odpoledne klesaly v téměř lineárním trendu. Nevznikla tedy možnost intenzivní reakce na prudký pokles okolní teploty.



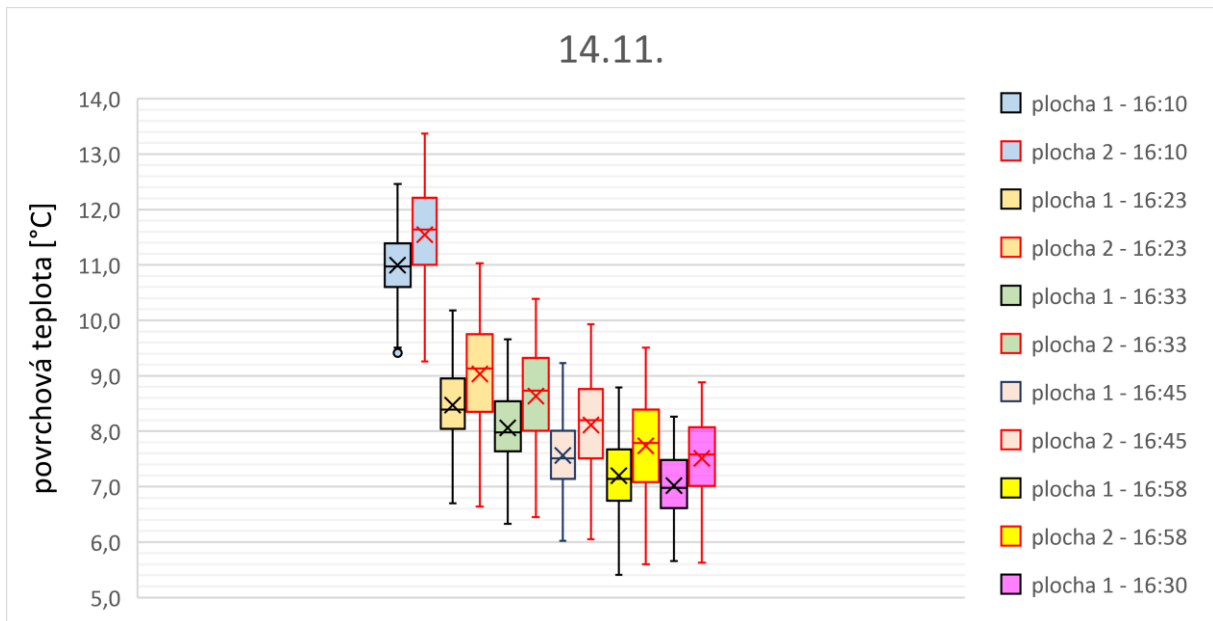
Graf 15: Statistické rozložení dat v testovacím polygonu (13.11.2020)



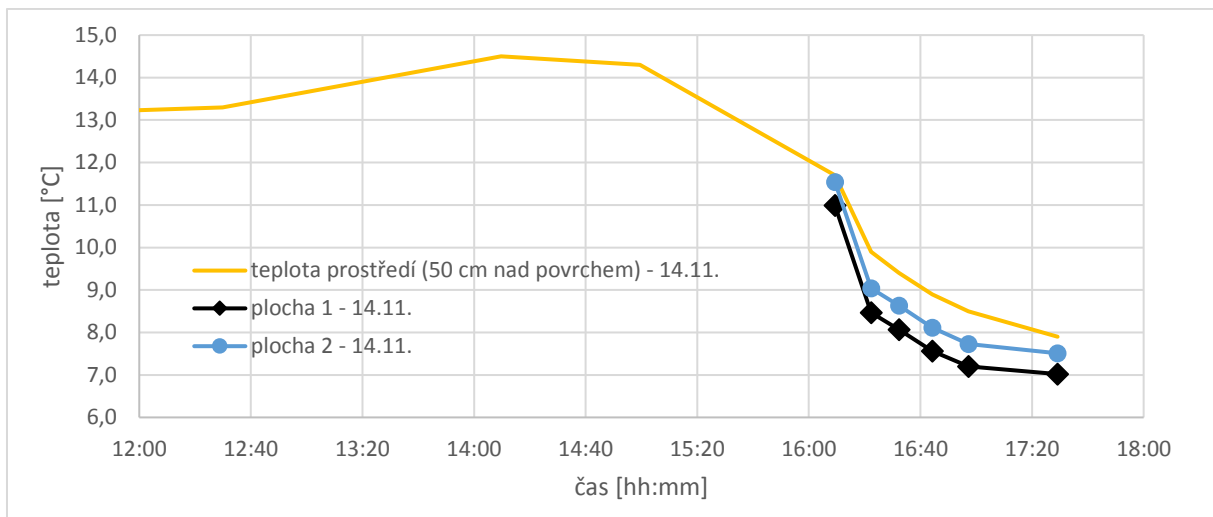
Graf 16.: Vývoj průměrné teploty v testovacích plochách (pokus č. 4 - 13.11.2020)

Vzhledem k negativním výsledkům prvního snímání, byla závlaha druhý den zdvojnásobena. Jak již bylo zmíněno, aplikace teplejší vody (okolo 13 °C) měla záměr simulovat prohřátý povrch, respektive neochlazovat povrch závlahou studenější vody, než má teplota povrchu. Finální vlhkost v zavlažované oblasti dosáhla hodnoty 41,1 %. Vizually je rozdíl mezi polygony evidentní, především v levé části v oblastech s horší kondicí vegetace (zahradní koridor – vyšlapaný travní porost). Pokud se zaměříme na srovnání průměrných teplot polygonů včetně rozptylů, můžeme pozorovat v případě zavlažované oblasti vyšší hodnoty (viz grafy č. 17 a 18). Rozdíl mezi polygony je ovšem v čase konstantní, což neodpovídá předpokladu z teorie odlišné tepelné setrvačnosti. Jestliže by byl rozdíl skutečně dán různou rychlostí ochlazování na základě míry zamokření, křivky by se měly vůči sobě po západu vzdalovat. Presentované grafy č. 17 a 18 indikují identický průběh poklesu teploty, ovšem s jinou počáteční hodnotou. Intenzivní zavlažování vytvořilo vlhkostní rozdíl necelých 6 %. Ovšem vzhledem k faktu, že již počáteční vlhkost byla vysoká, nedošlo k vytvoření výrazně odlišných ploch, u kterých by byla možná detekce odlišné reakce na pokles okolní teploty. Vyšší hodnoty u zavlažované oblasti jsou patrně způsobeny aplikací teplejší závlahové vody.

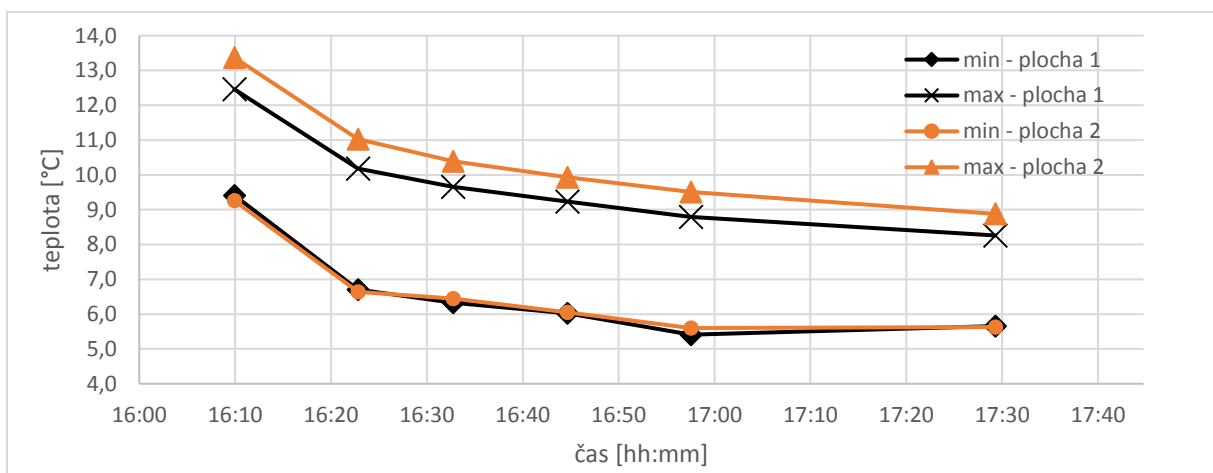
Pokud se zaměříme na prostorovou distribuci teplot, je třeba zhodnotit vliv přítomné vegetace. Nejprve je nutné připomenout, že dávkování závlahové vody bylo v celé ploše rovnoměrné. V prezentovaných termogramech jsou přesto oblasti teplotně identické nezavlažovanému polygonu, nebo dokonce nižší. Tento fakt potvrzuje i srovnání extrémů, kde se hodnoty minim z obou oblastí shodují (viz hodnoty minim v grafu č. 19). I přes snahu rovnoměrné závlahy může být jeden z důvodů špatná distribuce zavlažovací vody (chybné rozložení dávky, preferenční cesty apod.), tedy potenciální vznik oblastí s nedostatečným ovlivněním půdní vlhkosti. Tyto lokality jsou ovšem výhradně v pravé části testovacího polygonu v oblastech s přítomností hustší vegetace (tráva, mech). Při úvaze konstantního ovlivnění vlhkosti v celé ploše lze konstatovat, že v případě malých rozdílů půdní vlhkosti, může mít i takto nízká vegetace vliv při stanovování povrchové teploty. Z grafu č. 17 ovšem vyplývá, že je zavlažený polygon (plocha 2) jako celek jednoznačně teplejší než plocha 1 (v průměru o 0,5 °C). Hodnoty minim nejsou pro plošnou analýzu zásadní, proto zde můžeme ovlivnění vegetací zanedbat. Obecně lze tedy předpokládat, že při analýze větších ploch nebude mít porost tohoto typu zásadní vliv.



Graf 17: Statistické rozložení dat v testovacím polygonu (14.11.2020)



Graf 18: Vývoj průměrné teploty v testovacích plochách (pokus č. 4 - 14.11.2020)



Graf 19: Přehled hodnot minim a maxim v daných testovacích plochách (pokus č. 4 - 14.11.2020)

Vzhledem k popisovaným problémům tohoto konkrétního pokusu nelze tento test považovat za zcela průkazný. Shrneme-li parametry a výsledky tohoto pokusu, můžeme říci, že v případě oblastí s komplexně vyšší vlhkostí je velice obtížné detekovat prostorovou distribuci, a především míru zamokření. Lze tedy předpokládat, že touto metodou je možné odhalit zamokřené oblasti především v kontrastu s výrazně sušší půdou, aby i s ohledem na případnou přítomnost vegetace docházelo k reakci s přijatelnou intenzitou pro detekci.

7 Vyhodnocení konkrétní lokality – Vavřínecký rybník

Za účelem ověření použitelnosti termokamery ve stanovování zamokřených lokalit bylo dne 9.10.2020 nasnímáno pole v těsné blízkosti Vavříneckého rybníka. Pozemek zemědělského půdního fondu byl dříve téhož dne zkulturnován do stavu předseťové přípravy s relativně hladkým povrchem. Tato skutečnost umožnila testování poměrně homogenní plochy bez vlivu vegetace. Celkem 3 testovací nálety s termální kamerou probíhaly po západu slunce za konstantní meteorologické situace.

Pro termální analýzu je vhodné znát reálnou charakteristiku povrchu, tedy například digitální model a RGB ortofoto terénu. Proto byl za denního světla uskutečněn nálet dronem *Phantom 4*, který je vybavený RGB snímačem vysokého rozlišení. Aktuální situace vlhkosti půdy v dané lokalitě byla zjištěna sadou měření v rovnoměrné síti o kroku 5 až 8 metrů. V každém bodě bylo měření 5x opakováno pro zjištění případného chybného měření. Pokud se některá z hodnot výrazně lišila od ostatních v dané sérii měření, byla vyloučena. Ze zbylých hodnot byla zprůměrována výsledná hodnota určená k analýze.

Termální snímky náletů byly zpracovány dle postupu v kapitole 5.2.

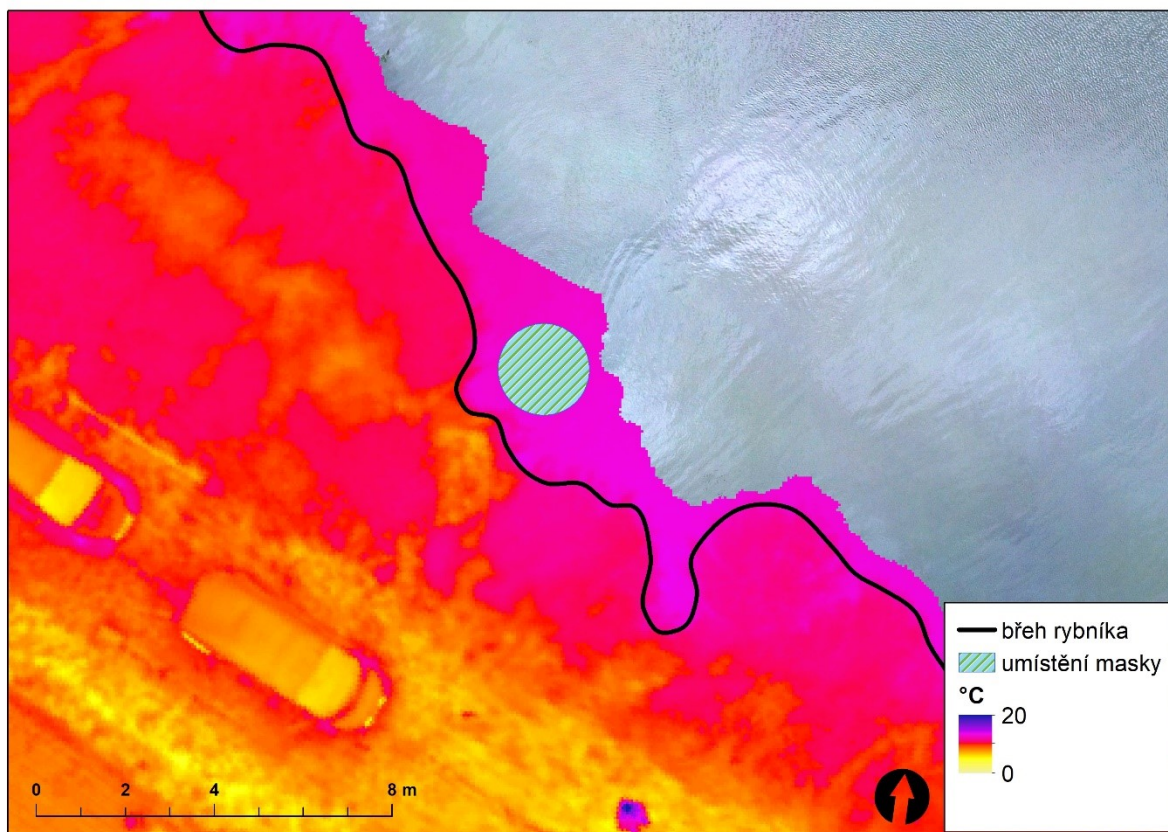
První z náletů probíhal v nejnižší letové hladině 9 m. Snímání probíhalo za úplné tmy za stálé meteorologické situace: jasno, mírné poryvy větru, teplota okolí 9,9 °C, relativní vlhkost 86 %. Druhý nálet probíhal v letové hladině 18 m za stejného atmosférického scénáře. Pouze teplota poklesla na 9,4 °C. Třetí nálet se uskutečnil v letové hladině 33 m. Teplota opět mírně klesla na 8,9 °C, jinak zůstaly podmínky opět neměnné. Interval mezi jednotlivými lety byl 6 minut (přistání, příprava, následující vzlet). Celková doba snímání se v letových hladinách prvního a druhého náletu pohybovala okolo 5 minut. V případě třetího náletu v nejvyšší letové hladině trvalo snímání necelých 7 minut. Rozsah zpracovaného území byl limitován zajištěním rozumného letového času.

