

Ing. Vladimír JIRKA, CSc.<sup>1)</sup>  
 Ing. Bořivoj ŠOUREK, Ph.D.<sup>2)</sup>  
 doc. RNDr. Jan POKORNÝ, CSc.<sup>1)</sup>  
 prof. Ing. Josef ZICHA, CSc.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ENKI, o.p.s. Třeboň  
<sup>2)</sup> ČVUT v Praze, UCEEB  
<sup>3)</sup> ČVUT v Praze, Fakulta strojní,  
 Ústav přístrojové a řídicí techniky

Recenzent  
 Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

# Vliv výšky travního porostu na teplotu povrchu a tepelná bilance na rozhraní země a atmosféry

## Effect of Grass Plot Height on Surface Temperature and Heat Balance at the Land-Atmosphere Boundary

*Príspevek se zabývá porovnáním povrchových teplot různých materiálů a travního porostu tří výšek, měřených v průběhu letního dne při plném slunečním svitu. Cílem práce je porovnat teploty fyzikálních povrchů (černý a bílý plech) s vegetací, která má nízkou odrazivost, ale ochlazuje se odparem vody. Pro tento účel bylo zkonstruováno experimentální zařízení sestávající ze stožáru výšky 30 m se 4 m dlouhým krakorcem, na kterém byl umístěn net-radiometr, čidla na měření teploty a vlhkosti vzduchu a termovizní kamera. Denní průběh povrchových teplot byl měřen na třech travnatých plochách s různou výškou porostu a dvou referenčních plochách z hliníkového plechu bílé a černé barvy. Teplota povrchu měřená kamerou byla porovnána s teplotou měřenou kontaktním teploměrem. Nejnižší denní povrchová teplota byla naměřena na trávniku o výšce 30 cm, který se chladí odparem vody (evapotranspirace). Povrchová teplota trávniku byla nižší, přestože vegetace má nižší odrazivost než bílý plech, a byla dokonce nižší než teplota vzduchu.*

**Klíčová slova:** rozhraní země a atmosféry, povrchová teplota, vegetační pokryv, tepelná bilance, net-radiometr

*Surface temperatures of various materials and grass plots of three different heights were compared on a summer clear-sky day. The aim of the work was to compare surface temperature of physical surfaces (metal sheets of different colour) with vegetation which has low reflectance (albedo) and cools itself by evaporation of water. For that purpose, experimental equipment was constructed, consisting of a pole 30 m height with 4 m long cross beam on which net-radiometer, thermal camera and shielded sensors for air temperature and air humidity measurement were fixed. Net-radiometer measured incoming and reflecting solar (shortwave) radiation and flux of heat (longwave radiation) between land surface and sky. Daily courses of surface temperatures were measured on 3 grass plots of different height and two reference plates made from aluminium sheet of white and black colour. Measured radiative temperature was compared with temperature measured by contact temperature sensors. The lowest surface temperature was recorded on the grass 30 cm high, which cool itself by evaporation of water (evapotranspiration). The surface temperature of grass was lower despite grass has lower reflectance than white metal sheet. The surface temperature of grass was lower than temperature of air.*

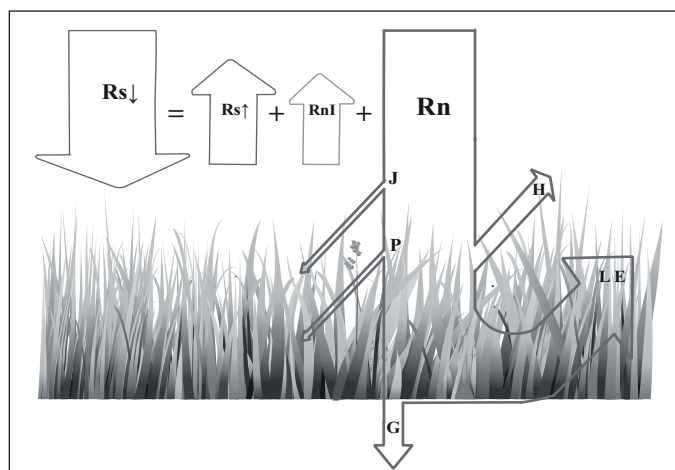
**Keywords:** land-atmosphere boundary, surface temperature, vegetation cover, heat balance, net-radiometer

### ÚVOD

Slunce ohřívá Zemi na průměrnou teplotu přibližně 18 °C. Sluneční energie zvyšuje teplotu Země o zhruba 290 °C. Na vnější vrstvu atmosféry dopadá 1412 až 1321 W·m<sup>-2</sup> (podle polohy Země na její eliptické dráze) a na vodorovnou plochu na zemském povrchu za jasného dne až 1000 W·m<sup>-2</sup> krátkovlnného slunečního záření.

Na obr. 1 je znázorněno schéma energetické bilance porostu. Hlavní toky lze měřit net-radiometrem [14]: krátkovlnné dopadající sluneční záření ( $R_{s\downarrow}$  = shortwave radiation), odražené krátkovlnné sluneční záření ( $R_{s\uparrow}$ ) a dlouhovlnné záření vysílané povrchem země do atmosféry ( $R_{nl}$  = net longwave radiation). „Zbytek“ tvoří tzv. čisté záření ( $R_n$  = net radiation), které se v porostech váže hlavně do odparu vody jako latentní teplo výparu ( $LE$  = skryté teplo evapotranspirace, latent heat), ohřívá povrch a od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch ( $H$  = citelné teplo, sensible heat), ohřívá se půda ( $G$  = tok tepla do půdy, ground heat flux). Velmi malý podíl sluneční energie (nejvýše 1 %) se váže fotosyntézou do biomasy ( $P$ ) a ohřívá biomasu porostu ( $J$ ).

V souvislosti s prodlužováním period bez srážek a s nárůstem extrémních teplot v létě ve městech probíhá práce na projektech adaptační strategie měst na klimatickou změnu, které spočívají především v úpravách povrchů, zadržování vody a péči o zeleň. Pro návrh účinných opatření



Obr. 1 Schéma radiační bilance porostu:  $R_{s\downarrow}$  – krátkovlnné sluneční záření dopadající;  $R_{s\uparrow}$  – krátkovlnné sluneční záření odražené;  $R_{nl}$  – dlouhovlnné sluneční záření od povrchu země do atmosféry;  $R_n$  – čisté záření;  $LE$  – latentní teplo výparu;  $H$  – citelné teplo;  $G$  – tok tepla do půdy;  $P$  – energie vázaná fotosyntézou do biomasy;  $J$  – ohřev porostu ([11], upraveno)

Fig. 1 Schematic diagram of the vegetation radiation balance:  $R_{s\downarrow}$  – shortwave solar radiation, incident;  $R_{s\uparrow}$  – shortwave solar radiation, reflected;  $R_{nl}$  – longwave solar radiation from the Earth surface to the atmosphere;  $R_n$  – net radiation;  $LE$  – latent heat of evaporation;  $H$  – sensible heat;  $G$  – heat flux to the soil;  $P$  – energy coupled by photosynthesis to biomass;  $J$  – heating of vegetation ([11], modified)

ke zmírnění efektu městského tepelného ostrova je nutné znát principy distribuce sluneční energie, chování různých povrchů a roli vegetace.

