

Calibration and Validation of Aerial Imaging of Thermal Data

Kalibrace a validace termálních leteckých dat

Vladimír Jirka, Petra Hesslerová
ENKI, o.p.s.



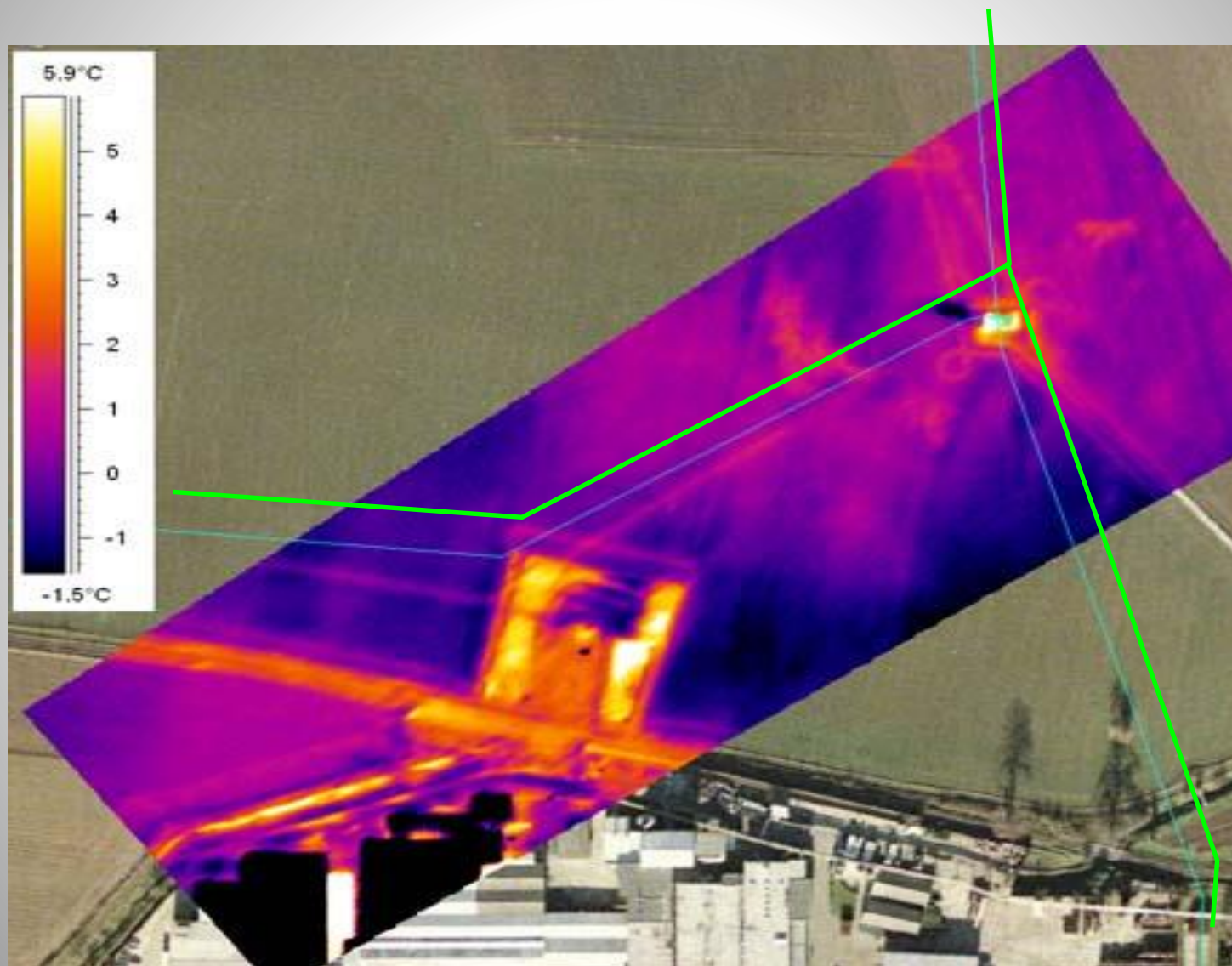
1. Získávání termovizních leteckých snímků spol. ENKI, o.p.s.

- Od r. 2002 - nálety s termovizní kamerou na palubě letounu CESSNA 206 spol ArgusGEO, součást Geodisu. První zkušenosti se spojováním a interpretací termovizních snímků ve spektrální oblasti 7,7 - 14 μm . Nálety skládek na Ostravsku, produktovody, tepelné ztráty měst v zimě. Jednalo se především o relativní posouzení teplotního pole.
- V r. 2008 2 nálety lokality Třeboňska letadlem z výšky 2000 m (velikost pixelu cca 3 m)
- Od r. 2007 první nálety se vzducholodí AirShipClub
- červenec 2010 nálety okolí Domanína a spojení do mapového rastru 3x za den
- Červenec 2013 nálet lokality Domanín a porovnání s kalibračním stožárem
- Až do ztroskotání dne 6.8.2015 vývoj vzducholodi a techniky snímkování a zpracování těchto snímků do georeferencovaných mapových podkladů v rámci společného grantu s katedrou speciální geodézie stavební fakulty ČVUT.

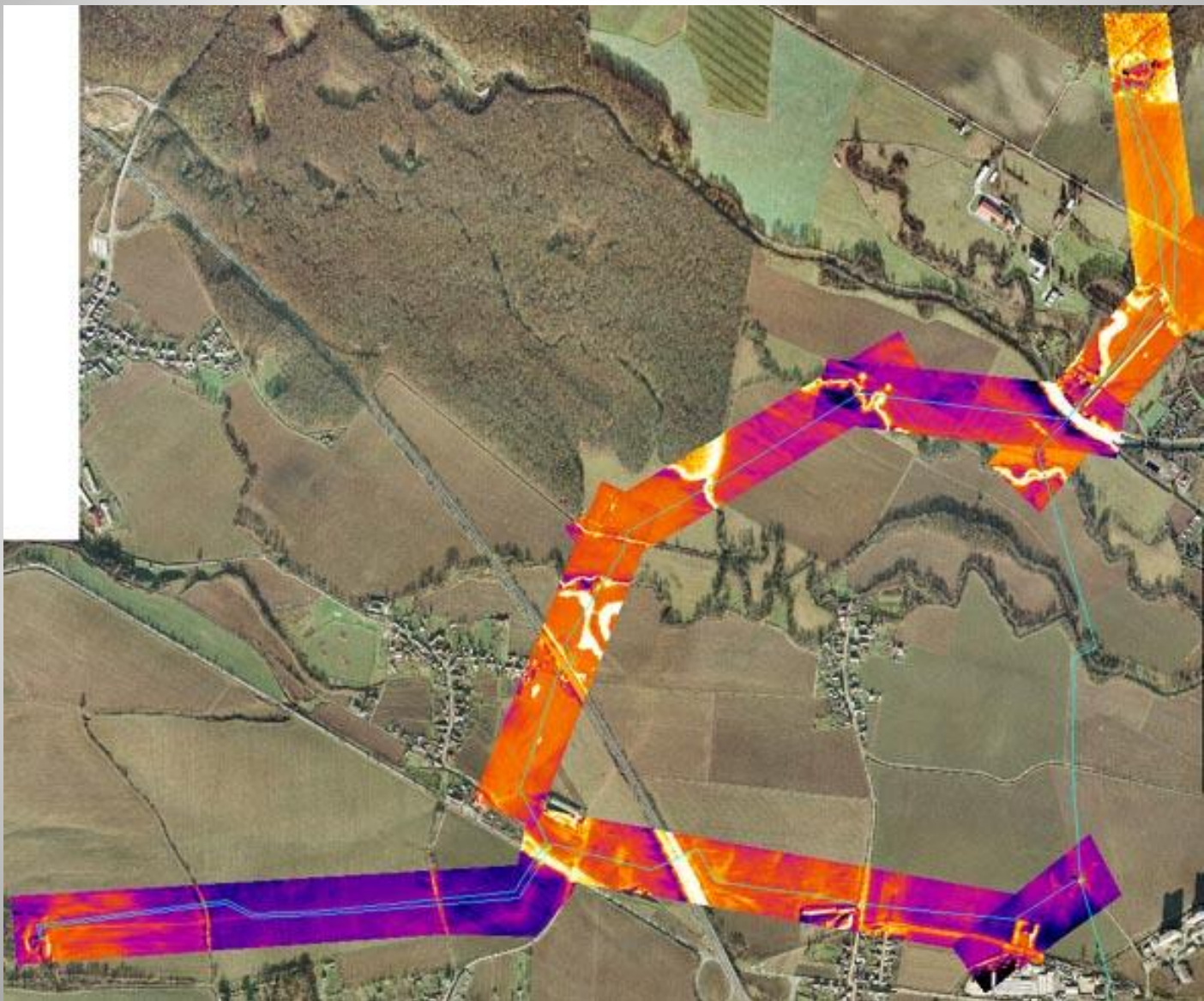
Ukázky termosnímků pořízených z letadla při hledání objektů na základě teplotních anomálií

- Účel pořizování snímků – kdy snímkovat – potřeba kalibrace
- V prvním období 2001 -2007 se jednalo pouze o prostorovou detekci teplotních anomálií – nebyly podstatné absolutní teploty
- Požadavky na polohovou přesnost

