

Nová metodika vzdělávání pracovníků městských úřadů

Sluneční energie – voda v krajině – vegetace

k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice



Tato metodika byla vytvořena s finanční podporou TAČR v rámci Projektu TL01000294:
*Sluneční energie, voda v krajině, vegetace: nová metodika vzdělávání pracovníků městských úřadů
a inovace školní výuky k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima.*

Autorský kolektiv:

Doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc.

RNDr. Renata Ryplová, Ph.D.

RNDr. Petra Hesslerová, Ph.D.

Ing. Vladimír Jirka, CSc.

Mgr. Zbyněk Vácha, Ph.D.

PhDr. Miroslav Procházka, Ph.D.

Fotografie: Archiv ENKI, o.p.s.

V roce 2021 vydalo ENKI, o.p.s., Třeboň

© 2021 ENKI, o.p.s., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích a město Dačice

ISBN 978-80-908090-1-7

Obsah

1. Úvodem	4
2. Cíle, obsah a způsob tvorby metodiky	4
3. Teoretický úvod do problematiky	5
3.1. Sluneční energie	5
3.2. Distribuce sluneční energie v krajině	6
3.3. Výpar a kondenzace vody, fyzikální principy v biologii rostlin	8
3.4. Role vegetace v distribuci sluneční energie v krajině	9
3.5. Proč vegetace vrací vodu do krajiny a odlesnění způsobuje vysychání	13
3.6. Biotická pumpa a obrácená biotická pumpa	14
3.7. Přehled vědeckých metod k měření potřebných fyziologických dějů a veličin	16
3.8. Shrnutí.....	19
4. Přístrojové vybavení a nácvik měření	19
4.1. Přehled potřebných fyzikálních veličin a jednotek.....	19
4.2. Doporučený soubor měřicích přístrojů.....	22
4.3. Nácvik měření.....	23
5. Specifita vzdělávání pracovníků městských úřadů	25
6. Vzdělávací situace	27
6.1. Agrární krajina	27
6.2. Urbánní krajina.....	31
7. Vyčíslení ekosystémových služeb	39
8. Příloha	40
9. Použitá literatura	41
Poděkování	43

1. Úvodem

Pracovníci městských úřadů s rozhodovacími pravomocemi se ve své každodenní praxi setkávají se situacemi, kdy mají posuzovat vhodnost plánovaných hospodářských zásahů v daném území. Tyto zásahy mnohdy významně ovlivňují vegetační kryt a mohou mít zásadní dopad na místní klima i dostatečné zásobení krajiny vodou. Praxe však ukazuje, že pro tyto rozhodovací procesy často pracovníkům městských úřadů chybí potřebné informace o fyziologické funkci vegetace v distribuci sluneční energie a s tím souvisejícího koloběhu vody v krajině. Důvodem je dosavadní opomíjení či dokonce naprostá absence tohoto tématu ve vzdělávání na všech stupních. Často se proto potýkají s nedostatkem informací o této roli vegetace v krajině, a to jak po stránce teoretické, tak i po stránce praktické ve smyslu znalostí metodiky měření a vyčíslení tzv. ekosystémových služeb v konkrétních posuzovaných případech. Co se stane s místním klimatem, pokud vykáčíme park a nahradíme jej nákupním centrem s velkoplošným betonovým parkovištěm? Ubyde v krajině voda, pokud vykáčíme les? Jaké dopady na teplotu okolí bude mít revitalizace stromořadí, při níž vykáčíme vzrostlé stromy a nahradíme je mladými doplněnými vodní fontánou? Pracovníkům městských úřadů chybí pro tyto rozhodovací procesy informace a podklady, odkud je čerpat, jejich zaměstnavatelům pak moderní metodika, podle které by mohli své pracovníky v tomto směru zaškolovat. V reakci na požadavek městských úřadů byla proto vytvořena tato vzdělávací metodika.

Vegetace hraje v životním prostředí člověka z pohledu utváření klimatu a zachování dostatku vody v krajině zcela klíčovou roli. Díky výparu vody (evapotranspiraci) přeměňuje většinu dopadající sluneční energie na skupenské teplo vody a chladí své okolí výkonem až několik set $W \cdot m^{-2}$. Evapotranspirace snižuje teplotní gradienty v našem životním prostředí a stojí na začátku tzv. krátkého cyklu vody, díky němuž se voda do krajiny opět vrací ve formě srážek. Vegetační kryt v krajině má proto klíčový význam pro zachování dostatečného množství vody pro budoucí generace a významně zmírňuje dopady globální klimatické změny. I přesto však je, bohužel, všeobecné povědomí o této úloze vegetace v distribuci sluneční energie a utváření klimatu poměrně nízké. Vzhledem k všeobecné neznalosti základních rostlinných fyziologických funkcí a s nimi souvisejícího významu rostlin v krajině, pak dochází k neuváženým zásahům do vegetačního krytu, které mají výrazný dopad na životní prostředí člověka. Jedním z těchto dopadů, který se v poslední době projevuje velmi negativně a pro existenci lidstva má zásadní význam, je rozšiřující se sucho i tepelné ostrovy měst.

2. Cíle, obsah a způsob tvorby metodiky:

Cílem této metodiky je umožnit zaškolení pracovníků městských úřadů v problematice role vegetace pro udržení vody v krajině, tak, aby byli sami schopni zodpovědně posuzovat navrhované hospodářské zásahy do krajiny s cílem zlepšit lokální klima a udržet v krajině vodu.

Nová vzdělávací metodika pro pracovníky městských úřadů k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima obsahuje:

- Teoretický úvod do problematiky
- Doporučenou sestavu měřících přístrojů
- Návik měření
- Výukové příklady z praxe
- Vyčíslení ekosystémových služeb

Metodika vychází z dlouhodobé expertní a výzkumné činnosti ENKI, o.p.s. v oblasti ekofyziologie rostlin a know-how v oblasti andragogiky pracovníků Pedagogické fakulty JU v Českých Budějovicích.

V části teoretické obsahuje metodika přehled a stručné vysvětlení základních dějů v oblasti vztahů solární energie – vegetační kryt – voda v krajině a doporučuje vhodné měřicí přístroje společně s popisem a návikem metodiky měření. V části praktické jsou v rámci výukových situací uvedeny vybrané terénní případy, spolu se způsoby jejich hodnocení. Teoretická část metodiky vychází z knižní publikace „Slunce – voda – rostliny – klima: Podklady k poznání a výuce“ dostupné online zdarma zde: <https://www.pf.jcu.cz/projekty/svv/>

Metodika byla vytvářena v průběhu 3 let v rámci řešení projektu TAČR TL 01000294 formou participativního výzkumu. Jedná se o složitou problematiku, kterou bylo nutno adekvátně uchopit a vzdělávací materiály přizpůsobit konkrétním potřebám cílové skupiny. Každoročně proto probíhaly workshopy pro pracovníky městských úřadů, na nichž byla metodika testována a na základě zpětné vazby následně upravována. V prvním roce bylo v rámci těchto workshopů nutno nejprve zmapovat konkrétní požadavky, potřeby a úroveň poznání tématu cílové skupiny – pracovníků městských úřadů. Na základě těchto poznatků pak byla vytvořena pilotní verze metodiky, podávající základní informace velmi názorně a detailně. V následujících dvou letech byla metodika během workshopů s pracovníky městských úřadů ověřována, upravována a evaluována pomocí dotazníkových šetření a rozhovorů s respondenty.

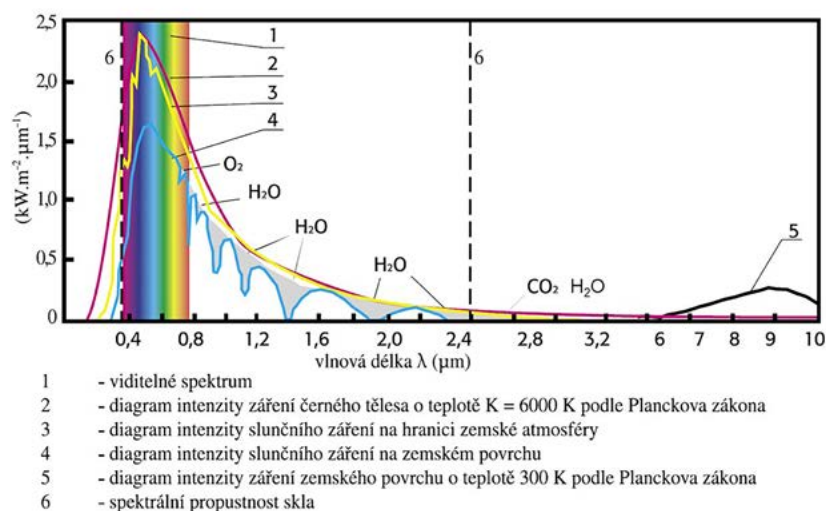
3. Teoretický úvod do problematiky

Hlubší informace k problematice role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu v krajině lze čerpat ve výše zmíněné publikaci „Slunce – voda – rostliny – klima: Podklady k poznání a výuce“, na tomto místě uvádíme jen stručný přehled stěžejních pojmů a procesů, nutných k pochopení této problematiky.

