

Ing. Vladimír JIRKA, CSc.
RNDr. Jan POKORNÝ, CSc.
ENKI, o. p. s., Třeboň

Energetická bilance slunečního záření, dopadajícího na zemský povrch

Energy Balance of Solar Radiation Falling on Earth Surface

Recenzent

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

Při dopadu na zemský povrch se část slunečního záření odrazí zpět, ale podstatná část energie je přeměněna na zjevné teplo, ohřev porostu, ohřev půdy, evapotranspiraci (změna skupenství vody) a fotosyntézu. Část energie se vyzáří v dlouhodobé tepelné složce zpět do prostoru. V příspěvku jsou popsány a kvantifikovány jednotlivé složky v závislosti na biotopu, tedy přírodních podmínkách, které vytváří člověk. Jsou také uvedeny metody měření a porovnány energetické bilance ve volné a urbanizované krajině.

Klíčová slova: sluneční energie, evapotranspirace, radiační bilance

Authors are engaged in the energy fluxes from solar radiation during its conversion on the earth surface in the dependence on the type of the environment, in their article. Authors demonstrate different methods (direct, indirect), used for the energy fluxes quantification. In the results is indicated which methods of the landscape sustainability affect the local climate positively and which negatively.

Key words: solar energy, evapo-transpiration, radiation balance

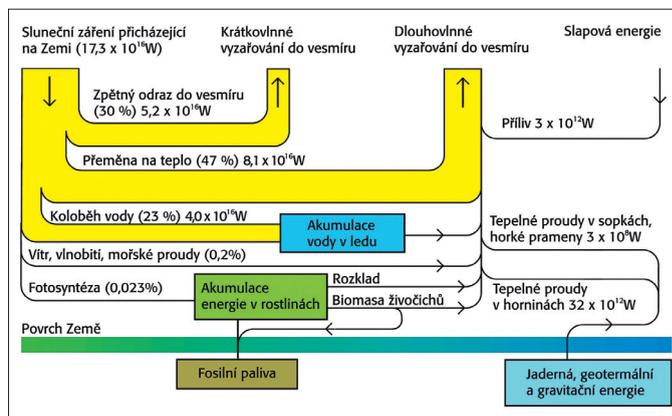
ÚVOD

Množství sluneční energie, které dopadá na plochu jednoho m^2 horní vrstvy atmosféry Země, orientovanou kolmo ke slunečním paprskům je známé a pohybuje se v rozmezí od 1438 W/m^2 do 1345 W/m^2 v závislosti na okamžité vzdálenosti Země od Slunce, která jej obíhá po eliptické dráze. Země dostává pouhou dvoumiliardtinu z celkové zářivosti Slunce ($180\,000 \text{ TW}$). Z toho se asi $1/3$ odráží. Celková bilance sluneční energie přicházející na Zemi je schematicky znázorněna na obr. 1. Toto známé schéma popisuje rozdělení slunečního záření na celé Zemi, tedy v oceánech i na pevnině.

Celé lidstvo využívá pro svoje potřeby (otop, doprava, výroba, potraviny) přibližně 10 TW , z toho potrava tvoří asi $0,6 \text{ TW}$. Potřebný energetický příkon je čerpán převážně z fosilních paliv, která vznikala za miliony let vázaním sluneční energie fotosyntézou s účinností nižší než jedno procento. Sluneční záření, které přichází na zemský povrch, se částečně odráží, částečně ohřívá povrch země a od něj se ohřívá vzduch, který proudí vzhůru (zjevné teplo). Část energie se spotřebuje na výpar vody (latentní teplo, skryté teplo) a část přechází do země (tok tepla do podloží). Fotosyntéza a ohřev porostu spotřebovávají velmi nízký podíl sluneční energie ve srovnání s odrazem, výparem vody a zjevným teplem.

Voda odráží pouze asi 10% záření, vegetace přibližně 20% , zastavěné plochy a betonový povrch 25 až 30% . Zásadní význam mají dva toky energie, jejichž poměr závisí na množství dostupné vody – zjevné teplo a latentní teplo výparu vody. Suchý povrch se pohlcovanou sluneční energií ohřívá a od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch, který stoupá vzhůru – v meteorologické budce zaznamenáváme vzestup teploty (zjevné – citelné teplo). Vlhký povrch, listy rostlin se ohřívají méně – sluneční energie se spotřebovává na výpar vody (latentní teplo).