Rozdíl předpokládané a skutečné trasy vodovodu



Termosnímký transformované do ortofotomapy

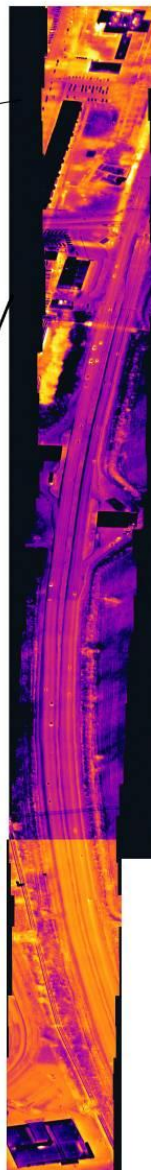


Teplovodní potrubí

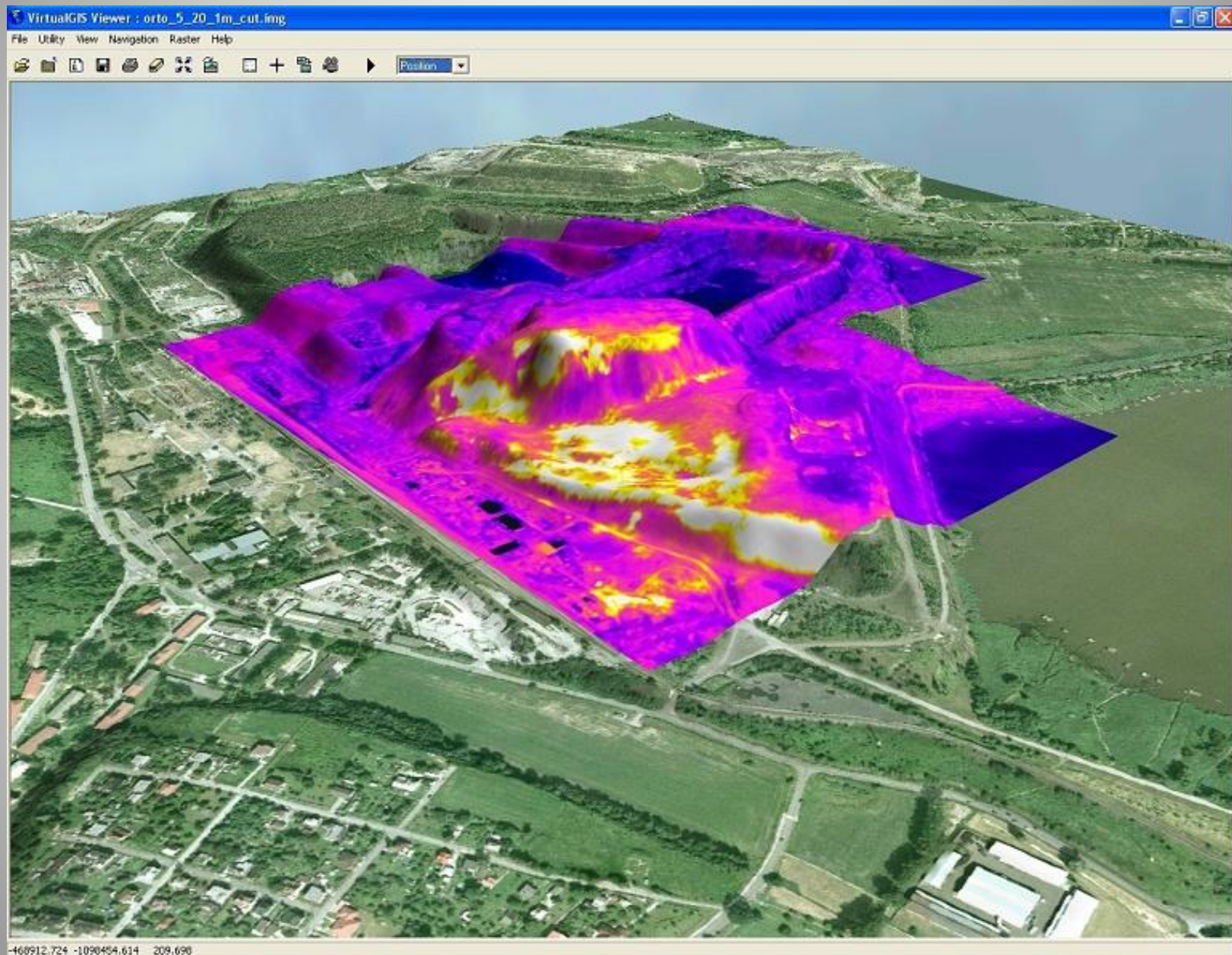
Osa 1 - pixel 25 cm



Detail podzemního parovodu

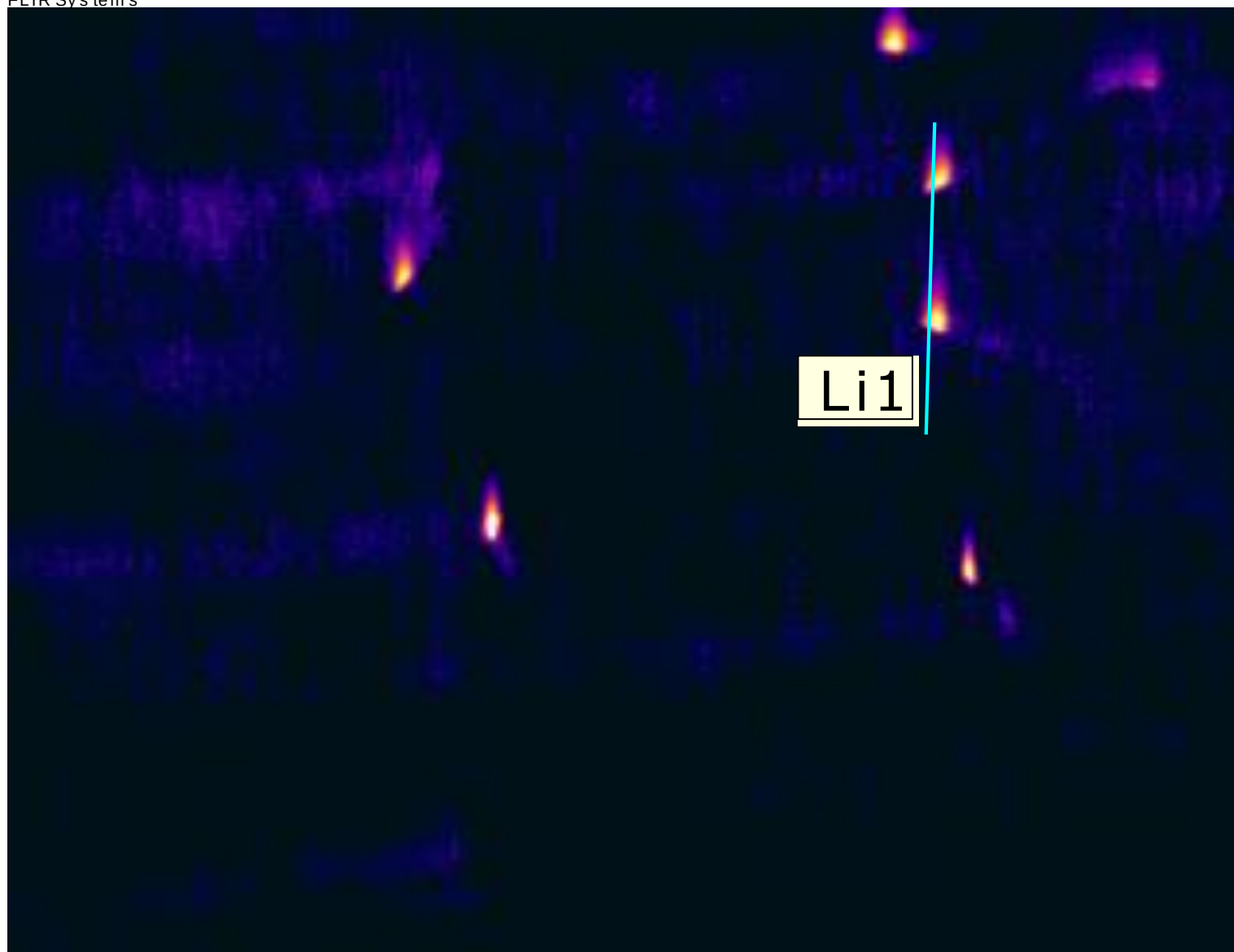


Odval Heřmanice ve 3D

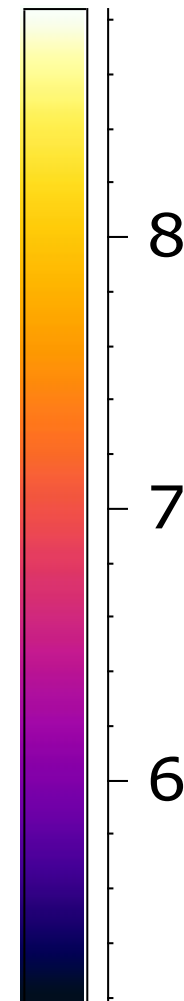


Počítání zvíř

FLIR Sys tem s



8.8 °C



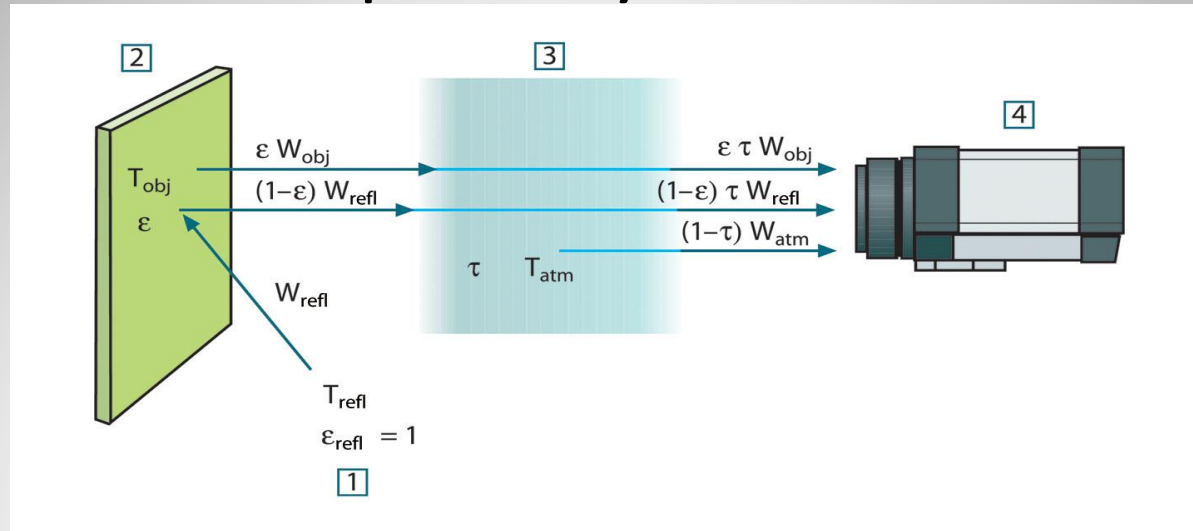
5.2

Ukázky termosnímků pořízených z letadla při studiu energetických toků v krajině

- Od r. 2007 jsme se intenzivněji začali věnovat energetickým tokům v krajině – distribuci dopadajícího slunečního záření.
- Na Třeboňsku jsme měli rozmístěno 12 meteorologických stanic s dálkovým GPRS přenosem, které v 10 minutovém intervalu zaznamenávají měřené veličiny



Princip tvorby termosnímků



U kamer řady FLIR se nastavují následné parametry:

- **emittance objektu ϵ** (0,96)
- **relativní vlhkost vzduchu Rh** (z meteorologických dat)
- **vzdálenost objektu (D_{obj})** (např. výška letu)
- (efektivní) **teplota okolí objektu** nebo odrážená okolní teplota T_{refl} (aproximace teplotou vzduchu ve 2 m – meteostanice)

- **teplota atmosféry (oblohy) T_{atm}**

aproximujeme z dat naměřených pyrgeometrem. Toto zařízení měří emitované záření zemským povrchem i atmosférou, ve vlnových délkách 4,5 – 50 μm . Teplota oblohy je odhadnuta na základě vztahu

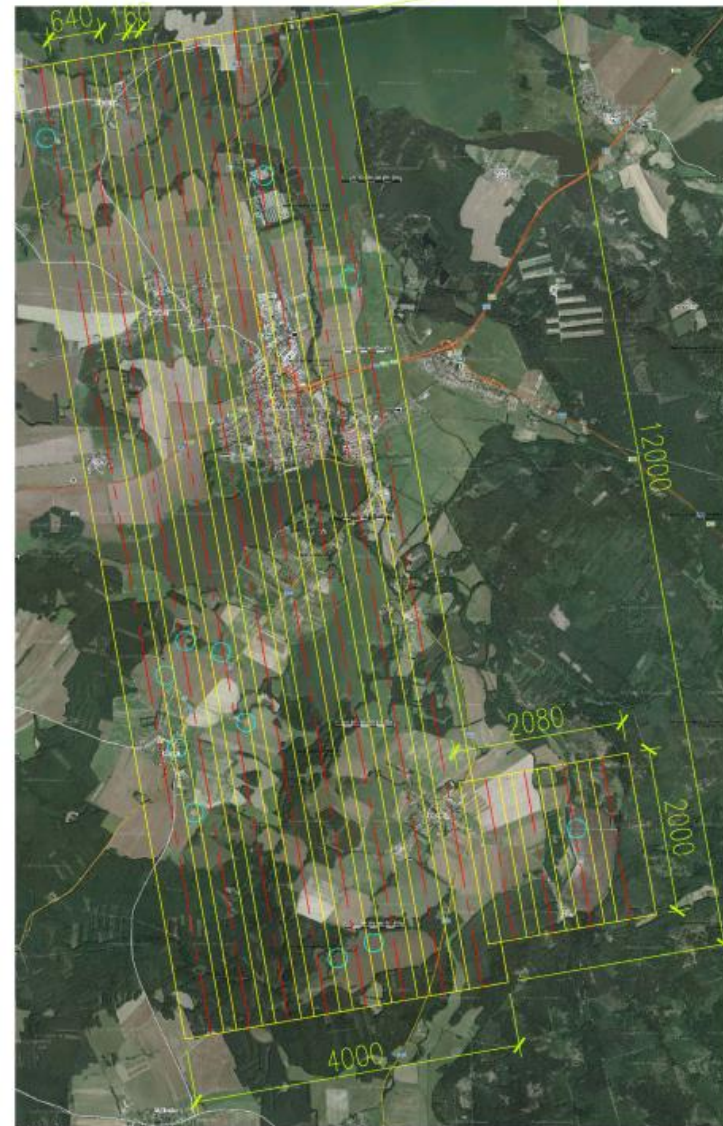
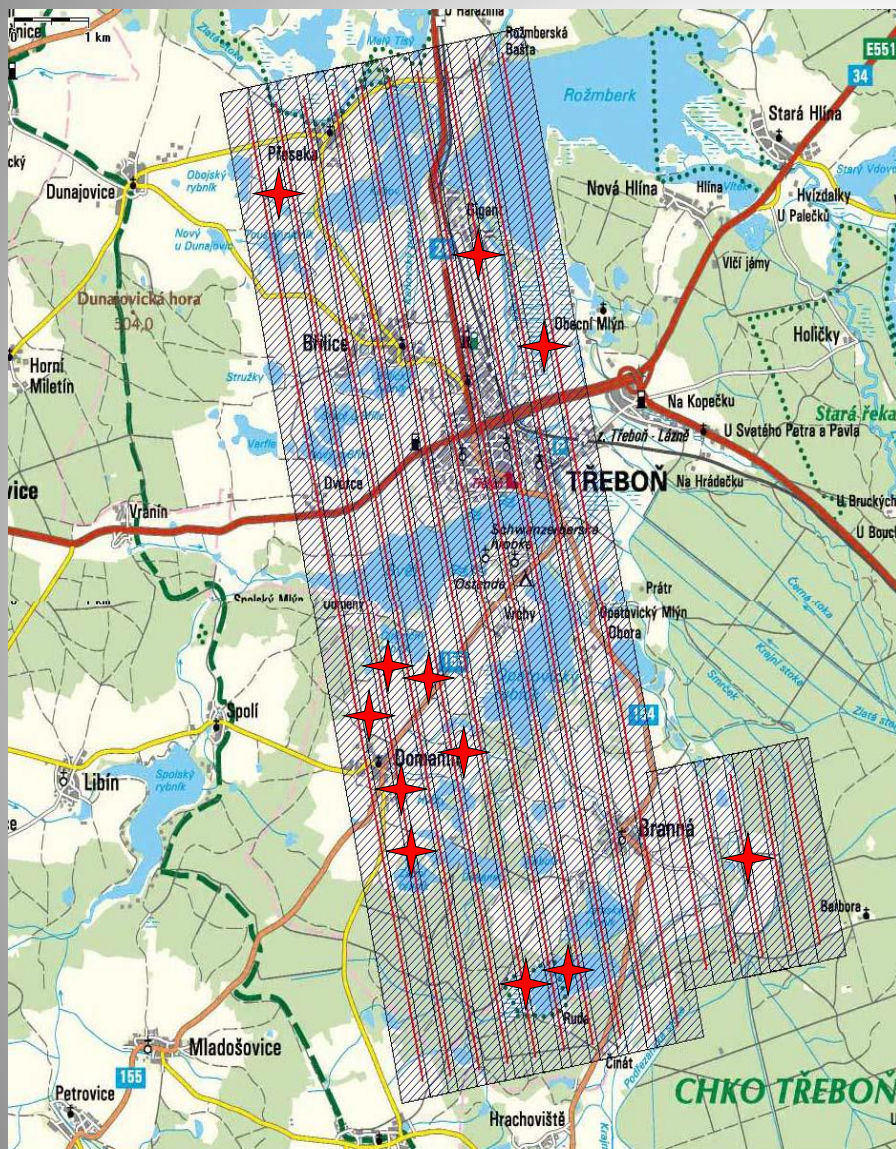
$$T_{sky} = \sqrt[4]{\frac{R_{down} + \varepsilon \sigma (T_{rad})^4}{\varepsilon \sigma}}$$

kde R_{down} je hodnota výměny dlouhovlnného záření mezi oblohou a pyrgeometrem, T_{rad} je teplota radiometru, σ - Stefan-Boltzmanova konstanta. Hodnoty emisivity jsou aproximovány hodnotami pro černé těleso, tzn. $\varepsilon = 1$ (stanoveno empiricky).

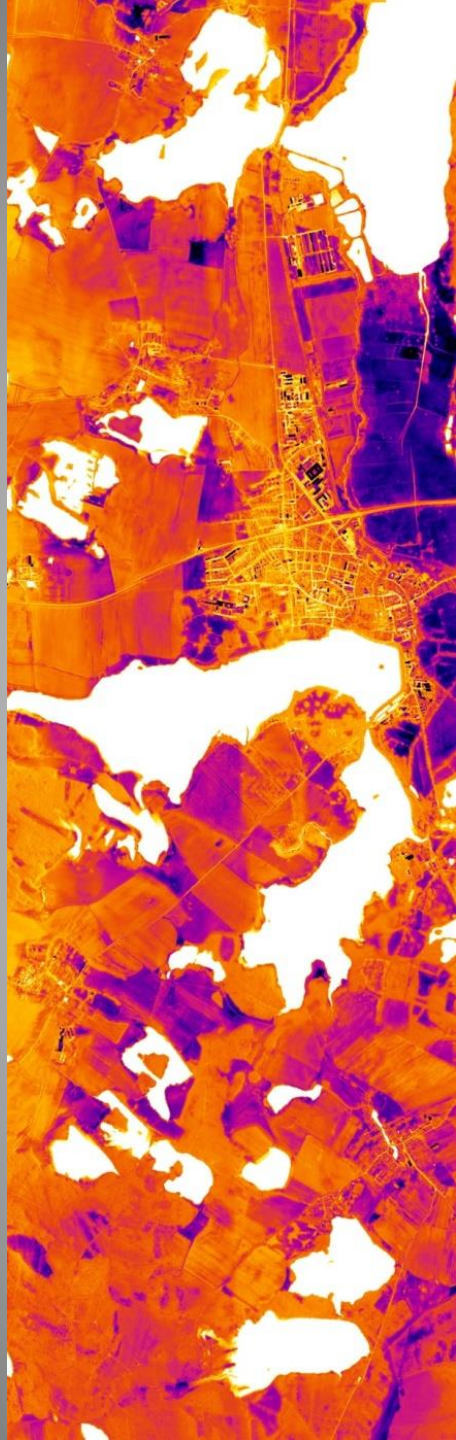
- **teplota externí optiky**

shodná s teplotou vzduchu v případě, že výška snímkování nepřekračuje 300 metrů. Pokud je výška snímkování vyšší, dosazujeme teplotu v okolí kamery.

