

# **Vliv vegetace na oběh vody – kontroverzní názory aneb čím se mají řídit ti, co rozhodují, když se vědci přou o principy.**

The effect of vegetation on water cycle – contradictory opinions

**Jan Pokorný, Petra Hesslerová**

*ENKI, o.p.s. Dukelská 145, 379 01 Třeboň*

**Abstrakt (10 řádků)** Historické civilizace vysychaly a nevyužívaly fosilní paliva. Rostoucí populace odlesňuje a odvodňuje, aby zajistila podmínky pro produkci obilnin a dalších plodin, které nesnášejí zatopení kořene vodou. Vegetace dobře zásobená vodou váže velkou část sluneční energie evapotranspirací do výparného tepla vody, tato energie se uvolní na chladných místech nebo v noci při kondenzaci vodní páry na vodu. Suché plochy se přehřívají a ohřátý vzduch stoupá vzhůru (zjevné teplo) a vysušuje krajinu. Hodnoty zjevného tepla dosahují stovek  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  a povrchová teplota odvodněných ploch je až o  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  vyšší nežli teplota vegetace, jak je patrné na termovizních snímcích. O úloze vegetace při utváření klimatu jsou protichůdné názory, jedni ji považují za ztrátu vody, jiní ukazují, že evapotranspirace je podmínkou transportu vody z moře na kontinent.

**Klíčová slova:** evapotranspirace, klima, distribuce slunečního záření, termální data

## **Abstract**

Historical civilisations dried out although they did not use fossil fuels. Growing population cuts forest and drains landscape to produce grains and other crops which do not tolerate flooding of roots. Vegetation well supplied with water transfers most of solar energy into latent heat of vaporisation which releases on cool places and equalises temperature. Drained surface exposed to sunshine has high temperature and warm air ascends into atmosphere (sensible heat) and dries surrounding landscape. Sensible heat reaches several hundred  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  and surface temperature of dry land is markedly higher than that of forest and vegetation well supplied with water as shown on IR pictures. Contradictory opinions on role of evapotranspiration in local and regional climate are presented and discussed in terms of measured data and experiences.

**Key words:** evapotranspiration, climate, distribution of solar energy, thermal data

## Úvod

Historické civilizace vysychaly, i když neužívaly fosilní paliva a nezvyšovaly koncentraci CO<sub>2</sub> a dalších skleníkových plynů. Kolaps historických civilizací způsobený odlesňováním, odvodňováním a postupnou degradací půdy až ztrátou úrodnosti zasolením popisují Ponting (1991), Diamond (2008). Archeologové odhalují historii starých civilizací pod nánosy písku. Území bývalé Mezopotámie, nejstarší civilizace, vidáme často v televizi, je to dnešní Sýrie, vyschlá země bez trvalé vegetace mezi řekami Eufrat a Tigris. V Ašhabadu, hlavním městě Turkmenistánu ukazují, jak postupně vysychala střední Asie. Částečné odvedení vody řek (Amudarja, Syrdarja) na zavlažování Turkmenistánu a Uzbekistánu bylo jen dovršením dlouhodobého vysychání.

Populace roste, odlesňuje, odvodňuje a krajina vysychá, ve druhé polovině 20. století vysychá subsaharská Afrika. Na jihu Afriky hrozí Kapskému městu, že nebude mít dostatek pitné vody. Na západě USA klesla hladina podzemní vody o desítky metrů v průběhu století. Rozlehlé části Sahary byly dříve zelené a saharská poušť se rozšiřuje, oázy zanikají pod dunami písku Villiers, Hirtle (2004).

Není pochyb, historické civilizace vyschly a přitom nezatěžovaly atmosféru oxidem uhličitým z fosilních paliv. Ruddiman (2011) sice uvažuje, že odlesňování a rozvoj zemědělství zatěžoval atmosféru oxidem uhličitým již před několika tisíci roky a ukazuje, jak v průběhu pandemií klesala koncentrace oxidu uhličitého s vysvětlením, že se se obdělávalo méně zemědělské půdy. Zásadní informace o hodnotách koncentrace CO<sub>2</sub> a dalších skleníkových plynů shromáždil australský geolog Ian Plimer ve své rozsáhlé vědecké monografii (Plimer 2009) a shrnul je v knize s provokativním názvem a úvodem V. Klause. I. Plimer připsal anglický originál českému géniovi Járovi Címrmanovi (Plimer 2011). Autor jasně prokazuje, že koncentrace oxidu uhličitého byly v geologických dobách i násobně vyšší než dnes a přitom nedocházelo k oteplení. Ukazuje, že zvýšené koncentrace CO<sub>2</sub> spíše následují po oteplení. Dále Plimer cituje Svensmarkovi práce, který studoval efekt kosmického záření na tvorbu mraků a ukázal, že zmenšená oblačnost v posledních dekáдах může být způsobena prokázanou změnou magnetického pole Slunce, která má za následek sníženou kondenzaci vodních par, méně oblačnosti a tudíž více slunečního záření přichází na zemský povrch.

Debata o kauzálním vztahu koncentrace skleníkových plynů a průměrné globální teploty nebere konce. Přitom skleníkový efekt, tak jak je prezentován IPCC nelze demonstrovat.

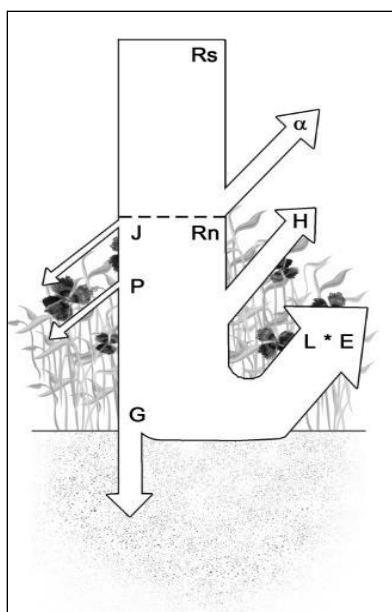
Skleníkové plyny se podílejí na globálním oteplování prostřednictvím tzv. radiačního zesílení (radiative forcing), což je změna čistého radiačního toku vyjádřená ve  $\text{W.m}^{-2}$  (dlouhovlnné záření směřující dolů minus záření směřující vzhůru) v tropopauze nebo na horní hranici atmosféry. Radiační zesílení je vnější příčinou klimatické změny a je působeno změnou koncentrace skleníkových plynů nebo změnou aktivity Slunce. Dokumenty IPCC (2007a) uvádějí, že radiační zesílení stouplo od počátku průmyslové revoluce (tj. od roku 1750) následkem zvýšené koncentrace skleníkových plynů v atmosféře o  $1 - 3 \text{ W.m}^{-2}$ . Očekávaný růst radiačního zesílení, způsobený vzrůstající koncentrací skleníkových plynů, v dalších deseti letech je  $0,2 \text{ W.m}^{-2}$ . Změny radiačního zesílení jsou natolik malé, že jsou neměřitelné. Připomínáme, že v průběhu jednoho roku přichází na vnější vrstvu zemské atmosféry 1321 až 1412  $\text{W.m}^{-2}$ , podle polohy Země na její eliptické dráze kolem Slunce. Udávané hodnoty se liší v jednotkách až desítkách, sluneční záření nelze totiž dlouhodobě měřit s přesností promile, tj. jednotek wattů na  $\text{m}^2$ . Hodnoty radiačního zesílení a jeho změn jsou hodnoty vypočtené (IPCC 2007b). Vliv nárůstu koncentrace skleníkových plynů na změny radiačního zesílení v atmosféře nebyl vědecky testován ani ověřen měřením. IPCC se při studiu klimatické změny zaměřuje na hodnoty průměrné globální teploty a varuje před globálním oteplením, které je důsledkem růstu koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Myhre et al. (2013) uvádějí: *Vodní pára je hlavním skleníkovým plynem, který se do atmosféry dostává přirozeným způsobem a má zásadní vliv na tvorbu klimatu na Zemi. Její množství v atmosféře je závislé spíše na teplotě vzduchu, než na emisích. Z těchto důvodů je považována spíše za "zpětnovazební faktor", než faktor, který by mohl mít vliv na klimatickou změnu. Antropogenním způsobem (ve formě emisí), se do atmosféry dostává vodní pára ze zavlažovacích systémů, či z elektrárenských chladicích věží. Toto množství je v souvislosti s globální změnou klimatu zanedbatelné.* Stručně vyjádřeno: zde se tvrdí, že člověk hospodářskými zásahy v krajině neovlivňuje množství vodní páry v ovzduší.