7.1 Analýza stanovených teplot

Pro zjištění rozdílu nasnímaných povrchových teplot oproti realitě byly ve snímané lokalitě rovnoměrně rozmístěny nádoby s vodou o známé teplotě. Ve všech výsledných termálních ortofotech jsou dané nádoby vůči okolí dobře rozpoznatelné, ovšem především u vyšších náletů je z důvodu nízkého rozlišení zpracovaných dat hladina nádoby reprezentována pouze 1 až 3 pixely v závislosti na hladině snímání. Vzhledem k fotogrammetrickému zpracování, k chybám vznikajícím při samotném snímání a specifikaci *MFOV* (3 x 3 pixely) nebylo možné na základě hodnoty jednoho pixelu kalibrovat celé ortofoto. Ovšem v tomto konkrétním případě lze pro zjištění vzájemných teplotních rozdílů využít homogenní plochu rybníka, která je součástí všech zpracovaných termálních ortofot. Teplota v rybníku nebyla bohužel za tímto účelem měřena, ale vzhledem k relativně krátkému času všech tří náletů (necelá půlhodina) a minimálním atmosférickým změnám v průběhu snímání je uvažována konstantní teplota. Na základě tohoto testu lze stanovit rozdíl mezi jednotlivým snímáním, nikoliv rozdíl oproti reálné teplotě.

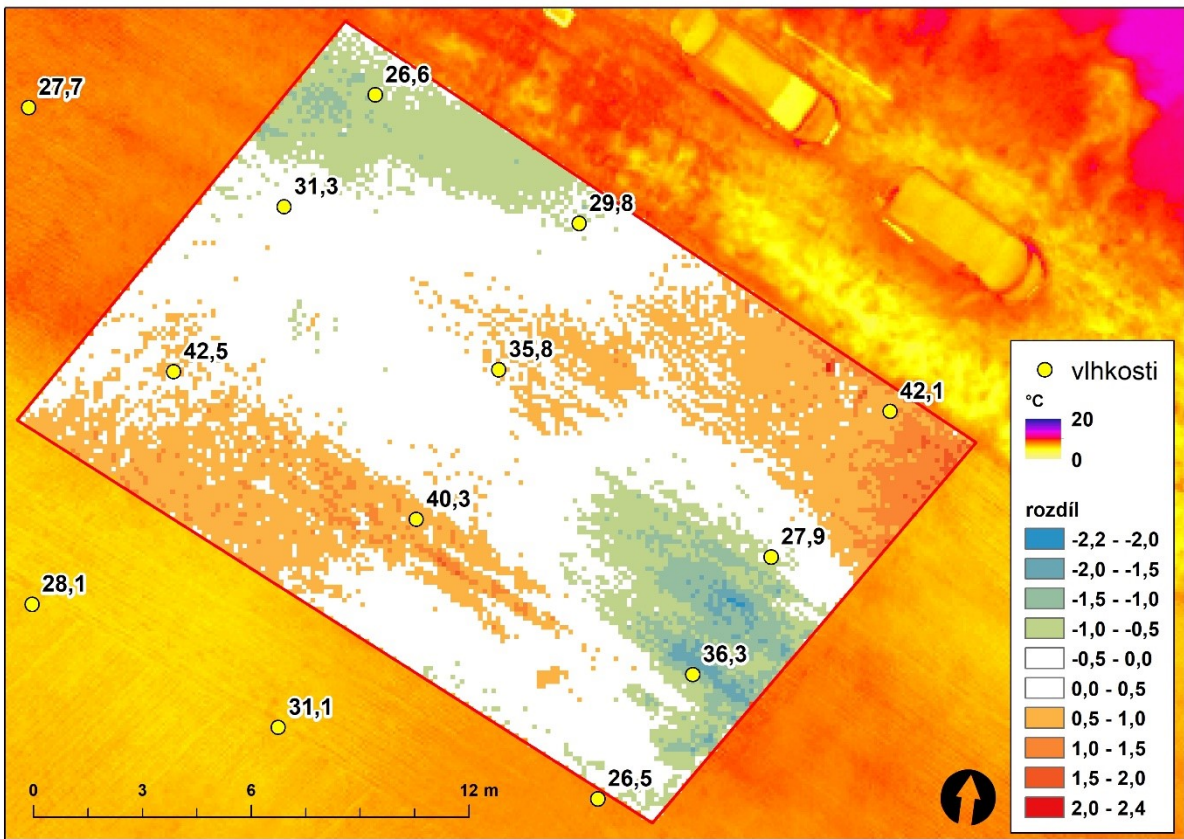
Pro porovnání byla ve všech zpracovaných IR ortofotomapách (nekalibrovaná škála teplot) opětovně zjištěna průměrná teplota hladiny rybníka v jedné konkrétní zóně (obrázek č. 24). Umístění této masky pro výpočet bylo limitováno nejnižším náletem, ve kterém byla

zpracována pouze malá část hladiny. V případě nejnižšího náletu č. 1 (9 m) byla průměrná teplota hladiny 12,9°C, u vyššího náletu č. 2 (18 m) byla průměrná teplota 12,7 °C a v posledním případě nejvyššího náletu č. 3 (33 m) dosáhl průměr nejnižší hodnoty 10,2 °C.

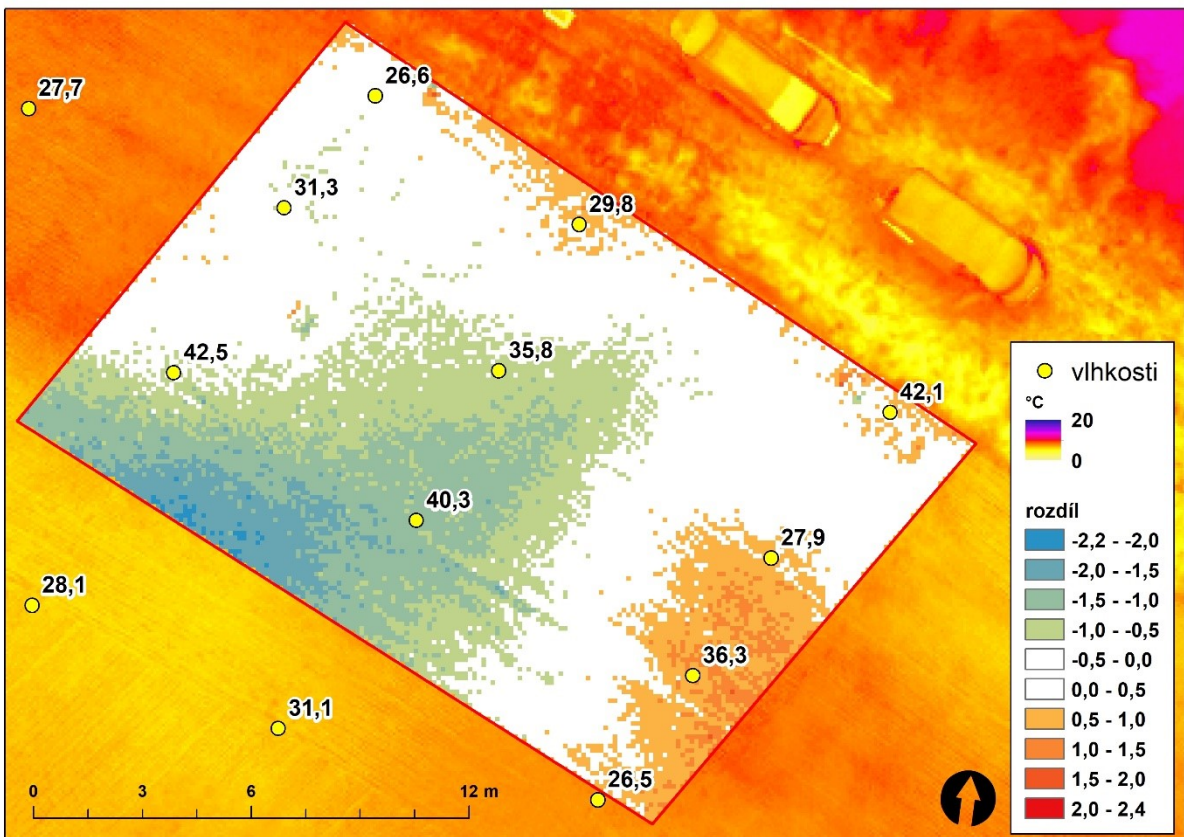


Obrázek 24: Umístění masky pro výpočet průměrné teploty hladiny z jednotlivých snímaní (dle náletu č. 1 - 9 m)

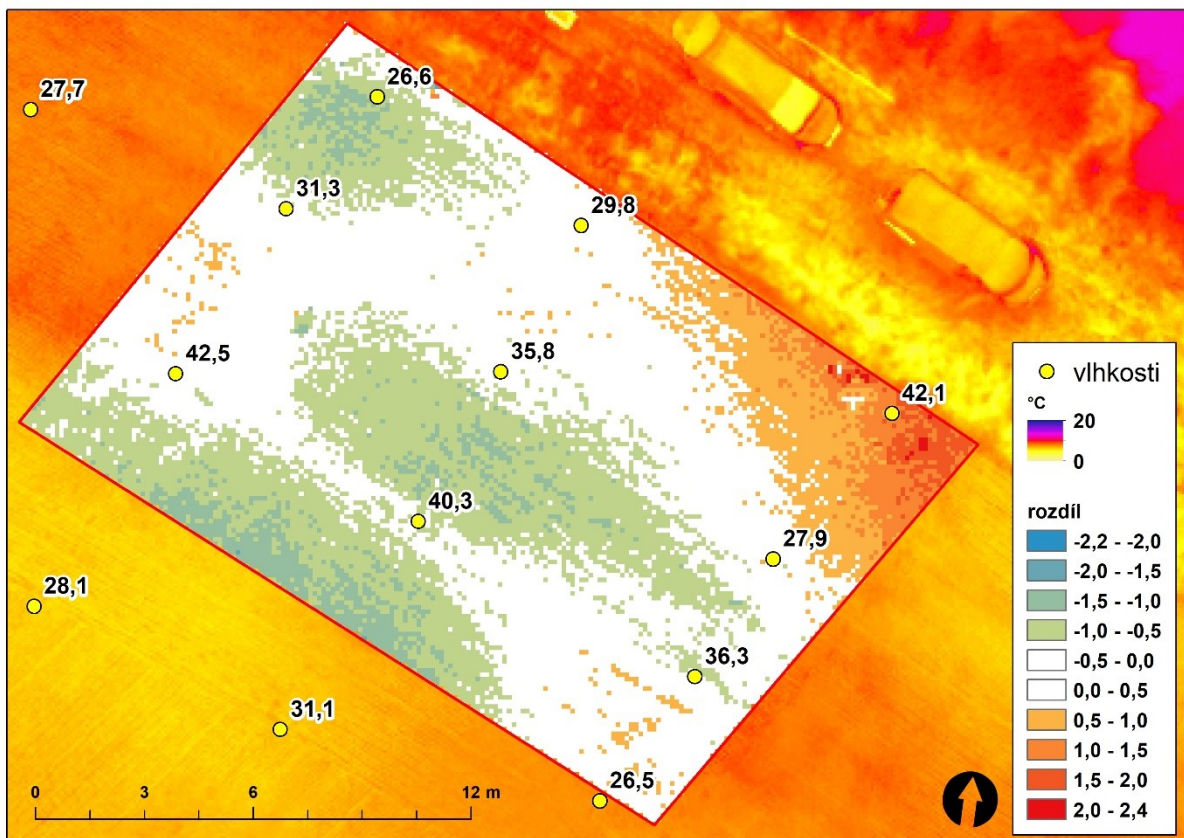
Z těchto tří hodnot lze opětovně potvrdit trend slábnutí signálu s rostoucí vzdáleností snímače. Průměrný pokles snímané teploty na hladině rybníka nabýval hodnoty 0,12 °C/m, což přibližně odpovídá poklesu snímaných hodnot z pokusu č. 2. Pokud se jedná o identické homogenní povrchy snímané za identických podmínek, je tato skutečnost nyní zcela zřejmá. Pro prosté posunutí celé škály do známe referenční hodnoty kalibračního bodu je ovšem vhodné zkontrolovat rozdíly i v rámci jiných povrchů. Za tímto účelem byl vybrán testovací polygon v oblasti s kontaktním měřením vlhkosti, kde bylo provedeno porovnání teplotních rozdílů. Z důvodu rozdílného rozlišení byla data v testovacím polygonu pro tuto konkrétní analýzu převzorkována, aby se hodnoty pixelů překrývaly. Vypočtené rozdíly (vždy nižší mínus vyšší nálet) byly reklasifikovány do intervalů po 0,5 °C. Tento test odhalil, že prosté snižování nasnímané teploty s rostoucí vzdáleností snímače zde neplatí. Srovnáme-li vůči sobě nejnižší (9 m) a střední (18 m) nálet, zjistíme, že nejsou teploty vyššího náletu nižší v celé ploše, ale v určitých oblastech jsou dokonce vyšší. V případě porovnání středního (18 m) a nejvyššího (33 m) náletu platí totéž. Dokonce i ve srovnání nejnižšího (9 m) a nejvyššího (33 m) náletu se vyskytují jak studenější, tak teplejší oblasti. Pro lepší ilustraci jsou rozdíly mezi jednotlivými nálety demonstrovány na následujících obrázcích č. 25, 26 a 27.



Obrázek 25: Rozdíl mezi nejnižším (9 m) a středním (18 m) náletem



Obrázek 26: Rozdíl mezi středním (18 m) a nejvyšším (33 m) náletem



Obrázek 27: Rozdíl mezi nejnižším (9 m) a nejvyšším (33 m) náletem

Z prezentovaných výstupů je patrné, že se fotogrammetricky zpracované snímky z různých výšek neliší pouze o daný teplotní rozdíl v celé ploše, ale dochází k proměnlivým chybám, jejichž důvody vzniku mohou být obtížně definovatelné. Kolísavé teplotní rozdíly mezi jednotlivými nálety mohou být umocněny reálným poklesem povrchové teploty na zemědělském pozemku, který není pro celou plochu lineární. Na základě nižší tepelné setrvačnosti sušší půdy se oproti oblastem s vyšší půdní vlhkostí bude povrch ochlazovat rychleji. Tento fakt by se měl při porovnávání jednotlivých náletů projevit větším teplotním rozdílem v sušších oblastech. Při bližším zkoumání je vidět, že hlavním problémem nejsou pouze proměnlivé rozdíly, ale i jejich lokalizace. Pokud se vrátíme k obrázkům č. 25, 26 a 27 a zaměříme se v testovacím polygonu například pouze na spodní část vlevo, můžeme pozorovat, že v případě náletů č. 1 a 2 jsou zde hodnoty z nižšího náletu vyšší. Tedy očekávaná skutečnost poklesu teploty se zvětšující se vzdáleností snímače. Jestliže se ovšem podíváme na porovnání náletu č. 2 a 3, pozorujeme ve stejné lokalitě opačný stav. Tedy, že ve vyšším náletu byly nasnímány teplejší hodnoty. Tato skutečnost hovoří nejen v neprospěch teorie vlivu vzdálenosti snímače, ale i předchozích tvrzení o reálném ochlazení v čase (nejvyšší nálet byl nasnímán poslední). Proto je zřejmé, že významnou roli hraje rovněž celý proces přípravy termálního ortofota.

Po bližší analýze primárních dat (video z termokamery) bylo zjištěno, že v rámci dílčích náletů se liší teploty konkrétních oblastí na jednotlivých snapshotech v řádu jednotek stupňů. Ve všech hladinách letu byla blíže analyzována stejná oblast o ploše cca 1 m². V případě prvního náletu v nejnižší hladině (9m) se zmíněná plocha vyskytla v obraze snímání dvakrát v časovém

rozestupu 1,5 minuty. Výskyt je uvažován co nejbližší středu snímání. Ve druhém záběru byla průměrná hodnota plochy o 1,6 °C nižší. Ve druhém případě náletu č. 2 (18 m) se stejná oblast vyskytla také dvakrát v rozestupu 4 minut. Zde opět platí pokles průměrné teploty oblasti, a to o hodnotu 2,6 °C. V posledním případě náletu č. 3 (33 m) se vybraná oblast vyskytuje v obraze snímání čtyřikrát. I zde lze pozorovat pokles nasnímané průměrné teploty oblasti v čase v lineárním trendu. Rozdíl mezi první a poslední hodnotou je 2,8 °C v časovém rozestupu necelých 6 minut. Pokud se zaměříme například na nálet č. 2 (18 m), průměrná hodnota téže oblasti ve zpracovaném termálním ortofotu je přibližně uprostřed intervalu zmiňovaného teplotního poklesu. Lze tedy konstatovat, že i vzhledem ke krátkému letovému času docházelo v průběhu snímání k výraznějším teplotním změnám, a tedy i ke zkreslení výsledného fotogrammetricky zpracovaného teplotního ortofota. Dále je třeba zmínit, že pokles snímaných teplot v čase může být umocněn ochlazováním samotné termokamery. Přestože byla kamera před snímáním delší dobu ve vnějším prostředí, tedy teplotně ustálená okolí, mohlo v důsledku sání rotorů dronu k tomuto ději docházet. Vzhledem k faktu, že nelze provést snímání v celém zájmovém území s identickou pokrývností (časové rozestupy a množství snímků), je třeba brát míru tohoto zkreslení v potaz, respektive uvažovat výrazné chyby ve stanovené povrchové teplotě. Rozptyl teplot v rámci této oblasti dosahuje hodnot přibližně ± 2 °C. Případ nasnímaní teplejší oblasti v nejvyšším náletu je dán určitým množstvím termogramů s vysokým stupněm teplotního zkreslení v krajích (viz kapitola 7.2.3).