V této práci jsou srovnávány povrchové teploty fyzikálních povrchů, konkrétně bílého a černého plechu, s travním porostem různé výšky. Je položena otázka, jakých povrchových teplot dosahují uvedené povrchy za jasných letních dnů, což je zásadní informace pro volbu vhodných materiálů, případně porostů v městské zástavbě. Vegetace obsahuje vodu, a proto pohlcuje až 80 % přicházejícího slunečního záření. Má nižší odrazivost (albedo), očekávali bychom proto na slunci vyšší povrchovou teplotu trávníku než teplotu bílého plechu. Pro exaktní srovnávací měření tepelného chování různých povrchů bylo sestaveno zařízení využívající nejnovější standardizované přístroje.

## METODY

### Popis měřicího zařízení

Měřením a výpočty lze s vysokou mírou spolehlivosti popsat tepelné toky v tepelné bilanci povrchu země a vytvořit teplotní mapu určité lokality. V Domaníně u Třeboně (GPS 48.9637450N, 14.7445564E) byl vytvořen v oplocené travnaté lokalitě vodního vrtu měřicí polygon, který je od roku 2008 průběžně monitorován.

Měřicí zařízení pro dlouhodobé sledování energetických toků na zkoumaném biotopu o ploše 560 m<sup>2</sup> bylo vyvinuto a vyrobeno ve spolupráci ENKI, o.p.s. a Fakulty strojní ČVUT v Praze [5]. V intervalu 10 minut jsou zaznamenávána data ze stožáru a 4 meteorologických stanic v jeho okolí, především radiace, teplota, vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru ve výškovém profilu 30 m, doplněná o termovizní snímky v termometrickém formátu v rastru 320 × 240 pixelů, což představuje rozlišení cca 9 cm na pixel.



Obr. 2 Stožár vysoký 30 metrů vybavený měřicí technikou – celkový pohled  
Fig. 2 Mast with the height of 30 m equipped with measuring equipment – overall view

Měřicí zařízení umožňuje zaznamenat a porovnat teploty a vlhkosti na sledovaných plochách. Jsou odečítány radiční teploty jednotlivých povrchů z termogramů, měřeny teploty a vlhkosti vzduchu nad travnatými plochami a také dotykové teploty referenčních ploch. Výsledky slouží ke zhodnocení a pochopení fyzikální podstaty dějů, odehrávajících se v přízemní vrstvě atmosféry, a především k porovnání rozložení teplot a následně tepelných toků na definovaném výseku povrchu. Experimentální plochy byly vytvořeny na extenzivní louce a lišily se pouze úpravou výšky porostu po dobu experimentu, kdy nejnižší výška byla udržována na 40 mm, střední na 100 mm a poslední nebyla kosena po celý vegetační cyklus a v době měření dosahovala výšky 300 až 500 mm.

Hlavní součástí měřicího zařízení je cca 30 m vysoký stožár (viz obr. 2), vyrobený z uhlíkového kompozitu, složený ze čtyř sekcí (trub) o průměru 230 mm a délce každé 7620 mm, na koncích opatřených zesílenými patkami pro spojení čtyřmi závitovými svorníky. Čidla jsou umístěna na transportovatelném měřicím stožáru a také na výzkumné ploše, monitorované termovizní kamerou. Podstata experimentu spočívá v průběžném monitoringu sledovaného pozemku. Termovizní data jsou doplněna bodovými měřeními na kalibračních pozemních meteorologických stanicích [6]. Experiment byl popsán v [7].

Pro měření meteorologických dat ve výškovém profilu je využito členění stožáru na sekce. Čidla jsou umístěna na držácích, upevněných k přírubám, vloženým mezi jednotlivé sekce. První příruba je umístěna ve výšce 0,5 m nad terénem, další jsou ve výškách 8,1 m, 15,7 m, 23,3 m a 30,9 m. V každé sekci je měřena teplota a relativní vlhkost vzduchu čidlem v meteorologickém radiačním krytu a dále rychlost a směr větru. Na vrcholu stožáru je umístěn 4 m dlouhý krakorec s dosedací platformou pro nosič termovizní kamery. Termovizní kamera s aperturním úhlem objektivu 48 × 36° snímá zemský povrch o rozměrech 28 × 20 m.

Na vrcholu stožáru (obr. 3) je umístěn net-radiometr, který snímá dopadající i emitované dlouhovlnné záření (4,5 až 42 μm), dopadající a odražené krátkovlnné záření (0,305 až 2,8 μm) a teplotu čidel. Čidla mají aperturu 180°. Spolu s teplotou čidla slouží k výpočtu efektivní teploty oblohy a průměrné povrchové teploty vegetačního pokryvu pod stožárem. Záření, dopadající na zemský povrch označujeme kladnými hodnotami a emitované do oblohy hodnotami zápornými. Systém je doplněn o stanice, které měří standardní meteorologické veličiny ve výškách 0,3 m a 2 m, včetně směru a rychlosti větru, množství srážek, dopadající a odražené radiace. Pro měření tepelného toku do půdy (G) je ve středním porostu v hloubce 100 mm pod zemí umístěno čidlo hustoty tepelného toku.



Obr. 3 Poslední sekce stožáru s krakorcem, net-radiometrem, termovizní kamerou v krytu a meteorologickými čidly

Fig. 3 Last section of the mast with cantilever, net-radiometer, thermal imaging camera in the housing and meteorological sensors

Čidla jsou obsluhována automatickými záznamovými a řídicími jednotkami Fiedler, které v sobě zahrnují univerzální datalogger, telemetrickou stanicí s vestavným GSM/GPRS modulem, programovatelný řídicí automat a energetický zdroj, nezávislý na síti, využívající sluneční záření. Jednotka umožňuje kontinuální celoroční záznam a přenos dat na server, odkud je dostupný všem uživatelům. Pro tento experiment byla ještě instrumentace doplněna o 3 meteorologické stanice, umístěné v porostech různé výšky.

Použité senzory a vybavení:

- transportovatelný měřicí stožár,
- termovizní kamera: FLIR ThermaCAM PM 695 s objektivem A = 45°,
- net-radiometry: Kipp&Zonen CNR1,
- pyranometry: Kipp&Zonen CM3,
- čidla teploty a relativní vlhkosti: Fiedler RV 12 v meteorologickém krytu,
- čidla směru a rychlosti větru: Tlusták W2,
- teploměry odporové: Pt 100-XM,
- čidla hustoty tepelného toku: Hukseflux HFP 01.

### Průběh experimentu a zpracování měřených dat

Na měřicím polygonu v Domaníně byl založen výzkumný „záhon“ se třemi různými výškami travního porostu (viz obr. 4). Pro účel experimentu byla plocha dlouhodobě připravována. Jedna část nebyla sekána po celé vegetační období, druhá část byla posekána a mulčována cca 2 týdny před experimentem a osový pás pod krakorcem byl posekán těsně před experimentem. Tím byly získány tři plochy 9 × 30 m ve stejné lokalitě se shodnou vegetací, lišící se pouze výškou porostu. Nad nimi byl vztyčen měřicí stožár a do porostů umístěny další tři monitorovací meteorologické stanice.