Toto je jeden z hlavních předpokladů, se kterým IPCC pracuje a nelze s ním souhlasit. Opomíjí vodu a vegetační pokryv jako mechanismy, které utvářejí klima. Za řídicí činitele globálního klimatu považuje koncentraci  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  v atmosféře, přestože je množství vodní páry v atmosféře o jeden až dva řády vyšší, než je koncentrace  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  (390 ppm a 1,8 ppm). Koncentrace  $\text{CO}_2$  podléhá sezónním výkyvům; v letním období je na severní polokouli o 20 ppm nižší (IPCC 2013), což ukazuje na vliv vegetace. Množství vodní páry ve vzduchu se vyjadřuje jako hmotnostní jednotka ( $\text{g.m}^{-3}$ ) a objemová jednotka (ppm vypočítáno podle Avogadrova zákona; tj. 1 mol odpovídá 22,4 litrům). Pokud máme nasycený vzduch o teplotě  $21^\circ\text{C}$ , obsahuje 22 400 ppm vodní páry; nasycený vzduch o teplotě  $40^\circ\text{C}$  již obsahuje 62 200

ppm. Koncentrace vodní páry ve vzduchu se velmi rychle mění, a to jak v čase, tak v prostoru, právě v závislosti na tom, jak člověk mění krajinný pokryv. Navíc, voda je na Zemi přítomna ve třech skupenstvích – v pevném, kapalném i plynném. Za normálních podmínek je přechod mezi jednotlivými fázemi spojen se spotřebou či uvolněním energie, tyto děje nelze modelovat. Je to důvod k tomu, aby je věda v debatě o klimatu opomíjela a soustředila se pouze na efekt nárůstu koncentrace CO<sub>2</sub>, případně metanu a oxidů dusíku, jak je tomu v kapitole pro „Decision makers“ zpráv IPCC?

Průměrná globální teplota je hodnotou vypočítanou z teplot vzduchu měřených ve výšce 2 metry nad zemí teploměrem ve stínu bílé meteorologické budky. Klima je ovšem utvářeno gradienty, tzn. rozdílnými hodnotami meteorologických prvků, jako jsou teplota, tlak. V důsledku těchto rozdílů dochází k formování jevů, jako jsou bouře, tornáda, přívalové deště, mořské proudy apod. Průměrná teplota tyto gradienty zastírá. Příkladem může být porovnání dvou ekosystémů – pouště a tropického deštného lesa. Ve dne teploty na poušti dosahují 40 °C, v noci klesají k nule. V tropickém deštném lese se přes den pohybují okolo 25 °C, v noci 15 °C. Průměrná hodnota teploty v obou ekosystémech je 20 °C. Klima je však naprosto odlišné.

V tomto příspěvku se zaměříme právě na přímý efekt vegetace na vyrovnávání rozdílů teplot a tlaku. Tyto efekty lze snadno ukázat i měřit. Zásadní úlohu v distribuci sluneční energie hraje přitom voda. Z nepochopitelných důvodů je úloha vody a vegetace zanedbávána. Na základní škole se žáci nesetkávají s pojmem transpirace a neučí se o zásadní úloze vody v utváření klimatu. Přitom principy lze pochopit se znalostmi fyziky základní školy, tj. pojmy práce a energie a výparné teplo vody.



*Obr. 1 Schéma toků sluneční energie  $R_s$  ...globální radiace,  $R_n$  ...čistá radiace,  $J$  ...hromadění tepla v biomase,  $P$  ...fotosyntéza,  $G$  ...tok tepla do půdy,  $\alpha$  ... albedo,  $H$  ... zjevné teplo,  $L \cdot E$  ...latentní teplo evapotranspirace.  
Zásadní je podíl mezi evapotranspirací (latentní teplo) a zjevným teplem, který je určen vegetačním pokryvem a dostupností vody.*

### **Metody využívané k posouzení efektu krajinného pokryvu na distribuci sluneční energie a oběh vody**

Efekt krajinného pokryvu na distribuci slunečního záření lze hodnotit pomocí různých metod. Energetickou bilanci stanoviště lze hodnotit na základě kontinuálních měření meteorologických veličin. Využíváme meteorologické stanice vybavené následovně:

přicházející a odražené krátkovlnné slunečního záření je měřeno pyranometry CM3 Kipp & Zonen, the Netherlands, (spektrální rozsah 310nm – 2800nm), přicházející a emitované dlouhovlnné záření Netradiometrem CNR1 (spektrální rozsah 5  $\mu\text{m}$  to 50  $\mu\text{m}$ ). Teplota vzduchu ve 2 metrech a na povrchu porostu a teplota půdního profilu je měřena stíněnými platinovými teploměry, vlhkost vzduchu kombinovaným čidlem teploty a vlhkosti vzduchu. Frekvence záznamu dat 10 minut. Objemová vlhkost půdy byla měřena přístrojem Wirrib AMET. Emitované dlouhovlnné záření bylo počítáno pomocí Stefan – Boltzmannova zákona z povrchové teploty porostu a teploty oblohy vypočítané z údajů netradiometru (podrobněji Pokorný et al. 2010). Evapotranspirace porostů a další toky sluneční energie (tok tepla do půdy, zjevné teplo) byly stanoveny z naměřených meteorologických dat metodou Bowenova poměru, případně Penman-Monteithovou metodou se zahrnutím korekcí na strukturu porostu a zejména s ohledem na advekci teplého vzduchu z okolí (Huryna a Pokorný 2016, Huryna et al. 2014).

Transpirační proud ve kmeni stromů, tedy rychlost transpirace (výdeje vody) stromem byla zjišťována metodou „sap flow“ (Čermák et al. 2004, Čermák et al. 2007).