Náletová oblast Třeboňsko 2008



**Složená teplotní
mapa ranního a
odpoledního náletu
Třeboňské pánve
dne 21.6.2008**



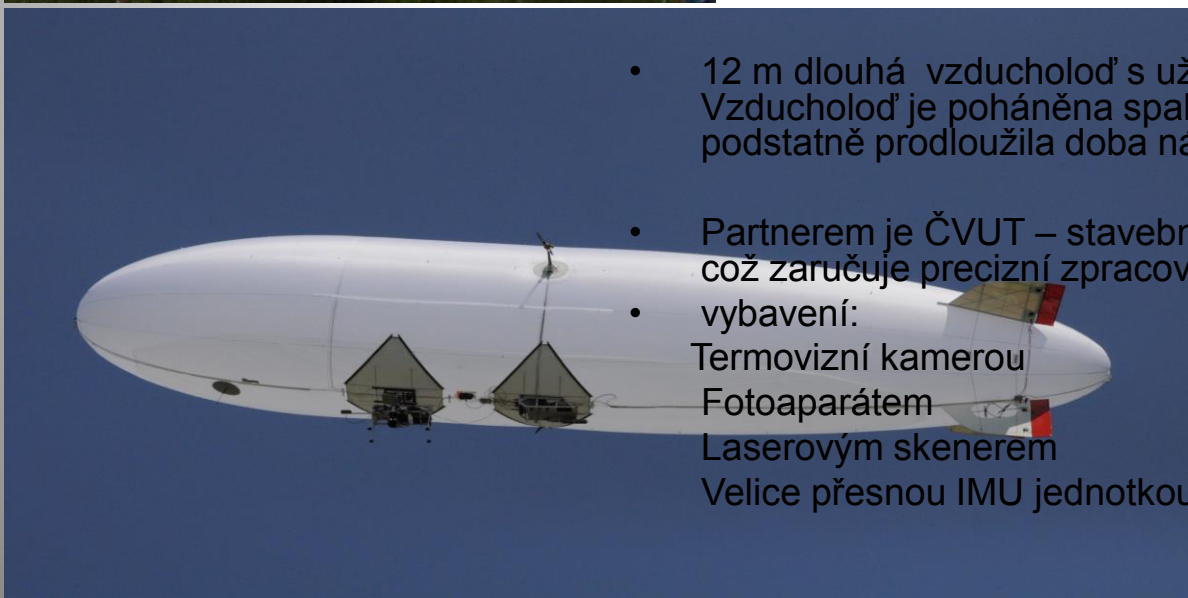
Ukázky termosnímků pořízených ze vzducholodě při studiu energetických toků v krajině

- **Zájmová lokalita pro testování instrumentace:
Domanín u Třeboně**

Vzducholodě Airship Club

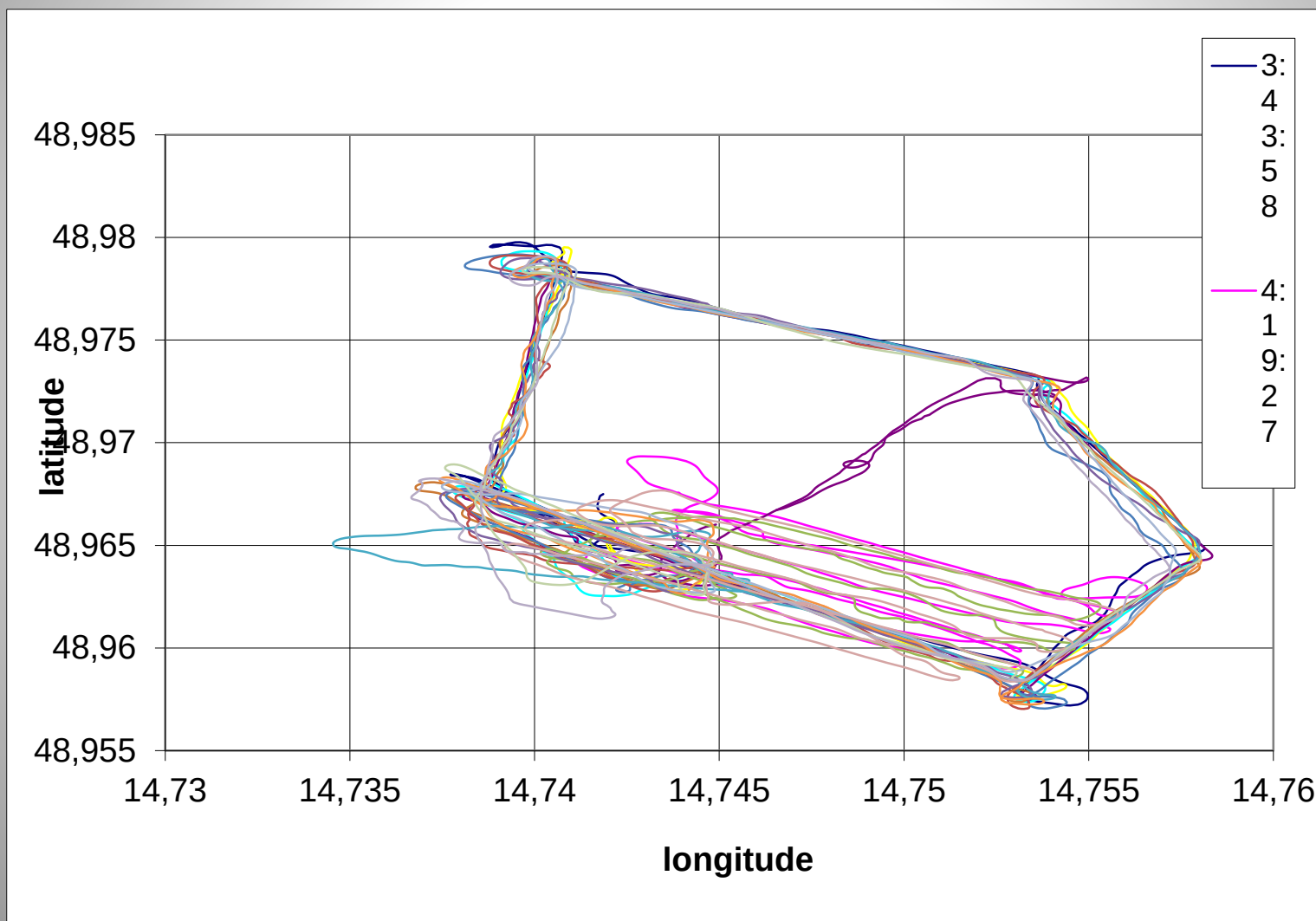


nástroje pro pořizování leteckých snímků v IR i VIZ oblasti v rozmezí výšek od 50 do 500m. Na konci projektu v r. 2011 byla ukončena první etapa . Výsledkem byla 9. m vzducholod' s užitečnou nosností cca 5 kg, schopná reprodukovatelného náletu po zadaných souřadnicích v délce trvání 30 min.

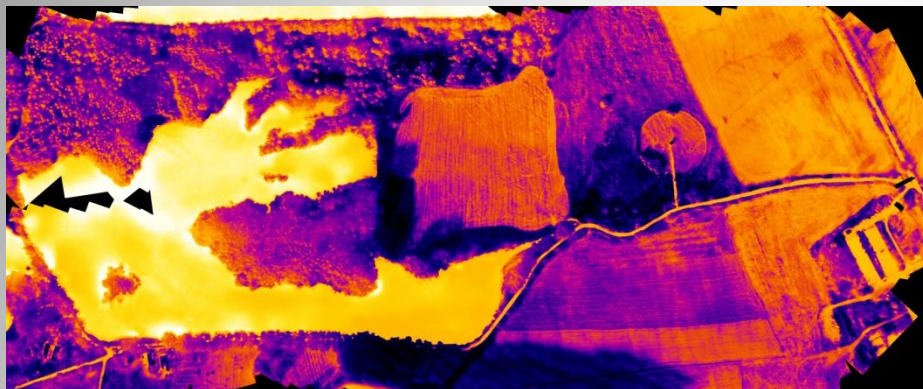


- 12 m dlouhá vzducholod' s užitečnou nosností větší než 10 kg. Vzducholod' je poháněna spalovacím motorem a proto se podstatně prodloužila doba náletu až na 2 hod.
- Partnerem je ČVUT – stavební fakulta, Ústav speciální geodézie, což zaručuje precizní zpracování mapových podkladů
- vybavení:
 - Termovizní kamerou
 - Fotoaparátem
 - Laserovým skenerem
 - Velice přesnou IMU jednotkou pro okamžité určení polohy