Na povrch s nejnižším porostem byly na dřevěné podložky položeny referenční plochy o rozměrech 1,25 × 1,25 m (viz obr. 5), opatřené černým a bílým nátěrem se známými pohltivostmi  $\alpha = 0,95$  (černá),  $\alpha = 0,28$  (bílá) v krátkovlnné oblasti a pásmové emisivitě  $\varepsilon = 0,95$  pro tepelné záření 7,5 až 14  $\mu\text{m}$ . Referenční plochy, tvořené hliníkovými plechy tloušťky 3 mm, mají napodobovat živичný a betonový povrch a jsou opatřeny jímkami s teploměry Pt 100 pro kalibraci povrchových teplot měřených termovizní kamerou. Zkoumané plochy s různou výškou porostu, monitorovací stanice a referenční plochy z plechu se nacházejí v zorném poli objektivu termovizní kamery, umístěné na krakorcí stožáru ve výšce 30 m nad porostem. Kamera byla napájena z akumulátoru, umístěného ve stanu u paty stožáru a data (termovizní snímky v termometrickém formátu) z ní byla stahována po sériové lince v 10minutovém intervalu. Experiment probíhal od roku 2011, ale až v roce 2013 se podařilo systém odladit



Obr. 4 Celkový pohled na experimentální plochy  
Fig. 4 Overall view of the experimental plots

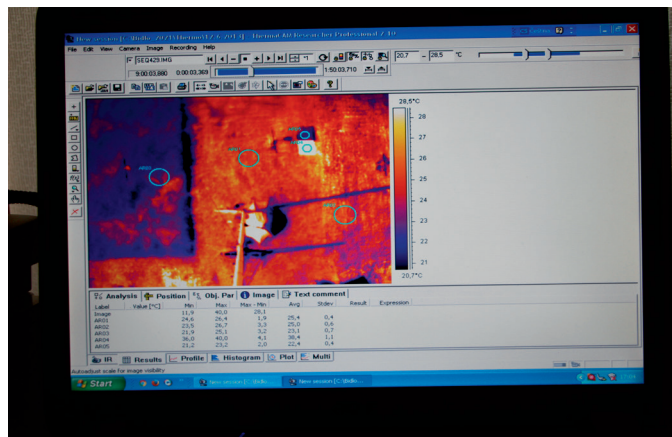


Obr. 5 Pohled na referenční plochy  
Fig. 5 View of the reference surfaces

natolik, že byl schopen poskytovat ucelené několikadenní datové řady. V blízkosti experimentálních ploch se nachází meteorologická stanice Vrt Domanín, která monitoruje tuto lokalitu od roku 2007 doposud.

Na základě měření je v příspěvku prezentováno chování jednotlivých povrchů za různých meteorologických podmínek: za jasného a oblačného dne. Předkládanými výsledky jsou hodinové průměrné hodnoty ze senzorů umístěných na stanicích, doplněné o výsledky analýzy termovizních snímků. Jedná se především o radiační povrchové teploty porostů, které byly odečteny z termogramů. Za tímto účelem byla vytvořena šablona (viz obr. 6) s kruhy o průměru přibližně 2 m umístěnými na každém měřeném porostu a kruhy o průměru 0,6 m umístěnými na referenčních plochách. V takto vymezených oblastech byly dopočítány průměrné teploty povrchu.

Naměřené teploty lze sdružit do logických skupin. První skupinu tvoří teploty vzduchu na stožáru a nad porosty, měřené ve standardních meteorologických krytech, které jsou porovnatelné s meteorologickými daty z globální sítě meteorologických stanic, např. ČHMÚ. Druhou skupinou jsou dotykově měřené teploty půdy, referenčních desek a také teplota tělesa net-radiometru. Třetí skupinu představují teploty povrchu porostů a referenčních desek, odečtené z termovizních snímků. V průběhu dne byly okrajové podmínky měření (teplota, vlhkost, teplota pozadí), určující přesnost výsledků měření termometrickou kamerou, korigovány podle



Obr. 6 Kruhové oblasti použité pro odečet radiačních teplot z termovizního snímku

Fig. 6 Circular areas used to determine radiant temperatures from the thermal image

reálně mění se meteorologické situace. Poslední skupinou jsou teploty vypočítané. Z teploty tělesa net-radiometru a měřených radičních toků v pásmu dlouhovlnného záření mezi net-radiometrem a oblohou, resp. zemským povrchem, byla podle Stefan-Boltzmannova zákona počítána ekvivalentní teplota oblohy a radiční teplota povrchu země:

$$T = \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{R}{\sigma} + T_{net}^4 \right)} \quad (1)$$

kde je:

- $R$  měřená hodnota příslušného radičního toku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],
- $T_{net}$  měřená teplota tělesa net-radiometru [K],
- $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ )
- $\varepsilon$  emisivita [-], na základě kvalifikovaného odhadu volíme hodnotu emisivity pro oblohu  $\varepsilon = 1$  a pro všechny sledované povrchy  $\varepsilon = 0,95$ .

Abychom určili pravděpodobnost orosení povrchu pyrgeometru, které by znehodnotilo měření dlouhovlnného záření, byla dopočítána teplota rosného bodu. K výpočtu teploty rosného bodu byly použity měřené teploty a relativní vlhkosti ve výšce 30 m, v které byl umístěn net-radiometr. V době uváděných měření byla vždy teplota rosného bodu nižší než teplota čidel.

## VÝSLEDKY MĚŘENÍ

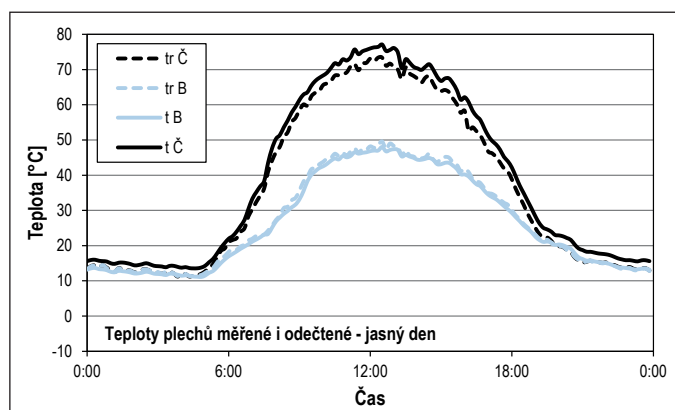
Z naměřených údajů byly vybrány dva modelové letní dny: 27. 7. 2013 – den se zcela jasnou oblohou a 24. 5. 2013 – den s oblohou pokrytou oblačností, kdy na začátku noci bylo jasno a odpoledne občas zasvítilo slunce. Oba dny jsou přibližně stejně vzdáleny od letního slunovratu a mají téměř shodnou teoretickou dobu slunečního svitu.

### Průběhy teplot

#### Porovnání měření povrchových teplot různými metodami

Při měření povrchové teploty je důležitá míra shody teplot měřených termografickou kamerou s povrchovými teplotami měřeními dotykovým teploměrem, tj. zda jsou v termovizní kameře správně nastaveny hodnoty emisivity, vlhkosti vzduchu, okolní a odražené teploty. Na obr. 7 jsou vyneseny průběhy povrchových teplot za jasného dne (kdy jsou rozdíly největší) měřené termografickou kamerou a platinovými teploměry Pt 100, uloženými v těsném kontaktu s plechy.