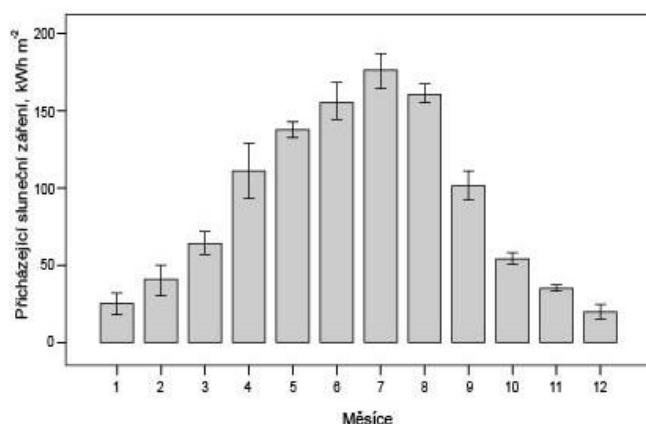
Způsob distribuce sluneční energie na Zemi se projevuje hodnotami povrchové teploty krajiny. Za teplotu krajiny je považována termodynamická (kinetická) teplota, měřená teploměrem ve stínu standardizované meteorologické budky ve 2 metrech nad zemí a následně interpolována na větší území. Jedná se o teplotu vzduchu, která „ohřívá teploměr“. V této výšce je eliminován vliv povrchu na měřenou teplotu. Teplotě krajiny však lépe odpovídá teplota radiační, měřená pomocí termovizních systémů na některých družicových, leteckých i bezpilotních systémech a poskytující prostorově spojitou informaci. V tomto případě zaznamenáváme hodnoty, které vypovídají o transformaci slunečního záření na zemském povrchu, v závislosti na jeho vlastnostech. Teplota povrchu je výsledným projevem bilance slunečního záření, tepelného přenosu do půdy, výparu a kondenzace vody. Data dálkového průzkumu Země umožňují funkční hodnocení krajiny z hlediska vlivu krajinného pokryvu na disipaci sluneční energie. Ze studií (Hesslerová a Pokorný 2015a,b), které byly založeny na analýze družicových dat Landsat, vyplývá, že krajinný pokryv přímo ovlivňuje teplotu povrchu. Využívané techniky dálkového průzkumu a další výsledky hodnocení vlivu krajinného pokryvu na povrchovou teplotu jsou popsány v (Hesslerová et al. 2013, Brom et al. 2014; Hesslerová a Pokorný 2014, Hesslerová et al. 2012). Hodnocení významu zeleně pro klima města pomocí dálkového průzkumu Země je podrobně popsáno v práci Pokorný et al. (2018), a výsledky z terénních měření povrchové teploty pomocí termovizní kamery, jsou spolu s hodnocením efektu mokřadů na lokální klima popsány v Pokorný et al. (2017). Prostorová data o povrchové teplotě získaná distančními metodami měření lze v kombinaci s meteorologickými daty využít pro prostorovou kvantifikaci energetických toků v krajině (Brom 2012, Nedbal a Brom 2018).

## Výsledky

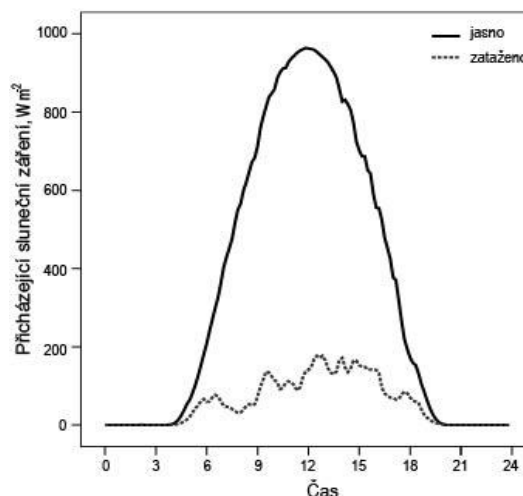
Výsledky jsou reprezentovány především ve formě grafických výstupů s příslušným komentářem. Cílem je ukázat, jak lze pomocí různých metod ukázat na chladicí schopnost vegetace a zdůraznit fakt, že evapotranspirace není plýtvání vodou a vegetace vodu naopak přitahuje.

Množství sluneční energie přicházející za měsíc na metr čtverečný vodorovné plochy v podmínkách ČR je ve vegetační sezóně několikrát vyšší nežli v zimních měsících. Na obrázku č. 1 jsou vyneseny měsíční sumy globálního slunečního záření naměřené na měřené v Třeboni. Na obrázku 2 je vynesen denní průběh intenzity slunečního záření za jasného dne a

při zatažené obloze. Je zřejmé, že mraky snižují intenzitu slunečního záření mnohonásobně až řádově.

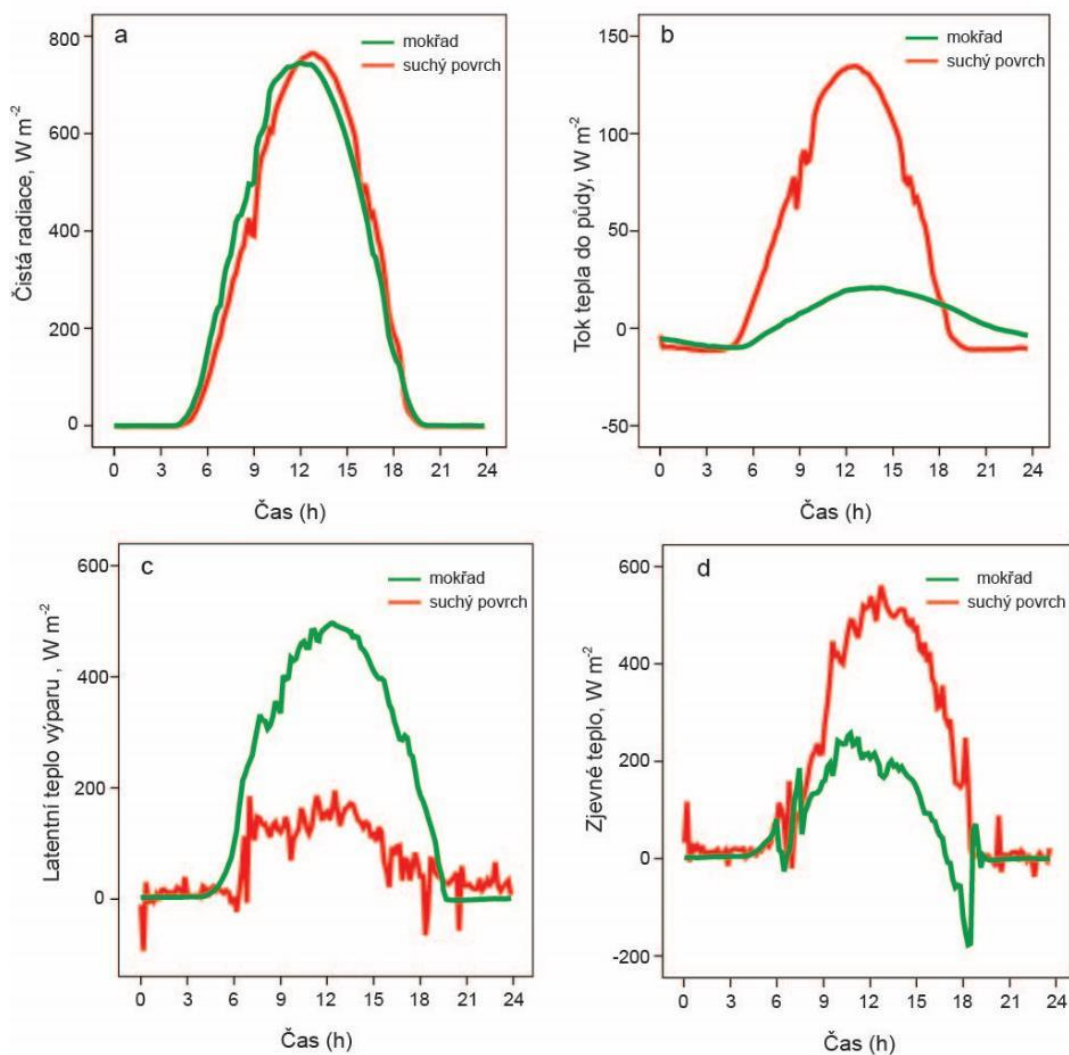


Obr. 1. Příkon slunečního záření  $\text{kWh.m}^{-2}$  v jednotlivých měsících roku 2008 na Třeboňsku, měřeno pyranometrem CM3 Kipp & Zonen, dopad na vodorovnou plochu. Data ENKI, o.p.s.