3.1. Sluneční energie

Na hranici zemské atmosféry prochází plochou 1 m² průměrně 1367 W slunečního záření. Tuto energii nazýváme solární konstantou, protože pro průměrnou vzdálenost Země od Slunce je její hodnota stálá. Podle

polohy Země na její eliptické dráze kolem Slunce se hodnoty množství sluneční energie přicházející na povrch atmosféry v průběhu roku pohybují od 1438 do 1345 W.m⁻². Při průchodu atmosférou se absorbuje nejméně jedna třetina slunečního záření (ve vodní páře, rozptyluje se a odráží v mracích, na částicích a aerosolech). Veškeré sluneční záření přicházející na zemský povrch se nazývá globální, zahrnuje přímé i rozptýlené záření všech vlnových délek. Při zatažené obloze postrádá sluneční světlo dopadající na zemský povrch složku záření přímého, je tvořeno pouze zářením rozptýleným. Hustá oblačnost odráží a pohlcuje velkou část slunečního záření. Zatímco při jasné letní obloze přichází na zemský povrch až 1000 W.m⁻² slunečního záření, při husté oblačnosti prochází pouze několik desítek W.m⁻². Za jasného letního dne přichází na 1 km² až 1000 MW, na 2 km² tedy přichází energie srovnatelná s výkonem jaderné elektrárny Temelín.

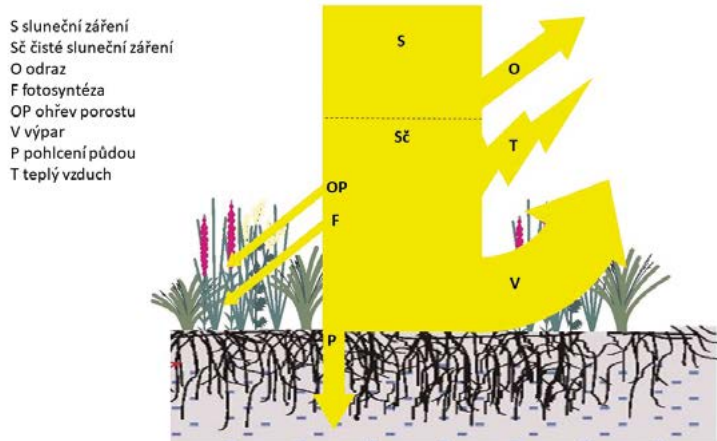


Obr. 1: Sluneční spektrum vypočítané podle Planckova zákona (2), měřené na vnější hranici zemské atmosféry (3), na zemském povrchu (4). V 7 – 10 um je znázorněno dlouhovlnné záření vysílané zemským povrchem. Sklo propouští krátkovlnné sluneční záření do vlnové délky přibližně 2,4um a nepropouští záření dlouhovlnné/teplo (6). Z přicházející sluneční energie má největší intenzitu oblast viditelného spektra (světlo). Na diagramu č. 4 jsou znázorněny absorpční pásy vodní páry a kyslíku. Vodní pára absorbuje též dlouhovlnné záření podobně jako CO₂ (Rosenberg 1974; Cihelka 1997).

3.2. Distribuce sluneční energie v krajině

Sluneční záření, které dopadá po průchodu atmosférou na zemský povrch, se částečně **odráží**, částečně **ohřívá zemský povrch** a od něj se **ohřívá vzduch**. Ten turbulentně proudí vzhůru (**zjevné teplo**), část energie spotřebovaná na výpar vody z půdy (evaporace) a z rostlin (transpirace) se označuje jako latentní, skryté teplo **evapotranspirace**, a část přechází do země (**tok tepla do půdy**).

Osud sluneční energie dopadající na povrch s vegetací...



Obr. 2: Distribuce sluneční energie v krajině (podle Šarapatka a kol. 2010)

S: Globální sluneční záření nebo-li globální (celková) sluneční radiace (používaný vědecký termín ISR, „incoming solar radiation“) dopadající na zemský povrch obsahuje přímé i rozptýlené záření všech vlnových délek. Při zatažené obloze postrádá sluneční světlo dopadající na zemský povrch složku záření přímého, je tvořeno pouze zářením rozptýleným. Hustá oblačnost pohlcuje velkou část slunečního záření.

O: Odražené záření (vědecky R_r , „radiation reflected“). Poměr mezi zářením odraženým a dopadajícím se nazývá albedo (α). Vysoké albedo (vysoký odraz) má světlý, suchý povrch. Naopak nízké albedo má tmavý povrch, zejména voda a tedy i vlhká vegetace. Ve slunných dnech odráží světlá betonová plocha až 30 % energie, zatímco vodní hladina rybníka odráží nanejvýš 10 %. Odraz různých typů vegetace se příliš neliší a pohybuje se okolo 20 %, relativně méně odráží po většinu roku vegetace dobře zásobená vodou.

Sč: Čisté sluneční záření (vědecky R_n „net radiation“). Tok krátkovlnného a dlouhovlnného záření mezi zemským povrchem a atmosférou přes jednotku plochy se nazývá čistá radiace (čisté záření). Je to rozdíl sumy veškeré přicházející energie a sumy veškeré energie odcházející (vyzařované, emitované). Sluneční záření se odráží (albedo) a ohřívá povrch, který potom vyzařuje/emituje dlouhovlnné záření. Je tedy nutné rozlišovat odraz a vyzařování.

T: Teplý vzduch (vědecky H , „sensible heat“, zjevné teplo). Sluneční energie ohřívá povrch a od něho se ohřívá vzduch, který turbulentním prouděním stoupá vzhůru. Vzrůstající teplotu povrchu i vzduchu vnímáme a můžeme ji měřit teploměrem, proto se nazývá teplem zjevným (citelné, pocitové). Letci znají vzestupné proudění ohřátého vzduchu pod pojmem termika.

V: Výpar (skupenské teplo, vědecky L^*E , „latent heat“, latentní, skryté teplo evapotranspirace) je energie využitá k přeměně skupenství kapalného na skupenství plynné. Při kondenzaci vodní páry zpět na kapalinu na chladných místech nebo v atmosféře se skupenské teplo opět uvolňuje.

Evapotranspirace je děj zahrnující výpar z půdy – evaporaci a výpar z rostlin – transpiraci.

P: Tok tepla do půdy (vedení tepla, vědecky G , „ground heat“). V létě se půda postupně ohřívá (tok tepla je kladný), v zimě nebo během chladné noci v létě půda chladne (tok tepla je záporný).

F: Fotosyntéza (vědecky P , „photosynthesis“). Tok sluneční energie fotosyntézou do biomasy rostlin tvoří velmi malou část celkové energetické bilance (max. 1 %). Počítá se jako množství sluneční energie vázané ve vznikající biomase. V našich podmínkách činí za slunného počasí a dostatku vody denní přírůstek sušiny přibližně $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, což odpovídá průměrnému energetickému toku $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

OP: Ohřev porostu (vědecky J , „canopy warming“). Množství energie spotřebované na ohřev porostu závisí na množství biomasy a obsahu vody v této biomase ($4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 1,16 \text{ Wh}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$, dříve $1 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Tělesa vyzařují dlouhovlnné záření. Teplejší těleso předává teplo tělesu chladnějším. Podle Stefanova–Boltzmannova zákona intenzita vyzařování černého tělesa roste se čtvrtou mocninou teploty zářícího tělesa ($I = \sigma T^4$). Prakticky to například znamená, že povrch země chladne v noci rychleji proti chladné jasné obloze nežli při zatažené obloze. Mraky mají vyšší teplotu nežli jasná obloha bez mraků. Intenzitu toku energie dlouhovlnného záření lze na základě Stefanova–Boltzmannova zákona odhadnout: rozdíl $1 \text{ }^\circ\text{C}$ představuje tok přibližně $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, rozdíl $10 \text{ }^\circ\text{C}$ představuje potom tok $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

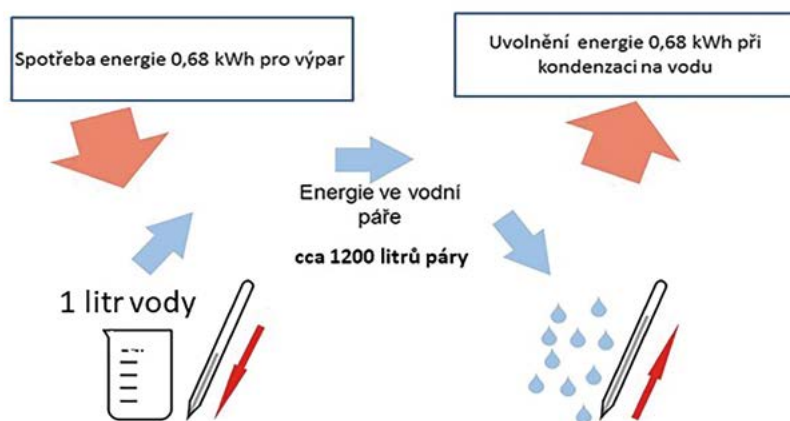
3.3. Výpar a kondenzace vody, fyzikální principy v biologii rostlin

O roli vegetace v distribuci slunečního záření a koloběhu vody v krajině se mluví také jako o „klimatizačním efektu“ vegetace v krajině. Klimatizační efekt je založen na evapotranspiraci. Pro jeho pochopení je nutná aplikace elementárních fyzikálních principů – přenos tepelné energie související se změnami skupenství vody z kapalného na plynné a naopak.