Rozdíly mezi dotykově měřenými povrchovými teplotami černého ( $t_{\check{C}}$ ) a bílého ( $t_B$ ) plechu a povrchovými teplotami naměřenými termografickou



Obr. 7 Teploty [°C] povrchů bílého a černého plechu za jasného dne měřené dotykově ( $t_B$ ,  $t_{\check{C}}$ ) a radiční teploty povrchů měřené termovizní kamerou ( $tr_B$ ,  $tr_{\check{C}}$ )

Fig. 7 Surface temperatures [°C] of white and black sheet metal on a clear day determined by contact measurement ( $t_B$ ,  $t_{\check{C}}$ ) and surface radiant temperatures measured by thermal imaging camera ( $tr_B$ ,  $tr_{\check{C}}$ )

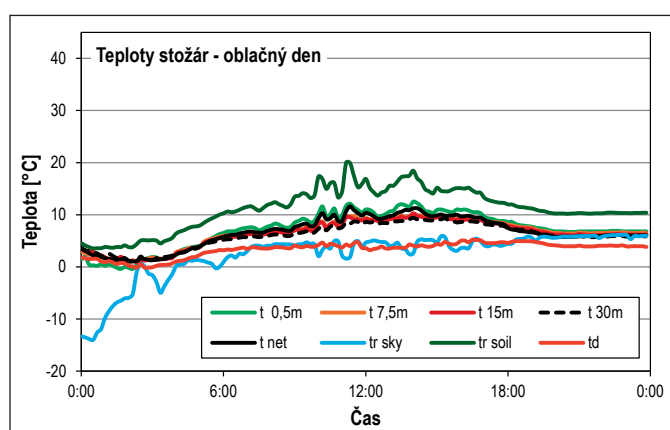
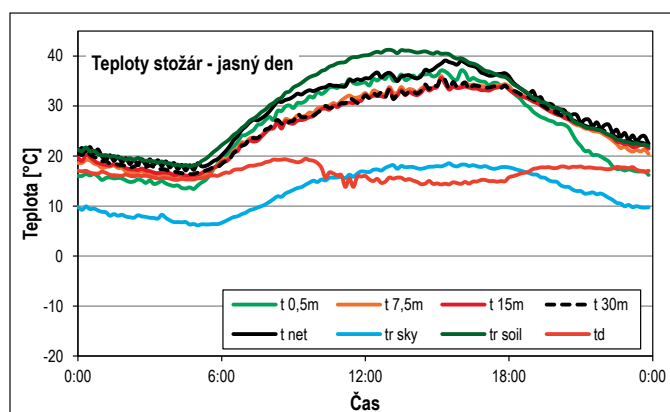
kamerou ( $tr_{\check{C}}$  a  $tr_B$ ) byly do 2 °C, byť byly měřeny odlišným způsobem. Dobrá shoda obou teplot svědčí o kvalitě termovizního měření a správném nastavení okrajových podmínek měření v softwaru termovizní kamery.

### Teploty měřené a vypočítané z čidel na stožáru

Vzhledem k tomu, že tepelné toky jsou uváděny ze stanice stožár, jsou zde pro dokreslení teplotní scény na sledované lokalitě uvedeny také průběhy teplot vzduchu, měřených standardně v meteorologickém krytu čidlem Pt 100 ve výškách 0,5, 7,5, 15 a 30 m nad zemí, doplněné o teplotu tělesa net-radiometru a vypočítanou hodnotu teploty rosného bodu, ekvivalentní teplotu oblohy a průměrnou radiční teplotu povrchu země v zorném poli radiometru. Teploty měřené na stožáru, resp. vypočítané z hodnot měřených na stožáru, jsou zobrazeny na obr. 8.

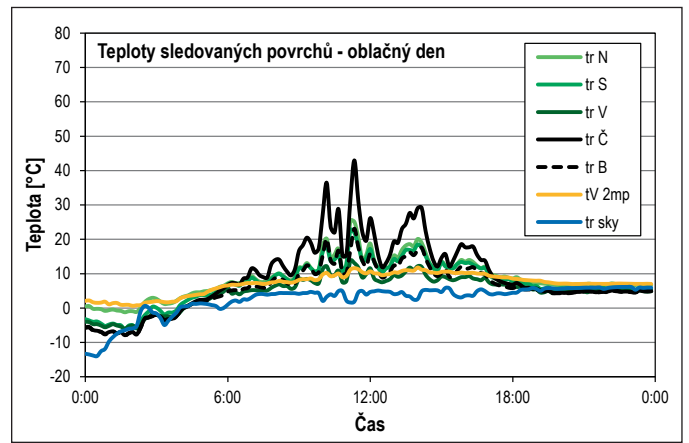
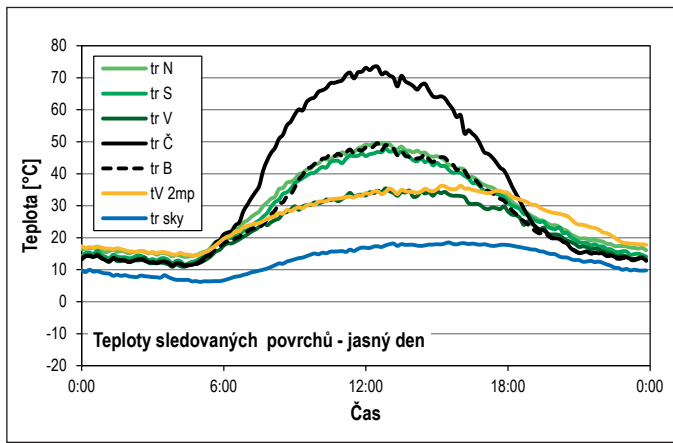
Z naměřených teplot za jasného dne vyplývá, že zemský povrch ovlivňuje teplotu vzduchu pouze v bezprostředním okolí. Od 7,5 m do 30 m byly v průběhu celého dne zaznamenány téměř shodné teploty. Oproti tomu teplota vzduchu na úrovni porostu (0,5 m) se velmi blížila radiční teplotě povrchu porostu, vypočítané podle rovnice (1). V době slunečního svitu byly teploty povrchu až o 5 °C vyšší než teploty vzduchu ve výškovém profilu stožáru.

Za jasného dne byla ekvivalentní teplota oblohy o více než 10 °C nižší než teplota půdy i než teplota vzduchu. Za oblačného počasí byly ekvivalentní teplota oblohy a teplota vzduchu celkem vyrovnané, pouze po půl-



Obr. 8 Průběhy teplot [°C] na stožáru za jasný (nahore) a oblačný (dole) dne:  $t_{0,5m}$ ,  $t_{7,5m}$ ,  $t_{15m}$ ,  $t_{30m}$  – teploty vzduchu v odpovídajících výškách;  $t_{net}$  – teplota tělesa net-radiometru;  $tr_{sky}$  – vypočítaná ekvivalentní teplota oblohy;  $tr_{soil}$  – změřená radiční teplota povrchu země;  $td$  – vypočítaná hodnota teploty rosného bodu

Fig. 8 Time courses of temperatures [°C] at the mast on clear (up) and cloudy (bottom) days:  $t_{0.5m}$ ,  $t_{7.5m}$ ,  $t_{15m}$ ,  $t_{30m}$  – air temperatures at the corresponding heights;  $t_{net}$  – net-radiometer body temperature;  $tr_{sky}$  – calculated equivalent sky temperature;  $tr_{soil}$  – measured radiant surface temperature;  $td$  – calculated dew point temperature



Obr. 9 Průběhy teplot [°C] povrchů (porostů a plechů) za jasného (vlevo) a oblačného (vpravo) dne: tr N – povrchová teplota nízkého travního porostu; tr S – povrchová teplota středně vysokého travního porostu; tr V – povrchová teplota vysokého travního porostu; tr Č – povrchová teplota černého plechu; tr B – povrchová teplota bílého plechu; tV 2mp – průměrná teplota vzduchu nad sledovanými plochami; tr sky – ekvivalentní teplota oblohy

Fig. 9 Time courses of surface temperatures [°C] (vegetation and sheet steels) on clear (left) and cloudy (right) days: tr N – surface temperature of low grassland; tr S – surface temperature of medium-height grassland; tr V – surface temperature of high grassland; tr Č – surface temperature of black sheet steel; tr B – surface temperature of white sheet steel; tV 2mp – average air temperature above the monitored areas; tr sky – equivalent sky temperature

noci byla ekvivalentní teplota oblohy výrazně nižší, což bylo způsobeno dočasným vyjasněním oblohy.