V krajině zásobené vodou a pokryté vegetací se podstatná část slunečního záření spotřebovává na výpar vody. Rostliny totiž vypařují vodu přes průduchy (transpirace) a voda se vypařuje též přímo z půdy (evaporace). Výpar vody porostem se proto nazývá evapotranspirace. Rostlinami a půdou se z metru čtverečního za den odpaří až několik litrů vody. Na výpar jednoho litru vody o teplotě 20°C se spotřebuje $2,45 \text{ MJ} \approx 0,68 \text{ kWh}$ sluneční energie. Při odpaření 5 litrů se tedy do vodní páry váže $3,4 \text{ kWh}$, více než polovina dopadající sluneční energie. Sluneční energie vázaná ve vodní páře ve formě skupenského tepla se potom opět uvolní při kondenzaci vodní páry, a to na chladných místech, na kterých se vodní pára



Obr. 1 Energetická bilance planety Země

sraží. Vázání sluneční energie výparem vody na místech s nadbytkem energie a uvolňování sluneční energie na místech chladných při kondenzaci vody je podstatou dokonalé přirozené klimatizace realizované vodou a rostlinami. Na pouhém jednom metru čtverečním může činit v létě rozdíl mezi energií vázanou ve vodní páře a energií uvolněnou jako teplo i několik kWh za den. Toky sluneční energie vázané při evapotranspiraci dosahují tedy až několika set wattů na m^2 .

Ekologie se zabývá zejména energií, která se využívá k fotosyntéze, tedy ke tvorbě rostlinné biomasy, která je primárním zdrojem potravy (energie) v potravních řetězcích. Fotosyntézou se ovšem do biomasy rostlin váže jen velmi málo sluneční energie (méně než 1%). Hlavním procesem přeměny sluneční energie v porostech není fotosyntéza, ale evapotranspirace, která účinně vyrovnává teplotní rozdíly v čase (mezi dnem a nocí) a v prostoru (mezi místy). Tomu odpovídá i poměr molekul přijímaného oxidu uhličitého a odpařované vody. Počet molekul vody, které rostlina přes průduchy odpařuje je o dva řády vyšší než počet molekul oxidu uhličitého, které rostlina průduchy přijímá. Sluneční energie se rozděluje zejména do následujících toků: odraz, zjevné teplo, latentní teplo výparu, tok tepla do půdy a vyzařování v infračervené oblasti. Je zřejmé, že distribuce sluneční energie v krajině s bohatou vegetací a vodou se liší od distribuce v krajině suché. Extrémními příklady jsou pouště na straně jedné a deštné lesy na straně druhé. Pouště se vyznačují vysokými denními amplitudami teplot, kdy ráno teploty klesají pod bod mrazu a odpoledne stoupají nad 40°C . Člověk obhospodaruje většinu plochy kontinentů, krajina se vysušuje a přichází o trvalou vegetaci.

Podle statistik OSN (FAO) se mění v poušti ročně na 60 000 km² pevniny a na 200 000 km² pevniny ztrácí vodu tak, že se nehodí k zemědělské produkci. Klimatická změna je podle Mezivládního panelu pro klimatickou změnu (Intergovernmental panel on Climate Change – IPCC 2007) působena zvyšujícím se skleníkovým efektem následkem zvyšující se koncentrace skleníkových plynů. Materiály připravované na konferenci států o klimatu (Copenhagen 2009) i pozdější doporučení IPCC se soustředily pouze na snižování emisí skleníkových plynů a nezabývaly se přímým efektem odvodnění a odstraňování vegetace na klima. Zvýšené koncentrace skleníkových plynů přitom podle IPCC působí změnu 1 až 3 W/m² (radiative forcing od roku 1750), odvodnění a odstranění vegetace působí změnu v řádu stovek wattů na m².

ENKI, o.p.s. se zaměřila na vývoj metody kvantitativního zhodnocení distribuce sluneční energie v krajině, která slouží k porovnání hlavních toků sluneční energie v různých typech krajiny a kvantitativně hodnotí, jak hospodářské zásahy člověka mění hlavní toky sluneční energie. V příspěvku je uveden nástin metody a výsledků, které názorně ukazují, že toky sluneční energie lze kvantifikovat i přes jejich dynamiku.