Skupenské výparné teplo vody udává, kolik energie je potřeba dodat k výparu 1 l vody. Skupenské výparné teplo vody je při běžné teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $2,45 \text{ MJ/l}$. To je přibližně $0,68 \text{ kWh}$ sluneční energie (přepočít $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$, $2450 : 3600 = 0,68 \text{ kWh}$). Při výparu 1 litru vody je tedy ve vodní páře „uschováno“ přibližně $0,68 \text{ kWh}$ sluneční energie. Při poklesu teploty dochází ke kondenzaci vodní páry zpět na vodu. Energie vázaná ve vodní páře se opět uvolňuje a ohřívá povrchy, na nichž se vodní pára sráží.

S výparem a kondenzací souvisí i mírné změny tlaku vzduchu. Z 1 litru vody se vytvoří 1245 litrů vodní páry (standardní molární objem $V_m = 22,414 \text{ dm}^3$ při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a normálním tlaku), 1 l vody obsahuje $55,55 \text{ mol}$ vody.

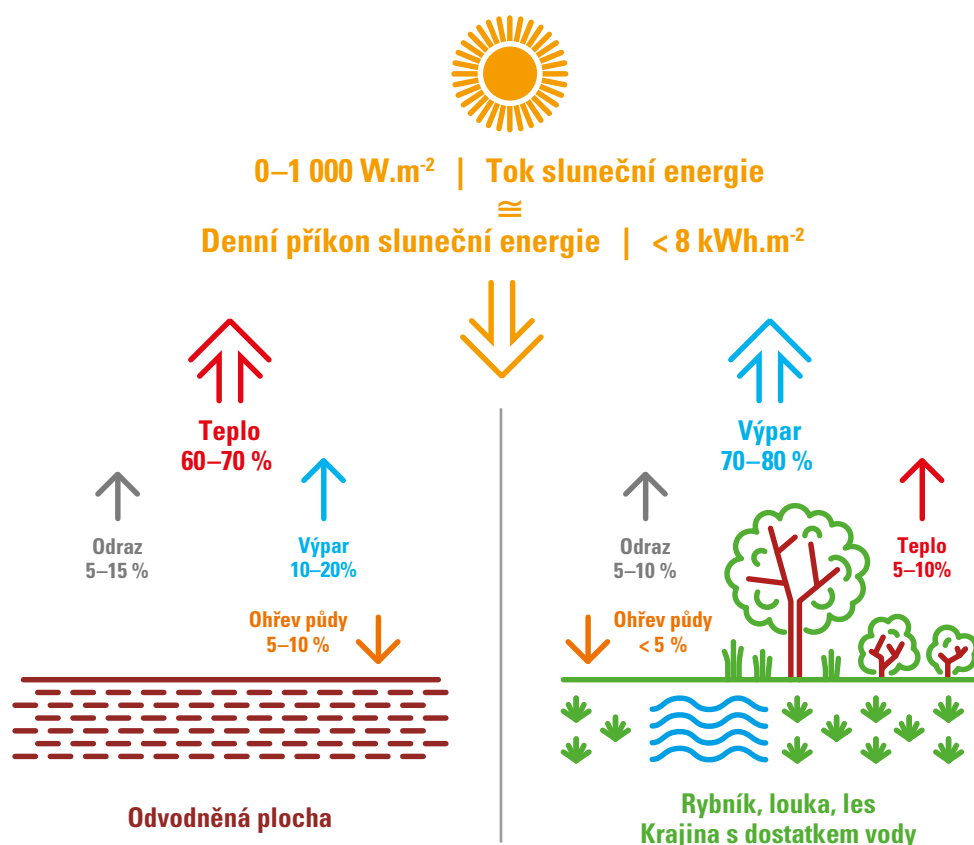
Molární hmotnost vody je $16 + 2 = 18$ g. Při výparu tlak vzduchu roste, při kondenzaci tlak vzduchu klesá.



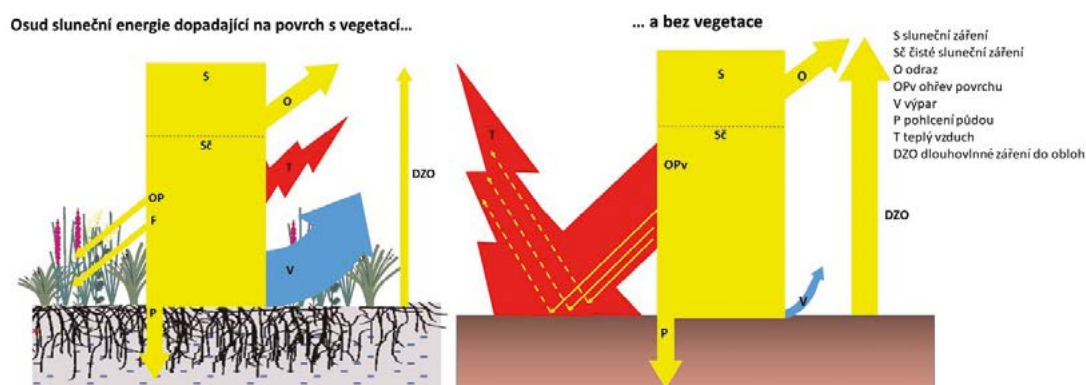
Obr. 3: Schematické znázornění energetických změn při výparu a kondenzaci vody

3.4. Role vegetace v distribuci sluneční energie v krajině

Osud sluneční energie dopadající na zemský povrch se významně liší v krajině s dostatkem vegetace zásobené vodou a v krajině s nedostatečným vegetačním krytem. Jednoduchým měřením a za použití níže doporučené měřicí techniky je možné se přesvědčit, že v našich podmínkách dopadá za jasného letního dne až $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Pokud sluneční energie přichází na suchý povrch bez vegetace, přeměňuje se převážně na zjevné teplo (obr. 5). Od ohřátého povrchu se pak ohřívá vzduch. Lehký teplý vzduch stoupá vzhůru. Zrychluje se tak i proudění vzduchu. V krajině zásobené vodou a pokryté vegetací se však podstatná část slunečního záření (např. 80 %) spotřebovává na výpar vody (obr. 4). Rozdíl v distribuci sluneční energie na odvodněné ploše a ve vegetaci dobře zásobené vodou je ve slunném dnu v rozsahu několika set $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Na evapotranspiraci se spotřebovává $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ i více v závislosti na vlastnostech porostu, stupni zásobení vodou apod. Již víme, že na výpar jednoho litru vody o teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ se spotřebuje $2,45 \text{ MJ} \approx 0,68 \text{ kWh}$ sluneční energie. Vzrostlý strom zásobený vodou s poloměrem koruny 4 m za jasného dne odpaří cca 200 l vody. Na výpar tedy spotřebuje 136 kWh sluneční energie. Tato energie se neuvolní jako zjevné (pocitové) teplo. Stromy (a vegetace jako taková) tímto způsobem chladí sebe i své okolí. Evapotranspirace má navíc dvojnásobný klimatizační efekt – ochlazuje výparem a ohřívá kondenzací (obzvláště v noci), přispívá tedy k vyrovnávání teplotních gradientů v krajině. Ohřev díky kondenzaci má pro zemědělce, sadaře a vinaře velký význam např. v období náhlých jarních mrazů.



Obr 4: Rozdíl v distribuci sluneční energie v krajině s vegetací a suché krajině bez vegetačního krytu a vodních nádrží. Odvodněná plocha s nedostatkem vegetace se přehřívá, ohřátý vzduch stoupá vzhůru a nasává vlhkost i z okolí. Krajina s vegetací a dostatkem vody se chladí výparem vody, chladný vzduch stoupá zvolna vzhůru a brzo dosáhne rosného bodu, tvoří se mraky, mlha, voda se vrátí jako drobný déšť.



Obr. 5: Schematické znázornění distribuce sluneční energie v krajině s vegetací a bez vegetace. Na schématech je patrný rozdíl ve velikosti šipek představujících výpar a teplý vzduch. V krajině s vegetací představuje největší šipka V – tedy velký výpar (evapotranspiraci), tzn., většina sluneční energie se váže do vodní páry jako tzv. „latentní teplo“ a pro ohřev vzduchu (šipka T) od povrchu zůstává tak méně energie. Naopak v krajině bez vegetace chybí voda, která by mohla vázat energii pro výpar, odpařuje se malé množství vody z půdy (malá šipka V), většina energie je tak využita pro ohřev povrchu a od něj se ohřívá vzduch (velká šipka T), (podle Šarapatka a kol. 2010, upraveno).