**Povrchové teploty porostů a referenčních ploch**

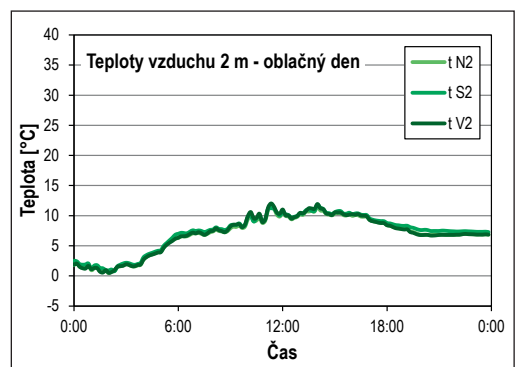
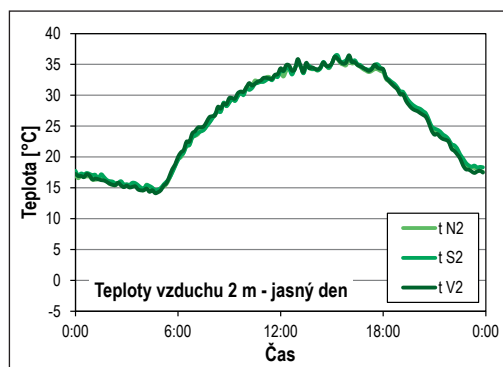
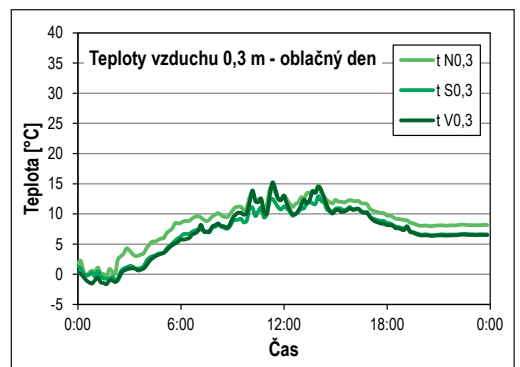
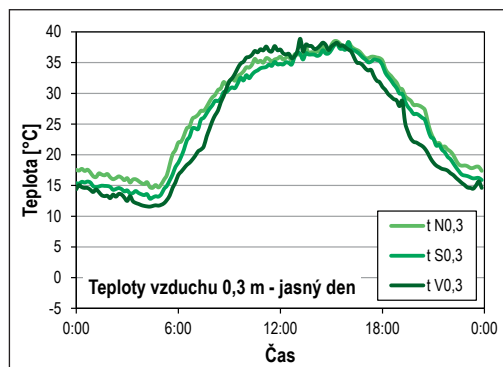
Průběhy povrchových teplot jednotlivých travních porostů (tr N, tr S, tr V) a referenčních ploch (tr Č, tr B) odečtené přes šablonu z termogramů, doplněné o průměrnou teplotu vzduchu ve výšce 2 m nad sledovanými plochami (tV 2mp) a ekvivalentní teplotu oblohy (tr sky) jsou zobrazeny na obr. 9.

razně vyšší. Vysoký porost má dostatečnou listovou plochu a ochlazuje se výparem vody z plochy listů (evapotranspirace). Průběh povrchové teploty vysokého travního porostu byl až do odpoledních hodin podobný teplotě vzduchu. Poté byla teplota vzduchu o několik stupňů vyšší, což lze vysvětlit obnovením výparu vody porostem po polední depresi.

Z porovnání radiační povrchové teploty jednotlivých travních porostů a dopočítané ekvivalentní teploty oblohy (tr sky) je patrné, že za jasného

Povrchová teplota referenčního černého plechu (tr Č) přesahovala během jasného dne po dobu několika hodin 60 °C a kolem poledne se přiblížila až k 70 °C. Naproti tomu zřetelně nejchladnější byl vysoký travní porost (tr V), u něhož byla nejvyšší denní povrchová teplota nižší než 35 °C. U vysokého travního porostu bylo zaznamenáno nejnižší denní kolísání teploty povrchu. Teploty povrchu nízkého (tr N) a středního (tr S) travního porostu byly podobné jako povrchová teplota bílého plechu (tr B) a dosahovaly denní maximální hodnoty 50 °C. Za oblačného dne se povrchové teploty všech sledovaných povrchů příliš nelišily. Výjimkou byl černý plech, který má v oblasti dopadajícího globálního slunečního záření vysokou pohltivost ( $\alpha = 0,95$ ).

Za jasného dne byly denní nejvyšší povrchové teploty nízkého a středního porostu až o 15 °C vyšší, než byla denní nejvyšší teplota vysokého porostu. Obdobný rozdíl teplot se běžně vyskytuje v městské zástavbě, kde jsou povrchové teploty osluněných suchých ploch s řídkým a krátkým porostem vý-



Obr. 10 Průběhy teplot vzduchu během jasného (a, c) a oblačného (b, d) dne nad jednotlivými porosty: t N – nízký travní porost; t S – střední travní porost; t V – vysoký travní porost; měření ve výšce 0,3 m (0,3) a 2 m (2) nad povrchem země [°C]

Fig. 10 Time courses of air temperature during clear (a, c) and cloudy (b, d) days above each experimental plot: t N – low grassland; t S – medium-height grassland; t V – high grassland; measurements at 0.3 m (0.3) and 2 m (2) above the ground [°C]

dne byla ekvivalentní teplota oblohy až o 30 °C nižší než teplota nízkého a středního porostu a až o 17 °C nižší než teplota vysokého porostu. Při zataženém obloze byly teploty porostů a oblohy podobné. Oblačnost absorbuje teplo vyzařované zemí (krajinným povrchem).

### Teplota vzduchu nad experimentálními plochami

Nad experimentálními plochami byly umístěny samostatné meteorologické stanice, které zaznamenávaly dopadající a odražené krátkovlnné (sluneční) ozáření, teplotu a vlhkost vzduchu ve výšce 0,3 m a 2 m nad povrchem země, dále směr a rychlost větru ve 2 m nad zemí. Sluneční ozáření i směr a rychlost větru byly na všech stanicích shodné. Byl vyhodnocen vliv výšky porostu na rozdíl teplot mezi oběma výškovými úrovněmi, průběhy teplot vzduchu měřených nad jednotlivými porosty jsou zobrazeny na obr. 10.

Ve výšce 0,3 m nad povrchem byly rozdíly teplot měřitelné. Teploty nad posekaným porostem byly o něco vyšší především v noci v období bez slunečního svitu, neboť jsou více ovlivněny teplotou půdy, kam proniká sluneční záření při nízké pokrývnosti listoví. Osluněná půda se ohřívá a akumuluje více tepla než půda stíněná vysokým porostem a v noci pak ohřívá přízemní vrstvu vzduchu. Je pozoruhodné, že ve výšce 0,3 m nad zemí se neprojevuje vliv vysoké radiační teploty nízkého a středního travního porostu (až 50 °C) a teplota vzduchu ve výšce 0,3 m je nad všemi třemi porosty podobná, maximálně okolo 37 °C. Ve dvou metrech nad zemí jsou již rozdíly teplot vzduchu nad porosty prakticky neměřitelné.