Obr. 2. Za jasné oblohy přichází ve vegetační sezóně na vodorovnou plochu až  $1000\text{W.m}^{-2}$  slunečního záření (měřeno pyranometrem CM3 Kipp & Zonen). Při zatažené obloze je intenzita slunečního záření násobně nižší. Data ENKI, o.p.s.

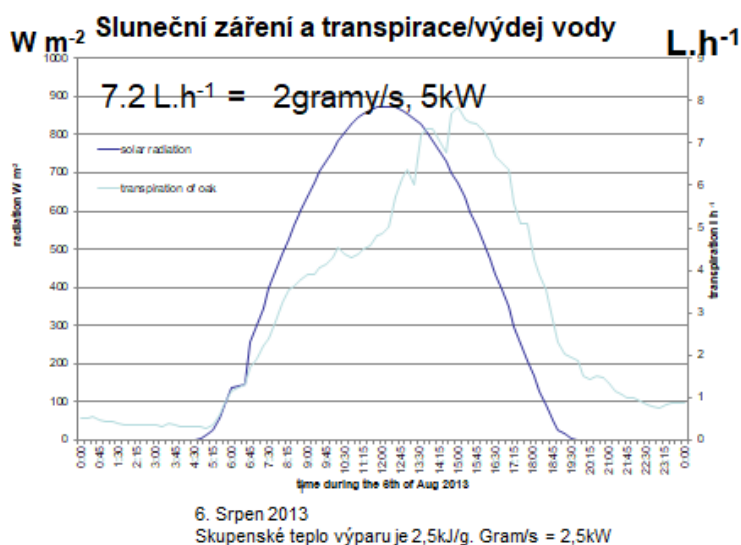
Na obrázku č. 3 je srovnání v distribuci sluneční energie za jasného dne v mokřadní louce a na odvodněné ploše. Na obrázku č. 3a je znázorněn denní průběh intenzity čisté radiace (celková intenzita slunečního záření zmenšená o hodnotu záření odraženého a bilanci dlouhovělnného záření). Hodnota čisté radiace dosahuje v obou případech téměř  $800\text{W.m}^{-2}$ . Tok tepla do půdy je nápadně vyšší na odvodněné ploše, stařina v nesečené mokřadní louce brání toku tepla do půdy (Obr. 3b). Evapotranspirace mokré louky (latentní teplo výparu) dosahuje hodnoty až  $500\text{W.m}^{-2}$  a je o více než  $300\text{W.m}^{-2}$  vyšší nežli na odvodněné ploše. Podobně je až o  $300\text{W.m}^{-2}$  vyšší tok zjevného tepla (turbulentní proudění ohřátého vzduchu) na odvodněnou plochu. Negativní hodnoty zjevného tepla v pozdním odpoledni na mokré louce vysvětlujeme advekci (přísunem) teplého vzduchu z okolí.



Obr. 3. Průměrné denní hodnoty celkové čisté radiace ( $W \cdot m^{-2}$ ) (a), toku tepla do půdy ( $W \cdot m^{-2}$ ) (b), toku latentního tepla ( $W \cdot m^{-2}$ ) (c) toku zjevného (pocitového) tepla ( $W \cdot m^{-2}$ ) (d), vypočtené z pěti slunečných dnů v roce 2009 (13. 6., 14. 6., 16. 6., 27. 7. a 1. 8.). Metodická poznámka: jako odvodněná plocha sloužil vybetonovaný prostor na ČOV v Třeboni, plocha však byla cca  $1000m^2$  a byla ovlivněna okolní vegetací.

Na obrázku 4 je ukázka měření denního průběhu transpiračního proudu ve kmeni dubu letního v lesním porostu v Soběšicích u Brna. Měření probíhalo v srpnu 2013 v době trvajících srážkového deficitu. V časném odpoledni dosahovala transpirace hodnoty 7,2 litru za hodinu, což odpovídá skupenskému teplu výparu  $7,2 \times 0,69 = 5kWh$ . Strom tedy chladil své okolí výkonem 5kW. Zřetelné je časové zpoždění v transpiračním proudu měřeném ve kmeni a chodem slunečního záření. Za den v srpnu transpiroval tento strom průměrně 66 litrů vody, na latentní tepla výparu se tedy spotřebovalo denně průměrně 45kWh sluneční energie. Tato energie se neprojevila jako zjevné teplo.





Obr. 4. Denní průběh slunečního záření a transpiračního proudu měřeného ve kmeni dubu v Soběšicích u Brna. Intenzita slunečního záření dosahuje hodnoty  $870 \text{ W.m}^{-2}$ , transpirační proud  $7,2$  litru za hodinu. Dub letní, Soběšice u Brna, srpen 2013, srážkově podnormální. Plošný průmět koruny stromu  $42\text{m}^2$ , (Tomková 2014, data a instrumentace J. Čermák)

Soliterní stromy dobře zásobené vodou transpirují denně několik set litrů vody. Na obrázku 5 jsou naměřené hodnoty okamžité intenzity slunečního záření na osluněném chodníku ( $877\text{W.m}^{-2}$ ) a povrchové teploty ( $51,2^\circ\text{C}$ ) a ve stínu stromu ( $82\text{W.m}^{-2}$  a  $26,9^\circ\text{C}$ ). Intenzita slunečního záření pod stromem je tedy řádově nižší a povrchová teplota je o  $24^\circ\text{C}$ . Na základě měření transpiračního proudu podobných soliterních stromů lze předpokládat intenzitu transpirace  $20$  litrů za hodinu, potom je chladicí efekt stromu  $14\text{kW}$ .

Odvodněné plochy se nechladí evapotranspirací a jejich povrchová teplota přesahuje  $40^\circ\text{C}$ , a je podstatně vyšší nežli je standardně naměřená teplota vzduchu ve  $2\text{m}$  v meteorologické budce. Vegetace, budovy, živočichové jsou ovšem exponovány této povrchové teplotě, jsou jí exponovány i okraje lesů. Na obrázku 6 je ukázka hodnot povrchové teploty osluněného asfaltu ( $49,1^\circ\text{C}$ ) a navazujícího sklizeného pole ( $48,3^\circ\text{C}$ ). Sklizené pole se tedy teplotně chová podobně jako tmavá plocha zcela nepropustná pro vodu. Na těchto plochách evidentně převažuje produkce zjevného tepla (turbulentní vzestupné proudění ohřátého vzduchu) nad latentním teplem výparu (chlazení evapotranspirací). Logicky očekáváme, že odvodněné plochy nevypařují vodu a krajina proto o vodu nepřichází. Vzestupný proud ohřátého vzduchu ovšem obsahuje vodní páru. Například vzduch o teplotě  $40^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $20\%$  obsahuje  $10$  gramů vodní páry v  $\text{m}^3$ . I při velmi pomalé vzestupné rychlosti  $0,1\text{m.s}^{-1}$ , „vytlačí“ za hodinu zjevné teplo produkované na  $1\text{m}^2$   $36\text{m}^3$  vzduchu a s ním  $3,6$  litru vody, za  $10$  hodin je to  $36$  litrů vody ve formě vodní páry, která se stahuje z okolní krajiny. Na velkých odvodněných plochách jsou to ohromná množství vody, která krajina ztrácí a která nezjistíme ze srážkově/odtokové bilance. Vodu ztrácíme díky zjevnému teple produkovanému na odvodněných přehřátých plochách.