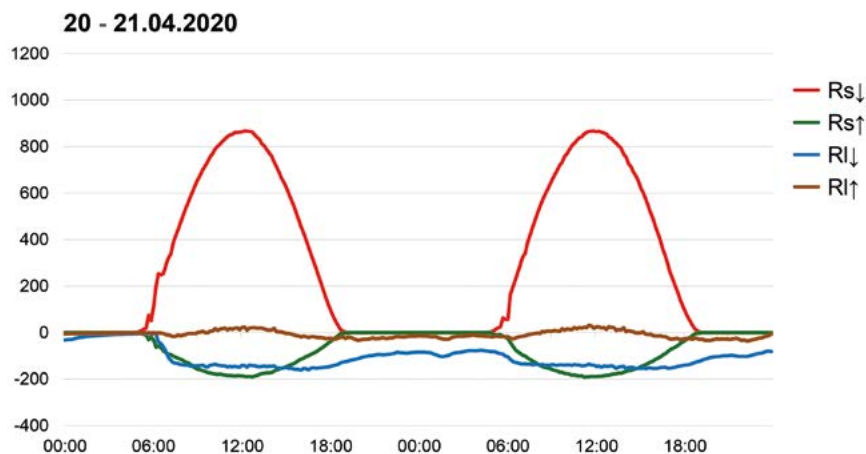
Doposud uvedená zjednodušená schémata distribuce sluneční energie v krajině vycházejí z dlouhodobých měření pomocí přesných vědeckých high – tech zařízení. Na vědecké úrovni se základní bilance toků slunečního záření, tj. množství energie přicházející a množství energie odcházející, měří tzv. netradiometrem. Uvádíme příklad hodnot naměřených na stanici ENKI, o.p.s. v Domaníně u Třeboně.



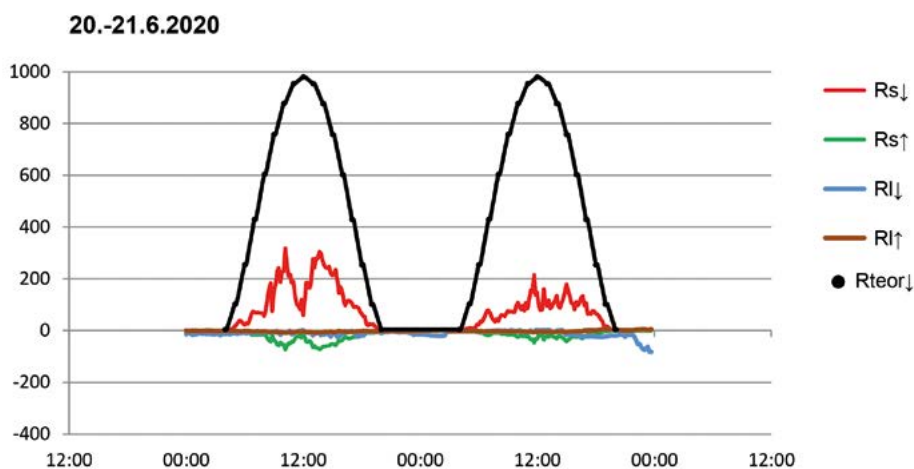
Obr. 6: Detail netradiometru. Čidla pro měření **dopadající krátkovlnné globální radiace** ($RS\downarrow$) a odražené krátkovlnné radiace $RS\uparrow$ (pyranometr 305-2800 nm) a radiačních toků **dlouhovlnného záření (tepla)** $RI\downarrow$, $RI\uparrow$ (4500 - 42 000 nm). $RI\downarrow$ = energetická výměna mezi čidlem a oblohou, využívá se pro výpočet zdánlivé **radiační teploty oblohy**. Měřená hodnota toku tepla (dlouhovlnného záření) vůči obloze bývá většinou záporná, protože obloha bývá chladnější než čidlo a nabývá hodnot do $-200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. $RI\uparrow$ = energetická výměna mezi čidlem a povrchem porostu (půdy), využívá se pro výpočet **radiační teploty povrchu**. Měřené tepelné záření nabývá kladných i záporných hodnot v rozmezí několika desítek $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Netradiometr je umístěn ve výšce 2m nad povrchem (Jirka a kol. 2021).

Porovnání hodnot naměřených netradiometrem za jasného dne 20. 4. 2020 a zataženého dne 20. 6. 2020 je na obrázcích 7, 8 a dokumentuje význam oblačnosti pro toky energie mezi zemským povrchem a atmosférou. Denní chod přicházejícího ($RS\downarrow$) a odraženého ($RS\uparrow$) slunečního záření ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou ($RI\downarrow$) a čidlem a povrchem země ($RI\uparrow$). $RS\downarrow$ znázorňuje průběh teoretické hodnoty dopadajícího slunečního záření při jasné obloze. Za jasného dne 20. 4. 2020 za 24 hodin dopadlo na 1m^2 7136 Wh sluneční energie, odrazilo se 1690 Wh a do oblohy se vyzářilo ve formě tepla 2191Wh. V zataženém dni 20. 6. 2020 na 1m^2 dopadlo 1955 Wh sluneční energie, odrazilo se 472 Wh a do oblohy se vyzářilo 290 Wh ve formě tepla. Teoretická hodnota sumy sluneční energie přicházející za 24 hodin na 1m^2 je 7028 Wh pro 20. 4. a 8961Wh pro 20. 6. Je zřejmé, že při zatažené obloze dopadlo pouhých 22% sluneční energie z teoretické hodnoty odpovídající jasné obloze. Praktický význam: tělesa vyzařují dlouhovlnné záření. Teplejší těleso předává teplo tělesu chladnějšímu. Podle Stefanova – Boltzmannova zákona intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou teploty zářícího

tělesa ($I = \sigma \cdot T^4$). Povrch země tedy chladne v noci rychleji proti chladné jasné obloze nežli při zatažené obloze. Mraky mají vyšší teplotu nežli jasná obloha bez mraků. Intenzitu toku energie dlouhovlnného záření lze odhadnout: rozdíl 1°C představuje tok přibližně $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, rozdíl 10°C odpovídá $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Např. 20. 4. 2020 se do jasné oblohy vyzářilo $2191 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$, což mělo za následek pokles teploty u země pod bod mrazu (na Jižní Moravě až -7°C) a zmrznutí květů ovocných stromů (meruněk).



Obr. 7: Denní chod přicházející slunečního záření ($RS\downarrow$), odraženého slunečního záření ($Rs\uparrow$), dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou ($RI\downarrow$) a čidlem a povrchem země ($RI\uparrow$).



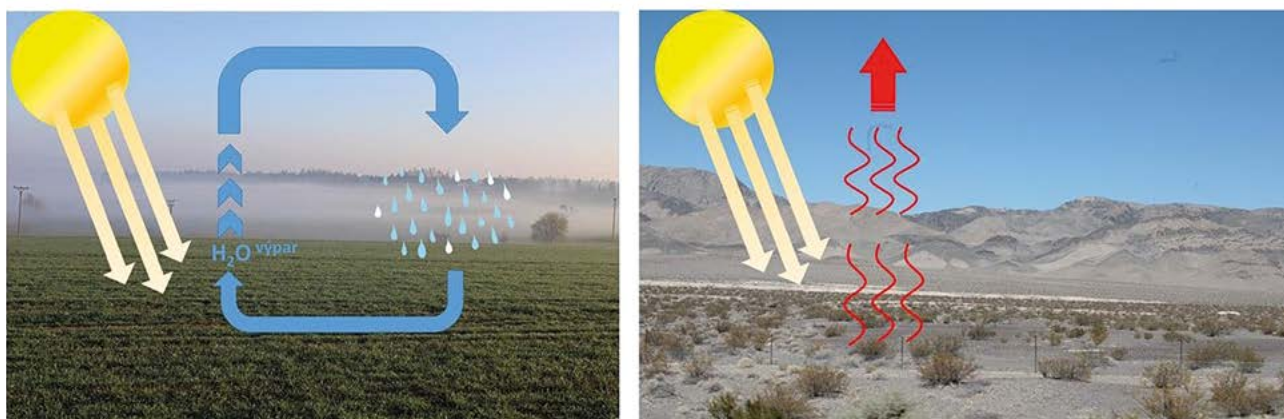
Obr. 8: Denní chod přicházející slunečního záření ($RS\downarrow$), odraženého slunečního záření ($Rs\uparrow$), dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou ($RI\downarrow$) a čidlem a povrchem země ($RI\uparrow$). $Rs\text{Teor}\downarrow$ je teoretická hodnota přicházející sluneční energie za jasné oblohy.

Na jeden m^2 povrchu České republiky dopadá za jasného dne ve vegetační sezóně přibližně $800 - 1000 \text{ W}$ sluneční energie; oblačnost snižuje množství přicházející sluneční energie násobně.

Oblačnost rozhoduje o množství přicházející sluneční energie i o množství energie vyzářené jako teplo do atmosféry (skleníkový efekt). Výpar z vegetace zásobené vodou významně přispívá k oblačnosti nad daným územím.