Z předchozích tvrzení je zřejmé, že při tvorbě termálního ortofota dochází fotogrammetrickým zpracováním jednotlivých termogramů k významným chybám prostorové distribuce teplot i v rámci homogenního povrchu. Tyto chyby vzhledem k charakteru snímání dálkového průzkumu nelze eliminovat. Pokud by snímání probíhalo v prostředí s konstantní meteorologickou situací s ustálenou teplotou povrchu, byla by chyba ve stanovených teplotách výrazně menší a odvíjela by se především od nastavení termální kamery. Ovšem pokud určujeme povrchovou teplotu za účelem detekce zamokřených oblastí, vyžaduje snímání změnu okolní teploty, která vyvolá různou teplotní odezvu povrchu na základě hodnoty vlhkosti. Z těchto důvodů není možné za těchto podmínek vytvořit termální ortofoto, které bude odpovídat reálným teplotám v daný konkrétní moment s minimální odchylkou.

Je tedy jasné, že od zpracovaných náletů nelze očekávat nejen správné určení povrchové teploty, ale ani fakt, že lokality s identickými hodnotami teplot ve zpracovaném termálním ortofotu mají identickou teplotu i ve skutečnosti.

7.2 Problémy ve fotogrammetrickém zpracování termografických snímků

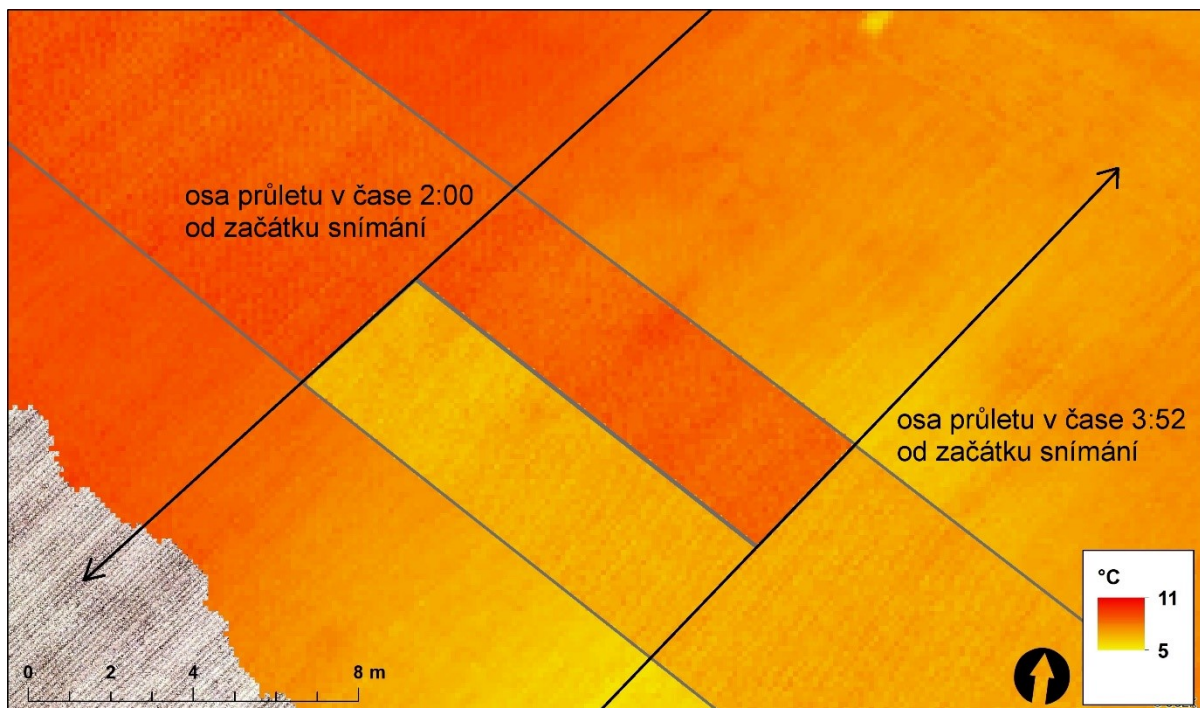
Vzhledem k významnému vlivu komentovaného teplotního zkreslení, které vzniká při pořizování a následném zpracování termických snímků, je vhodné se blíže zaměřit na konkrétní popis problému. Především ve zpracování ale dochází i k dalším chybám, které se odrážejí ve výsledném termálním ortofotu.

7.2.1 Teplotní zkreslení

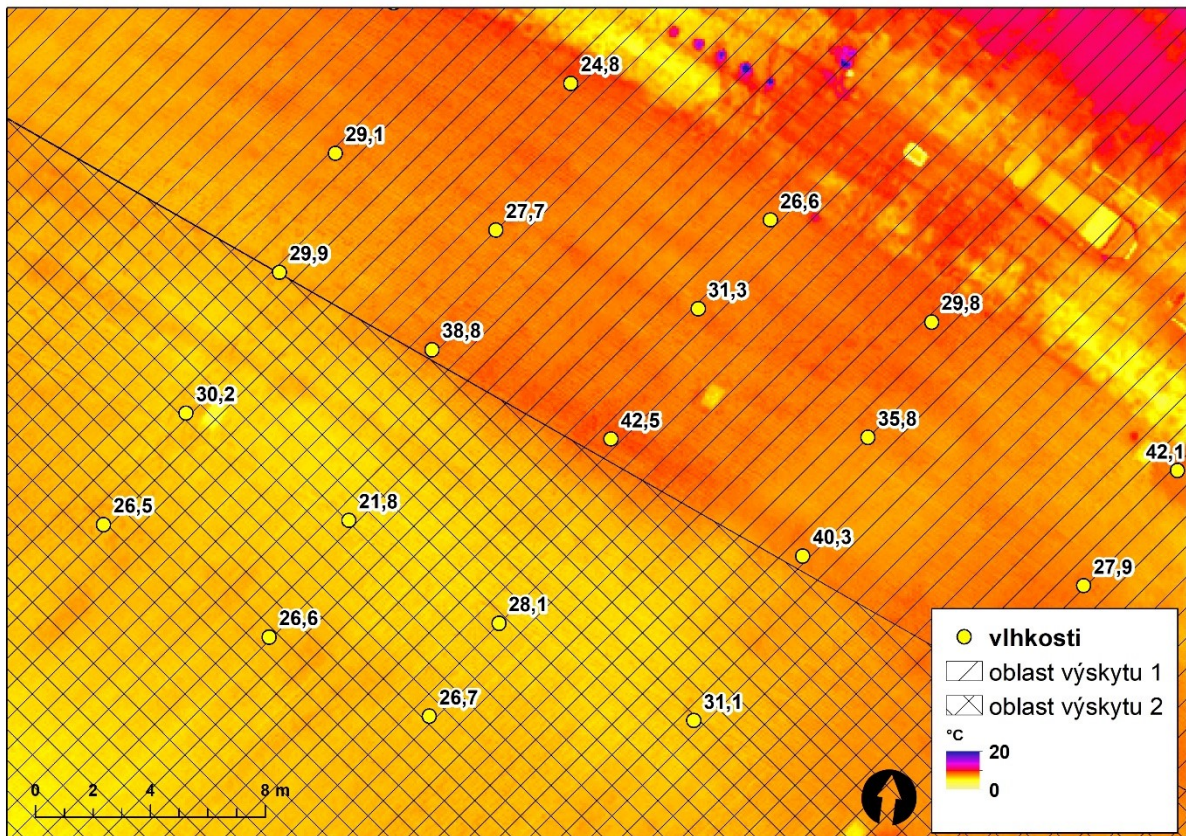
Prvním nejzávažnějším problémem je již zmíněné teplotní zkreslení především v důsledku tepelného vývoje povrchu v době snímání. Bohužel není toto zkreslení konstantní v celé ploše, jelikož není možné zajistit snímání všech míst s identickým překryvem ve stejném čase. Trasování letu zapříčiní překryv lokalit v různých časech v různé teplotní kondici.

Výsledná teplota se pak odvíjí od počtu snapshotů z daných časů snímání. Například pokud bude homogenní oblast o teplotě 10 °C nasnímána na 5 snímcích, následně se ochladí na 6 °C a bude podruhé nasnímána na 8 snímcích, bude výsledná teplota termálního ortofota přibližně 7,5 °C. Pro ilustraci je uveden obrázek č. 28, ve kterém jsou vyznačeny osy průletů v daných časech snímání (včetně výřezů z konkrétních termogramů v ose snímání). Na obrázku je vidět drobný přechod v překryvu. V této oblasti mezi osami letů se při prvním průletu v čase 2:00 [min:sec] od začátku snímání pohybovaly teploty okolo 8 °C. V téže oblasti se při druhém průletu v opačném směru pohybovaly teploty již pouze okolo 7 °C. Proto zde ve výsledných datech vzniká drobný přechod, který by při neinformovaném přístupu mohl být vyhodnocen jako indikace přechodu do oblasti s vyšší vlhkostí.

Pro lepší představu je na obrázku č. 29 uveden detail části území v širším měřítku, kde jsou vyznačeny oblasti výskytu dronu v čase. V oblasti 1 se dron nacházel bezprostředně po zahájení náletu, zatímco v oblasti 2 v úplném závěru letu. Po bližším zkoumání jednotlivých termogramů je zejména díky překryvům vidět, že v obou oblastech byla na začátku téměř identická průměrná povrchová teplota. V pozdějším čase je oproti tomu vidět, že průměrná teplota povrchu v obou oblastech poklesla téměř o 2 °C. Překryvy mezi oblastmi zajišťují plynulý přechod, který je podpořen (částečně maskován) výrazně vlhčí oblastí na rozhraní těchto ploch, které vykazovalo v celém čase náletu konstantnější teploty. Ve finálním ortofotu se tedy oblast 1 jeví jako teplejší než oblast 2, ve skutečnosti je ovšem tento fakt dán odlišným časem snímání.

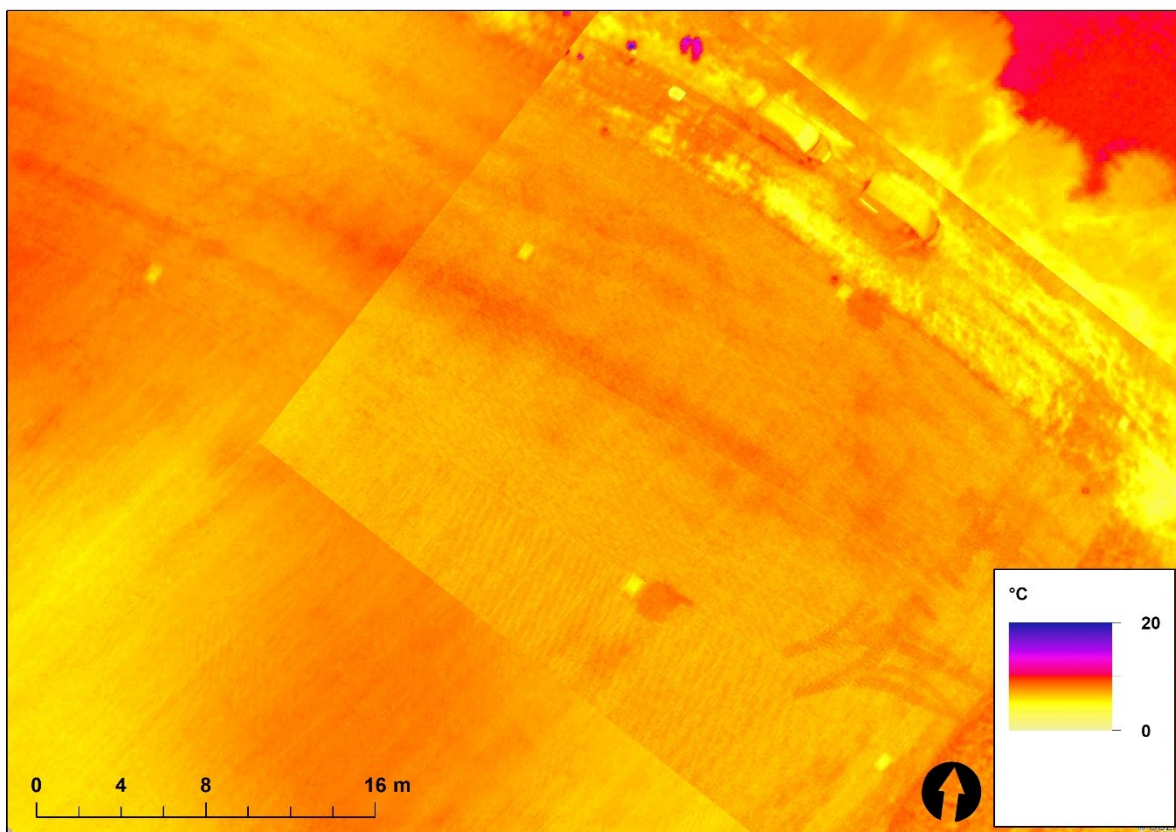


Obrázek 28: Ilustrace zkreslení termálního ortofota vývojem teplot při samotném snímání (nálet č. 3 – 33 m)



Obrázek 29: Detail teplotního zobrazení v širším měřítku s vyznačenými oblastmi výskytu dronu v rozdílném čase kampaně (nálet č. 2 – 18 m)

V následujícím obrázku č. 30 je umístěn vybraný termogram (snapshot) ve výsledném termálním ortofotu. Zcela jasně můžeme identifikovat výrazně vlhčí oblasti, které jsou v průběhu letu teplotně stářejší, a tedy i v rámci výsledných dat konstantního charakteru. Oproti tomu je vidět jednoznačný rozdíl mimo tyto zóny. Pokud se zaměříme na přechod v levé dolní části termogramu a termálního ortofota, můžeme pozorovat, že v jednotlivém snímku je tato oblast viditelně teplotně konstantní, zatímco ve finálním ortofotu je patrné evidentní zkreslení. Spojování jednotlivých snímků z různých časů snímání zapříčiňuje prostorovou distribuci proměnlivých teplot, které logicky generují iluzi ploch s rozdílnou vlhkostí.