Ve výšce 0,3 m nad zemí je větší denní amplituda teplot vzduchu než ve výšce 2 m.

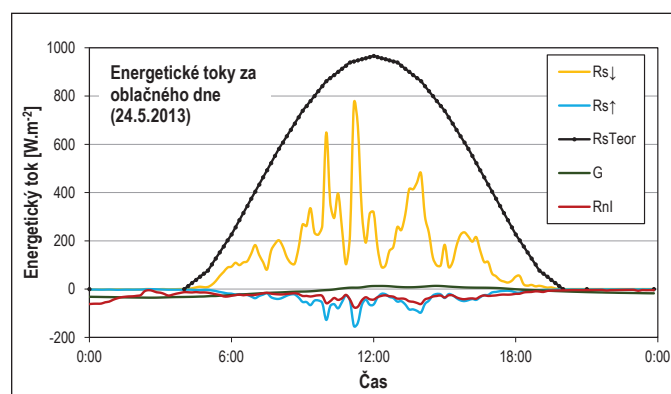
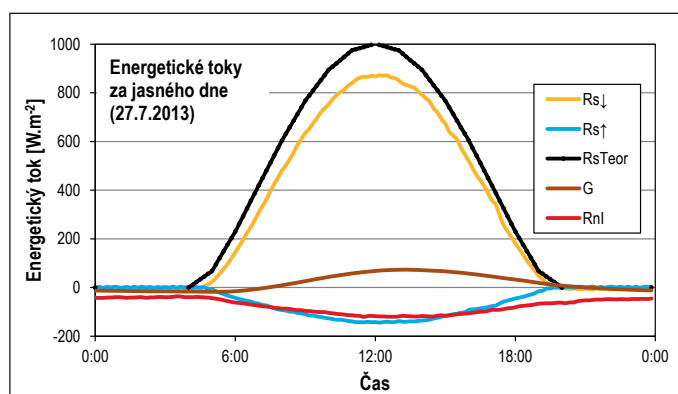
### Tepelná bilance povrchu země

#### Energetické toky naměřené na stožáru a v jeho okolí

Net-radiometrem umístěným na vrcholu stožáru ve výšce 30 m nad porosty byly měřeny jednotlivé složky radiace: krátkovlnné dopadající sluneční záření ( $R_{s\downarrow}$ ), odražené krátkovlnné sluneční záření ( $R_{s\uparrow}$ ), tepelný tok sáláním mezi radiometrem a oblohou ( $R_{l\downarrow}$ ), tepelný tok sáláním mezi radiometrem a zemským povrchem ( $R_{l\uparrow}$ ). Čidlem hustoty tepelného toku byl měřen tepelný tok do půdy ( $G$ ). Kladná hodnota toku  $G$  znamená tok z povrchu země do půdy. Čidlo bylo umístěno v hloubce 100 mm pod středně vysokým trávníkem.

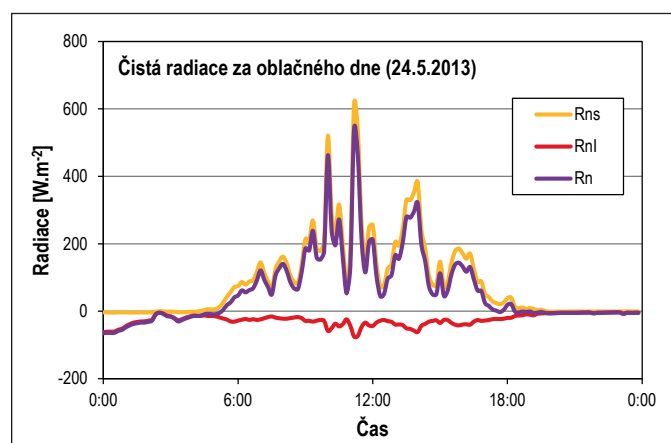
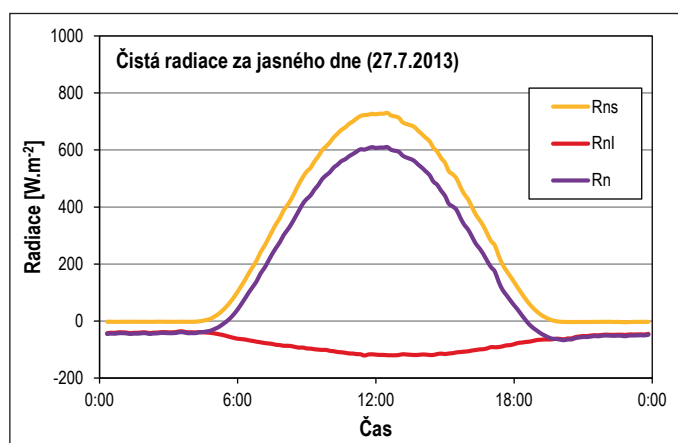
Čisté krátkovlnné záření se vypočítá jako  $R_{ns} = R_{s\downarrow} + R_{s\uparrow}$ . Čisté dlouhovlnné záření se vypočítá jako  $R_{nl} = R_{l\downarrow} + R_{l\uparrow}$ . Čisté celkové ozáření se vypočítá jako  $R_n = R_{ns} + R_{nl}$ . Pokud jsou hodnoty radiačních toků kladné, směřují směrem na povrch země. Pokud jsou hodnoty radiačních toků záporné, směřují toky z povrchu země do okolí.

V grafu na obr. 11 byly měřené hodnoty energetických toků doplněny o hodinové teoretické hodnoty slunečního záření ( $R_{sTeor\downarrow}$ ), vypočítané pro danou lokalitu podle [9], [10]. Na obr. 12 jsou vyneseny denní průběhy čistého záření, měřeného net-radiometrem na stožáru ve výšce 30 m.



Obr. 11 Denní průběh jednotlivých složek radiační bilance povrchu země za jasného (vlevo) a oblačného (vpravo) dne [ $W \cdot m^{-2}$ ]:  $R_{s\downarrow}$  – krátkovlnné záření dopadající;  $R_{s\uparrow}$  – krátkovlnné záření odražené;  $R_{nl}$  – sálání mezi povrchem země a atmosférou;  $G$  – tok tepla do půdy;  $R_{sTeor}$  – teoretická hodnota dopadajícího slunečního záření pro jasnou oblohu pro daný den

Fig. 11 Daily time course of the individual components of the radiation balance of the Earth surface on a clear (left) and cloudy (right) day [ $W \cdot m^{-2}$ ]:  $R_{s\downarrow}$  – shortwave incident radiation;  $R_{s\uparrow}$  – shortwave reflected radiation;  $R_{nl}$  – radiation between the land surface and the atmosphere;  $G$  – heat flux to the ground;  $R_{sTeor}$  – theoretical value of incident solar radiation for clear skies on a given day



Obr. 12 Denní průběh čistého krátkovlnného záření ( $R_{ns}$ ), čistého dlouhovlnného záření ( $R_{nl}$ ) a čistého celkového ozáření ( $R_n$ ) za jasného (vlevo) a oblačného (vpravo) dne [ $W \cdot m^{-2}$ ]

Fig. 12 Daily time course of net shortwave radiation ( $R_{ns}$ ), net longwave radiation ( $R_{nl}$ ) and net total irradiance ( $R_n$ ) on clear (left) and cloudy (right) days [ $W \cdot m^{-2}$ ]