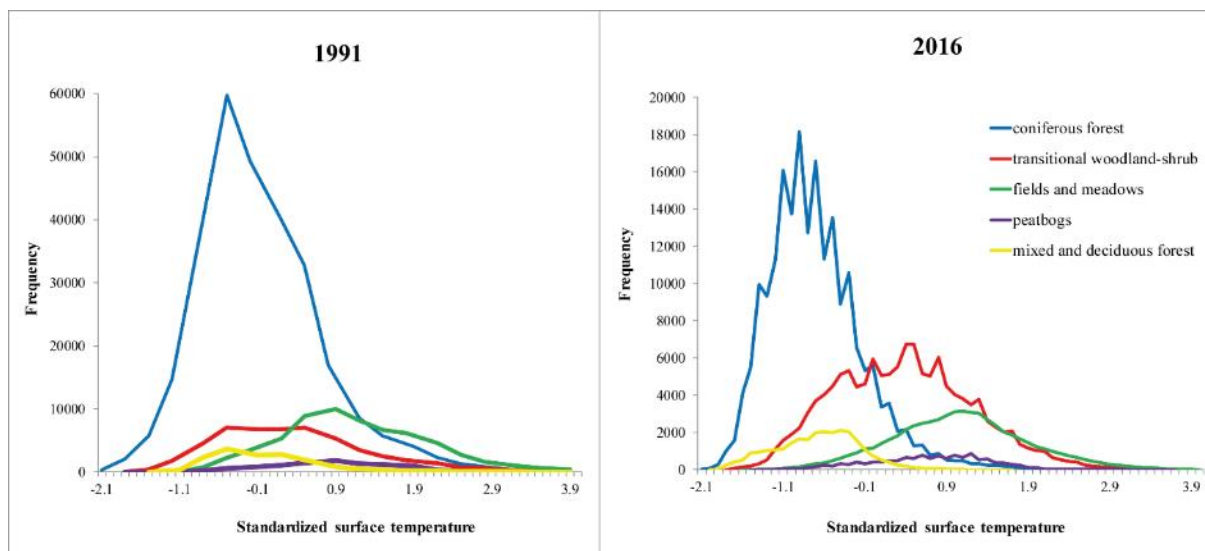


Obr. 5. Intenzita slunečního záření na osluněném chodníku je  $877 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a povrchové teploty  $51,2^\circ \text{C}$ . Ve stínu stromu je intenzita slunečního záření  $82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a povrchová teplota  $26,9^\circ \text{C}$ . Při transpiračním toku 20 litrů za hodinu chladí strom sebe a své okolí výkonem  $14 \text{ kW}$ .



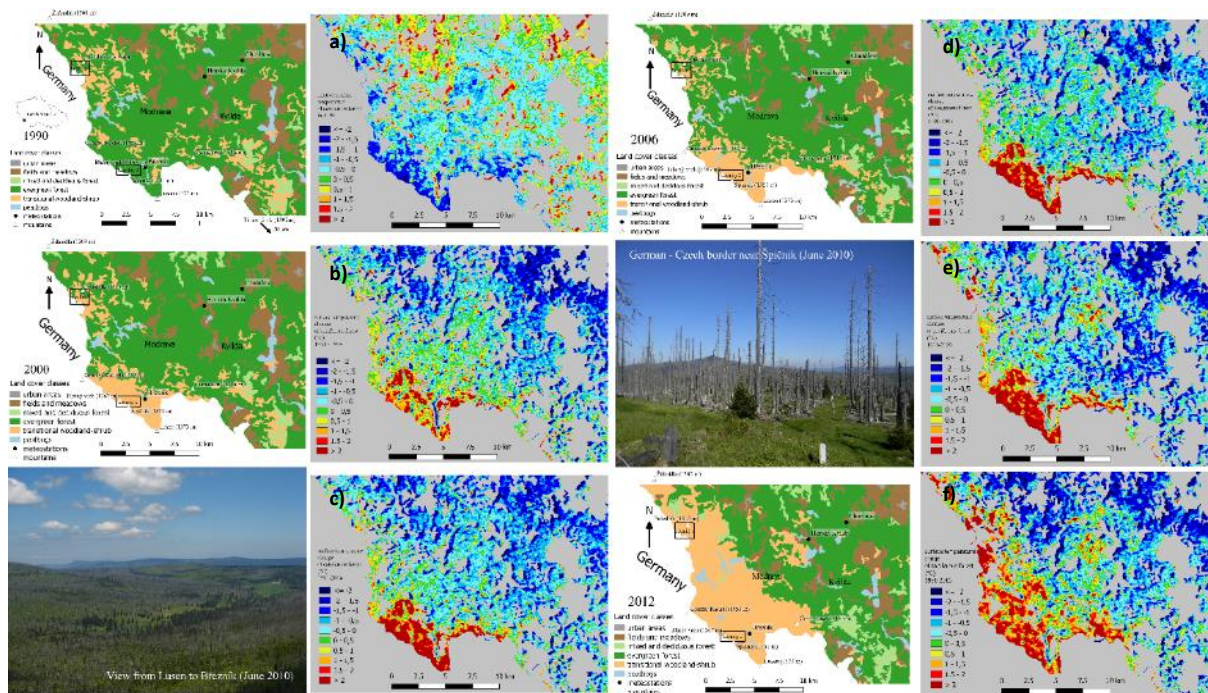
Obr. 6. Benešovsko 26. 8. 2017, intenzita dopadajícího slunečního záření  $650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Srovnání povrchové teploty asfaltu ( $49,1^\circ \text{C}$ ) a navazujícího sklizeného pole ( $48^\circ \text{C}$ ). Měřeno okolo 15:00 SEČ

Změny teplot následkem lidských hospodářských zásahů na velkých plochách lze hodnotit např. pomocí satelitu Landsat s velikostí pixelu termálního kanálu cca  $1 \text{ ha}$ . Příkladem může být změna teploty zapříčiněná rozsáhlým odlesněním v oblasti Šumavy (Obr. 7 a 8). Odlesněním dochází ke změnám v hodnotách evapotranspirace, jehož důsledkem je změna disipace sluneční energie. Toky tepla jsou místo do latentního tepla výparu směřovány do zjevného tepla, což má za následek růst povrchové teploty a další ztráty vody. Rozdíl v distribuci latentního a zjevného tepla lesních porostech a na odvodněném území, se v horkých dnech, řádově liší o stovky  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pokles evapotranspirace z  $1 \text{ km}^2$  v důsledku odvodnění či odlesnění pro ekvivalent  $100 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  vodní páry představuje  $250 \text{ MW}$  sluneční energie uvolněné z této plochy do atmosféry ve formě teplého vzduchu (zjevného tepla). V letech 1991 – 2012 došlo v modelovém území k úbytku cca  $7\,500 \text{ ha}$  jehličnatého lesa (vyhodnocení z dat CORINE Land Cover). Znamená to tedy, že z této plochy odumřelého lesa se během horkého letního dne uvolní  $18\,750 \text{ MW}$  ve formě zjevného tepla (Hesslerová et al. 2018 a,b).