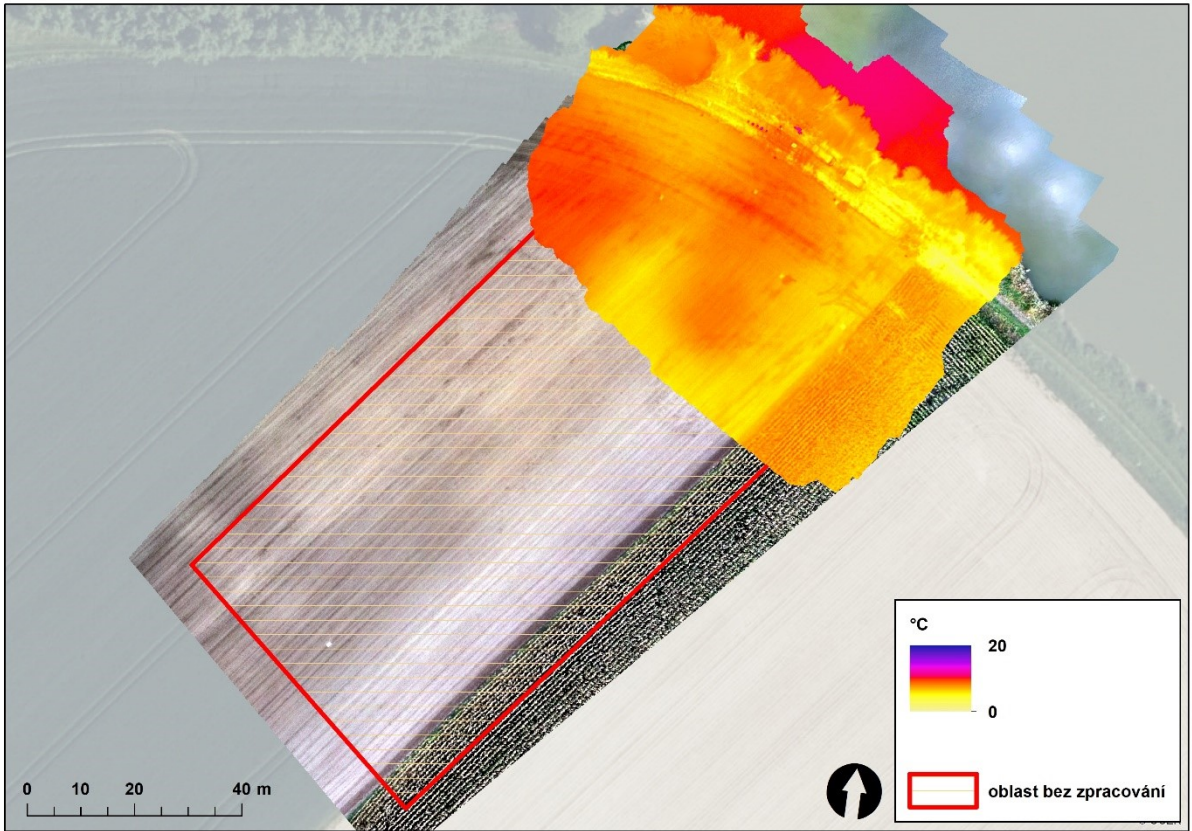


Obrázek 30: Ilustrace rozdílu jednotlivého termogramu vůči finálnímu termálnímu ortofotu (nálet č. 3 – 33 m)

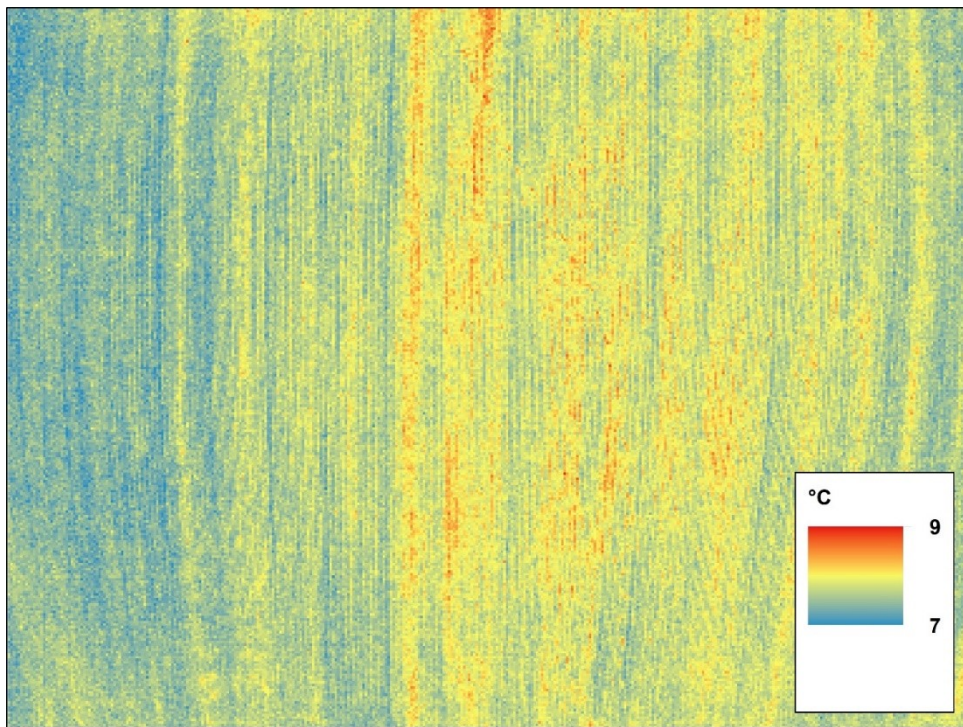
7.2.2 Nezpracovatelnost rozsáhlých homogenních ploch

Nízké nálety z důvodu zajištění rozumného letového času neumožňují snímání rozsáhlejších oblastí. Pokud ovšem zvolíme snímání z vyšší letové hladiny, snižujeme rozlišení, které může být zásadní ve fotogrammetrickém zpracování. V případě homogenních oblastí bez výrazných útvarů vzniká velké množství snímků, které jsou si velice podobné. Počet softwarově detekovatelných rozdílů, které mohou být nápomocné při spojování, klesá se snižujícím se rozlišením.

V případě nejvyššího náletu č. 3 (33 m) nebyl software *Agisoft Photoscan* schopen spojit významnou část oblasti snímání (viz obrázek č. 31). Nezpracovaná oblast reprezentuje jednolitý povrch s relativně konstantní teplotou, jak bylo zjištěno při bližším zkoumání primárních dat z termální kamery. Příkladem může být jeden z mnoha téměř identických snímků uvedený na obrázku č. 32, který sice jeví rozlišitelné útvary v podobě ořebních řádků, ovšem vizualizovaná barevná škála reprezentuje rozdíl mezi teplotním minimem a maximem necelých 1,5 °C. Rozdíly mezi jednotlivými pixely se pohybují v řádu setin až jednotek desetin. Přesnost kamery a proměnlivost podmínek vnáší do snímání nepřesnosti také v řádu setin až jednotek desetin. Proto nelze takto homogenní plochu softwarově spojit. Jednotlivé termogramy jsou od sebe těžko odlišitelné, respektive významné body (lokální extrémy) nejsou v rámci více snímků detekovatelné. Konstantní teplota v takto významné ploše je pravděpodobně zapříčiněná i poměrně konstantními hodnotami vlhkosti. Tato hypotéza ovšem není podložena kontaktním měřením.



Obrázek 31: Vyznačená oblast bez zpracování (nálet č. 3 - 33 m)



Obrázek 32: Charakteristický snímek nezpracované homogenní oblasti (nálet č. 3 - 33 m)

7.2.3 Rušivé vlivy způsobující šum ve zpracování

Z předchozích kapitol je zcela zřejmé, že fotogrammetrické zpracování termálních snímků je protkáno řadou chyb, které jsou proměnlivé dle charakteru snímání. Nutno dodat, že kvalita finálního termálního ortofota se odvíjí především od kvantity kvalitních termogramů, potažmo snapshotů. Samotná detekce zamokřených oblastí je přímo závislá na správně stanovených povrchových teplotách. Mimo teplotní zkreslení způsobené reálným vývojem teplot v čase snímání je řada dalších faktorů, které do souboru přinášejí určité množství chybných termogramů.

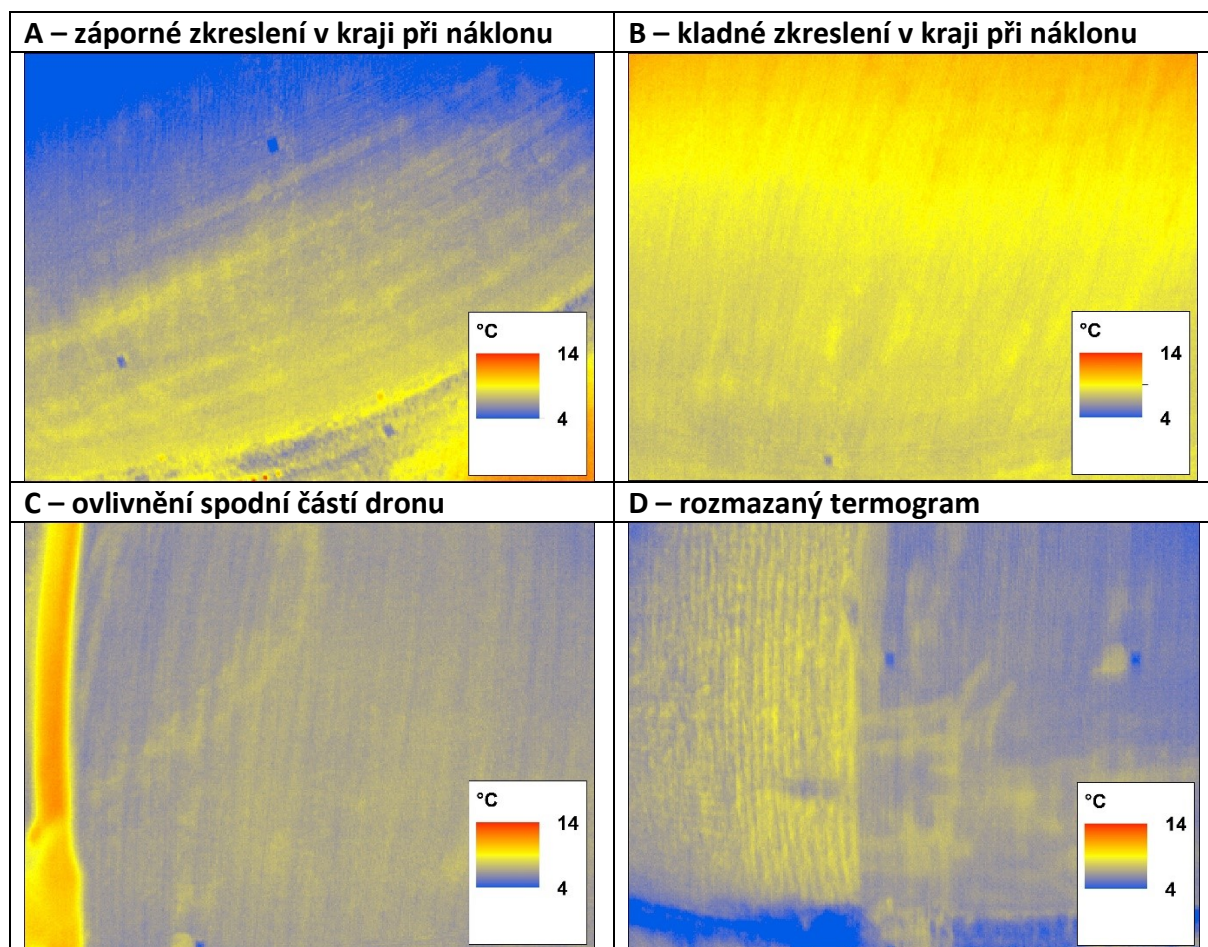
Nejčastějším problémem je tepelné zkreslení v krajích snímání. Tyto chyby vznikají především při významnějším náklonu kamery, ke kterému dochází při změně směru trajektorie letu. V tabulce č. 6 jsou uvedeny dva typy zkreslení. Příklad A nastává zpravidla při „brždění“, tedy při náklonu po směru letu. Naopak příklad B nastává při zrychlování, či rychlém letu, tedy při náklonu proti směru letu. Obecně k těmto druhům zkreslení dochází při jakémkoliv rychlejším pohybu kamery.

V konkrétním náletu v lokalitě Vavříneckého rybníka docházelo k ojedinělému ovlivnění nezajištěnou nohou dronu, který je znázorněn v téže tabulce č. 6 jako příklad C. Tato chyba byla v evidentních případech jako je tento odstraněna eliminací termogramů s jejím výskytem. Je třeba zdůraznit, že pokud nastane případ minimálního ovlivnění (zachycení podstavce v minimální části snímku), může být tato chyba snadno přehlédnuta. V horším případě může dojít k ovlivnění na významné části snímání, které nebude možné eliminovat vyřazením termogramů ze zpracovávaného souboru.

Dalším problémem, který vede k chybám ve finálně zpracovaném termálním ortofotu jsou snímky s určitým stupněm rozmazání (příklad D). Pokud v průběhu letu dojde k prudkému pohybu například vlivem větru, nebo náhlé změny směru řízení, vzniká v termálním videu datové okno rozmazaného záznamu. Přítomnost těchto termogramů ve zpracovávaném souboru vede k zanesení rozmazaných oblastí i do výsledného termálního ortofota.

Chyby, které vznikají při pořizování je nutné ručně detekovat a odstranit, lépe řečeno vyčlenit ze souboru. Problém eliminace těchto termogramů nastává při nedostatečném zajištění pokrývnosti pro zpracování. Respektive pokud se chyba objevuje ve významně velké oblasti snímání, nelze ji odstranit. Její definice je ovšem nezbytná pro rozklíčování zkreslených lokalit, které by mohly mít vliv na analýzy a hodnocení výsledného termálního ortofota.

Tabulka 6: Prezentace nejčastějších chyb při pořizování termálních dat



7.3 Detekce zamokření půd

V hlavní zájmové oblasti snímaného území lze díky čerstvě zoranému povrchu již na první pohled vizuálně detekovat plochu s vyšší vlhkostí (viz obrázek č. 34 a 35). Z RGB ortofota pořízeného *Phantomem 4* lze tyto oblasti snadno porovnávat s výsledným termálním ortofotem. Z důvodu zajištění přítomnosti více zamokřených ploch bylo vhodné vytvořit další vlhké oblasti v kontrastu s okolím. Několik hodin před zahájením termálního snímání byly dvě oblasti (přibližně 1 m²) v rámci testované lokality uměle zavlaženy. V těchto dvou oblastech byla snaha vytvořit ostrý přechod vlhkostí v půdním prostředí. Obě tyto části území byly umístěny v těsné blízkosti vlčovacího bodu pro snadnou identifikaci v termálním ortofotu (viz obrázek č. 33).

Přestože jsou výstupy analýzy stanovených teplot relativně pesimistické, pro vizuální detekci zamokřených oblastí nejsou v tomto případě nepoužitelné. V první řadě je důležité vymezit oblast zájmu, respektive editovat hranice analýzy. Jak už bylo avizováno v kapitole 5, při zpracování heterogenního povrchu je vhodné rozčlenit území na homogenní celky (dle typu povrchu). Proměnlivá emisivita povrchů a další faktory ovlivňují termální snímky, proto při fixním nastavení snímání nelze v rámci jedné IR ortofotomapy vzájemně porovnávat odlišné typy povrchů. Jestliže v tomto konkrétním případě zaměříme termální analýzu pouze na část zpracovaného území, ve které je přítomné kontaktní měření vlhkosti (povrch zoraného a uvláčeného pole), můžeme tuto oblast považovat za homogenní. Vymezenou lokalitu není nutné dále dělit na zmiňované segmenty odlišného řešení. Zbytek zpracovaného území můžeme ignorovat (vzrostlá kukuřice, travní porost, vodní plocha).

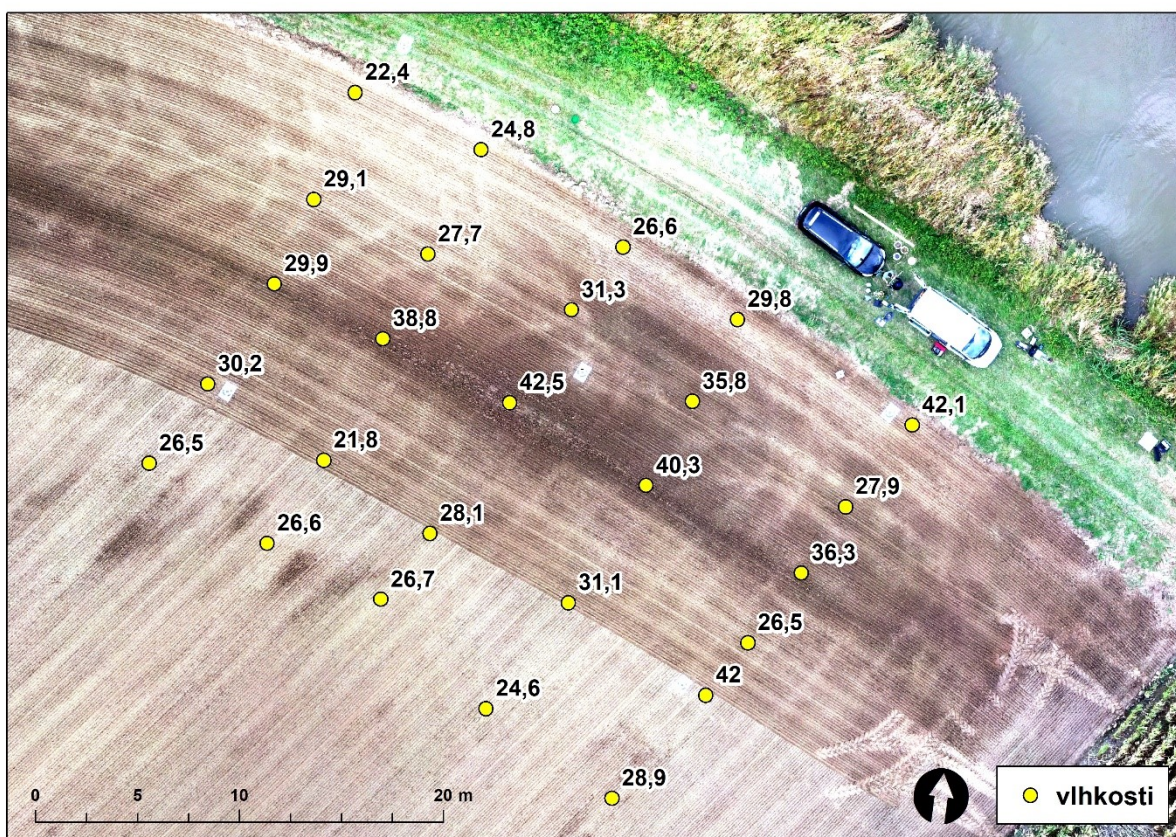
Při pohledu na výsledná termální ortofota všech tří náletů jsou zmiňované oblasti zamokřené půdy dobře identifikovatelné. V případě kontinuálnější distribuce vlhkosti jsou výsledky termálního snímání ze všech výšek snímání značně nestálé, s vysokou mírou nejistoty.