3.5. Proč vegetace vrací vodu do krajiny a odlesnění způsobuje vysychání

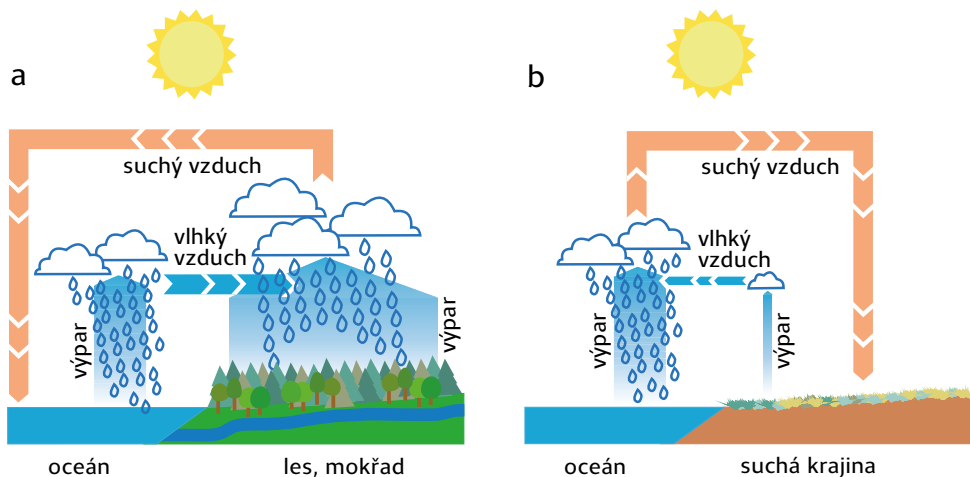
Výpar z vegetačního krytu stojí na začátku tzv. krátkého cyklu vody, kterým se odpařená voda z krajiny do ní zase vrací zpět. Sluneční energie vázaná ve vodní páře ve formě skupenského tepla se na chladných místech (výše v atmosféře, v noci, ráno) potom opět uvolní při kondenzaci vodní páry zpět na vodu. Vodní pára se sráží na kapičky vody, které vytvářejí oblačnost, ze které vypadávají mírné srážky. Územní výpar zvýšený působením vegetačního krytu tedy zvyšuje tvorbu oblačnosti a srážek v území, čímž dochází k navracení vody zpět do krajiny. Nejkratší cestou návratu vody z atmosféry zpět do krajiny je tvorba horizontálních (usazených) srážek, zejména rosy a jinovatky. Navíc mlha a oblačnost zásadním způsobem snižují průnik slunečního záření na zemský povrch (viz vlastní měření intenzity slunečního záření za jasného a oblačného dne). Naopak na místech bez vegetačního krytu se většina sluneční energie přemění na teplo, suchý teplý vzduch rychle stoupá vzhůru od ohřátého suchého povrchu, zrychluje se vzestupné proudění vzduchu, které krajinu dále vysouší. Ohřátý vzduch pojme násobně více vody nežli vzduch chladný. Ohřátý vzduch odnáší vzhůru do atmosféry vodní páru, která se sráží až vysoko v atmosféře. Nevrací se proto zpět ve formě mlhy, rosy nebo drobného deště. 1m³ vzduchu o teplotě 21 °C pojme při normálním atmosférickém tlaku cca 18 gramů vodní páry, zatímco vzduch o teplotě 40 °C pojme cca 50 gramů vodní páry při 10% nasycení, tedy maximální absolutní vlhkosti vzduchu. Vzduch o teplotě 40 °C, který obsahuje 18 gramů vodní páry má relativní vlhkost 36 % a vynese stejné množství vodní páry mnohem výše nežli vzduch o teplotě 21 °C .



Obr. 9: Význam tzv. krátkého cyklu vody v krajině. Výpar vody z listů rostlin je někdy mylně označován jako „ztráta vody“. Z krajiny s vegetací na obrázku vlevo se však voda neztrácí. Těžký vzduch s vodní párou stoupá pomalu vzhůru, po kondenzaci vodní páry se voda vrací zpět jako mlha nebo déšť. Říkáme tomu krátký cyklus vody. Naopak krajina bez vegetace na obrázku vpravo se dále vysouší. I zdánlivě „suchá půda“ obsahuje malé množství vody. Od rozpáleného povrchu se ohřívá vzduch, lehký teplý vzduch s malým množstvím vodní páry rychle proudí vzhůru, zrychluje se proudění vzduchu, krajina dále vysychá. Krátký cyklus vody se přerušil. Na obr. Vlevo jihočeská krajina s lesy a ranními mlhami způsobenými kondenzací vodní páry ve vzduchu. Vpravo Death Valley, Kalifornie, USA, jedno z nejteplejších a nejsušších míst na Zemi.

3.6. Biotická pumpa a obrácená biotická pumpa

Vegetační kryt může ovlivňovat množství vody na kontinentech i v globálním měřítku. Je historickou zkušeností, že odlesnění vede po čase k úbytku vody, srážek a vysychání. Logicky vzato, vegetace a stromy zejména vypařují vodu do atmosféry. Evapotranspirace je často mylně považována za ztrátu vody výparem. Nad lesními komplexy je ovšem více oblačnosti a jsou tam vyšší srážky. Funkci lesů v oběhu vody vysvětluje teorie tzv. biotické pumpy, kterou vytvořili Makarieva a Gorshkov (2007). Podle teorie Biotické pumpy záleží dodávka vody z oceánu na pevninu na stavu vegetačního pokryvu. Evoluce vyřešila dva zásadní a obtížné problémy: jak dopravit atmosférickou vlhkost daleko do nitra pevniny a jak tento transport setrvale udržet. Les má vysokou pokryvnost listoví (listová plocha nad jedním metrem čtverečním) a má proto i vysokou evapotranspiraci (transpirace + evaporace z povrchu), která může být vyšší nežli evaporace z povrchu oceánu. Následkem intenzivní evapotranspirace obsahuje vzduch nad lesem vysoký obsah vodní páry, která v noci kondenzuje, jak vlhký vzduch adiabaticky (bez výměny tepla s okolím) stoupá vzhůru. Při kondenzaci vodní páry na vodu kapalnou klesá tlak vzduchu nad lesem. Například objem 22 400 ml vodní páry se při kondenzaci na vodu zmenší na 18 ml, voda ve stavu vodní páry má tedy více než 1000x vyšší objem nežli stejné množství vody v kapalném stavu (Avogadrův zákon). Pokles tlaku vzduchu má za následek vzestup vzduchu vzhůru nad les. Vzniká tak horizontální gradient tlaku, neboli díky sníženému tlaku vzduchu se nasává vzduch horizontálně z okolí, pokud je lesů dostatek (například 40 % plochy) nasává se vzduch z oceánů hluboko do kontinentů. Vlhký vzduch z oceánu zrychluje kondenzaci vodní páry nad lesem, což zesiluje transport vodní páry z oceánu na pevninu. Vzduch zbavený určitého množství vodní páry se vrací zpět nad oceán ve vyšší vrstvě atmosféry, nežli je proud vlhkého vzduchu z oceánu. Neboli vlhký vzduch přicházející z oceánu proudí v nižší vrstvě atmosféry nežli vzduch zbavený vlhkosti, který odchází k oceánu a uzavírá tak cyklus transportu vody z oceánu na pevninu (obr. 10). Je pozoruhodné, že směrem do nitra kontinentu přibývá podíl vody z malého oběhu ve srážkách a je prokázáno, že voda z Atlantiku se dostává přes Evropu a Sibir až na sever Číny. Odlesňováním se ovšem tento transport narušuje. Odlesněná a odvodněná krajina se přehřívá.



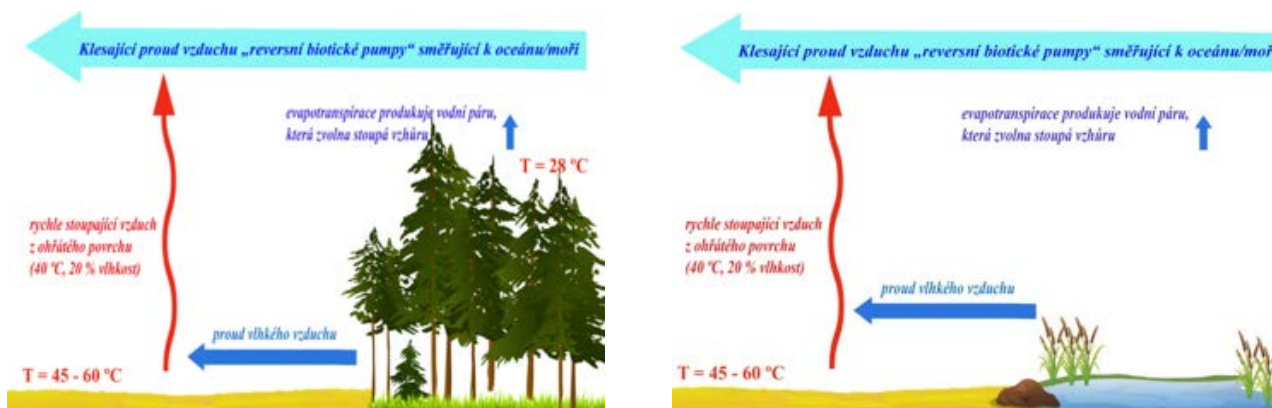
Obr. 10: a) Biotická pumpa a b) obrácená/reverzní biotická pumpa (Brom a Pokorný, 2017)

a) Intenzivní výpar nad lesními porosty → zvýšená kondenzace → snížení tlaku → pokles vertikálního tlakového gradientu pohyb vzduchu mimo lesy → nasátí vzduchu od oceánů