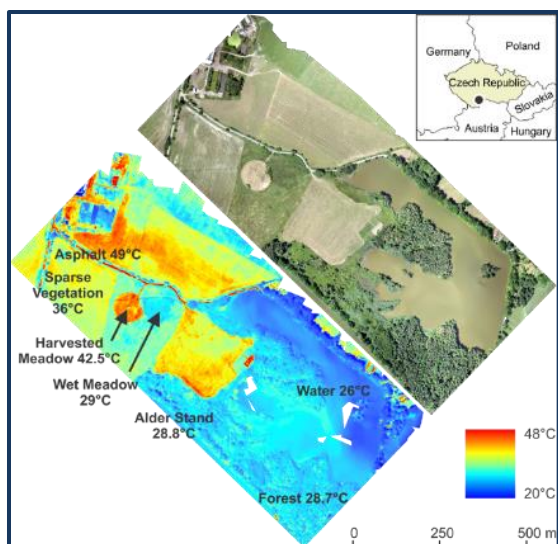
Obr. 7 Standardizované hodnoty povrchové teploty pro různé typy krajinného pokryvu umožňují hodnotit časové změny. Grafy znázorňují relativní teplotu v roce 1991 (a) a 2016 (b) pro jehličnaté lesy, přechodová stádia les – křoviny, pole a louky, rašeliniště a listnatý a smíšený les v modelovém území Šumavy (Obr. XYZ). Zdravý jehličnatý les, spolu s listnatým a smíšeným je charakterizován nízkými hodnotami teploty. K nejteplejším náleží pole a louky. Specifickým případem krajinného pokryvu jsou rašeliniště. V případě, že jejich povrchová vrstva (acrotelm) je dostatečně zásobena vodou a nevysychá, patří k nejchladnějším typům krajinného pokryvu., a to díky výparu vody. Pokud však povrchová vrstva vyschne, suchá vegetace se teplotně chová téměř jako holý povrch a rašeliniště se na termálních snímcích jeví jako teplé plochy. Kategorie přechodová stádia les – křoviny je v roce 1991 charakterizována nízkými hodnotami teploty. V letech 1991 – 2012 došlo v modelovém území k odumření cca 7 500 ha jehličnatého lesa. Odumřelé lesní porosty byly následně klasifikovány jako kategorie přechodová stádia. Odlesněné lokality se promítly do zvýšení povrchové teploty této kategorie. (Zdroj Hesslerová et al. 2018b)





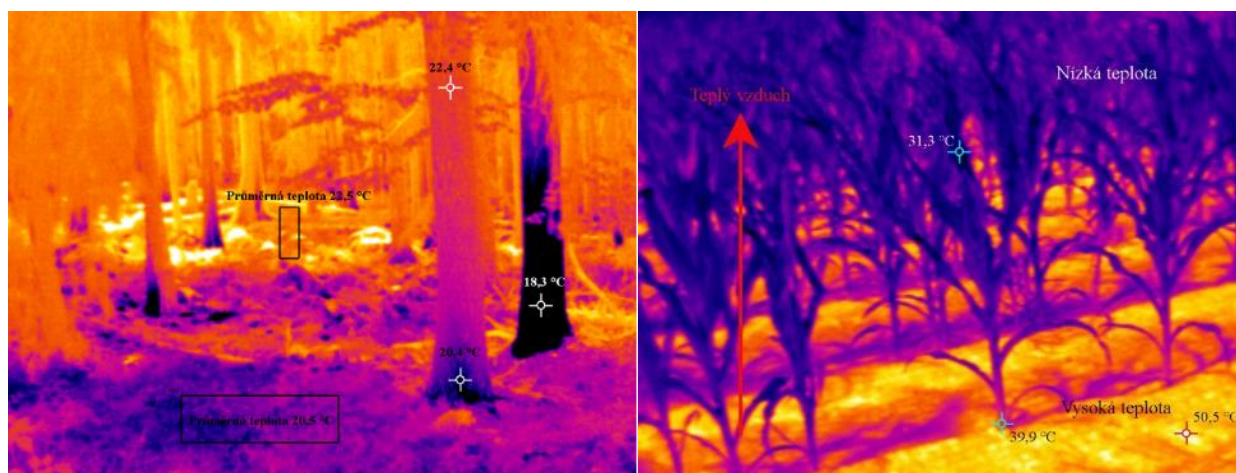
Obr. 8 Vyhodnocené satelitní snímky z družice Landsat ukazují standardizované hodnoty povrchové teploty v modelovém území Prácheň – Knížecí Pláně – Zdíkov v roce 1991 (a) a nárůst teploty v odlesněných lokalitách o 1 – 5 °C v letech 1998 (b), 2004(c), 2005 (d), 2009 (e) a 2016 (f). Informace o krajinném pokryvu, doplňující teplotní mapy, byla získána z evropské databáze Corine land cover (European Environmental Agency) pro roky 1990, 2000, 2006 a 2012 (Zdroj Hesslerová et al. 2018b).

V poměrně pestré kulturní krajině, jakou je Třeboňsko se za slunného dne podle typu krajinného pokryvu ustavují povrchové teploty různých hodnot. Na obrázku 9 je termovizní snímek pořízený za slunného dne termokamerou nesenou vzducholodí. Posečená louka má povrchovou teplotu 42,5 °C, sousedící mokrá louka 29 °C, podobně olšina a borový les mají povrchovou teplotu 28 - 29 °C, asphaltový povrch 49 °C. Podle typu krajinného pokryvu lze v naší kulturní krajině za slunného dne na rozloze cca 200ha vytvořit lidskou činností rozdíly povrchových teplot 20 °C, tyto rozdíly teplot jsou odrazem různé distribuce sluneční energie a na to navazujícího proudění vzduchu a vody.



Obr. 9 Termovizní snímek ze vzducholodě okolí obce Domanína u Třeboně ukazuje teplotu vegetace dobře zásobené vodou a povrchů se suchou či řídkou vegetací. Teplotní rozdíly mezi povrchy dosahují i 15 °C (Zdroj. Hesslerová et al. 2013, Ellison et al. 2017).

Zásadní rozdíl v rozložení teplot je mezi plodinami bez podrostu (s vyhubeným plevelem) a vzrostlým vertikálně strukturovaným lesem. Na obrázku 8 je termovizní snímek vzrostlého lesa se zřetelně nižší teplotou v podrostu a vyšší teplotou v korunách. V takovém vysokém porostu s inverzním rozložením teplot vzduch proudí minimálně a udržuje se vlhkost, vzrostlý živý les komunikuje s atmosférou prostřednictvím korun stromů. Naproti tomu plodiny bez podrostu mají zřetelně vyšší teplotu na povrchu půdy než na povrchu porostu. Vzestupný proud vzduchu od ohřáté půdy (zjevné teplo) stoupá vzhůru a odnáší vlhkost z porostu do atmosféry.



Obr. 10 Vysoké teploty povrchu půdy u plodin způsobují ztrátu vody vzestupným prouděním vzduchu. V lesních porostech se díky teplotní inverzi voda dokáže zadržet.