TEORIE

Ze zákona zachování energie musí i na zemském povrchu, jak je znázorněno na obr. 2, pro energetické toky platit:

$$R_s = R_{net} + \alpha \quad (1)$$

$$R_{net} = H + LE + G + IR + J + P \quad (2)$$

kde je

R_s záření, dopadající na zemský povrch ze Slunce (0,3–2,8 μm) [W/m²]

α odražené záření od zemského povrchu (0,3 až 2,8 μm) [W/m²]

IR radiační výměna mezi zemským povrchem a oblohou (4,5 až 42 μm) [W/m²]

R_{net} celková radiační bilance [W/m²]

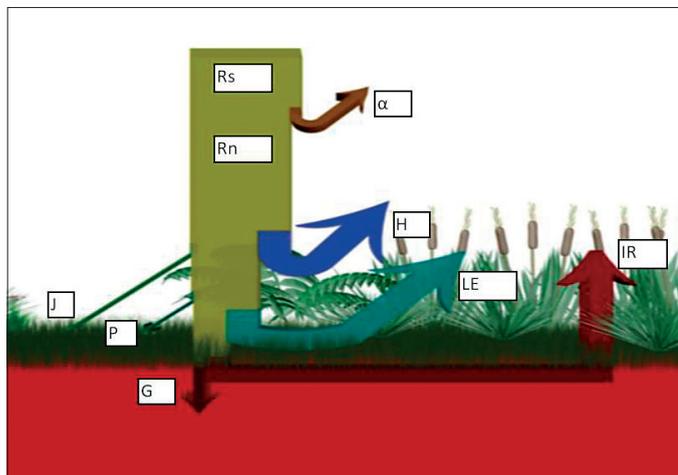
G tok tepla do půdy [W/m²]

LE tok latentního tepla výparu [W/m²]

H turbulentní tok tepla (zjevné teplo) [W/m²]

P energetický tok pro fotosyntézu [W/m²]

J tok tepla na ohřev porostu povrchu [W/m²]



Obr. 2 Energetické toky na povrchu Země

Vzhledem k velmi nízkému podílu fotosyntézy P a ohřevu povrchu J na využití sluneční radiace (do 1 %), jsou tyto dva členy obvykle zanedbány a rovnice energetické bilance stanoviště se zjednodušuje do tvaru

$$R_{net} = H + LE + G + IR \quad (3)$$

Jedná se o základní energetickou bilanci – osud energie dopadajícího slunečního záření na lokalitu v okolí kalibračního bodu – meteorologické stanice. Z těchto energetických toků některé dokážeme měřit přímo a některé zjišťujeme zprostředkovaně na základě změřených souvisejících fyzikálních veličin a pomocí následných výpočtů.

Externím projevem výše popsaných energetických toků je potom teplota povrchu T_{ground} , tzn. veličina, kterou lze monitorovat pomocí prostředků dálkového průzkumu Země (DPZ). Na základě teplotní mapy povrchu, znalosti povrchu a výsledků z kalibračních stanic potom lze s dostatečnou přesností odhadnout (vypočítat) energetické toky i mimo kalibrační body.

Stanovení R_{net} – krátkovlnné radiační bilance

Pomocí pyranometrů je měřeno přímo celkové sluneční záření R_s (0,3 až 2,8 μm) dopadající kolmo na zemský povrch ze Slunce a odražené sluneční záření α od zemského povrchu. Rozdíl těchto energetických toků je definován jako krátkovlnná radiační bilance R_{net} .

Stanovení IR – tepelné výměny mezi zemským povrchem a oblohou

Pro stanovení tepelné bilance zemského povrchu vůči obloze IR , je použita kombinovaná metoda měření a následného výpočtu pomocí Stefan-Boltzmannova zákona, kdy se v prvním přiblížení předpokládá, že snímané objekty jsou absolutně černá tělesa (jejich emisivita $\varepsilon = 1$ a je konstantní pro všechny vlnové délky λ).

Zářivý energetický tok v infračervené oblasti je dán dvěma teplotami: teplotou povrchu a teplotou oblohy. Teplotu zemského povrchu lze měřit přímo, průběžně a pomocí prostředků DPZ i plošně. Pro zjištění teploty oblohy byly některé meteorologické stanice vybaveny NET radiometrem, který je schopen měřit jak krátkovlnnou (0,3 až 2,8 μm), tak infračervenou (4,5 až 42 μm) radiaci.