Obrázek 33: Uměle zavlažená plocha v těsné blízkosti vlčovacího bodu



Obrázek 34: Zkoumaná homogenní oblast v lokalitě Vavříneckého rybníka s vyznačením okem patrné vlhčí zóny

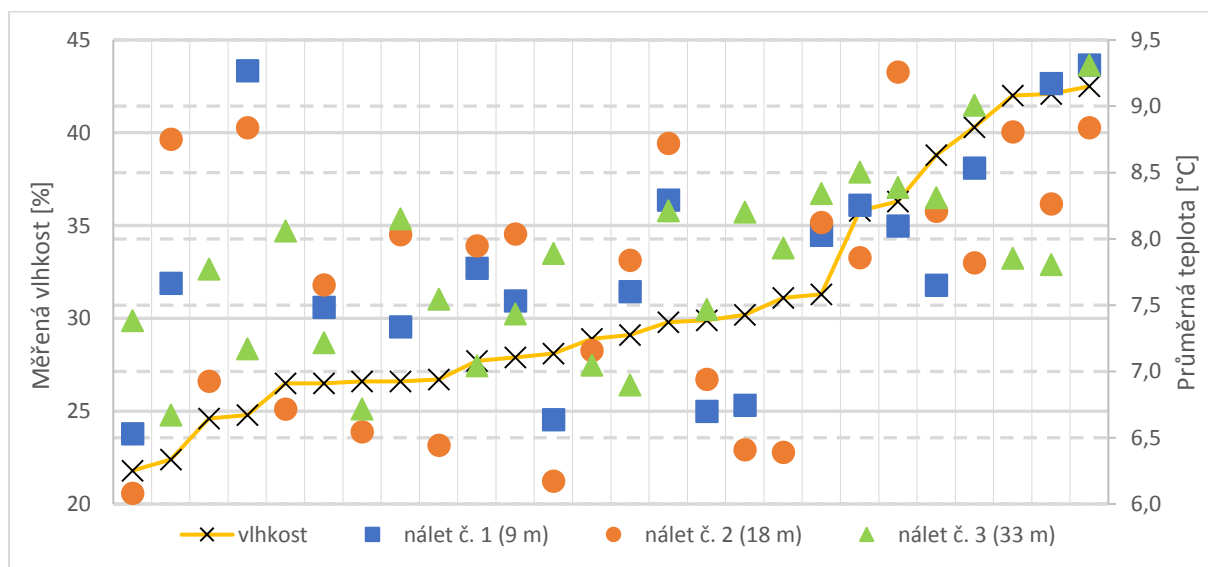


Obrázek 35: RGB ortofoto zkoumané homogenní oblasti v lokalitě Vavříneckého rybníka s vyznačeným měřením vlhkosti

7.3.1 Srovnání termálních ortofot

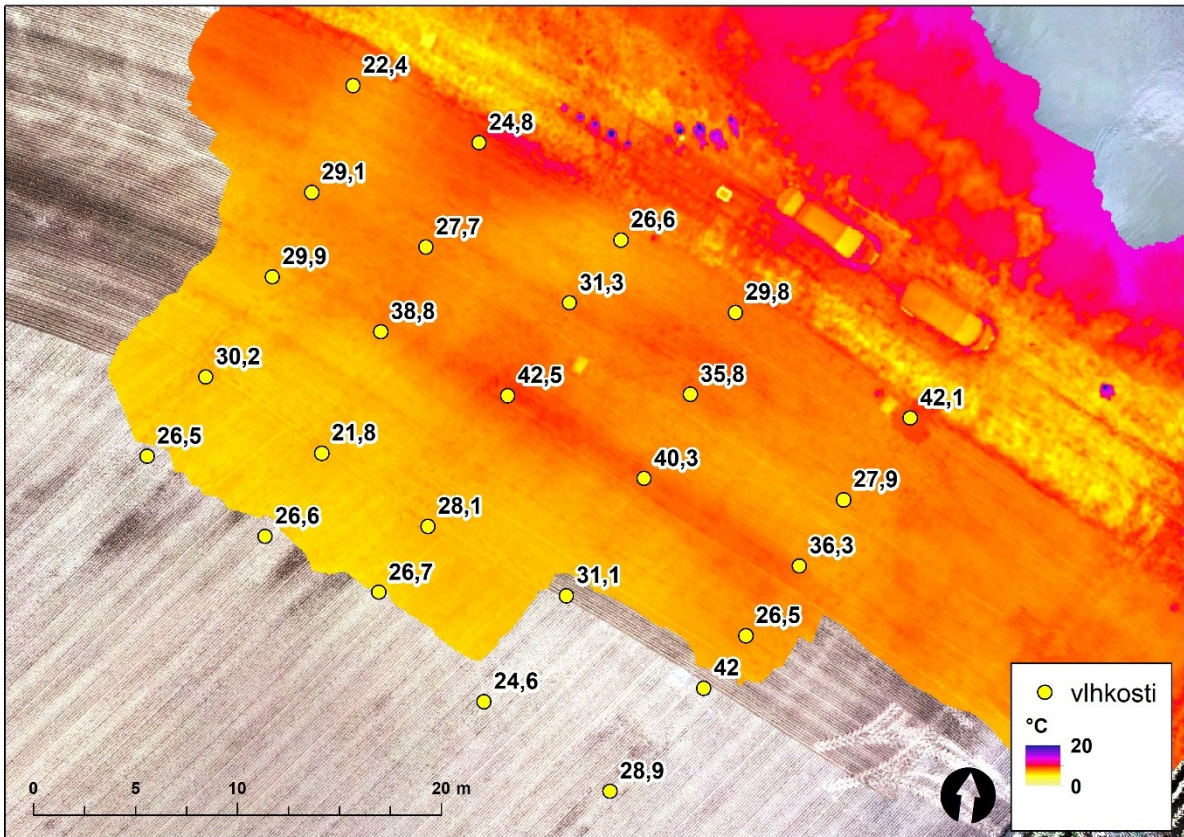
Z popisovaných problémů pořizování a zpracování termálních dat prezentovaných v předchozích kapitolách nyní víme, že v důsledku těchto chyb mohou ve výstupech vznikat výrazně zkreslené oblasti. Tyto nepřesnosti ve stanovení povrchové teploty mohou vést k mylné představě o distribuci vlhkosti v aktivní zóně půdního prostředí. Bohužel tyto oblasti není možné identifikovat bez bližšího zkoumání surových dat, potažmo jednotlivých termogramů.

Srovnáme-li výsledně zpracovaná data všech tří náletů, můžeme potvrdit výskyt zmiňovaných problémů v každém z nich. Provedeme-li zonální výpočet průměrné teploty v každém místě kontaktního měření vlhkosti (rádius 0,5 m), můžeme potvrdit, že proměnlivé zkreslení způsobuje výrazně rozkolísané hodnoty ve vztahu vlhkost – povrchová teplota (viz graf č. 20). Z těchto důvodů by nebylo správné hodnotit termální ortofoto ve vztahu k zamokření komplexně přímou korelací s povrchovou teplotou.

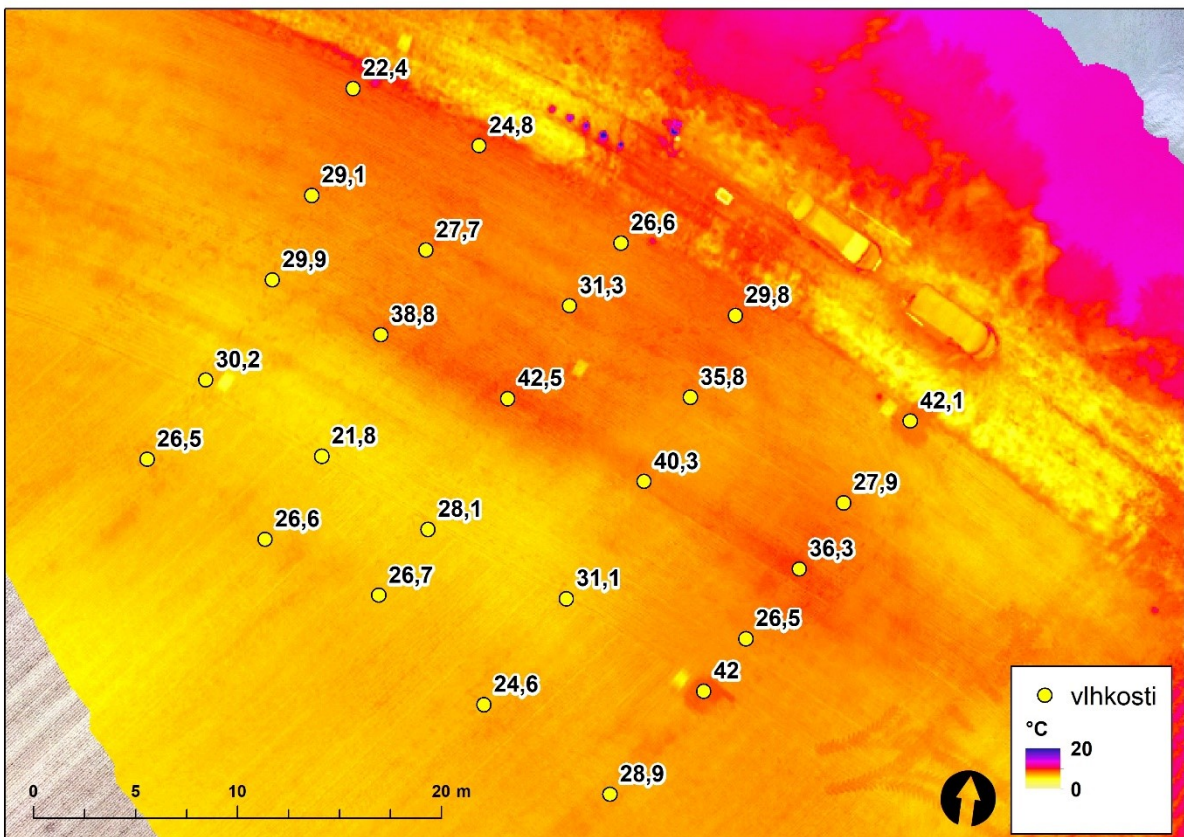


Graf 20: Průměrné teploty v místě kontaktního měření vlhkosti (rádius zóny 0,5 m)

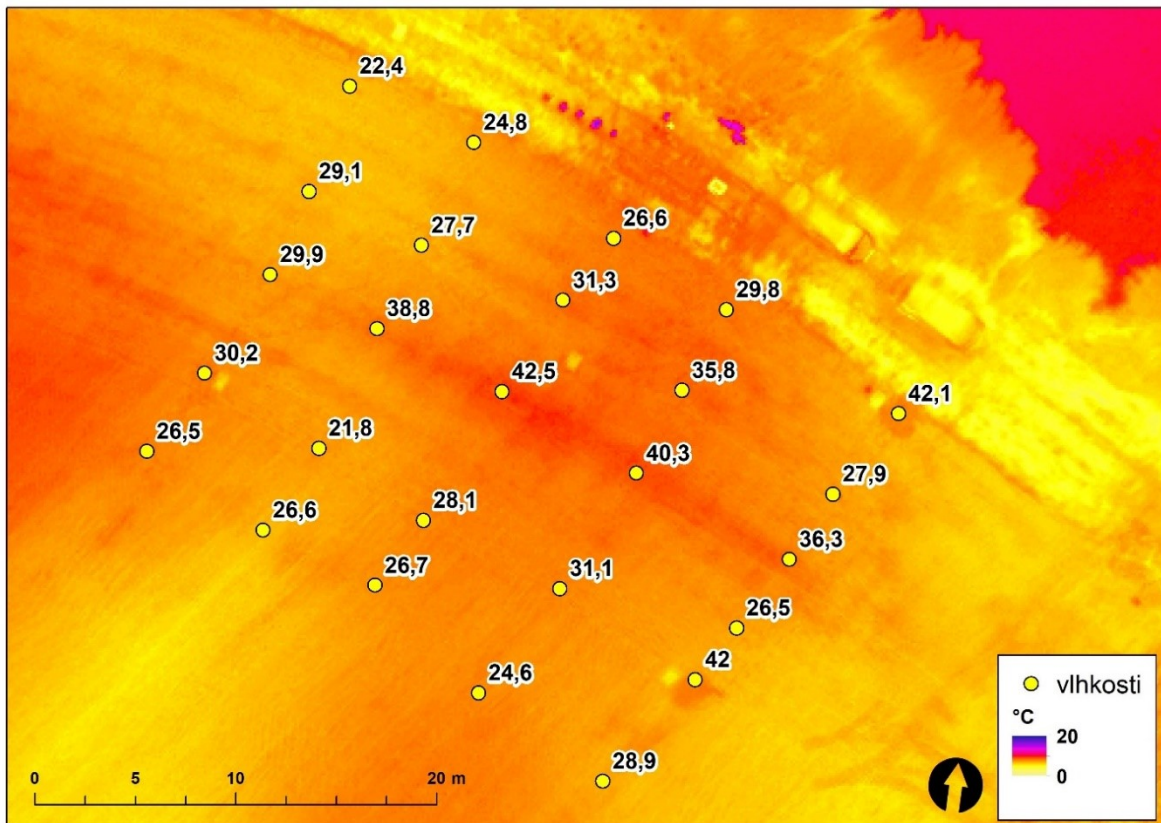
Z porovnání kvality zpracovaných termálních dat je z hlediska geometrie jednoznačně nejhorší nálet z nejnižší letové hladiny (nálet č. 1 – 9 m), ve kterém dochází k nejvýraznější deformaci výsledného tepelného ortofota. Chyby v teplotním zkreslení jsou ve všech datech v podobném množství, jen s proměnlivou distribucí. V nejvyšším náletu č. 3 (33 m) jsou z důvodu nižšího rozlišení obtížně zpracovatelné oblasti. Vzhledem ke srovnatelné geometrii náletu č. 2 a 3 lze tedy hodnotit nálet č. 2 (18 m) za nejvhodnější k analýze.