Z měřených desetiminutových hodnot byly vypočítány denní dávky jednotlivých složek přicházejícího ( $\Sigma Rs_{\downarrow}$ ) a odraženého ( $\Sigma Rs_{\uparrow}$ ) krátkovlnného slunečního záření a také denní dávky dlouhovlnného záření emitovaného z povrchu země ( $\Sigma RI_{\uparrow}$ ) a z oblohy ( $\Sigma RI_{\downarrow}$ ). Vzájemné porovnání denních dávek jednotlivých složek za jasného a oblačného dne je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Denní dávky jednotlivých složek záření měřené net-radiometrem [ $Wh \cdot m^{-2}$ ] za jasného (27. 7. 2013) a oblačného (24. 5. 2013) dne, jejich rozdíly a podíly

Tab. 1 Daily doses of individual radiation components measured by the net-radiometer [ $Wh \cdot m^{-2}$ ] on clear (27. 7. 2013) and cloudy (24. 5. 2013) days, their differences and ratios

Radiační toky a tok tepla do půdy na lokalitě sožár				
$\Sigma$ za 24 hod	27. 7. 2013 jasno	24. 5. 2013 oblačno	rozdíl	poměr
	[ $Wh \cdot m^{-2}$ ]	[ $Wh \cdot m^{-2}$ ]		
$\Sigma Rs_{Teor}$	8920	8624	296	0,97
$\Sigma Rs_{\downarrow}$	7439	2664	4775	0,36
$\Sigma Rs_{\uparrow}$	-1343	-625	-718	0,47
$\Sigma RI_{\downarrow}$	-2200	-456	-1744	0,21
$\Sigma RI_{\uparrow}$	383	-151	534	-0,39
$\Sigma Rns$	6096	2040	4056	0,33
$\Sigma Rnl$	-1816	-607	-1209	0,33
$\Sigma Rn$	4280	1433	2847	0,33
$\Sigma G$	713	-259	973	-0,36

Rozdíl mezi sumou energie dopadajícího krátkovlnného záření za jasného a oblačného dne je  $7\,439 - 2\,664 = 4\,775 Wh \cdot m^{-2}$ , tj. za oblačného dne dopadlo na zemský povrch pouze 36 % energie oproti dni jasnému (viz tab. 1). Rozdíl v denní dávce tepelného sálání mezi zemským povrchem a oblohou byl naměřen  $(-1816) - (-607) = -1209 Wh \cdot m^{-2}$ , tj. za oblačného dne se do oblohy vyzáří pouze 33 % energie oproti dni jasnému. Rozdíl v energetické bilanci neboli rozdíl čisté energie však činí  $4\,280 - 1433 = 2\,847 Wh \cdot m^{-2}$ . Rozdíl mezi jasným a zataženým dnem je kompenzován především podstatně vyšším sáláním povrchu do chladné jasné oblohy o  $2\,200 - 456 = 1\,744 Wh \cdot m^{-2}$ .

**Tepelný tok sáláním z povrchu země k obloze**

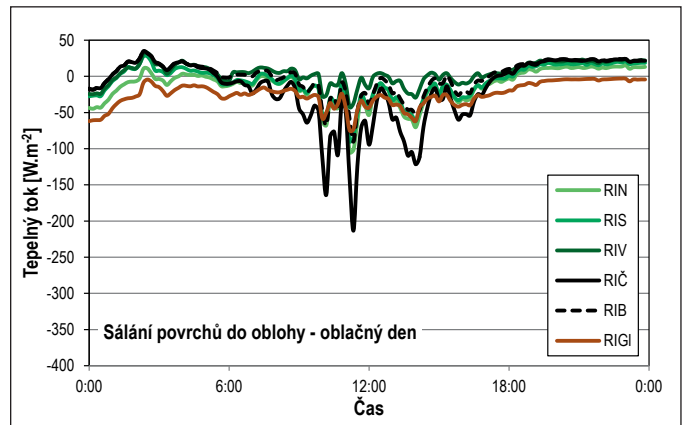
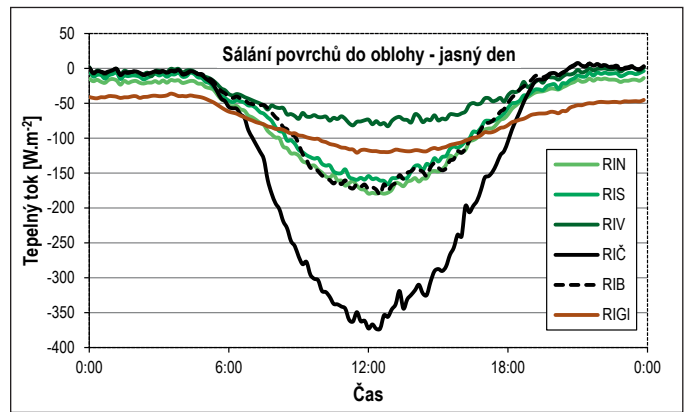
Tepelný tok sáláním mezi jednotlivými povrchy a oblohou byl vypočítán podle Stefan-Boltzmannova zákona z teplot, odečtených z termogramů a aktuální efektivní teploty oblohy:

$$RI = \epsilon \sigma Tl^4 - \sigma T_{sky}^4 \quad (2)$$

kde je:

- $RI$  sálání povrchu [ $W \cdot m^{-2}$ ],
- $Tl$  teplota povrchu odečtená z termogramu [K],
- $T_{sky}$  efektivní teplota oblohy vypočítaná z teploty radiometru a sálání mezi ním a oblohou [K],
- $\epsilon$  emisivita povrchů, která byla uvažována  $\epsilon = 0,95$  pro všechny povrchy stejně a byla nastavená shodně v termometrické kameře,
- $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

Dopočítané průběhy tepelných toků sáláním ( $RI_V$  – sálání z vysokého porostu,  $RI_S$  – sálání ze středního porostu,  $RI_N$  – sálání z nízkého porostu,  $RI_{\check{c}}$  – sálání černé desky,  $RI_B$  – sálání bílé desky,  $RI_{GI}$  – celkové sálání povrchu do oblohy) za jasného a oblačného dne jsou zobrazeny na obr. 13.



Obr. 13 Sálání [ $W \cdot m^{-2}$ ] ze sledovaných povrchů směrem k obloze za jasného (nahore) a oblačného (dole) dne:  $RI_V$  – sálání z vysokého porostu;  $RI_S$  – sálání ze středního porostu;  $RI_N$  – sálání z nízkého porostu;  $RI_{\check{c}}$  – sálání černé desky;  $RI_B$  – sálání bílé desky;  $RI_{GI}$  – celkové sálání povrchu

Fig. 13 Radiation [ $W \cdot m^{-2}$ ] from the investigated surfaces towards the sky on clear (up) and cloudy (bottom) days:  $RI_V$  – radiation from high vegetation;  $RI_S$  – radiation from medium-height vegetation;  $RI_N$  – radiation from low vegetation;  $RI_{\check{c}}$  – black plate radiation;  $RI_B$  – white plate radiation;  $RI_{GI}$  – total surface radiation

Dopočítané denní dávky tepla vyzářeného z jednotlivých experimentálních povrchů směrem k obloze za jasného a oblačného dne jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Denní dávky tepla [ $Wh \cdot m^{-2}$ ] vyzářeného z povrchů do oblohy za jasného a oblačného dne

Tab. 2 Daily amount of heat [ $Wh \cdot m^{-2}$ ] radiated from surfaces into the sky on a clear and cloudy days