Stanovení G – toku tepla do půdy

Tok tepla do půdy G lze měřit přímo půdními radiometry nebo výpočtem toku z měření teplot a vlhkosti pro určení tepelné vodivosti v definované hloubce. V současnosti jsou v povrchové vrstvě do 100 mm měřeny teploty po 10 mm a dále ve 200 a 250 mm a vypočtené hodnoty jsou konfrontovány s radiometrickými.

Stanovení LE – toku latentního a tepla výparu turbulentního (zjevného) tepla

Evapotranspiraci LE a její intenzitu určujeme různými metodami, které lze rozdělit na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody patří využití lyzimetrů a výparoměrů, mezi nepřímé pak řada mikrometeorologických metod, ze kterých se nejčastěji používají: energetická bilance stanoviště a metoda vířivé kovariance.

POUŽÍVANÁ TECHNIKA

V rámci monitorování a výzkumu energetických toků v krajině je využívána řada prostředků a zařízení pro měření a vyhodnocování.

Pozemní kalibrační meteorologické stanice

Pozemní meteorologické stanice (viz obr. 3) jsou vybaveny senzory, které umožňují popsat energetické toky v měřené lokalitě. V intervalu 10 minut jsou monitorovány a zapisovány následující veličiny: teplota a vlhkost vzduchu ve dvou výškových úrovních, dopadající a odražená globální radiace slunečního záření v oblasti krátkovlnné (0,3 až 2,8 μm), půdní vlhkost, srážky, směr a rychlost větru ve výšce 2 m, 10 teplot půdy – do 100 mm měřeny teploty po 10 mm (viz obr. 4) a ve 200 a 250 mm. Na některých lokalitách je také monitorován atmosférický tlak a dopadající a odražená radiace v IR oblasti (4,5–45 μm) spolu s teplotou čidla. Data jsou automatic-



Obr. 3 Pozemní kalibrační stanice s NET radiometrem



Obr. 4 Měření půdního teplotního profilu

ky předávána 3x za den prostřednictvím GPRS sítě na server, kde jsou k dispozici všem řešitelům projektu.

Mobilní měřicí a kalibrační stožár

Mobilní měřicí stanice (viz obr. 10) umožňuje provázat data „bodových“ měření z pozemních stanic s teplotní mapou celé lokality, získanou jejím zobrazením germaniovou optickou soustavou na maticový bolometrický nechlazený detektor termovizní kamery, pracující ve spektrální oblasti 7 až 14 μm . Velkou výhodou systému je kontinuální monitoring a tím postižení dynamiky jevů, probíhajících na měřené lokalitě. Jedná se o plně autonomní pracoviště, které k doposud měřeným datům přidává data další, jiným způsobem nezměřitelná. Příkladem jsou výškové rozložení teploty, relativní vlhkosti a rychlosti větru, jehož vliv na odpařování vody (z energetického hlediska jeden z klíčových jevů, který v přírodě probíhá) je velice významný. Sensory jsou doplněny o NET radiometr (teplota čidla, infračervené a viditelné zření oblohy a porostu) a obsahuje také termovizní snímek sledované plochy, který je zaznamenáván ve stejném časovém intervalu (10 min). Čidla jsou umístěna na držácích, které jsou upev-

něny k přírubám, vloženým mezi jednotlivé sekce. 1. příruba je umístěna ve výšce 0,5 m nad terémem, další příruby jsou ve výškách 8,1, 15,7, 23,3 a 30,9 m. Na každé sekci jsou měřeny teplota a relativní vlhkost v meteorologickém radiálním krytu a rychlost a směr větru. Na vrcholu stožáru je umístěn krakorec, který nese dosedací platformu pro nosič termovizní kamery a fotoaparátu, které lze během několika desítek sekund spustit nebo vytáhnout operátorem do pracovní polohy. Pro určení komplexní meteorologické a energetické situace je systém doplněn o stanici měřící standardní meteorologické podmínky ve výškách 0,3 a 2 m, s měřením směru a rychlosti větru, záznamem množství srážek, dopadající a odraženou radiací. Pro výpočet energetického toku do půdy je měřeno 8 hodnot teplot v půdním profilu a vlhkost půdy.