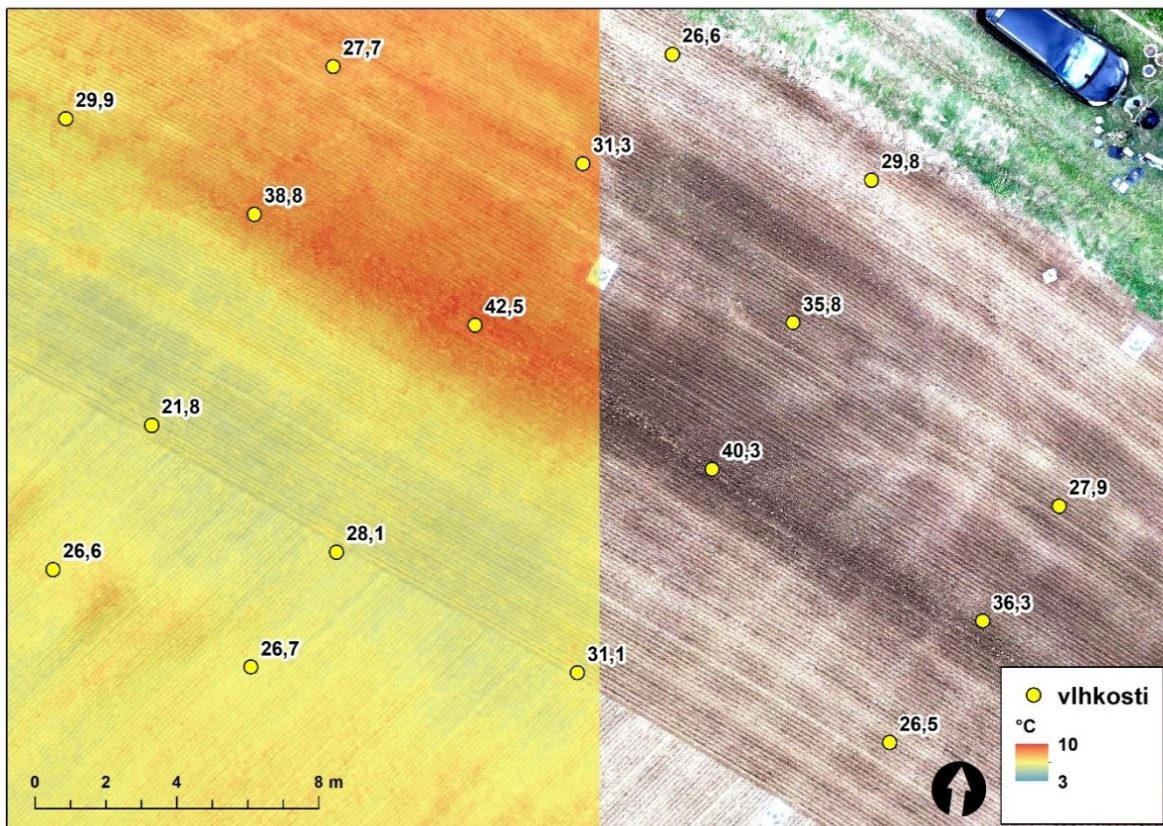
Obrázek 36: Mapa termálního ortofota s vyznačeným měřením vlhkostí (nálet č. 1 - 9 m)



Obrázek 37: Mapa termálního ortofota s vyznačeným měřením vlhkostí (nálet č. 2 - 18 m)



Obrázek 38: Mapa termálního ortofota s vyznačeným měřením vlhkostí (nálet č. 3 - 33 m)

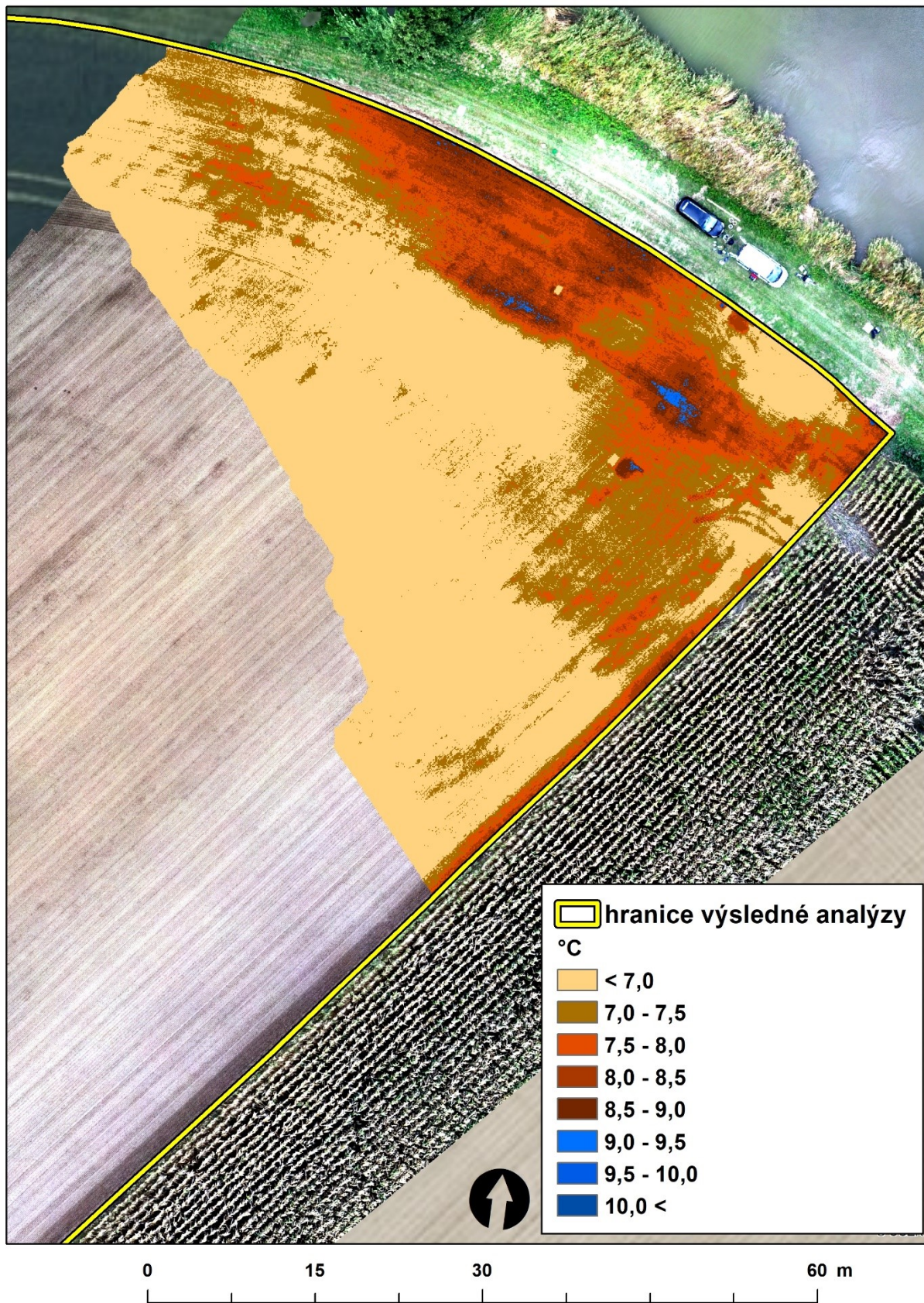


Obrázek 39: Ukázka vhodně zpracovaných termálních dat, které lze porovnávat s RGB ortofotem (pzn.: Termální data jsou zobrazena v mírné transparentci) – nálet č. 2 (18 m)

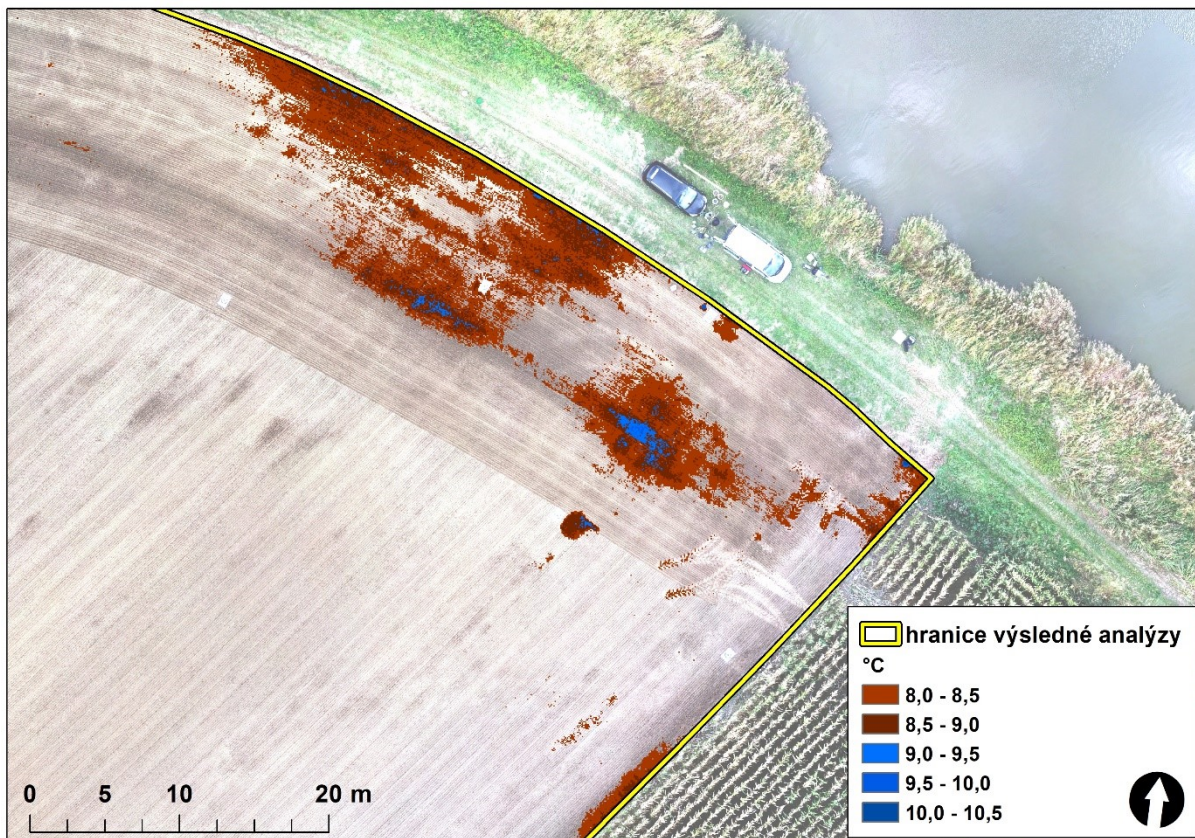
7.3.2 Výstup termální analýzy z pohledu detekce zamokření

Pro popis a tvorbu výsledné mapy detekce zamokřených oblastí v lokalitě Vavříneckého rybníka byl jako nejvhodnější zvolen prostřední nálet č. 2 pořízený v letové hladině 18 m. Prvním vhodným krokem analýzy detekce zamokření na finálně zpracovaném termálním ortofotu je reklasifikace teplot do intervalů. Vzhledem k přesnosti stanovených teplot postačí interval půl stupně celsia v rozmezí závislém na lokálních extrémech dat. Pro tuto konkrétní oblast byla dle maxima a minima zvolena teplotní stupnice od 7,0 do 10,0 °C. Po primární reklasifikaci vznikne přehledová mapa, ve které lze snadno odhalit žádoucí oblasti zájmu (viz obrázek č. 40). Nutno dodat, že i s ohledem na předchozí popis problémů při pořizování/zpracování je nutné zájmové oblasti podrobit bližší analýze. Pro definici oblastí zájmu je nutné zvolit hraniční hodnotu povrchové teploty, od které uvažujeme indikaci pravděpodobného zamokření (viz obrázek č. 41). Následně je možné převést tuto vrstvu na polygon a na základě bližšího zkoumání surových dat a RGB ortofota případně editovat. V případě lokality Vavříneckého rybníka bylo nutné výslednou polygonovou vrstvu dále upravit. Vzhledem k prezentovanému teplotnímu zkreslení, ke kterému docházelo v řadě oblastí, byla část polygonu vyhodnocena jako chybné stanovení, a tedy odstraněna (obrázek č. 42). Hranice výsledně editovaného polygonu je pro přehlednost vhodné vyhladit. K tomu může sloužit například nástroj *Simplify Polygon*, kterým můžeme významně zjednodušit variabilitu hranice, ale se zachováním základního tvaru. Pro lepší interpretaci je žádoucí eliminace drobných děr ve výsledném polygonu, respektive zajištění celistvosti prezentovaných dat. Vzhledem k tomu, že lze výsledně editovaný polygon uvažovat pouze jako orientační stanovení zamokřené oblasti, je příhodné zvolit buffer (obalovou křivku) v řádu desítek centimetrů, spíše jednotek metrů, v závislosti na rozsahu zkoumaného území (viz obrázek č. 43).

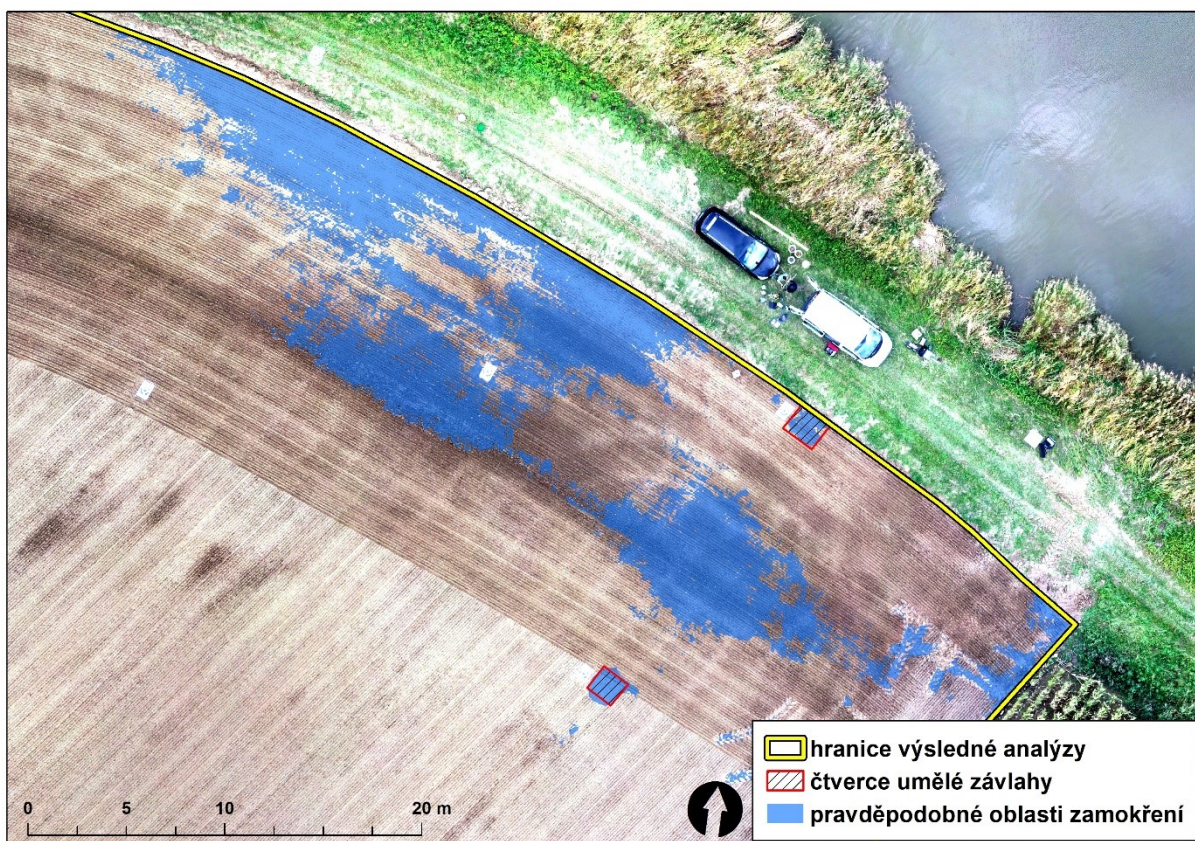
I přes detailnější analýzu termálního ortofota v synchronním režimu se surovými termogramy a doplňkovým RGB ortofotem je vhodné výsledně stanovené zóny zamokření považovat pouze za pomocný nástroj, nikoliv za přesnou detekci. Ovšem za předpokladu znalostí v problematice termografie může být za určitých podmínek tato metoda použita především pro primární představu o zájmové lokalitě. Na základě takto zpracovaných dat lze například vytipovat pravděpodobné lokality zamokření, které je vhodné následně ověřit kontaktním měřením.