- Vzduch od oceánů je vlhký → podpora procesů biotické pumpy
- Po vypadnutí srážky → suchý vzduch se vrací zpět nad oceány

b) Pokud krajinu odlesníme a odvodníme, probíhá kondenzace vodní páry převážně nad oceánem. Oceán tak odebírá („krade“) vodu kontinentu. To je mechanismus dlouhodobého vysychání oblastí, které člověk zbavil vegetace a vody. Hovoříme o reverzní (obrácené) biotické pumpě (Makarjeva, Gorškov 2007)

Sluneční záření dosahující za jasného dne intenzity $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ohřívá povrch odvodněné plochy až na $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Od přehřáté plochy se ohřívá vzduch a stoupá vzhůru. Tohoto vzestupného turbulentního proudění využívají ptáci, znají je dobře rogalisté a piloti malých i velkých letadel. Vzduch o teplotě $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 20% obsahuje 10 g vody v m^3 ve formě vodní páry. I při velmi pomalém vzestupném proudění $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, vystoupá za jednu hodinu nad 1 m^2 do atmosféry 360 m^3 ohřátého vzduchu, který odnesl $3,6 \text{ kg}$ vody. Je známo, že vzestupné proudění vzduchu z ohřátých ploch dosahuje běžně rychlosti několika metrů za sekundu; za hodinu potom vystoupá „se suchým“ ohřátým vzduchem vysoko do atmosféry 36 kg vody. Ohřáté plochy potom „nasávají“ vzduch z okolí, tedy ze sousedního lesa, mokřadu rybníka a teplý vzduch tak intenzivně vysouší okolí.



Obr. 11: Vysychání krajiny následkem odvodněných ploch, které se přehřívají. Ohřátý vzduch o nízké relativní vlhkosti stoupá vzhůru, nedosahuje rosného bodu a je odnášen do oceánu. Vzduch o teplotě $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 20% obsahuje 10 g vody ve formě vodní páry. Za hodinu vytlačí vzestupné turbulentní proudění nad jedním metrem čtverečním do atmosféry řádově tisíce metrů krychlových vzduchu a s tím i desítky kilogramů vody (Pokorný a Hesslerová, 2019).

3.7. Přehled vědeckých metod k měření potřebných fyziologických dějů a veličin

K dokreslení informace uvádíme stručný přehled vědeckých metod a postupů, s jejichž pomocí lze na vědecké úrovni získat data, na jejichž základě byl vypracován výše uvedený teoretický přehled.

Metody měření evapotranspirace

Evapotranspirace porostu je úhrnné množství vody vypařené na určitém místě z půdního povrchu a povrchu rostlin (evaporace) a vydané průduchy rostlin (transpirace). Její intenzitu lze studovat pomocí různých metod, které lze rozdělit na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody patří využití lyzimetrů a výparoměřů, mezi nepřímé pak řada mikrometeorologických metod a metody dálkového průzkumu Země.

1) Přímé metody

Lyzimetr je izolovaný blok porostu, v nejjednodušším případě kultivační nádoba s rostlinami. Sledují se změny hmotnosti půdního bloku s rostlinným pokryvem za určité časové období. Známe-li množství vody dodané do nádoby srážkami nebo zálivkou, je změna hmotnosti způsobena prakticky pouze evapotranspirací. Důležité je, aby se množství půdy, teplota a vlhkostní poměry kolem kořenů blížily podmínkám v porostu a aby lyzimetr byl umístěn v zápoji vegetace, jejíž evapotranspiraci zjišťujeme. Existuje mnoho různých typů lyzimetrů, některé o objemu až několika krychlových metrů umístěné v zemi, s kontinuálním sledováním jejich hmotnosti, vlhkosti půdy atp. U mokřadní vegetace lze místo změn hmotnosti využít sledování poklesu hladiny podzemní vody a změny vlhkosti v půdě.

Výparoměry (evaporimetry) jsou založeny na principu výparu buď z vodní plochy, nebo z referenčního výparného povrchu daných vlastností. Výpar z vodní plochy je sledován v nádobě naplněné vodou o dané ploše na principu měření změny vodní hladiny, např. meteorologické evaporimetry na bázi Rónova výparoměru. Měření výparu z referenčního výparného povrchu je založeno na principu výparu z porézního materiálu nasáklého vodou o dané ploše, např. z filtračního papíru – tzv. Pitcheův výparoměr.

2) Nepřímé metody

Evapotranspirace se zjišťuje výpočtem z naměřených meteorologických dat. **Mikrometeorologické metody** jsou vhodné pro studium evapotranspirace a ostatních energetických toků na úrovni ekosystémů. Jsou založeny na monitoringu fyzikálních parametrů prostředí, jako je sluneční záření, teplota a vlhkost vzduchu a půdy, rychlost větru, stabilita atmosféry a charakter mezní vrstvy atmosféry apod., v kombinaci s popisem porostu jako je např. odpor porostu k proudění vzduchu, architektura porostu, listová pokryvnost apod. Mezi mikrometeorologické metody patří řada metod, od jednoduchých až po metody instrumentálně a výpočetně značně složitě. Mikrometeorologické metody se využívají pro zjišťování potenciální a aktuální evapotranspirace. Přičemž aktuální evapotranspirace je rychlost výdeje vody porostem naměřená a potenciální evapotranspirace je rychlost výdeje vody, kterou by porost dosáhl při optimálním

zásobení vodou. Metody měření evapotranspirace se rozvíjely zejména v souvislosti s optimalizací závlahy při pěstování zemědělských plodiny.

Nejčastěji se používají tři následující metody:

- a) energetická bilance stanoviště (tzv. metoda Bowenova poměru)
- b) metoda Penman-Monteithova
- c) metoda vířivé (eddy) kovariance.

Metoda Bowenova poměru je založena na kombinaci radiační bilance, gradientu teplot a gradientu obsahu vodní páry nad porostem. Do výpočtu je zahrnuta též informace o toku tepla do půdy. Jedná se o instrumentálně i výpočetně poměrně jednoduchou metodu.

Penman–Monteithova metoda do výpočtu zařazuje další členy, jako je teplota povrchu porostu, odpor mezní vrstvy atmosféry, odpor porostu, aerodynamické vlastnosti porostu a rychlost proudění vzduchu. Metoda je poněkud složitější jak technicky, tak i výpočetně. Oproti metodě Bowenova poměru, která bere v potaz pouze fyzikální parametry prostředí, zahrnuje Penman-Monteithova metoda přímo vlastní parametry porostu, jako je výška porostu, index listové plochy a vodivost průduchů. Metoda též využívá informaci o proudění vzduchu, který se při výparu uplatňuje jako dodateková energie.

Metoda vířivé (eddy) kovariance je založena na principu přímého spektroskopického měření obsahu vodní páry a CO₂ ve vzduchu v kombinaci s ultrasonickým měřením pohybu vzduchu v trojrozměrném prostoru. Hodnoty jsou zaznamenávány ve frekvenci 20 Hz a integrovány ve zpravidla 30 minutových intervalech. Jedná se o analytickou metodu, která je instrumentálně i výpočetně značně složitá. Používá se v současné době zejména na stanovení toků CO₂ v různých typech ekosystémů.

Měření rychlosti transpirace

Výdej vody rostlinou přes listy/jehlice se nazývá **transpirace**. Transpirace umožňuje zásobování částí rostlin vodou a minerálními látkami, ochlazuje povrch listů a umožňuje tak metabolické pochody. Rozlišujeme **transpiraci stomatární** (přes průduchy) a **kutikulární** (přes pokožku chráněnou hydrofobní vrstvou – kutikulou).

Voda se vypařuje převážně přes průduchy rostlin, které se při nedostatku vody (ale i pod vlivem dalších parametrů) zavírají. I po zavření průduchů se v menší míře voda vypařuje přes pokožku listů. U běžných rostlin (kromě sukulentů) se na jednu přijatou molekulu oxidu uhličitého a jednu vyloučenou molekulu kyslíku, vypaří několik set molekul vody. Kritériem nároků na vodu je tzv. **transpirační koeficient**. Transpirační koeficient je množství vody potřebné pro vytvoření jednoho kilogramu biomasy (sušiny), které rostlinou projde a přes listy se odpaří. Hodnoty transpiračního koeficientu dosahují několika set kilogramů vody. Velkým stromem tak projde za den i sto litrů vody. Z jednoho metru čtverečního porostu se běžně za slunného počasí odpařuje 100 mg vody za vteřinu, což odpovídá spotřebě sluneční energie 240 W.

Jednou z nejstarších metod studia transpirace a její intenzity je vážková (**gravimetrická**) metoda. Princip je založen na úbytku hmotnosti rostlinného orgánu, který je dán výparem z jeho povrchu. Metoda se hodí spíše pro laboratorní podmínky, ale lze ji použít i v terénu. Oddělený list ovšem odpařuje vodu mimo porost, kde je jiná vlhkost a jiné proudění vzduchu. Touto metodou se dá snadno ukázat transpirace jako jev i princip jejího kvantitativního stanovení.