## Diskuse a kontroverzní názory

Vegetace se chladí vypařováním vody přes průduchy. Řečeno termíny termodynamiky otevřených systémů (Schneider, Sagan 2006): „Lesy a stromy v nich jsou hlavní technologií

biosféry na redukci gradientů. Úloha, jakou les a stromy hrají v přeměnách sluneční energie a zejména redukci gradientů nebyla dosud doceněna. Strom je jako obrovská vodní fontána, ze které prýští voda drobnými průduchy ve formě skupenského tepla“. Děje se to neslyšně, neviditelně, takže tento proces vyrovnávání teplot intenzitou několika set wattů na metr čtverečný nevnímáme.

Je nesporné, že nad rozsáhlými lesními prostory se udržují srážky i několik tisíc km od moří směrem do kontinentu.

*Na suché pole neprší“, „voda přitahuje vodu“, „lesy přitahují vodu“, odpovídají skutečnosti tato lidová rčení?*

Vezmeme-li v úvahu tzv. přetahování o vodu je faktem, že na zalesněných kontinentech jako je Amazonie, západní Afrika/Kongo, části Sibíře neubývá srážek od oceánu směrem do kontinentu i na vzdálenosti několika tisíc km. Na odlesněných částech pevniny srážky ubývají ve vzdálenosti několika set km od pobřeží. V posledních 10 letech se k tomuto jevu obrátila pozornost v souvislosti s teorií „biotické pumpy“ formulovanou ruskými fyziky atmosféry Makarievou a Gorškovem (2007), nověji tuto teorii diskutují Ellison et al. 2017, Shiel 2018: Les má vysokou pokryvnost listoví a má proto i vysokou evapotranspiraci, která může být vyšší nežli evaporace z povrchu oceánu. Nad lesem je vysoký obsah vodní páry, která v noci kondenzuje, jak vlhký vzduch stoupá vzhůru, tím klesá tlak vzduchu a nasává se horizontálně vzduch z okolí. Vzduch zbavený určitého množství vodní páry se vrací zpět nad oceán ve vyšší vrstvě atmosféry, nežli je proud vlhkého vzduchu z oceánu. Odlesňováním se ovšem tento transport narušuje a toky se obrací, vlhký vzduch je odsáván z přehřáté pevniny nad chladnějším oceán o nižším atmosférickém tlaku vzduchu. Efekt odlesnění se projevuje změněným odtokem vody, nižším výparem a zvýšenou teplotou. Po odlesnění menších ploch odtéká vyšší podíl srážek do přehradních nádrží. To už mnohokrát v historii svádělo k odlesnění, a to už mnohokrát v historii vedlo k poklesu srážek a postupnému vysychání rozsáhlých odlesněných ploch. Andréassian (2004) např. uvádí na 130 případových studií, kdy po odlesnění odtéká větší podíl srážek a odtok více kolísá.

**Kontraverzní názory na evapotranspiraci (ET):** evapotranspirace je pokládána tradičně za ztrátu vody, kterou je potřeba omezit například pěstováním plodin s nízkou spotřebou vody (Irmak 2008) a omezením dalších rostlin, které ubírají plodinám vodu. Empirie ovšem praví, že „na suché pole neprší“ a „voda přitahuje vodu“. Teorie biotické pumpy vysvětluje vysoké srážky nad zalesněným územím vysokou evapotranspirací a s tím spojenou nižší teplotou a

nižší atmosférickým tlakem. Bude naším cílem v kulturní krajině omezovat ztráty vody evapotranspirací, nebo se budeme snažit krajinu ochladit určitým procentem ploch trvalé vegetace dobře zásobené vodou?

„Rybníky nebudeme stavět, protože ztrácí výparem mnoho vody“ (výroky hydrologů při zasedání pracovní komise pro koncepci „Sucho). Zhoršuje otevřená vodní hladina vodní bilanci? Nebo jsou rybníky a jejich litorály jedním z nezbytných prvků kulturní krajiny, které zadržují vodu, ochlazují krajinu a přispívají k ustavení malého vodního cyklu?

Dřevo je ekologicky neudržitelné, protože na jeho produkci se spotřebuje mnoho vody, dřevo má vysokou vodní stopu (water footprint). Nebo stromy redukují gradienty teplot a tlaku vzduchu a „zklidňují“ projevy počasí a to právě výparem vody a „měli bychom jim za to děkovat“? Za vysokých nákladů se testují technologická zařízení na sekvestraci CO<sub>2</sub> s tím, že jsou výhodnější nežli lesní porosty a rychle rostoucí dřeviny, protože „neplýtvají vodou“.

Princip vysychání: je zásadní rozdíl mezi evapotranspirací a tokem zjevného tepla z odvodněných ploch. Les vydá například za den 3mm vody evapotranspirací, ochladí se, vodní pára stoupá zvolna nad les, (potenciální ET je blízká aktuální ET), vytvoří se mlha, mraky, případně drobný déšť, část vody se vrací. Odvodněné plochy se zahřívají až na 50 °C, ohřátý vzduch turbulentně stoupá vzhůru, jeden m<sup>3</sup> vzduchu o teplotě 40 °C, a 20% vlhkosti obsahuje 10gramů vody. I při velmi pomalé vzestupné rychlosti 0,1m.s<sup>-1</sup> se nad 1m<sup>2</sup> vynese vysoko do atmosféry za hodinu 3,6 litru vody, za 10 hodin 36 litrů vody ve formě vodní páry, která se sbírá z okolí, vysušuje les, louky, vodní plochy. Rybníky menších ploch (několik ha) v zemědělské krajině ztrácejí vodu rychleji nežli rybníky v lesích nebo velké rybníky.

Když v létě v ČR sklídíme řepku a obilí na 1 800 000ha polí, proudí z přehřátých ploch do atmosféry teplo cca 9000GW (12 GW je instalovaný výkon elektráren v ČR, z toho JE Temelín má 2GW). Ohřátý vzduch odnáší vlhkost vysoko do atmosféry, krajina se vysušuje, ohřátý vzduch produkovaný jako zjevné teplo na velkých plochách brání proudění oceánského vzduchu směrem do kontinentu. Mnohé klimatologické studie se soustřeďují pouze na albedo (bělost), tedy odrazivost povrchu a tvrdí, že zejména lesy mírného pásma ohřívají planetu, protože jsou tmavé. Pokud by les vyhořel, albedo se zvýší a planeta se spíše ochladí, protože nárůst teploty způsobený uvolněným oxidem uhličitým je nižší nežli ochlazení způsobené zvýšeným albedem/odrazem (Bala et al. 2007). V těchto pracích není zmínka o tom, že les je chladnější díky evapotranspiraci.

Někteří čeští vědci (profesoři Přírodovědeckých fakult UK Praha a Jihočeské univerzity, experti ČGS) opakovaně tvrdí, že les na horách nemá hydrologickou funkci, a že funkci uschlého vzrostlého lesa nahradí přízemní vegetace. Ušchlý les nemůže prý být příčinou snížení stavu vody v toku, protože suchý strom vypaří méně vody nežli strom živý. Jsou přitom známy úspěšné projekty obnovy aridní krajiny založené na zadržení vody a obnově trvalé vegetace.

Jaká je vize udržitelné krajiny? Kapénková závlaha, podmínka hned po sklizni a pole bez vegetace, volné odvodněné plochy, aby se voda nevypařovala, Šetření vodou a vodní stopa uplatňovaná i na stromy a další vegetaci?