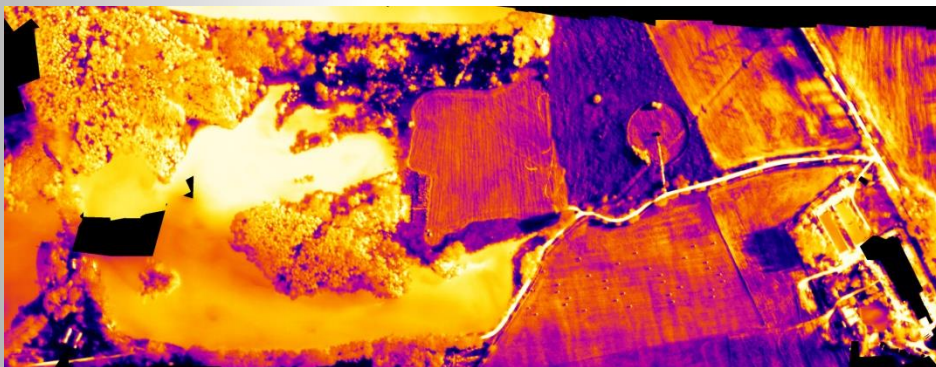
GPS souřadnice trajektorie vzducholodi



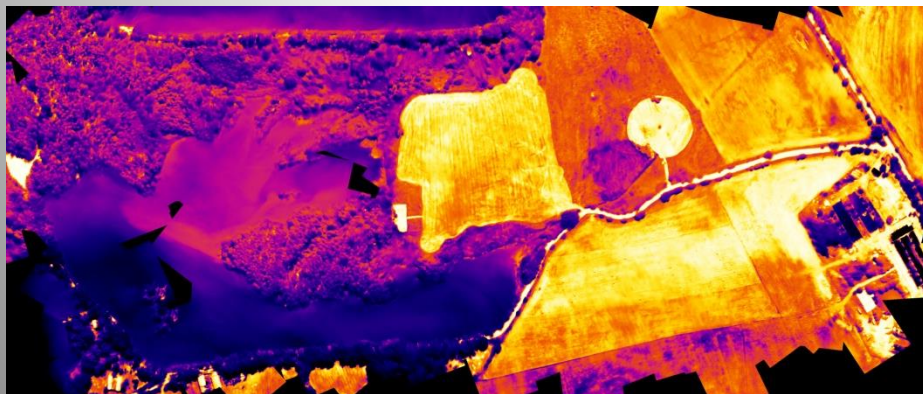
Lokalita Domanín - vrt



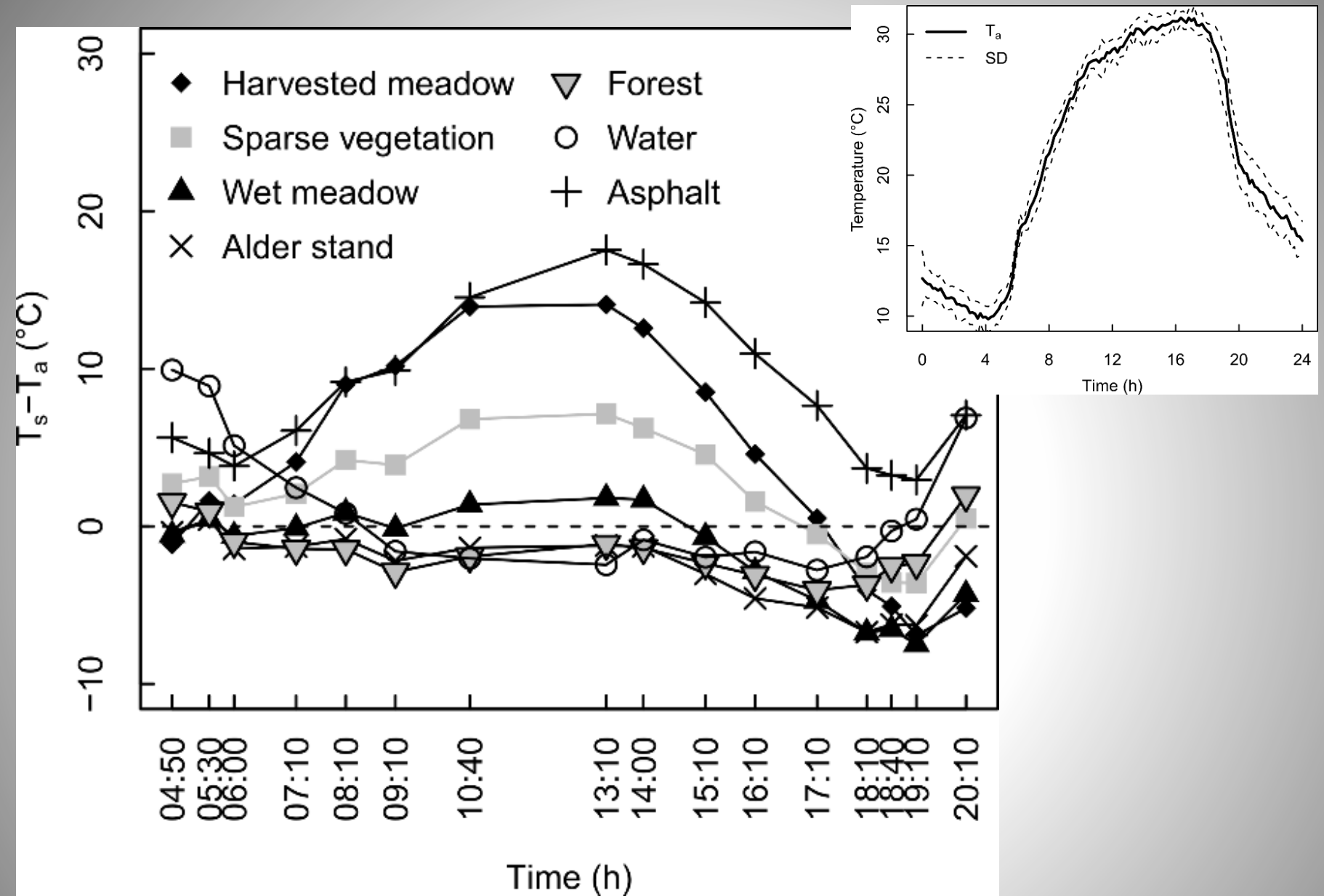
07.09.2010 05.30



07.09.2010 14.00



07.09.2010 16.40



Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J., Rejšková – Procházková, A. (2013): Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. *Ecological Engineering* 54, 145– 154.

2. Otázky a pochybnosti při vyhodnocování

- Lévalo se s větším rozlišením nad menšími lokalitami, které byly osazeny meteorologickými stanicemi.
- Jednalo se o : teplotu povrchu, porostu, teplotu vzduchu nad porostem měřenou v meteorologickém krytu, radiační teplotu měřenou z prostředků DPZ.
- **Pro lepší orientaci a určení míry nepřesnosti a odchylek mezi jednotlivými měřeními jsme se rozhodli vyvinout specializované měřicí zařízení na kalibraci a verifikaci teplot, pracující v kontinuálním měřicím režimu.**

3. Vývoj instrumentace

Mobilní měřicí stanice



Funkce

- Zařízení na měření energetických toků, které umožňuje vytvořit teplotní mapu zkoumané plochy o velikosti řádu stovek m².
- Slouží k popsání distribuce slunečního záření, dopadajícího na zemský povrch, tj. rozložení, transformaci
- Zaznamenává absolutní a komparační měření teplot, vlhkostí, směru a rychlostí větru ve výškovém profilu 30 m a je určeno pro posouzení vlivu vegetace na redistribuci energie dopadajícího slunečního záření.
- Jeho pomocí lze porovnat metody a čidla měření radiačních teplot, teplot vzduchu nad porosty i teplot povrchů v přízemní vrstvě atmosféry.

Využití

- Výsledky slouží ke změření a pochopení fyzikální podstaty dějů, odehrávajících se v přízemní vrstvě atmosféry a především k porovnání rozložení teplot a následně energetických toků v rozdílných porostech v rámci biotopu a tím k popsání odezvy porostu na zásahy lidské činnosti.
- Postihnout a zaznamenat dynamiku procesů ve zkoumané lokalitě
- Slouží pro kalibraci teplot z prostředků DPZ a porovnání teplot, měřených na rozhraní půda - atmosféra

Mobilní měřicí stožár- osazení čidly

- ve výšce 30 m
Termovizní kamera FLIR PM695
NET radiometr CNR-1 vyhřívaný
tj. 2x pyranometr CP-3 a 2x pyrliometr
- ve výšce 7.5, 15, 22.5 a 30m
anemometr - směr a rychlost větru
RV +t snímače teploty a relativní vlhkosti
- u paty stožáru
2x teplota
1x půdní vlhkost
1x půdní radiace

Použitá čidla

- Termovizní kamera: FLIR ThermoCAM PM 695 s objektivem $A=45^\circ$
- Bezdotykový teploměr: FSI AGEMA Thermopoint 64 Plus
- Netradiometr: Kipp&Zonen CNR1
- Radiometry: Kipp&Zonen CM3
- Čidla teploty a relativní vlhkosti: Fiedler RV 12
- Čidla směru a rychlosti větru: Tlusták W2
- Teploměry: Pt 100- XM
- Půdní radiometr: Huxeflux HFP 01
- Čidlo tlaku vzduchu: Dyrk – Peters HIM Electronical air preassure sensor F1

4. Měřené objekty a veličiny

Měření ve dnech 2.-3.10.2011 příprava experimentu

- Levá část nebyla udržována a sekána po celé vegetační období.
- Pravá část byla posekána a zmulčována cca 2 týdny před experimentem
- osový pás pod krakorcem byl posekán těsně před experimentem.
- Pod krakorcem na ose byly umístěny dvě kalibrační tabule Al plechu o velikosti 1,25x1,25 m, jedna černá a druhá bílá nanesená barva o známé emisivitě $\varepsilon = 0,96$.
- V průběhu měřicí kampaně byla prováděna kontrolní měření teplot bezdotykovým teploměrem, měřícím radiační teplotu povrchu a termočláňkovou dotykovou sondou, kterou je teploměr vybaven.

Měřená plocha



5. Metodika, měření a vyhodnocení

Měření ve dnech 2.-3.10.2011- postup

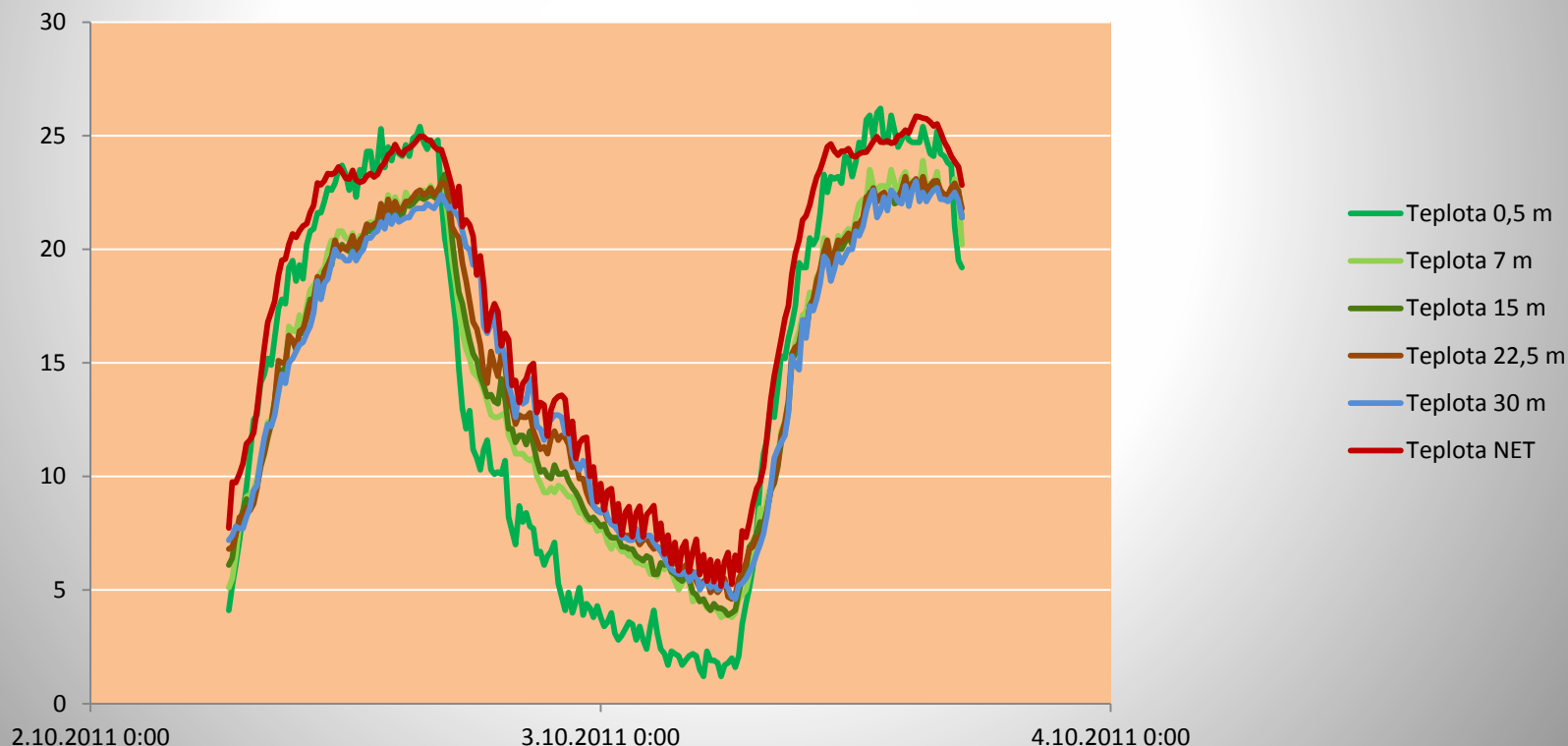
- Na stožár do stabilně definované polohy byla vytažena termovizní kamera v krytu s bateriovým boxem a interval snímání byl nastaven na 10 min.
- Data - termovizní snímky byly zaznamenávány do paměťové karty v kameře. Po 8 hodinách byla kamera spuštěna, vyměněn bateriový box, provedena kontrola zaostření, recalibrace kamery a kamera byla vytažena zpět na stožár.
- Paralelně probíhal ve shodném intervalu sběr dat z čidel, umístěných na stožáru i pomocných stanicích.