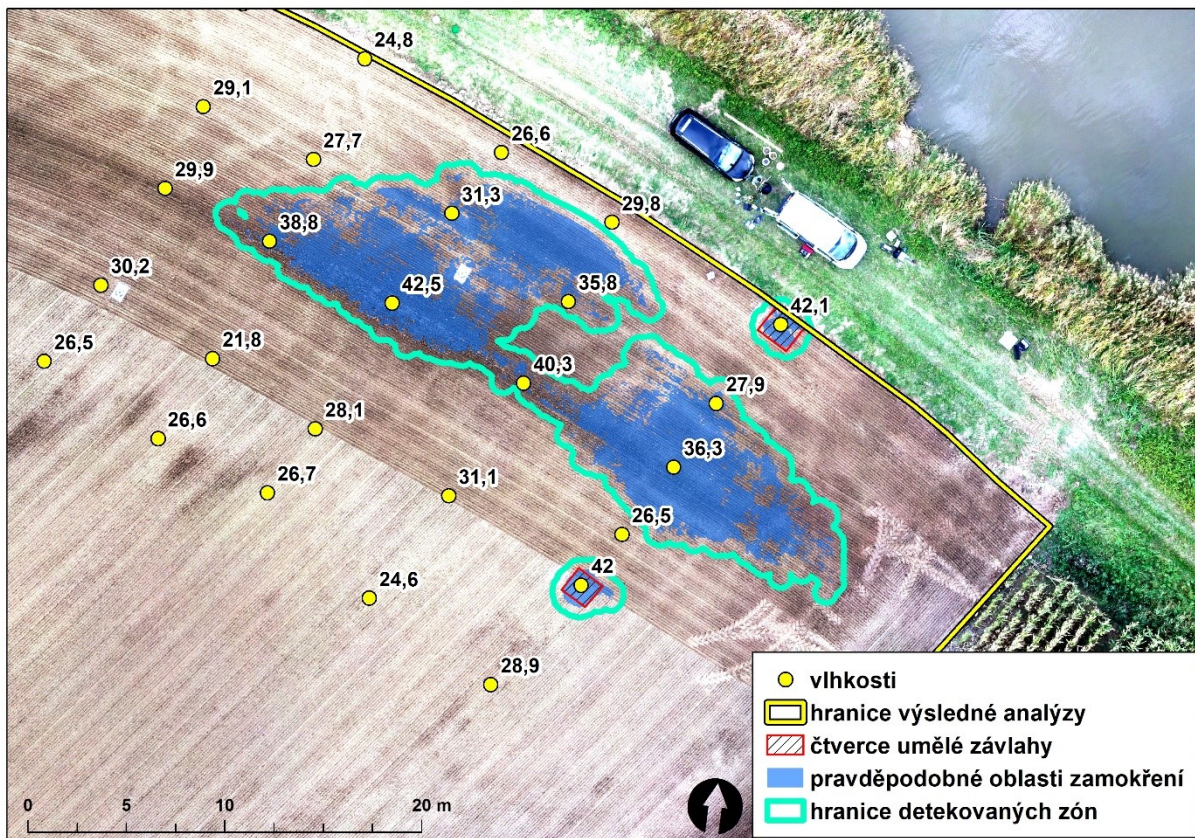
Obrázek 40: Základní přehledová mapa po primární reklasifikaci - Vavřinec (nálet č. 2 - 18 m)



Obrázek 41: Přehledová mapa po sekundární reklasifikaci - vytažení oblastí pro bližší analýzu



Obrázek 42: Mapa pravděpodobných oblastí zamokření před editací



Obrázek 43: Výsledná přehledová mapa po bližší analýze a editaci detekovaných zón pravděpodobného zamokření

8 Diskuze

Závislost vývoje povrchové teploty na množství obsažené vody ve svrchní části půdního prostředí je prokázána v řadě publikací. Qiu (2006) dokázal, že za přítomnosti optimálních scénářů může v ranních a odpoledních periodách existovat dokonce lineární vztah půdní vlhkosti a gradientu povrchové teploty. Ten je ovšem závislý na vegetačním krytu, vlastnostech půdy apod. Pokud ale chceme na základě tepelného vývoje povrchu zjistit distribuci vlhkosti v ploše, musíme znát povrchovou teplotu celé zájmové oblasti v jeden daný moment. K tomu je použití bezkontaktního měření teploty pomocí termografie velice vhodné. Popis vhodných parametrů a vlivů na snímání je dnes ve valné většině termografických příruček aplikován především na průmyslové využití. Zpravidla se jedná o homogenní povrchy, které jsou snímány za jasně definovaných podmínek. V těchto případech může být tato metoda stanovení povrchové teploty velice přesná. Jestliže ale chceme využít termografii v oblasti přírodních povrchů, kde jsou proměnlivé podmínky, je přesné stanovení velice obtížné.

V první řadě je vhodné shrnout a zhodnotit výsledky testování termokamery na ručním nosiči. Především pokusy č. 1, 2 a 3 prokázaly významný vliv mnoha proměnlivých parametrů na výsledné termální snímky. Pokud se zaměříme pouze na vliv atmosférických podmínek a vzdálenost snímače, můžeme na základě zmíněných pokusů potvrdit nezanedbatelné dopady na stanovení povrchové teploty. Jestliže je míra těchto vlivů známá, je možné v případě snímání homogenních ploch tyto vlivy eliminovat nastavením termokamery (emisivita, teplota okolí, prostupnost atmosféry). Jsou-li tyto parametry obtížně definovatelné, můžeme dosáhnout správné povrchové teploty posunutím celé teplotní škály termogramu vůči vhodně zvoleným kalibračním bodům. I přes skutečnost, že snímané teploty jednotlivých měření vykazovaly proměnlivé chyby ve stanovení, můžeme potvrdit, že v případě homogenního povrchu je chyba prostorově konstantní. Lze tedy říci, že pro homogenní plochu není za konstantních podmínek snímání a přítomnosti kalibračního bodu problém dosáhnout správně zjištěné povrchové teploty (v rámci jednoho termogramu).

Problém nastává při snímání a zpracování heterogenní oblasti. Zpracované termální ortofoto ve většině případů zobrazuje rozsáhlejší heterogenní oblast. Při pořizování surových termálních dat takového území dochází již v rámci jednotlivých termogramů k významným chybám stanovené povrchové teploty. Při pokusu kalibrace celé IR ortofotomapy jednotlivých náletů 1, 2 a 3 (z výšky 9, 18 a 33 m) byly předem aplikované kalibrační body dobře detekovatelné, ale z důvodu nízkého rozlišení nebylo možné je za tímto účelem použít. Proto byla snaha využít část zpracované hladiny rybníka. Ovšem z bližšího zkoumání zájmové oblasti bylo patrné, že prosté posunutí celé škály teplot do příslušné hodnoty kalibračního bodu zde nelze využít. Rozdíly mezi jednotlivými nálety proměnlivě kolísají do kladných i záporných hodnot v intervalu přibližně -2 až 2 °C. Tento fakt vedl k podrobnějšímu zkoumání surových dat, které odhalilo řadu chyb vznikajících již při pořizování. Ty následně vedou ke zkreslení termálního ortofota. Mezi hlavní faktory patří tepelný vývoj povrchu v době náletu, kterému se i vzhledem k charakteru požadovaných okolních podmínek nelze vyhnout. Oblast výskytu dronu v počátku snímání může vykazovat významnou změnu povrchové teploty v čase závěru snímání. Při překryvech dochází k nasnímání identického povrchu v odlišné teplotní kondici, což vede při zpracování k teplotnímu zkreslení finálního IR ortofota. Dále jsou zde faktory technologie pořizování, ke kterým dochází převážně pohybem bezpilotního zařízení, potažmo

termokamery. Jedná se především o rozmazané úseky, významné tepelné zkreslení v krajních částech IR videa (v tomto konkrétním případě až o několik stupňů Celsia), nebo dokonce v ojedinělých případech ovlivnění konstrukcí dronu. Takovýmito chybám se lze ve většině případech vyhnout eliminací konkrétních termogramů, které některou z chyb obsahují. Pokud ovšem dojde k ovlivnění významné části nasnímaného území, nelze tyto snímky z důvodu fotogrammetrické zpracovatelnosti vyřadit.

Ovšem pro pouhou detekci zamokřených míst není důležitá konkrétní hodnota teploty, ale její rozdíl vůči okolí. Pokud tedy analyzujeme individuálně stanovenou homogenní část lokality, stačí nám znát teploty v zjednodušené úrovni teplejší/chladnější, případně míru rozdílu. Je pravda, že i v rámci homogenních ploch dochází díky popisovaným problémům k teplotnímu zkreslení, které může vést k mylné představě o vlhkých zónách. Ovšem analýza všech IR ortofot prokázala, že oblasti s vysokou půdní vlhkostí jsou teplotně stálější, tedy vykazují minimální teplotní zkreslení. Zjednodušeně řešeno jsou vizuálně detekovatelné ve všech zpracovaných IR ortofotech. Oproti tomu sušší oblasti vykazují významné prostorové chyby, což koresponduje s teorií tepelného gradientu. Obecně lze ale říci, že v závislosti na vlhkosti vykazují oblasti v průběhu teplotní změny prostředí odlišnou reakci (termální diferenci). Rozdílné teploty v závislosti na půdní vlhkosti pozoroval i Zumr a kol. (2020), který ve své studii také využil termální snímání prostřednictvím dálkového průzkumu. Při zkoumání historické hráze zjistil, že suchý sediment ve vypuštěné nádrži měl tendenci vykazovat vyšší teploty oproti saturovanému sedimentu v oblasti spodní výpusti. Opačný stav povrchových teplot (suchý – teplejší, saturovaný – chladnější) je v tomto případě dán odlišnými parametry snímání, které probíhalo souběžně se západem slunce.

Lze tedy říci, že pro vytvoření primární představy o vlhkých či dokonce zamokřených zónách je možné tuto metodu k detekci použít. Ovšem je nezbytné dodat, že data vyžadují bližší zkoumání jednotlivých termogramů, které odhalí chybné oblasti IR ortofotomapy. Jestliže se ale vrátíme k sérii pokusů na ručním nosiči, pokus č. 4 vnáší jisté pochybnosti. Tento konkrétní experiment dvou identických ploch s nízkým travním pokryvem, přičemž jedna byla intenzivně zavlažována, neprokázal odlišný vývoj teplot. Tato skutečnost byla pravděpodobně dána relativně vysokou hodnotou vlhkosti již před zahájením pokusu (35,2 %). Na základě této hypotézy lze předpokládat, že ani intenzivním zaléváním nedošlo k vytvoření dostatečného vlhkostního kontrastu mezi testovacími polygony, který by byl možný detekovat.

Shrneme-li dosavadní výsledky, můžeme říci, že k odhalení zamokřených zón může tato metoda sloužit jako pomocný nástroj především v lokalitách s vyšším kontrastem mezi suchou a vlhkou oblastí. V případě území s vyšším stupněm půdní vlhkosti je i vzhledem k chybám snímání a měřicího přístroje zamokření obtížně detekovatelné.

Na závěr je žádoucí shrnout vhodné parametry a postup snímání a potažmo zpracování. Z výsledků této práce vyplývají následující doporučení:

Snímání

Pro termální analýzy je velice příhodné znát aktuální situaci v zájmové oblasti. Proto je velice vhodné provést RGB snímání vysokého rozlišení, jehož systémy jsou zpravidla vybaveny GPS modulem (georeference). IR ortofoto lze následně snadno referencovat a porovnat s reálným

obrázkem daného povrchu, což může vést k odhalení potenciálních chyb. Z důvodu velice obtížně definovatelného vlivu změny vzdálenosti snímače je nezbytné zajistit konstantní hladinu letu po celou dobu snímání. Výšku náletu je účelné zvolit dle požadovaného rozlišení. Z hodnocení provedených náletů plyne, že ve vztahu k detekci zamokření je i nejvyšší uskutečněný nálet (33 m) z hlediska rozlišení dostatečný. Pokud ovšem chceme pro kontrolu využít kalibrační bod, je nutné myslet na jeho velikost, aby byl ve výsledném IR ortofoto prezentován dostatečným množstvím pixelů. Dle specifikace *MFOV* je nutné zajistit, aby kalibrační bod reprezentovala plocha minimálně 3 x 3 pixely (pro IR kameru *TIM450*). Z důvodu tepelného vývoje je nutné provést snímání v rozumném, respektive v co nejkratším letovém čase. Proto není možné létat příliš nízko (malý záběr). Jako rozumný kompromis je na základě výstupů z lokality Vavříneckého rybníka uvažována letová hladina od 15 do 20 metrů. Vzhledem k tepelnému vývoji je velice příhodné uskutečnit několik náletů po sobě ve zvoleném intervalu. Přes popisované problémy tepelného zkreslení IR ortofot byly vlhké zóny viditelné ve všech náletech. Chybné úseky se týkaly především sušších oblastí, kde docházelo k prostorově proměnlivým chybám. Proto je vhodné například s 10minutovým odstupem nálet alespoň dvakrát zopakovat. Tímto krokem si můžeme pomoci při detekci zamokřených oblastí, které by měly vykazovat konstantnější teploty ve všech náletech. Při dodržení stejných parametrů snímání lze vícero náletů využít alespoň pro vytvoření představy o vývoji teplot. Z doporučení plyne následující shrnutí:

- 1) uskutečnit RGB nálet aktuální situace (vysoké rozlišení)
- 2) aplikace vhodného kalibračního bodu (pro případné vytvoření orientační představy o reálné teplotě vůči snímané) – nádoba s vodou o průměru alespoň 1 m
- 3) dodržování konstantní výšky po celou dobu IR náletu (doporučená 15 - 20 m)
- 4) vyhýbat se dlouhým časům jednotlivé kampaně (optimálně do 5 minut)
- 5) IR nálet několikrát zopakovat (alespoň dvakrát, stejné parametry snímání)
- 6) dokumentace okolních podmínek pro pozdější vyhodnocení

Zpracování

Již při tvorbě snapshotů (jednotlivých termogramů) je důležité pečlivě sledovat termální záznam. Pro fotogrammetrické zpracování je vhodné vytvořit co největší počet snímků, ale v průběhu snímání dochází k mnoha popisovaným problémům, které je nutné eliminovat (pokud to záznam umožňuje). Ve většině případů se ale nelze z důvodu zajištění dostatečných překryvů těmto chybám vyhnout. Přítomnost těchto chybných termogramů ve zpracovávaném souboru vnáší do finální IR ortofotomapy řadu chyb. Proto je po vytvoření termální ortomozaiky nezbytné provést bližší analýzu termálního videa a odhalit tyto chybné úseky. Následně je možné vytvořit přehledovou mapu pravděpodobných oblastí zamokření:

- 1) reklasifikace IR ortofota ve zvoleném kroku (doporučen 0,5 °C)
- 2) určení teplotní hranice pro detekci zamokření (individuálně dle IR ortofota)
- 3) převod rastru na polygon
- 4) editace polygonu po odhalení chybných úseků (tepelné zkreslení)
- 5) vyhlazení polygonu, rozšíření zóny pomocí obalové křivky a eliminace drobných děr

9 Závěr

Diplomová práce hodnotí využitelnost termokamery *Optris TIM450* ve vztahu k detekci zamokření půd. Dále udává stručný postup vhodného snímkování a následného zpracování termálních dat pořízených technologií *UAV* za účelem detekce zamokřených oblastí. Zpracování surových dat probíhalo pomocí softwarů *Optris PI Connect*, *Agisoft Photoscan Pro* a *ArcMap*. Pro záměry práce bylo provedeno několik pokusů na ručním nosiči v lokalitě Vavříneckého rybníka a v obci Železná Ruda v zahradě u několikapatrového domu. Dále byly uskutečněny tři termální testovací nálety a jeden RGB nálet zemědělského pozemku opět v lokalitě Vavříneckého rybníka.

První část práce je věnována úvodu do problematiky termografie a vztahu půdní vlhkosti k tepelnému vývoji aktivní části povrchu. Dále je uvedena stručná rešerše využití technologie snímání příslušných dat.

V druhé pasáži byly popsány vhodné parametry termálního snímkování včetně postupu zpracování surových dat do finální podoby IR ortofotomapy. Navazující část hodnotí podrobnou analýzou kvalitu pořízených dat včetně popisu vznikajících chyb snímání a následného zpracování. Sadou experimentů byla testována schopnost určení co nejpřesnější povrchové teploty bezkontaktní metodou pomocí zmiňované IR kamery *Optris TIM450*. Výsledné termální ortofota byla hodnocena ve spojitosti s detekcí zamokřených oblastí.

Vzhledem k charakteru termického snímání dochází již při tvorbě jednotlivých termogramů k významným chybám v oblasti stanovení povrchové teploty. Nejen parametry povrchu, jejichž emisivita je v ploše proměnlivá, ale i další faktory ovlivňují přesnost termokamery, která je po celou dobu snímání fixně nastavena. I přes relativně krátký letový čas dochází v průběhu snímání k tepelnému vývoji povrchu, což je ale smyslem zájmu detekce zamokření půd. Ovšem z těchto důvodů dochází především v oblastech překryvů k tepelnému zkreslení při fotogrammetrickém zpracování. Například v sušších oblastech, kde dochází k rychlejšímu ochlazení, může být při prvním přeletu naměřena vyšší průměrná hodnota než při přeletu zpátečním. V důsledku dojde k tepelné deformaci celého ortofota. V případě tepelně ustáleného území s konstantní meteorologickou situací bude výsledek záviset především na nastavení kamery a dalších podmínkách, ovšem s ohledem na teorii detekce zamokřených oblastí na základě tepelného gradientu není možné vytvořit přesné termální ortofoto daného momentu s minimální odchylkou.

I přes relativně pesimistické výstupy stanovených teplot povrchu lze v konkrétním případě Vavříneckého rybníka termální data ve vztahu k detekci hodnotit kladně. Především v hlavní zájmové oblasti lze na první pohled vidět výrazně vlhčí oblast, která je zde podpořena kontaktním měřením vlhkosti. Uměle zavlažené čtverce (1 x 1 m) jsou též zřetelné, opět podpořeny měřením vlhkosti. Problém nastává při pohledu na celé území, kde je proměnlivě v ploše viditelné popisované teplotní zkreslení, které může na první pohled vypadat jako zóny s odlišnou vlhkostí. Tyto oblasti je nutné odlišit od skutečně vlhkých oblastí bližší analýzou. Proto je s termálním ortofotem vhodné operovat jako s pomocným nástrojem, který je doplněný například RGB ortofotem, případně digitálním modelem či kontrolním kontaktním měřením.