Nebo krajina s trvalou vegetací, meziplodinami po sklizni, s vodními plochami a litorály, zasakovacími pásy na velkých polích? Krajina s podporou trvalé vegetace i z kulturních rostlin a stromů, která funkčně napodobuje les, zadržuje dešťovou vodu, která se odpařuje přes rostliny, chladí a vrací se částečně v malém oběhu vody?

## **Závěr**

Odlesnění, ztráta trvalé vegetace vede k vysychání krajiny, extrémům teplot, zrychluje se odtok vody. Zkušenost historických civilizací prokázala opakovaně pozitivní úlohu lesa v klimatu, proto je tato funkce zakotvena v Lesním zákonu od počátku.

Zapomíná se na přímý efekt vody a vegetace na teplotu, na klima. Voda vyrovnává teploty cyklem výpar – kondenzace, vodní pára tvoří mraky a mlhu a brání průniku slunečního záření. Voda je médium a rostliny jsou procesory ovládající výdej vodní páry a vyrovnávají tak extrémy tlaku a teplot.

## **Literatura**

Andréassian, V., 2004: Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. J Hydrol. 291, 1–27.

Bala, G. et al., 2007: Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. PNAS 104, č. 16 s. 6550–6555.

Brom J., 2012: Modul pro prostorový výpočet energetické bilance a vodního stresu vegetace (Module for Spatial Computing of Surface Energy Balance and Crop Water Stress) – „SEBCS 0.1. Návod k použití. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta.

Brom, J., Pivovarník, M. Hesslerová, P., Nedbal, V., Jirka, V. Vinciková, H., Procházka, J., Lechner, P., 2014: Termální data. In: Zemek, F. a kol. Letecký dálkový průzkum země teorie a



příklady hodnocení terestrických ekosystémů. 2014. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i 155 s. ISBN: 978-80-87902-07-3 Str. 49-60

Brom, J. a Pokorný, J., 2017: Hydrologie mokřadů, vodní cyklus a klima. In: Čížková, H., Vlasáková, L. and Květ, J. (eds). Mokřady: Ekologie, ochrana a udržitelné využívání. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice. Str.. 313-332,

Čermák, J., Kučera, J., Bauerle, W. L., Phillips., N., Hinckley, M., 2007: Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree physiology*, 27: 181–198.

Čermák, J., Kučera, J., Nadezhdina, N., 2004 Sap flow measurements with two thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees, structure and function*, 18:529-546.

Diamond, J., 2008: Kolaps, proč společnosti přežívají či zanikají. Academia, Praha, pp.752

Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, C.E., Sheil, D. et al, 2017: Trees, forests and water: cool insights for a hot world, *Global Environmental Change* 43 (2017) 51–61

Hesslerová, P., Chmelová, I., Pokorný, J., Šulcová, J., Kröpfelová, L., Pechar, L., 2012: Surface temperature and hydrochemistry as indicators of land cover functions. *Ecological Engineering* 49, 146 – 152.

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.

Hesslerová, P., Pokorný, J. 2014: Denní dynamika povrchové teploty různých typů krajinného pokryvu. 2014. In: Zemek, F. a kol. Letecký dálkový průzkum země teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i 155 s. Str. 137-146

Hesslerová, P., Pokorný, J., 2015a: Functional attributes of the landscape surrounding the Temelin nuclear power plant (Czech Republic). *International Journal of Remote Sensing* 36 (19-20), 5165 - 5177.

Hesslerová, P., Pokorný, J., 2015b: *Surface temperature, wetness and vegetation dynamic in agriculture landscape – comparison of cadasters with different types of wetlands*. In: Vymazal, J. (ed.): *The Role of Natural and Constructed Wetlands in Nutrient Cycling and Retention on the Landscape*, Springer. p. 123 – 136.

Hesslerová, P., Pokorný J., Procházka, J., Huryňa H. 2018a: Funkce vzrostlého lesa v oběhu vody a místním klimatu aneb následky velkoplošného uschnutí lesa na regionální klima. Sborník ke konferenci Úloha lesa v koloběhu vody na Zemi. Modrava 27.5. 2018, str. 19 – 22.

Hesslerová, P., Huryňa H., Pokorný J., Procházka, J., 2018b: The effect of forest disturbance on landscape temperature. *Ecological Engineering*. In press.

Huryna H, Brom J., Pokorný J., 2014: The importance of wetlands in the energy balance of an agricultural landscape. *Wetland Ecology and Management* 22(4), 363 – 381

Huryna, H. and Pokorný, J., 2016: The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica*. 51(3), 101-208.

IPCC 2007a: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

IPCC 2007b: Direct warming potentials,  
[https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-2.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-2.html)

IPCC (2013): Climate Change, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New

Irmak, S. 2008: Evapotranspiration, In Encyclopedia of Ecology, edited by SE Jørgensen and BD Fath, Academic Press, Oxford, Pages 1432–1438.

Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G. 2007: Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrol Earth Syst Sci* 11(2): 1013-1033.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura T., Zhang, H., 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment

Nedbal, V., Brom, J., 2018: Impact of highway construction on land surface energy balance and local climate derived from LANDSAT satellite data. *Science of The Total Environment*. 633, 658 – 667.

Plimer, I., 2009: Heaven and Earth, global warming the missing science, Taylor Trade Publishing, Lanham, Maryland 504 pp

Plimer, I., 2011: How to get expelled from school – A guide to climate change for pupils, parents and punters. , Connorcourt, Publishing , Ballan VIC, Australia, 243 pp

Ponting C., 1991: A Green History of the World. The Environment and the Collapse of Great Civilizations, Penguin Books, 412 s.

Pokorný, J., Brom, J., Čermák, Hesslerová, P., J., Huryna, H., Nadezhdina, N., Rejšková, A., 2010: Solar energy dissipation and temperature control by water and plants, *Int. J. Water*, Vol 5, No 4, 311 – 336

Pokorný, J., Hesslerová P., Huryna, H., 2017: Mokřady a klima. In: Pithart, D., Melichar, V., Přikryl, I., Křesina, J., Vlasáková L.(eds.): Ekologický stav mokřadů v ČR a trendy jejich vývoje. Beleco, z.s. Praha. 199 - 212.

Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Huryna, H., Seják, J., 2018: Význam zeleně pro klima města a možnosti využití termálních dat v městském prostředí. Urbanismus a územní rozvoj. 1, 26 – 37.

Ruddiman, W.F., 2011: Pluhy, nemoci a ropa, Academia, Praha, 294 pp

Sheil, D., 2018, Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle, Forest Ecosystems (2018) 5:19 <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0138-y>

Schneider, E.D., Sagan, D., 2006: Into the Cool, Energy Flow, Thermodynamics, and Life, The University of Chicago Press, Chicago and London 362pp

Tomková, A., 2014: Srovnání různých přístupů k hodnocení energetické bilance stromů. Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta UK Praha, katedra experimentální biologie, 90 s.

Villiers M., Hirtle, S. 2004: Sahara, the life of the great desert. Harper Collins Publisher, London, 326 pp.

Poděkování.: Tato práce byla podpořena z projektu TAČR TE02000077 a Horizon 2020 SIM4NEXUS

## **Kontakt**

Doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc

ENKI, o.p.s.

Dukelská 145, 379 01 Třeboň

Tel. 602 465 099, e-mail: [pokorny@enki.cz](mailto:pokorny@enki.cz)