Vzducholoď

Ve spolupráci ČVUT v Praze s Airship.com a ENKI, o.p.s. byla vyvinuta vzducholoď délky 8 m o průměru 2,5 m plněná heliem (viz obr. 5), schopná letu po předem naprogramované dráze. Vzducholoď je vybavena inerciální měřicí jednotkou pro přímé měření úhlu náklonu a zrychlení vzhledem k souřadné soustavě gondoly ve všech směrech, přesným výškoměrem, krátkovlnnými pojítky s dosahem min. 10 km a GPS navigací. Pracovní rychlost s akumulátory a elektrickými motory je 5 m/s, operační výška do 1000 m a maximální výdrž ve vzduchu 30 min. Na gondole vzducholodi je umístěn gravitační závěs (viz obr. 6), který je vyvážen tak, aby směřoval vždy kolmo na zemský povrch. Na něm je upevněna termovizní kamera FLIR THERMACam PM 695 a fotoaparát, ovládané společným triggerem, odvozeným od dopředné rychlosti vzducholodi.



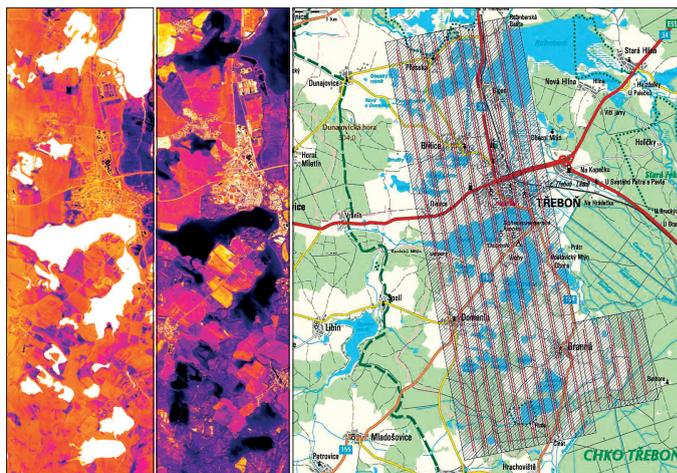
Obr. 5 Vzducholoď délky 8 m plněná heliem



Obr. 6 Gravitační závěs s termovizní kamerou a fotoaparátem



Obr. 7 Cessna TU 206 F



Obr. 9 Ranní a odpolední teplotní mapa Třeboňska a náletové osy



Obr. 8. Termovize FLIR SC 645 na gyroskopickém závěsu v Piperu Chieftain



Obr. 10 Celkový pohled na měřicí stožár

Letadla

Pro vypracování IR mapových podkladů větších ploch řádu 10 km² byla ve spolupráci se společností ArgusGeo s.r.o. vypracována metodika velkoplošného leteckého termovizního snímkování. Výsledky poskytují komplexní ucelený obraz o sledované lokalitě a s její pomocí jsou určována místa pro podrobnější pozorování. Byly využity zkušenosti pracovníků a technické vybavení společnosti ArgusGeo s.r.o., která se specializuje na pořizování snímků ve viditelné a blízké IR oblasti, ze kterých následně vytváří ortofotomapy. Byla využita letadla: Cessna TU 206 F (viz obr. 7) a Piper Chieftain a termovizní kamery FLIR (viz obr. 8) společnosti ENKI, o.p.s.

VÝSLEDKY

Teplotní mapy Třeboňska

Výsledkem náletu jsou potom složené teplotní mapy zájmové plochy, vytvořené složením termovizních snímků, získaných z jednotlivých náletových os (viz obr. 9). Vzhledem k tomu, že teplota je projevem stavu povrchu v daném okamžiku, teplotní mapa poskytuje mnoho cenných informací.

Výsledky měření ze stožáru

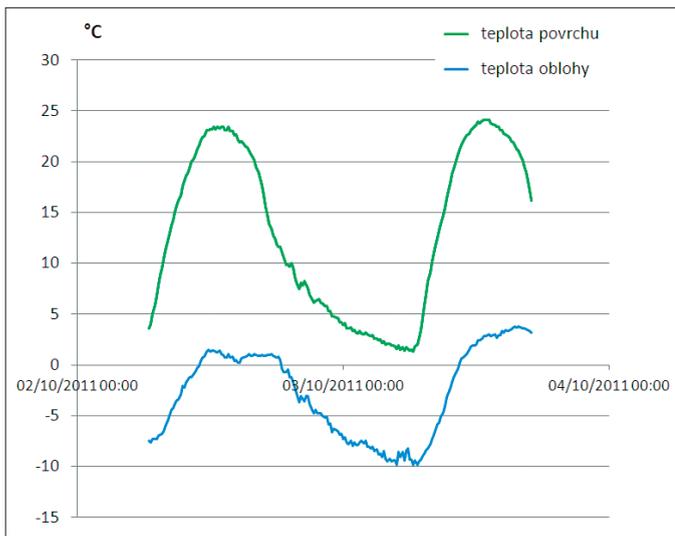
Pro experiment byla vybrána zatrávněná oplocená plocha vodního zdroje obce Domanín (viz obr. 11) u Třeboně. Pro účel experimentu byla plocha dlouhodobě připravována. Levá část nebyla udržována a sečena po celé vegetační období. Pravá část byla posečena a zmulčována cca 2 týdny před experimentem a osový pás pod krakorcem byl posekán těsně