Ze zmíněných problémů se zpracováním vyplývá, že nelze hodnotit území komplexně, ale je potřeba přistupovat ke každé dílčí oblasti individuálně. Respektive nelze s jistotou říci, že identické teploty v termálním ortofotu budou identické i ve skutečnosti. Z tohoto důvodu není možné stanovit míru zamokření. Pouhá detekce v tomto konkrétním případě možná je, ale je třeba pracovat i s aktuálním RGB ortofotem a jednotlivými termogramy pro případné odhalení zkreslených dat. Z prezentovaných výstupů analyzovaných dat lze konstatovat, že při významném kontrastu vlhkých a suchých oblastí jsou tyto plochy termicky detekovatelné. V případě rozdílu v řádu jednotek procent ale podléhají tepelnému zkreslení fotogrammetrickým zpracováním, které narůstá ve vztahu k proměnlivosti podmínek snímané plochy.

Navržení dalšího postupu testování termokamery v tomto konkrétním využití:

Je třeba brát ohled na danou situaci v testovaném území, kde po čerstvé orbě absentovala vegetace, proto by bylo vhodné vyzkoumat a popsat, jaký vliv má přítomnost ale především stav vegetace. Je zcela jasné, že přítomnost křovištní či stromové vegetace bezkontaktní snímání povrchové teploty neumožní. Ovšem pokud se jedná například o souvislou plochu s nízkou vegetací (tráva apod.), bylo by žádoucí zjistit, jestli dokáže teplota povrchu ovlivnit teplotu přítomných rostlin do takové míry, aby byla termokamera schopna teplejší lokality odhalit. K takovému testování by bylo náležité zvolit konkrétní lokalitu s vyhovující vegetací, rozdělit tuto oblast na jasně definované segmenty a v každém z nich uměle přizpůsobit vegetaci (výška, procentuální plošné zastoupení), případně v části rostliny skrýt na holý substrát. Ideální by bylo vytvořit sadu dvojic těchto segmentů, přičemž v každé dvojici s identickou vegetací by byly udržovány odlišné vlhkostní podmínky (vlhký x suchý). Předpokladem je osazení vlhkostních a teplotních čidel s kontinuálním kontaktním měřením.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Nejvýznamnější faktory bilance tepla v přírodě, upraveno z (Petrová, 2009)	11
Obrázek 2: Průběh radiační teploty v průběhu dne, upraveno z (Lillesand, Kiefer a Chipman, 2015).....	12
Obrázek 3: Popis složek termografického měření, převzato z (Sova, 2017).....	17
Obrázek 4: Směrová závislost emisivity, převzato z (Štajnrt, 2014)	18
Obrázek 5: Vliv chybně zadané emisivity při výraznějším rozdílu teplot, nádoba s vodou (vlastní zpracování)	18
Obrázek 6: Vliv emisivity na výsledný termogram (vlastní zpracování).....	19
Obrázek 7: Blokové schéma termokamery, převzato z: http://www.termokamera.cz	21
Obrázek 8: Termokamera Optris TIM 450, převzato z http://www.hotset.cz	22
Obrázek 9: Termokamera FLIR Duo Pro R, převzato z http://www.flir.com	23
Obrázek 10: Termokamera FLIR Duo R, převzato z http://www.flir.com	23
Obrázek 11: Termokamera DJI Zenmuse H20T, převzato a upraveno z: http://www.dji.com	24
Obrázek 12: DJI Phantom 4, převzato z (CZC.cz, 2020).....	26
Obrázek 13: Tarot X6, převzato z (UAV Systems International, 2020).....	26
Obrázek 14: Měřicí pole (termokamera optris PI640 s objektivem 33° x 25°), převzato z manuálu (Optris, 2020a)	29
Obrázek 15: Porovnání fotogrammetricky zpracovaných termálních ortomozaik s rozdílným režimem prolnutí (shora Mosaic, Average, Disabled).....	33
Obrázek 16: Ilustrace snímání - pokus č. 1 (na snímku z leva Ing. Václav David, Ph.D., doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.)	36
Obrázek 17: Nádoby 1.1, 1.2 a 1.3 při pokusu č. 1.....	36
Obrázek 18: Termogram z výškové hladiny 2 m s vyznačenými oblastmi pro zonální statistiku	38
Obrázek 19: Systém testovaných nádob - pokus č. 2.....	39
Obrázek 20: Výsledná fotogrammetricky zpracovaná série nádob ze snímaných výšek z leva nahoře 1,5m; 2,0m; 2,5m a 3,0m.....	46

Obrázek 21: Testovací nádoba, Pokus č. 3 - první patro (4m)	47
Obrázek 22: Testovací plocha vlivu vlhkosti na termální odezvu za přítomnosti nízké vegetace (v čase závlahy).....	49
Obrázek 23: Detail testovací plochy včetně vyznačení oblasti výpočtu zonální statistiky.....	49
Obrázek 24: Umístění masky pro výpočet průměrné teploty hladiny z jednotlivých snímaní (dle náletu č. 1 - 9 m).....	56
Obrázek 25: Rozdíl mezi nejnižším (9 m) a středním (18 m) náletem	57
Obrázek 26: Rozdíl mezi středním (18 m) a nejvyšším (33 m) náletem.....	57
Obrázek 27: Rozdíl mezi nejnižším (9 m) a nejvyšším (33 m) náletem	58
Obrázek 28: Ilustrace zkuslení termálního ortofota vývojem teplot při samotném snímání (nálet č. 3 – 33 m).....	60
Obrázek 29: Detail teplotního zkuslení v širším měřítku s vyznačenými oblastmi výskytu dronu v rozdílném čase kampaně (nálet č. 2 – 18 m)	61
Obrázek 30: Ilustrace rozdílu jednotlivého termogramu vůči finálnímu termálnímu ortofotu (nálet č. 3 – 33 m).....	62
Obrázek 31: Vyznačená oblast bez zpracování (nálet č. 3 - 33 m).....	63
Obrázek 32: Charakteristický snímek nezpracované homogenní oblasti (nálet č. 3 - 33 m)...	63
Obrázek 33: Uměle zavlažená plocha v těsné blízkosti vlíčovacího bodu.....	66
Obrázek 34: Zkoumaná homogenní oblast v lokalitě Vavříneckého rybníka s vyznačením okem patrné vlhčí zóny	67
Obrázek 35: RGB ortofoto zkoumané homogenní oblasti v lokalitě Vavříneckého rybníka s vyznačeným měřením vlhkostí	67
Obrázek 36: Mapa termálního ortofota s vyznačeným měřením vlhkostí (nálet č. 1 - 9 m) ...	69
Obrázek 37: Mapa termálního ortofota s vyznačeným měřením vlhkostí (nálet č. 2 - 18 m) .	69
Obrázek 38: Mapa termálního ortofota s vyznačeným měřením vlhkostí (nálet č. 3 - 33 m) .	70
Obrázek 39: Ukázka vhodně zpracovaných termálních dat, které lze porovnávat s RGB ortofotem (pozn.: Termální data jsou zobrazena v mírné transparentci) – nálet č. 2 (18 m).....	70
Obrázek 40: Základní přehledová mapa po primární reklasifikaci - Vavřinec (nálet č. 2 - 18 m)	72

Obrázek 41: Přehledová mapa po sekundární reklasifikaci - vytažení oblastí pro bližší analýzu	73
Obrázek 42: Mapa pravděpodobných oblastí zamokření před editací.....	73
Obrázek 43: Výsledná přehledová mapa po bližší analýze a editaci detekovaných zón pravděpodobného zamokření	74

11 Seznam grafů

Graf 1: Emisivita vybraných povrchů přírodního charakteru, zpracováno z (Zhang, 1999).....	17
Graf 2: Vliv nejistoty emisivity, upraveno z (Smetana, 2009)	20
Graf 3: Vývoj teplot v testovacích nádobách - pokus č. 1	37
Graf 4: Vývoj teplot v sérii testovacích nádob - pokus č. 2	39
Graf 5: Porovnání průměrných hodnot získaných z ftg. zpracovaných dat a z jednotlivých termogramů	40
Graf 6: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádob 2.1)	41
Graf 7: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádob 2.2)	41
Graf 8: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádob 2.3)	42
Graf 9: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádob 2.4)	42
Graf 10: Boxplot všech měřených hodnot pixelů hladin nádob snímané z jednotlivých výšek (nádob 2.5)	43
Graf 11: Porovnání reálných a snímaných teplot v nádobách (průměrné teploty po teplotní korekci).....	44
Graf 12: Pokles snímaných teplot hladin v jednotlivých nádobách v závislosti na vzdálenosti snímače (pokus č. 2)	45
Graf 13: Porovnání reálných a snímaných teplot v nádobách (posun škály všech hladin snímání do stejného výchozího bodu nádoby 2.1)	45
Graf 14: Porovnání vlivu vzdálenosti snímače (denní x noční)	47
Graf 15: Statistické rozložení dat v testovacím polygonu (13.11.2020)	51
Graf 16.: Vývoj průměrné teploty v testovacích plochách (pokus č. 4 - 13.11.2020).....	52
Graf 17: Statistické rozložení dat v testovacím polygonu (14.11.2020)	53
Graf 18: Vývoj průměrné teploty v testovacích plochách (pokus č. 4 - 14.11.2020).....	53

Graf 19: Přehled hodnot minim a maxim v daných testovacích plochách (pokus č. 4 - 14.11.2020)	53
Graf 20: Průměrné teploty v místě kontaktního měření vlhkosti (rádius zóny 0,5 m)	68

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Podrobný přehled vlivu vzdálenosti snímače pro jednotlivé typy objektivů, převzato z prospektu (HotSet, 2020)	29
Tabulka 2: Souhrn naměřených a nasnímaných teplot v jednotlivých nádobách - pokus č. 1	37
Tabulka 3: Jednotlivé termogramy testovací plochy pokus č. 4 - 1. část.....	50
Tabulka 4: Jednotlivé termogramy testovací plochy pokus č. 4 - 2. část.....	50
Tabulka 5: Jednotlivé termogramy testovací plochy pokus č. 4 - 3. část.....	51
Tabulka 6: Prezentace nejčastějších chyb při pořizování termálních dat	65

13 Seznam literatury

AEROVISION k.s. (2019) „B3_Tarot_20190401“.

Agisoft (2018) „Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4“. Dostupné z: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf.

Berlin Environmental Atlas (2001) *Surface Temperatures Day and Night (Edition 2001)*. Dostupné z: https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/eda406_01.htm (Viděno: 19. listopad 2020).

Colomina, I. a Molina, P. (2014) „Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review“, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), 92(June), s. 79–97. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.

CZC.cz (2020) *DJI Phantom 4, 4K Ultra HD kamera DJ0110*. Dostupné z: <https://www.czc.cz/dji-phantom-4-4k-ultra-hd-kamera/197933/produkt> (Viděno: 16. prosinec 2020).

HotSet (2020) *Infrakamera, termokamera optris PI 400/ 450 | HotSet ČR*. Dostupné z: <https://www.hotset.cz/optris/termokamery/infrakamera-optris-pi-400450/> (Viděno: 26. listopad 2020).

Klabzuba, J. a Kožnarová, V. (2011) „Aplikovaná meteorologie a klimatologie V . díl - Bilance tepla na aktivním povrchu , teplota půdy , vzduchu a vody“, (1), s. 5–10.

Langhammer, T. a Tůmová, O. (2013) „Vlivy dílčích nejistot měření na celkovou nejistotu měření v infračervené termografii“, 1, s. 1–4.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. a Chipman, J. W. (2015) *Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Edition*. 7th Editio, *Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Editio*. Wiley. doi: 10.14358/pers.81.8.615.

Lowe, D. G. (2004) „Distinctive image features from scale-invariant keypoints“, *International Journal of Computer Vision*, s. 91–110. Dostupné z: <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf>.

Maset, E. et al. (2017) „PHOTOGRAMMETRIC 3D BUILDING RECONSTRUCTION from THERMAL IMAGES“, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W3), s. 25–32. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W3-25-2017.

Novák, V. (1995) *Vyparovanie vody v prírodě a metódy jeho určovania*. Bratislava: Veda.

Optris (2020a) „Manuál optris PI“, 8, s. 1–8. Dostupné z: <https://www.optris.cz/infracervene-termokamery>.

Optris (2020b) *Návody k použití a datové listy IR kamer optris PI*. Dostupné z: <https://www.optris.cz/infracervene-termokamery> (Viděno: 9. listopad 2020).

Petreje, M. (2019) *Teplotní režim zkušebních ploch zelených střech*. ČVUT v Praze.

Petrová, R. (2009) *TERMOKINETIKA PŮDNÍ POVRCHOVÉ VRSTVY*. ČVUT v Praze.

Pratt, D. A. a Ellyett, C. D. (1979) „The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology“, 8(2), s. 151–168.

Qiu, H. (2006) „Thermal Remote Sensing of Soil Moisture : Validation of Presumed Linear Relation between Surface Temperature Gradient and Soil Moisture Content", 477(November), s. 6–10. Dostupné z: <http://people.eng.unimelb.edu.au/jwalker/theses/HuangQui.pdf>.

Sazima, M., Kmoníček, V. a Schneller, J. (1989) *Teplo*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.

Sledz, A., Unger, J. a Heipke, C. (2018) „THERMAL IR IMAGING : IMAGE QUALITY AND ORTHOPHOTO GENERATION", XLII(October), s. 10–12.

Smetana, J. (2009) „EMISIVITA – potíž přesného radiometrického měření", 3, s. 36–37. Dostupné z: <https://www.blue-panther.cz/data/files/clanek-metrologie3-emisivita-potiz-presneho-radiometrickeho-mereni-zalomeny-339.pdf>.

Snavely, N., Seitz, S. M. a Szeliski, R. (2007) „Modeling the world from Internet photo collections", *International Journal of Computer Vision*, 80(2), s. 189–210. doi: 10.1007/s11263-007-0107-3.

Sova, J. (2017) *Bezdotykové měření teplotních polí II*. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php (Viděno: 15. říjen 2020).

Štajnrt, P. (2014) *Úvod do práce s termokamerou Flir i7*. 1. vydání. Opava: Střední průmyslová škola stavební.

Termokamera.cz (2020) *Termokamera.cz Konstrukce termokamery - Termokamera.cz | Průvodcem světem termokamer*. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/> (Viděno: 1. listopad 2020).

Testo (2020) *Příručka termografie - Termokamery testo*. Dostupné z: <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/#PR-7> (Viděno: 6. listopad 2020).

UAV Systems International (2020) *Tarot X6 V2.2 Ready To Fly | Heavy Lift Payload Drones*. Dostupné z: <https://uavsystemsinternational.com/products/tarot-x6> (Viděno: 16. prosinec 2020).

Úřad pro letectví ČR (2014) „Letecký Předpis L 2 Pravidla Létání", s. 107. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf.

Vollmer, M. a Möllmann, K. P. (2010) *Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications*. 1st. Editi, *Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications*. 1st. Editi. Wiley-VCH.

W-TECHNIKA (2020a) *Hybridní termokamera DJI Zenmuse H20T na dron s termokamerou DJI M300 RTK*. Dostupné z: <https://www.w-technika.cz/dji-zenmuse-h20t-termokamera-na-dron-dji-m300-rtk.html> (Viděno: 15. říjen 2020).

W-TECHNIKA (2020b) *Termokamera FLIR Duo Pro R pro drony*. Dostupné z: <https://www.w-technika.cz/termokamera-flir-termovize-duo-pro-r-pro-drony.html?listtype=searchfulltext&searchparamfull=Termokamera FLIR Duo> (Viděno: 15. říjen 2020).

W-TECHNIKA (2020c) *Termokamera FLIR Duo R pro drony*. Dostupné z: [https://www.w-technika.cz/termokamera-flir-duo-r-pro-drony.html?listtype=searchfulltext&searchparamfull=Termokamera FLIR Duo](https://www.w-technika.cz/termokamera-flir-duo-r-pro-drony.html?listtype=searchfulltext&searchparamfull=Termokamera%20FLIR%20Duo) (Viděno: 15. říjen 2020).

Zhang, Y. (1999) *MODIS UCSB Emissivity Library*. Dostupné z: <https://ices.eri.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html> (Viděno: 8. prosinec 2020).

Zumr, D. *et al.* (2020) „Monitoring of the soil moisture regime of an earth - filled dam by means of electrical resistance tomography , close range photogrammetry , and thermal imaging“, *Environmental Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 79(12), s. 1–11. doi: 10.1007/s12665-020-09052-w.