Plocha	27. 7. 2013 jasno	24. 5. 2013 oblačno
	[ $Wh \cdot m^{-2}$ ]	[ $Wh \cdot m^{-2}$ ]
$\Sigma RI_V$ – vysoký porost	-867	121
$\Sigma RI_S$ – střední porost	-1577	-156
$\Sigma RI_N$ – nízký porost	-1825	-305
$\Sigma RI_{\check{c}}$ – černý plech	-3159	-399
$\Sigma RI_B$ – bílý plech	-1518	4
$\Sigma RI_{GI}$ – celkem porost	-1816	-596

Během jasného dne se z vysokého trávníku vyzáříla přibližně polovina tepla oproti trávníku pokosenému, přičemž nebyl zásadní rozdíl mezi

nízkým a středním porostem. Projevilo se to především za jasného dne při teplotách vzduchu nad 30 °C, kdy teploty posekaného porostu dosahovaly až 50 °C, zatímco teplota vysokého (nesekaného) porostu se držela v blízkosti teploty vzduchu, i když byla špičkově ozářena až 800 W·m<sup>-2</sup>. Za jasného dne vyzářila referenční plocha z bílého plechu obdobné množství tepla jako pokosený trávník. Referenční plocha z černého plechu vyzářila za jasného dne o 70 % víc ve srovnání s plechem bílým.

Cílem práce bylo srovnání povrchové teploty fyzikálních povrchů (bílého a černého plechu) s travním porostem různé výšky. Oproti očekávání na základě odrazivosti (albedo) měl nejnižší povrchovou teplotu vysoký trávník, nikoli bílý plech. Vysoký trávník se chladí výparem vody, evapotranspirací. Experiment byl uspořádán tak, aby sledované plochy byly v zorném poli termovizní kamery umístěné na stožáru ve výšce 30 m. Plochy jednotlivých variant trávníku byly příliš malé pro výpočet rychlosti evapotranspirace některou z nepřímých metod, jako je metoda podle [2] nebo metoda Bowenova poměru [12]. Z vlastních měření evapotranspirace i z literárních údajů [13], [14] lze počítat se střední hodnotou rychlosti evapotranspirace 100 mg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, což odpovídá toku latentního tepla výparu 240 W. Maximální hodnoty evapotranspirace naměřené v travním porostu s vysokou hladinou podzemní vody dosahovaly 500 W·m<sup>-2</sup>. Pokud není porost dostatečně zásoben vodou nebo pokud má porost malou listovou plochu, je evapotranspirace nízká, porost se přehřívá, jako tomu bylo u kosených variant trávníku.

## ZÁVĚRY

Za jasného slunečného dne dosahovala povrchová teplota černého plechu hodnoty 60 až 70 °C. Povrchová teplota bílého plechu dosahovala až 50 °C, podobně jako nízký (40 mm) a středně vysoký (100 mm) travní porost. Nekosený travní porost o výšce 300 až 500 mm měl nejvyšší povrchovou teplotu výrazně nižší (maximálně 35 °C), srovnatelnou s teplotou vzduchu měřenou ve výšce 2 m nad povrchem. Vysoký travní porost vykazoval též nejnižší denní kolísání teplot.

Za oblačného dne se povrchové teploty všech sledovaných povrchů příliš nelišily, kromě černého plechu, jehož povrchová teplota byla poněkud vyšší a reagovala i na nevelké zvýšení difuzního ozáření.

Rozdílem teplot travního porostu, lišícího se pouze svojí výškou, se prokázal zásadní vliv výparu vody vegetací (evapotranspirace) na povrchovou teplotu. Vegetace musí pokrývat celý povrch terénu.

Standardní měření teploty a vlhkosti vzduchu, která se provádějí na meteorologických stanicích ve výšce 2 m, nemají žádnou vypovídací hodnotu o vlivu porostu na redistribuci dopadající sluneční energie na povrchu země. Bez termovizních leteckých snímků se při posuzování vlivu porostů a vlhkosti na místní klima neobejdeme.

Zásadní význam pro teploty má ovšem množství přicházející sluneční energie, které je v určitém datu (sezóně) dáno vlhkostí vzduchu a oblačností, která současně ovlivňuje tok tepla do atmosféry, tedy skleníkový efekt.

Kontakt na autora: jirka@enki.cz

## Použité zdroje:

- [1] GEIGER, R., ARON, R. H., TODHUNTER, P. *Climate near the Ground (Sixth Edition)*. Rowman Littlefield Publishing Group, 2003.
- [2] MONTEITH, J. L. *Principles of Environmental Physics*. London: Edward Arnold Ltd, 1973.

- [3] TRENBERTH, K. E. *The Changing Flow of Energy Through the Climate System* [online]. Cambridge University Press: 2022. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/books/changing-flow-of-energy-through-the-climate-system/F6DEF9F0033FCD43398BFA9A2B-F64FAD>
- [4] ARYA, S. P. *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, 2001.
- [5] JIRKA, V., ZICHA, J. PV 303 151. *Zařízení pro měření energetických toků na rozhraní zemského povrchu a atmosféry*. Patent, 31. 3. 2012.
- [6] JIRKA, V., POKORNÝ, J., BÍLA, J., ZICHA, J. PV 303 245. *Způsob zjišťování energetických toků v přízemní vrstvě atmosféry a systém k provádění tohoto působu*. Patent, 2. 5. 2012.
- [7] JIRKA, V., ZICHA, J., ŠOUREK, B. *Transportabilní terénní stanice na měření teplot a energetických toků na rozhraní země – atmosféra. Strojař*. 2011, ročník XX., dvojčíslo 3, 4. ISSN 1213-0591.
- [8] JIRKA, V., POKORNÝ, J. *Energetická bilance slunečního záření dopadajícího na zemský povrch. Vytápění, větrání, instalace*. 2013, 4, 184–188.
- [9] MATUŠKA, T. *Solární tepelné soustavy 1*. Společnost pro techniku prostředí, odborná sekce alternativní zdroje energie, 2009.
- [10] JIRKA V., HESSLEROVÁ, P., HURYNA, H., POKORNÝ, J. *Energetická výměna mezi zemským povrchem a atmosférou v závislosti na meteorologických podmínkách bez ohledu na obsah CO<sub>2</sub>. Vytápění, větrání, instalace*. 2021, 5, 234–239.
- [11] HESSLEROVÁ, P., POKORNÝ, J., HURYNA, H., HARPER, D. *Wetlands and Forests Regulate Climate via Evapotranspiration*. In: *S.An, J.T.A. Verhoeven (eds.) Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use, Ecological Studies 238*, 2019. pp. 63–93.
- [12] POKORNÝ, J. *Evapotranspiration*. 2019. In: *Fath, B.D. (editor in chief) Encyclopedia of Ecology, 2nd edition*. Vol. 2, pp. 292–303. Oxford: Elsevier B.V, 2019.
- [13] POKORNÝ, J., BROM, J., ČERMÁK, J., HESSLEROVÁ, P., HURYNA, H., NADEZHDINA, N., REJŠKOVÁ, A. *Solar energy dissipation and temperature control by water and plants*. *Int. J. Water*. 2010, Vol 5, No 4, 311–336.
- [14] HURYNA, H., BROM, J., POKORNÝ, J. *The importance of Wetlands in the energy balance of an agriculture landscape*. *Wetlands Ecol Management*, 2014. 22. 363–381, DOI 10.1007/s11273-013-9334-2.