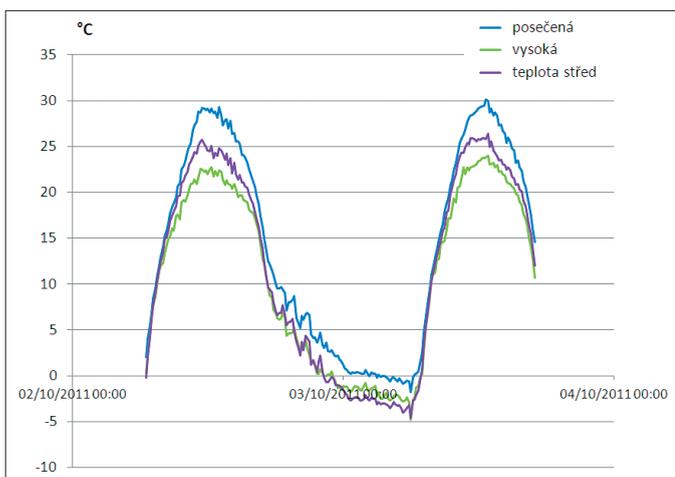
Obr. 11 Připravená měřicí plocha v lokalitě Domanín

před experimentem. Tím byly získány tři plochy na stejné lokalitě se shodnou vegetací, lišící se pouze výškou porostu. Pod krakorcem na ose byly umístěny dvě kalibrační tabule Al plechu o velikosti 1,25 x 1,25 m, jedna černá a druhá bílá, s barvou o známé emisivitě $\epsilon = 0,96$. Příklady naměřených hodnot teploty (°C) a radiace (W/m²) jsou uvedeny na obr. 12 až 15.

Pro kontrolu byly porovnány hodnoty naměřených radiací ze dvou NET radiometrů, které se nacházely v sousedství na stejné lokalitě, vzdálené od sebe cca 20 m. Jeden z NET radiometrů byl ve výšce 2 m (značeno



Obr. 12 Vypočítaná radiční teplota oblohy a porostu z NET radiometru na stožáru



Obr. 13 Odečtené z termovizních snímků radiční teploty travního porostu různé výšky

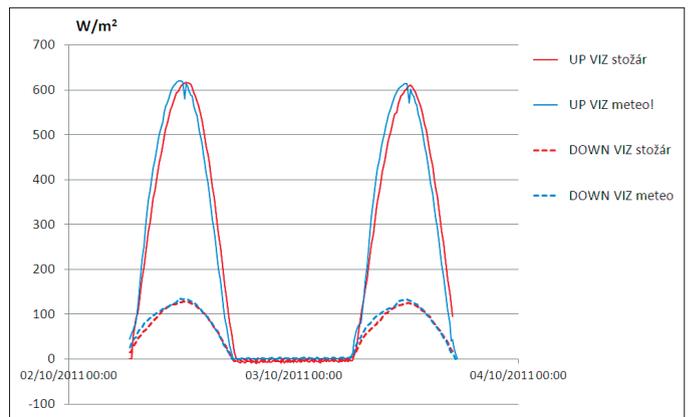
meteo) a nebyl vyhříván. Druhý radiometr, vyhříváný, byl na stožáru ve výšce 30 m nad porostem (značeno stožár NET). NET radiometr představuje dva páry radiometrů, orientovaných kolmo do země a do nadiru, umístěných na horizontálním držáku známé měřené teploty T_{pyr} . Jeden pracuje v krátkovlnné oblasti (0,3 až 2,8 μm , značeno VIZ), druhý v infračervené oblasti (4,5 až 42 μm , značeno IR). Hodnoty krátkovlnných radiací vykazují velmi dobrou shodu (viz obr. 14), v dlouhovlnné – tepelné oblasti byly naměřeny značné rozdíly, především v nočním období (viz obr.15).