Teploty měřené na stožáru:

Teplota **vzduchu**, měřená v meteo krytu ve výšce :15 cm, 2m, 7,5m, 15m, 22,5m, 30m

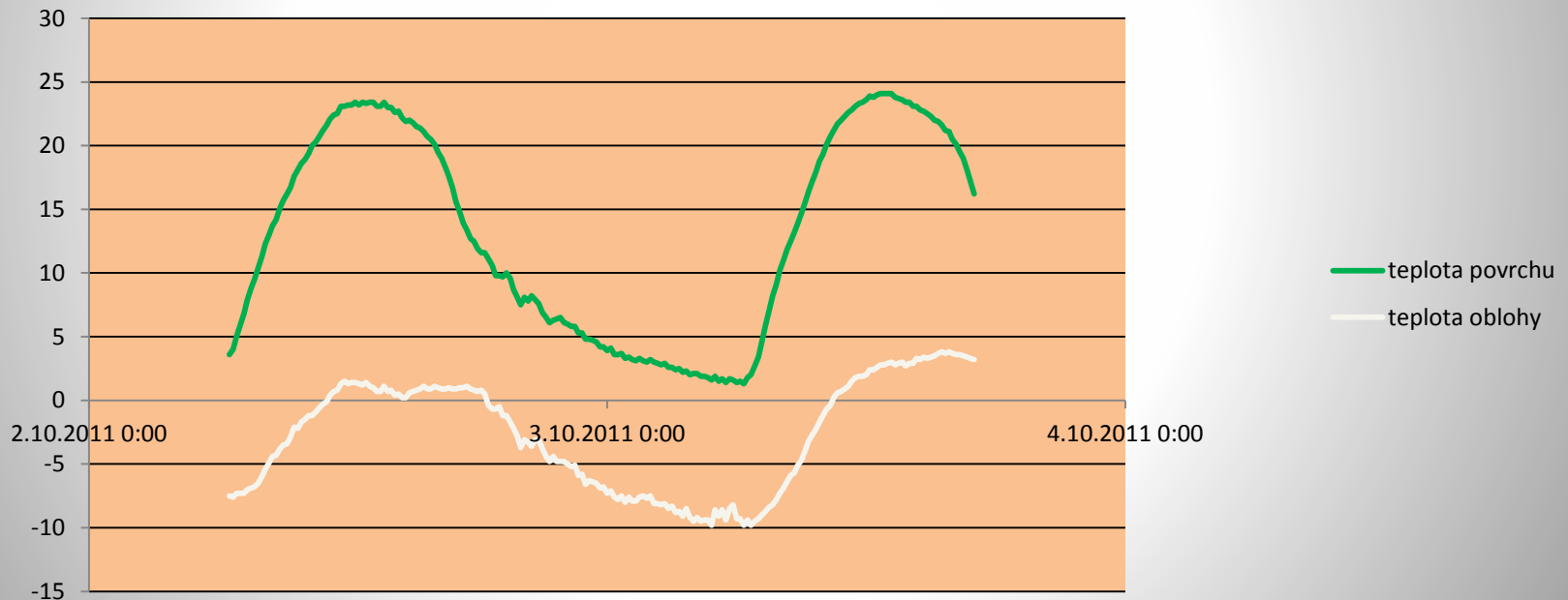
Teplota těla NET radiometru 30m

TEPLOTY MĚŘENÉ NA STOŽÁRU



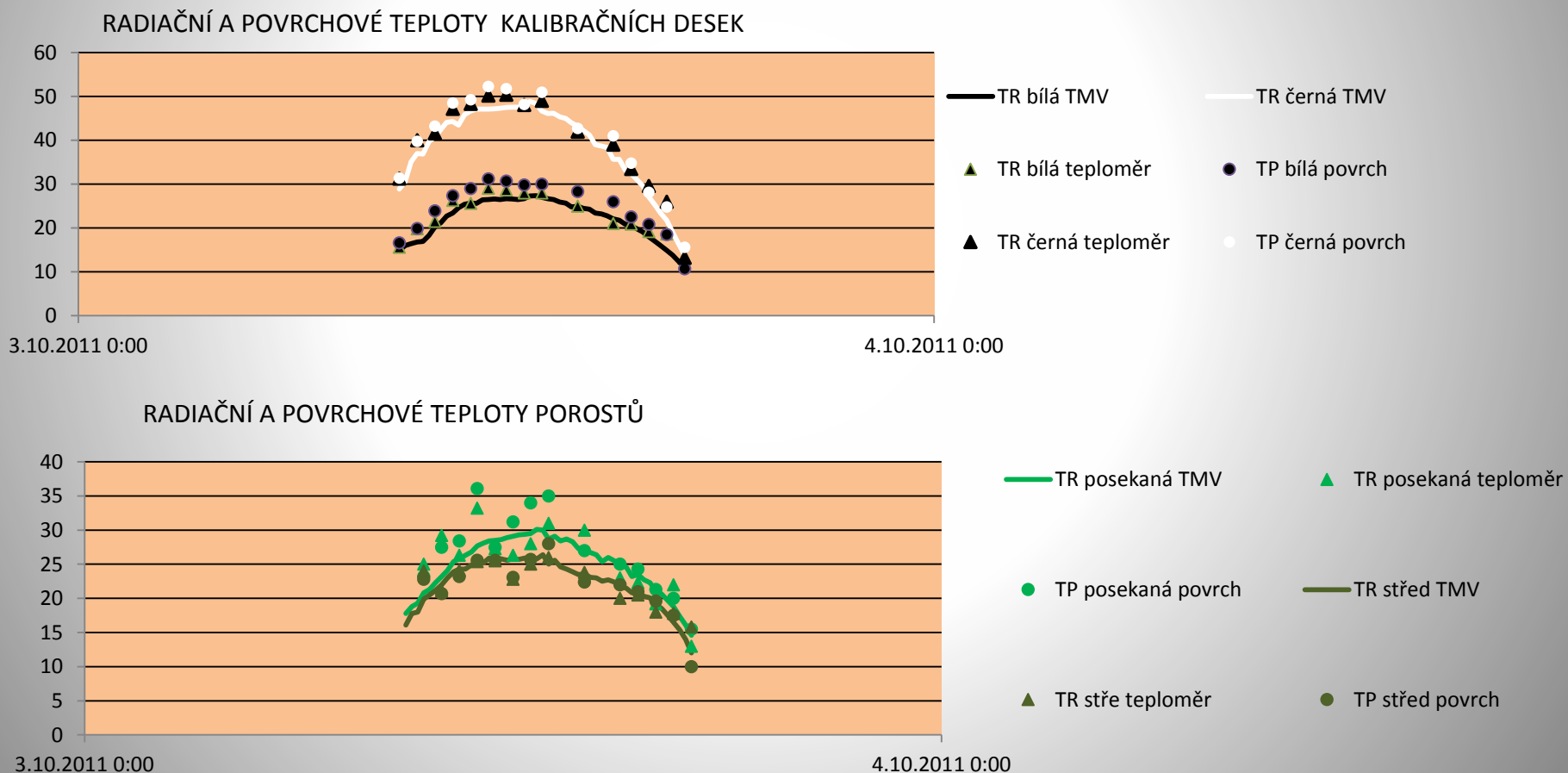
Teploty počítané

Zdánlivá radiační globální teplota oblohy a zdánlivá radiační globální teplota povrchu. Výpočet ze Stefan-Boltzmanova zákona na základě měřené teploty těla NET radiometru a radiační výměny ve spektrální oblasti 5 - 35 μm



Kalibrační teploty povrchů.

desky a porosty byly kontaktně měřeny termočlánkovým čidlem bezdotykového teploměru FSI AGEMA Thermopoint 64 Plus a **radiační** teploty byly měřeny při nastavené emisivitě $\varepsilon = 0,96$

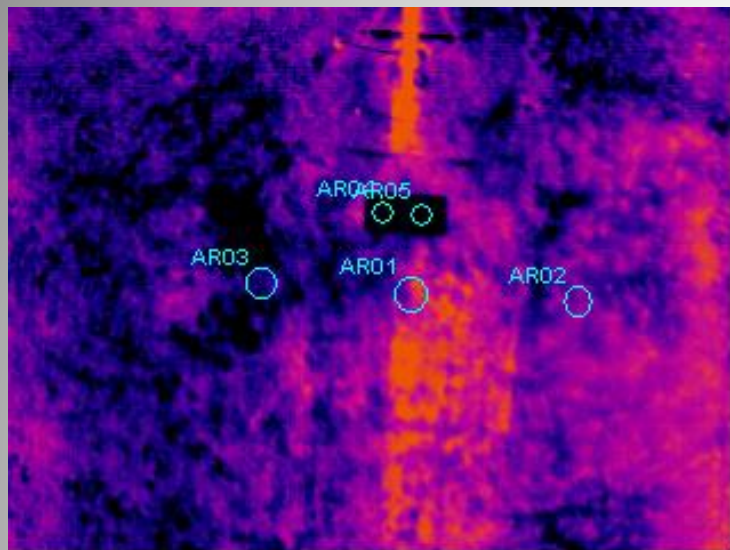


Radiační teploty, odečtené z termovizních snímků

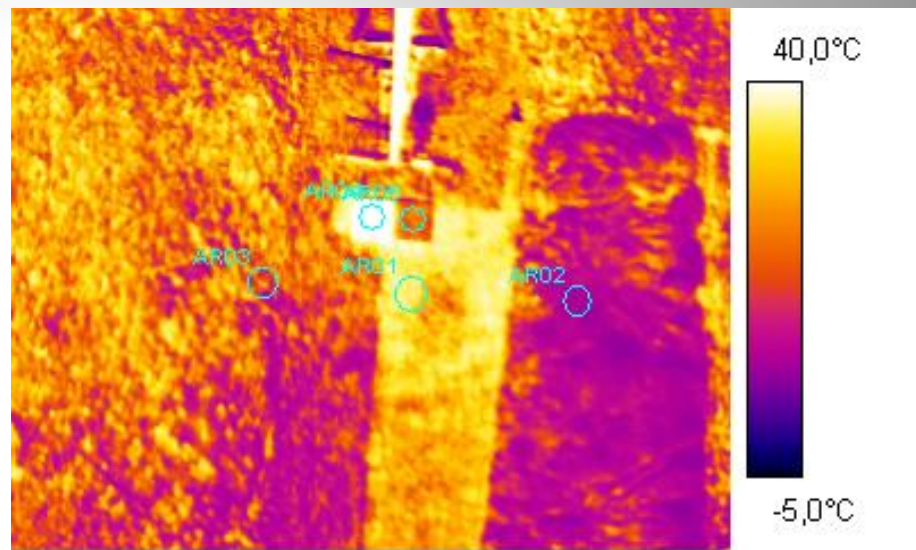
Pro správné určení radiačních teplot měřených povrchů byly dodrženy následující zásady:

- Teplota povrchu je průměrná teplota pevně definovaného kruhového segmentu, který byl vytvořen maskou v programu FLIR ThermaCAM Researcher 9.1.
- Masky byly kopírovány na jednotlivé snímky a program obsahuje teplotní analýzu
- Pro každý odečet bylo upravováno nastavení kamery:
 - teplota pozadí - zdánlivá globální teplota oblohy
 - teplota okolí
 - teplota externí optiky, která byla totožná s teplotou okolí
 - relativní vlhkost
- Chybějící hodnoty cca 2% při výměně baterií byly nahrazeny interpolací

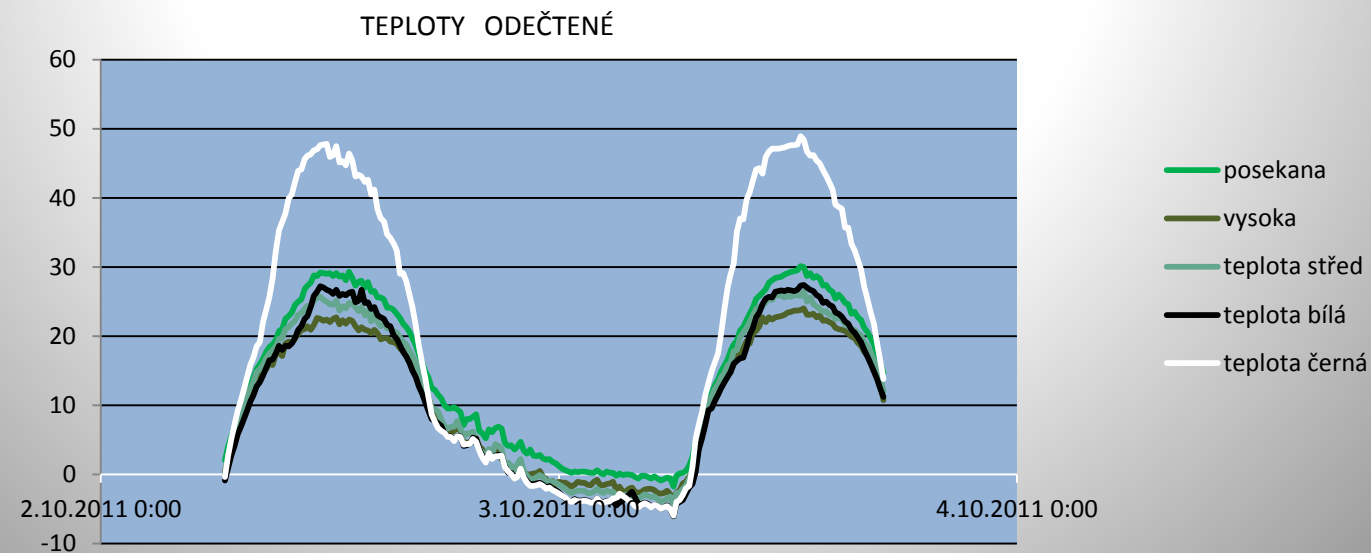
Odečítání teplot z termogramů



03.10.2011 05.50hod

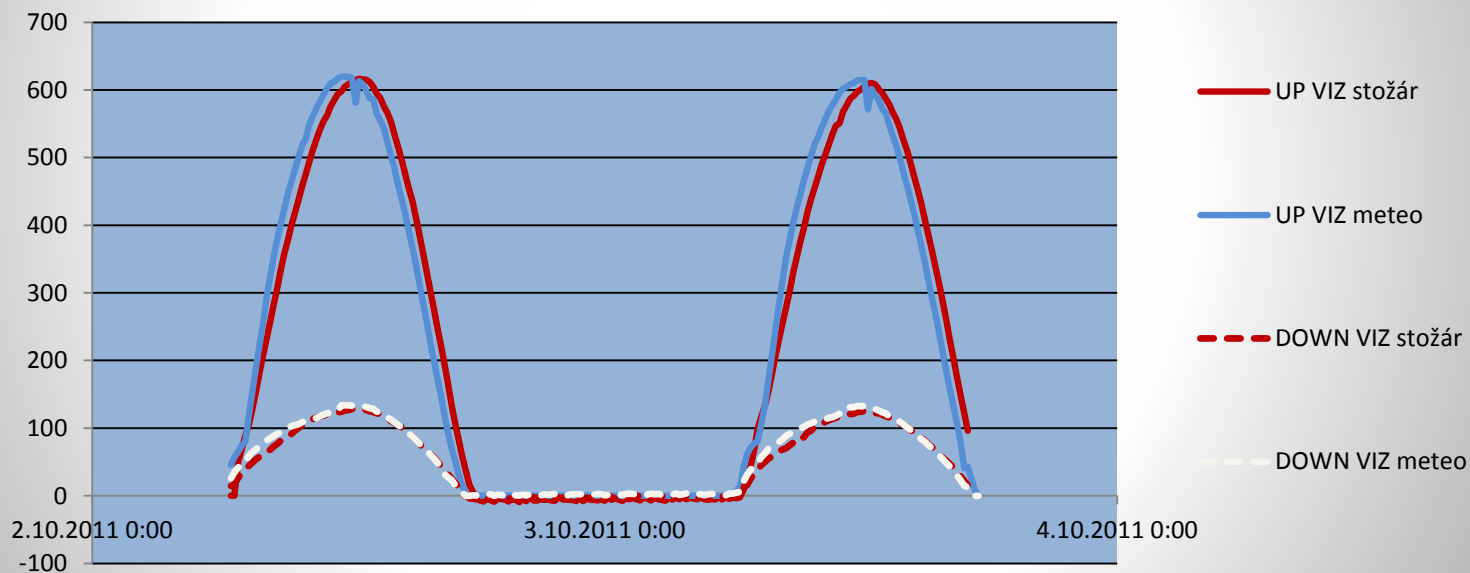


03.10.2011 13.30 hod.