Rychlost transpirace na úrovni listu v přirozených podmínkách je možné měřit tzv. **gazometricky**, tzn. přímým měřením výdeje vodní páry z části listu pomocí infračervených plynových analyzátorů (např. přístroj LI-COR LI-6400). Spektrofotometricky se určuje změna koncentrace vodní páry ve vzduchu po průchodu měřicí komůrkou, ve které je uzavřena přesně stanovená plocha listu za kontrolovaných konstantních podmínek osvětlení, vlhkosti vzduchu, teploty, rychlosti proudění vzduchu atd. Další metodou, jak odhadnout rychlost výparu, je měření vodivosti (odporu) listu pro difúzi vodní páry (a obdobně CO₂). Tyto hodnoty můžeme získat například **porometrickým** měřením. Přehled klasických metod pro měření výdeje vody a vodní bilance u rostlin uvádí např. Bannister (1986).

Další velmi vhodnou metodou pro účely pochopení klimatizační role vegetace, je **měření kontinuálního toku xylémové šťávy „sap flow“**, označovaná v češtině také jako metoda měření transpiračního toku. Používá se u stromů a výdej vody se měří na základě šíření teplotních pulsů kmenem. Ve světovém měřítku vypracoval a využívá této metody profesor Jan Čermák z Mendelovy univerzity v Brně.

Voda je přijímána kořeny, proudí dřevní částí cévních svazků (xylemem) kmenem vzhůru do listů a přes průduchy se odpařuje do atmosféry. Tato kapalina se nazývá míza. Obsahuje živiny přijaté kořenem a hormony jím produkované. Lýkem (floem) ve vnější části cévních svazků pak proudí směrem dolů ke kořenům především produkty fotosyntézy z listů. Funkční cévní svazky mají na řezu kmenem světlou barvu, česky se tato část nazývá běl (anglicky sap). Cévní svazky jsou funkční nejvýše několik let, postupně dřevnatí a mění se v tzv. tvrdé dřevo a nahrazují je nové svazky, nová běl. Přirůstající dřevo vytváří letokruhy.

Rychlost proudění vody v cévních svazcích (běli) je úměrné množství vody, která se vypařuje listy (transpirace). Tok vody v běli se měří jako rozdíl teplot nad a pod elektrodou instalovanou do běle. Elektroda je zahřívána elektrickým proudem z baterie. Tento princip má několik variant. Rozvoj metody probíhal v ČR od 70. let s cílem využít naměřené hodnoty transpirace jednotlivých stromů na celý les. Dnes je pro měření transpiračního toku dostupná komerční instrumentace různého typu.

Tepelná bilance kmene („trunk heat balance“), se měří termočlánky umístěnými vertikálně nad a pod elektrodou zahřívající transpirační proud v běli. K dosažení větší přesnosti měření je potřeba ohřát a měřit větší část běle. Na obvodu kmene neproudí míza stejnou rychlostí. Proto se využívá jehlic, ve kterých je i několik termočlánků za sebou a je pak možné měřit teploty v různé hloubce běle a vyhodnotit rychlost toku prostorově. Jiná varianta metody sap flow pracuje s tepelnými pulsy.

Je snahou měřit též tzv. reverzní tok, v některých případech v noci teče voda ze zásobních prostor z kmene do kořenů. Jsou popsány i případy transportu vody mezi kořeny nebo z hluboko kořenujícího stromu do kořenů stromků mladých.

3.8. Shrnutí

- Intenzita slunečního záření dopadajícího na zemský povrch za jasné oblohy dosahuje několika set až 1000 W.m⁻².
- V krajině s trvalou vegetací a dostatkem vody se sluneční energie váže převážně výparem vody (evapotranspirace) do vodní páry a uvolňuje se na chladných místech při kondenzaci vodní páry zpět na vodu kapalnou. Toky energie prostřednictvím výparu a kondenzace dosahují stovek W.m⁻². Odvodněné plochy se přehřívají, ohřátý vzduch (zjevné teplo) stoupá vysoko do atmosféry a odnáší vodní páru, přehřáté odvodněné plochy vysušují i okolní lesy, mokřady a rybníky.
- Výpar z vegetace významně přispívá ke zvýšení oblačnosti nad daným územím. Tato oblačnost snižuje energetické toky mezi zemským povrchem a atmosférou.
- Máme-li se seriózně zabývat klimatickou změnou, musíme uvažovat důsledky úbytku vegetace v krajině, vedoucí ke:
 - snížení evapotranspirace (chlazení)
 - snižování obsahu vodní páry
 - nárůstu zjevného tepla
 - zvýšení gradientů teplot a tlaku vzduchu. Tyto gradienty se vyrovnávají dynamicky formou přívalových srážek a rychlého proudění vzduchu.

4. Přístrojové vybavení a nácvik měření

4.1. Přehled potřebných fyzikálních veličin a jednotek

1. Sluneční záření

Pro naše účely se jeví nejvhodnějšími cenově dostupné, kompaktní ruční měřiče příkonu slunečního záření založené na polovodičovém efektu. Např. námi v praxi ověřený přístroj měří sluneční záření ve spektrální oblasti 400-1100nm v rozsahu 0 – 3990 W.m⁻². Intenzitu slunečního záření odečítáme přímo na displeji v energetických jednotkách (W.m⁻²) na rozdíl od většiny luxmetrů.

Dokonalejší jsou termočláňkové radiometry, používané v meteorologických stanicích, ale jejich cena je řádově vyšší a navíc potřebují na vyhodnocení přesný mikrovoltmetr nebo převodník.



Obr. 12: Měřiče intenzity slunečního záření (solarimetry)

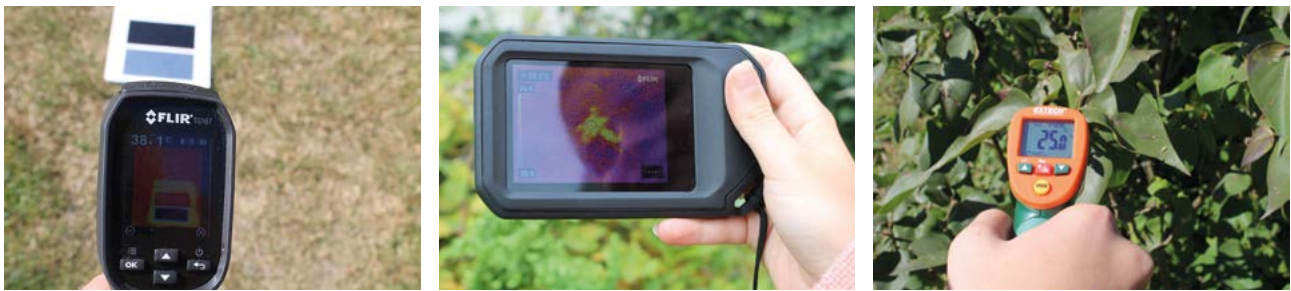
2. Teplota

Pro pochopení problematiky měření teplot je nezbytné měřit povrchovou teplotu jak infračerveným, tak i kontaktním teploměrem a dále také teplotu a relativní vlhkost okolního vzduchu. Pro posouzení celkového teplotního obrazu, tedy rozložení teplot je vhodná termovizní kamera, jejíž ceny postupně klesají a jednodušší verze jsou cenově dostupné.

Přístroje pro měření teploty

a. Infračervený teploměr s kontaktním čidlem

Infračervený teploměr (pyranometr) je dnes nejčastěji používaným typem teploměru. Setkáváme se s ním již od dětských let například u lékaře. Je to nejpohodlnější a nej přesnější přístroj na **měření povrchové teploty**. Infračervený teploměr (IČ = IR/infrared) měří radiační teplotu, tedy vlnovou délku záření vydaného tělesem. Jeho výhodou je, že v podstatě nezáleží na makroskopické struktuře povrchu. Ale má i své nevýhody, které je důležité ukázat a pokusit se vysvětlit. Radiační teplota je závislá na fyzikálních vlastnostech povrchu – na jeho emisivitě, tedy nakolik se chová jako černé těleso. Pyranometr pro naše použití musí být vybaven také dotykovou termočlávkovou sondou (lze dohledat u komerčních výrobků), která je důležitá právě k pochopení emisivity, kdy se například u lesklého plechu výrazně liší radiační teplota od skutečné teploty povrchu.



Obr.13: IR teploměr s integrovanou termokamerou (vlevo), termokamera FLIR C5 (uprostřed), IR teploměr s podsvíceným displejem (vpravo).

b. Termovizní kamera

Termovizní kamera je dnes již cenově dostupná. Termovizní kamera umožňuje zobrazit teplotní scénu jako celek a ukazuje rozdíly teplot jednotlivých povrchů v daném okamžiku a souvislostech, na kterých je možné vysvětlit mnohé fyzikální děje, které okolo nás probíhají a které ovlivňují teplotní pole, (odraz, absorpce, výpar). U současných i jednoduchých a cenově dostupných kamer lze informace (termosnímky) předávat přes wi-fi rozhraní do tabletů a lze s nimi dále pracovat. Termovizní snímky lze proto v praxi pracovníků městských úřadů využít jako součást dokumentace ilustrující klimatizační funkci vegetace.

c. Kombinované čidlo pro měření teploty vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti



Obr.14: Čidlo pro měření relativní vzdušné vlhkosti a teploty vzduchu s USB konektorem

Dalším důležitým čidlem pro prezentaci a výuku je čidlo pro měření teploty vzduchu, kombinované se senzorem relativní vlhkosti vzduchu. Teplota vzduchu je veličina, se kterou se setkáváme při každé předpovědi počasí. Toto kombinované čidlo je vhodné mít v meteorologickém krytu, aby výsledek nebyl ovlivněn přímým osluněním.