Vzhledem k tomu, že na stanicích jsou monitorovány také vlhkosti, pro kontrolu byly ještě dopočítány teploty rosných bodů T_a , (viz obr. 16) které vysvětlily rozdíly v tepelných tocích – úbytek signálu byl způsoben orosením IR nevyhříváného radiometru na meteostanici.

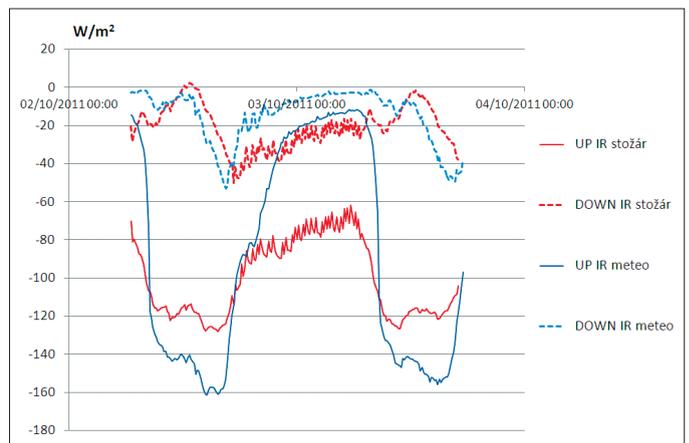
ZÁVĚR

Člověk svým hospodařením zásadně mění distribuci sluneční energie a oběh vody v krajině, a tím tedy i místní klima a kvalitu odtékající vody. Toky energie a látek v krajině je proto nezbytné monitorovat, neboť pouze jejich znalost umožňuje hodnotit, do jaké míry je hospodaření v krajině udržitelné. Kritériem udržitelnosti jsou vyrovnané teploty, vyrovnaný odtok vody a nízký obsah rozpuštěných látek v odtékající vodě.

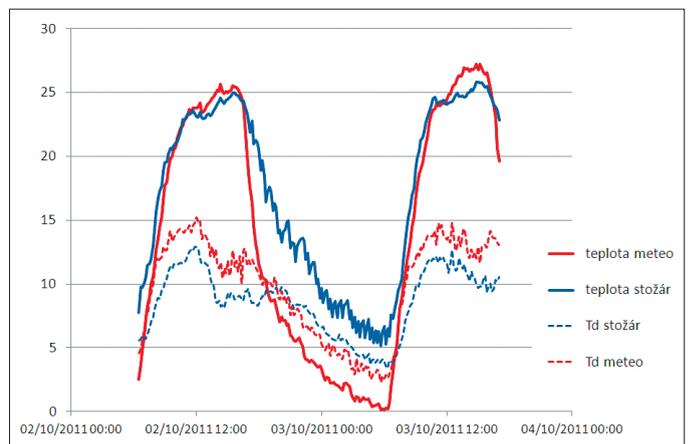
Kontakt na autory: jirka@enki.cz, pokorny@enki.cz



Obr. 14 Krátkovlnná radiace na stožáru a meteostanici



Obr. 15 Dlouhovlnná složka radiace na stožáru a meteostanici



Obr. 16 Teploty těles NET radiometrů a odpovídající rosné body

Směrnice TÜV k podílu blokových tepláren na udržení napětí sítě

Od července 2012 platí v Německu nová směrnice TÜV, která zavazuje provozovatele tepláren, provozujících vedle výroby tepla i výrobu elektrické energie, podílet se více i na udržování napětí sítě. Podle nové směrnice se musí teplárny podrobit přípojovacím pravidlům sítě a výstavbě nových inteligentních sítí jako Smart Grids. Důvodem je skutečnost, že teplárny připojují výrazně více energie v GWh, než např. solární fotovoltaická zařízení a přispívají k nerovnováze sítě.

Podle údajů o výrobě proudu v Německu z ústavu Leipziger Institut für Energie bylo dosud v letošním roce připojeno z fotovoltaických modulů 26 113 GWh, zatímco jen z tepláren zhodnocujících biomasu to bylo 29 384 GWh.

Pramen: TÜV Nord Cert

(AB)