Radiační měření net radiometry ve výškách 2 a 30 m

RADIAČNÍ TOKY NA STOŽÁRU A METEOSTANICI

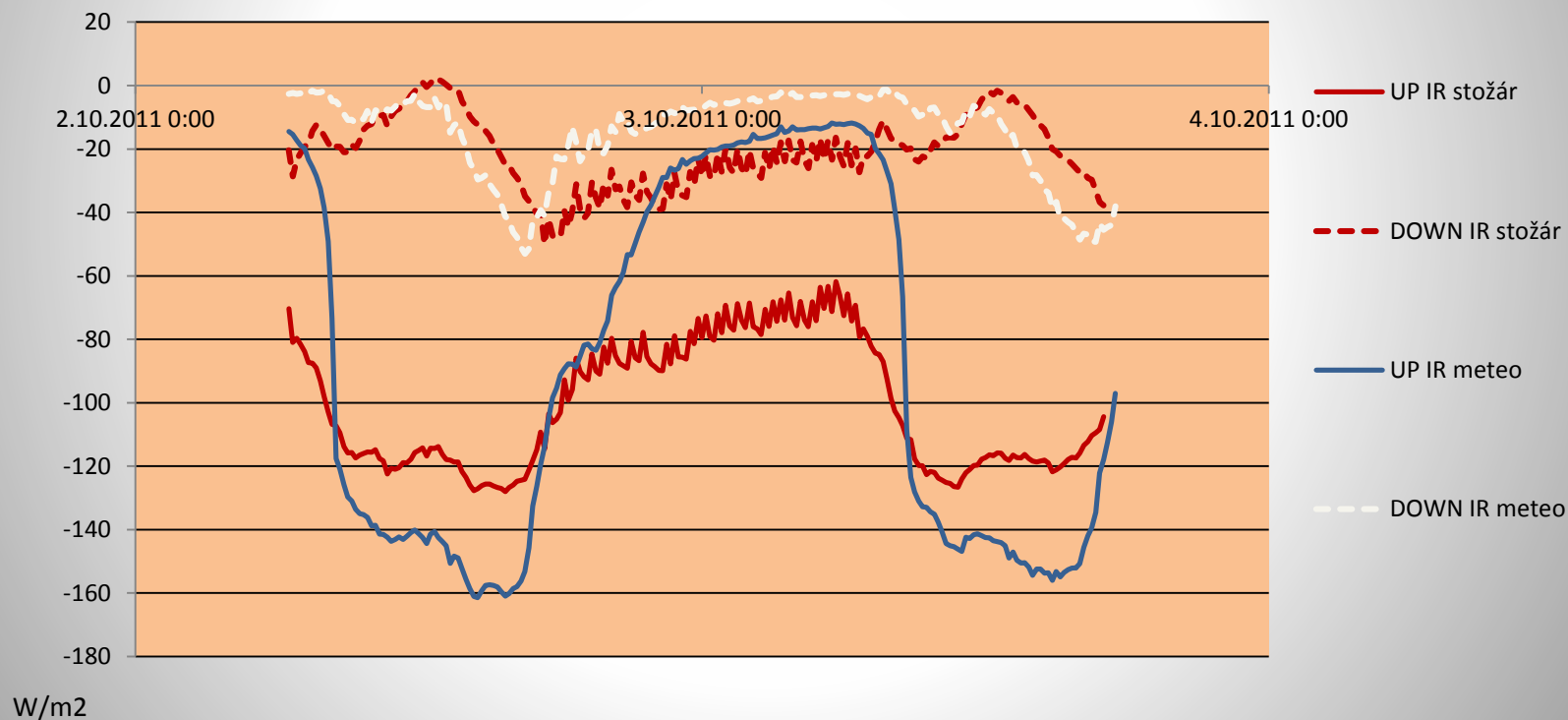


W/m²

Krátkovlnná radiace na stožáru a meteostanici

Radiační měření net radiometry ve výškách 2 a 30 m

RADIAČNÍ TOKY IR NA STOŽÁRU A METEOSTANICI



Dlouhovlnná radiace na stožáru a meteostanici

Nálet lokality Domanín dne 2.7.2013

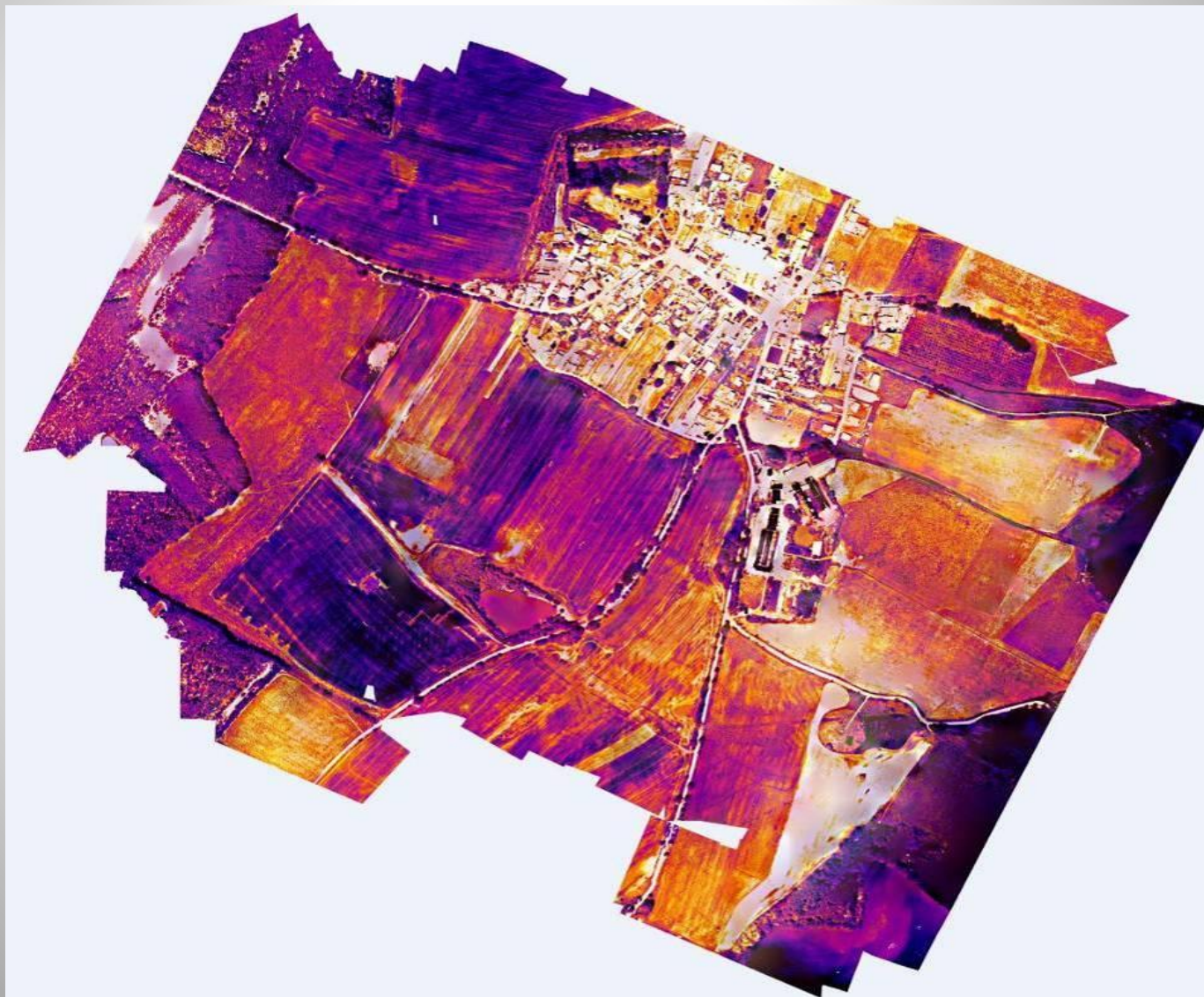
- Plocha: 1.8 x 1.5 km
- Data:
 - Visible spectrum (VIS) – rozlišení cca. 4cm
 - Infrared spectrum (IR) – rozlišení cca. 20cm
- Objekt pozorování: Meliorační systém, měřicí stožár



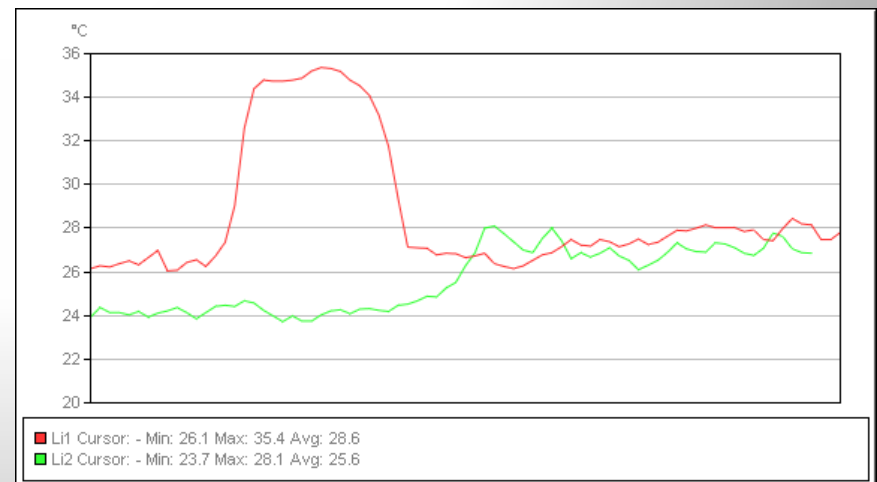
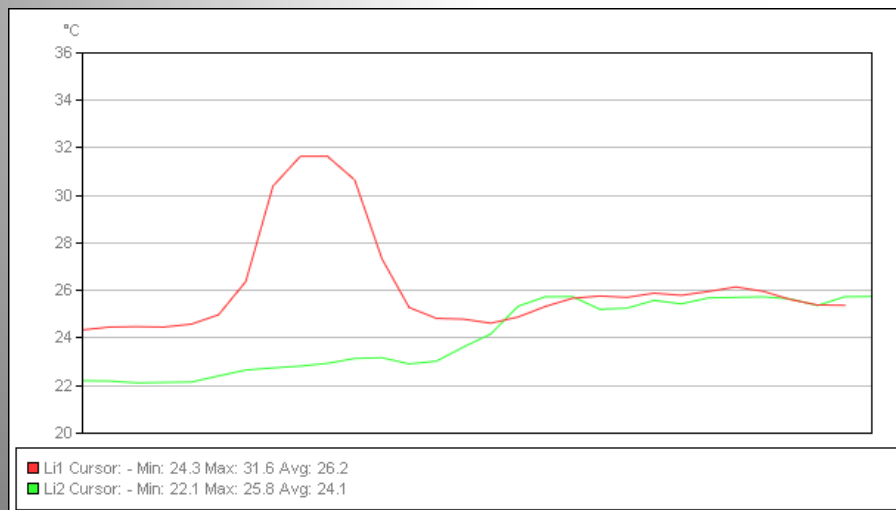
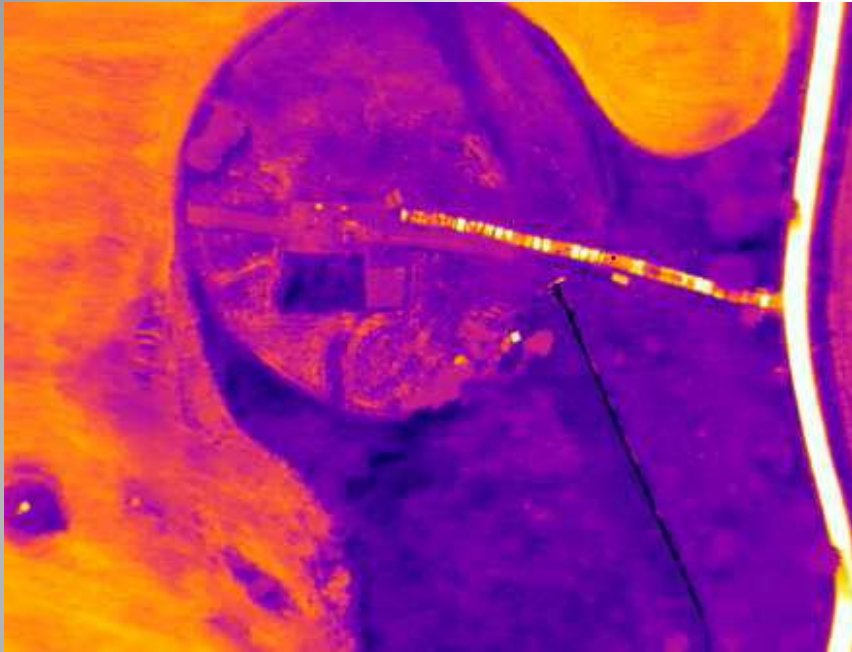
Zkoumaná oblast - Domanín



Georeferencovaná IR orthofotomapa s rozlišením 30 cm v teplotní škále 24°C – 34 °C



Analýza stejného místa ze vzducholodě a stožáru 2.7.2013 v 16,30



6. Zhodnocení teplotních charakteristik termovizního systému na vzducholodi.

Porovnání radiačních teplot vzducholodí – stožár

- Relativní chyba měření (rozdíl mezi teplotami jednotlivých povrchů, měřených ze stožáru a vzducholodě) se pohybuje v rozmezí 1 – 2 K.**
- Teplotní mapa, získaná ze vzducholodi je použitelná a poměrně přesná v oblasti relativních teplot, což je velice důležité a většinou postačující pro identifikaci jevu.**
- Po kalibraci na pozemní stanici a především nastavení okrajových podmínek v termovizní kameře na základě změření a výpočtu aktuálních klimatických a meteorologických podmínek jsou výsledky použitelné i pro absolutní měření a tedy i pro kvantitativní energetické výpočty.**

Děkuji za pozornost...

Kontakty:

Vladimír Jirka jirka@enki.cz
Petra Hesslerová M42barta@seznam.cz