Teplota vzduchu je výslednicí působení všech okolních povrchů, oblohy a proudění vzduchu. Proto se její hodnoty velmi liší od hodnot teploty povrchové (radiační) naměřené pomocí IR teploměru či termovizní kamery. Názorné jsou rozdíly extrémů teplot na osluněném holém povrchu, ve stínu a na vegetačním povrchu (vzrostlý trávník).

3. Vlhkost vzduchu a rosný bod

Kombinovaným měřičem relativní vlhkosti a teploty vzduchu lze tedy měřit také vlhkost vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu udává poměr mezi okamžitým množstvím vodní páry ve vzduchu a množstvím páry, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Udává se v procentech (%). Relativní vlhkost vzduchu se též někdy označuje jako poměrná vlhkost.

Tyto naměřené hodnoty nám umožňují vyhledat v tabulkách absolutní vlhkost, jinak řečeno hustotu vodní páry neboli měrnou hmotnost vodní páry, která vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. V meteorologii se vyjadřuje nejčastěji v gramech vodní páry na metr krychlový vzduchu. Vzhledem k tomu, že množství sytých par (100% nasycení) závisí především na teplotě vzduchu, mění se relativní vlhkost vzduchu s jeho teplotou i přesto, že absolutní množství vodních par zůstává stejné. Tato vlastnost má velký význam při vzniku oblaků a tím i tvorbě počasí. Pro pochopení podstaty přenosu energie vodními parami v přírodě je také nutné pochopit pojem rosný bod. **Rosný bod** (teplota rosného bodu) je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami, relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %. Pokud teplota klesne pod tento bod, vodní pára kondenzuje na vodu kapalnou. Teplota rosného bodu je různá pro různé absolutní vlhkosti vzduchu: čím více je vodní páry ve vzduchu, tím vyšší je teplota rosného bodu, čili tím vyšší teplotu musí vzduch (a pára) mít, aby pára nezkondenzovala. Naopak pokud je ve vzduchu vodní páry jen velmi málo, může být vzduch chladnější, aniž pára zkondenzuje.

4. Rychlost větru

Další veličinou, se kterou se setkáváme v meteorologickém zpravodajství, je rychlost větru. Rychlost větru se měří anemometrem. Existují jednoduché ruční měřicí přístroje, které v sobě zahrnují vrtulový anemometr na měření rychlosti větru a také teploměr a vlhkoměr. Na displeji potom můžeme současně odečíst rychlost větru a teplotu a následně lze přepnout a odečíst hodnotu relativní vlhkosti vzduchu a také rosného bodu. Je to vhodný doplněk pro ucelený pohled na aktuální meteorologickou situaci bez dalšího dopočítávání zájmových veličin.

4.2. Doporučený soubor měřicích přístrojů

Přístrojové vybavení – příklady v praxi ověřených měřicích přístrojů

Během vývoje této metodiky byla testována řada měřicích přístrojů, splňujících výše uvedené požadavky pro měření jednotlivých veličin. Nabídka na trhu je široká a stále se mění, uživatelé této metodiky tedy mohou vybírat z mnoha variant. Pro ilustraci níže uvádíme příklady některých ověřených přístrojů, včetně jejich přibližných cen bez DPH v roce 2021. Snahou autorského kolektivu bylo uvést příklady přístrojů relativně levných, avšak spolehlivých, jejichž přesnost měření byla ověřena, a které se pro účely metodiky

osvědčily. Tyto příklady nelze chápat jako doporučení či propagaci konkrétních značek, autoři metodiky nejsou vázáni žádnými smluvními závazky s jednotlivými výrobci.

- **Sluneční energie měřená ve $W \cdot m^{-2}$**

Měřič výkonu slunečního záření EXTECH SP 505..... 3 800 Kč

- **Infračervený teploměr s kontaktním termočláňkovým čidlem**

FLIR TG 56 5 200 Kč

EXTECH IR 267 1 200 Kč

- **Termovizní kamera:**

FLIR C3 s WiFi..... 15 000 Kč

Flir C5 s WiFi 22 000 Kč

- **Měřič a záznamník teploty a relativní vlhkosti**

LASCAR EL-USB-2 LCD+ 2 400 Kč

nebo

EXTECH RHT50 (vlhkost, teplota a tlak vzduchu)..... 3 300 Kč

- **Termoanemometr**

EXTECH 45158 3 100 Kč

4.3. Nácvič měření

1. Měření slunečního záření

O intenzitě dopadajícího slunečního záření se můžeme sami snadno přesvědčit měřením solarimetrem. Standardně se měří množství sluneční energie dopadající na vodorovnou plochu. Přesvědčte se natáčením čidla, že množství sluneční energie je nejvyšší při kolmém dopadu slunečních paprsků.

- *Změřte intenzitu ozáření na volném prostranství za jasného dne a za oblačného dne*

Druh povrchu	Jasný den	Obláčný den
Ozáření [$W \cdot m^{-2}$]		

- *Za jasného slunečného dne změřte ozáření pod korunou stromu a v jeho těsném sousedství na volném prostranství. Přemýšlejte, proč se naměřené hodnoty významně liší?*

	Pod korunou stromu	Volné prostranství	Rozdíl
Ozáření [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]			

2. Měření teploty – klimatizační efekt vegetace

- *Pomocí infračerveného bezkontaktního teploměru s laserovým zaměřovačem či pomocí termovizní kamery změřte povrchovou teplotu jakoli zpevněného suchého povrchu na plném slunečním svitu na volném prostranství a ve stínu stromu. Jak můžeme vysvětlit výrazně nižší teplotu ve stínu stromu?*

	Pod korunou stromu	Volné prostranství	Rozdíl
Povrchová teplota $^{\circ}\text{C}$			

Vysvětlení rozdílu:

.....

.....

.....

- *Pomocí IR teploměru najděte nejteplejší povrch v okolí. Změřte povrchovou teplotu na pěti různých osluněných površích (např. trávník, asphalt, dlažba, fasáda domu apod.) Neměřte ve stínu, ale pouze na osluněných místech. Vybírejte povrchy tak, abyste našli co nejteplejší a nejchladnější povrch. Určete pořadí (1= nejteplejší, 5= nejstudenější povrch).*

Druh povrchu	Pořadí dle teploty povrchu	Teplota [°C]

Jaký povrch byl nejteplejší, jaký nejchladnější a proč?

.....

.....

.....

5. Specifita vzdělávání pracovníků městských úřadů

Tato metodika je koncipována pro využití k zaškolování pracovníků městských úřadů formou kurzů vedených lektorem (např. pracovníkem odboru životního prostředí již znalým této problematiky). Kromě toho mohou být vzdělávací materiály, o které se metodika opírá, využity i k individuálnímu samostudiu jednotlivých pracovníků dle jejich aktuálních potřeb.

V případě kurzů vedených lektorem je potřeba si uvědomit, že vzdělávání dospělých má svá jistá specifika, kterých by si lektor kurzů měl být vědom.

Předně je třeba uvést, že účastníci kurzů a programů vzdělávání dospělých mají stejné nebo velmi podobné předpoklady pro vzdělávání jako jiné věkové kategorie. Dospělý člověk je vzdělavatelny, je schopen dosahovat jasných vzdělávacích úspěchů. Je pověrou, že s věkem tato schopnost mizí. Dokazují to psychologické výzkumy i pozitivní zkušenosti z praxe. Vzdělávání dospělých je závislé zvláště na individuálních vlastnostech a schopnostech, duševním a tělesném zdraví, na úrovni motivace ke studiu, na zájmech a potřebách, na společensky působících činitelích (rodina, kolegové a jejich postoje).

Úspěšnost vzdělávání dospělých mohou ovlivnit tyto tři aspekty:

- orientace posluchače jen na bezprostřední zadání a na bezprostřední okolí, bez sledování širších perspektiv („školím se proto, že mne „sem“ poslali, že se to musí...“)
- vnímání toho, co je dospělému posluchači prezentováno, čemu se učí, jako výklad jakéhosi světa, ne jako prostoru pro přemýšlení („to jsou ty vaše teorie..., v praxi je to jinak...“)

- v myšlení posluchače převládne, např. díky pochybnostem v okolí, vzdělávací rezignace („stejně takové kurzy nic v reálu neovlivní“) či se projeví strach komunikovat své vzdělávací možnosti („je hloupé se před druhými ptát, diskutovat, projevovat zájem – zdržovat ostatní svými otázkami...“).

Porozumění specifikům vzdělávání dospělých umožní lektorovi využít silných stránek dospělých edukantů a zohlednit jejich slabé či rizikové stránky.

K výhodám dospělých při vzdělávání se patří:

- vyšší schopnost soustředit pozornost. Pokud je posluchač adekvátně motivován, sleduje i dlouhý výklad nebo studuje obsáhlý text. Soustředěná pozornost dospělého člověka je v optimální podobě 45 minut.
- Proces vnímání je u dospělého dokonalejší díky srovnávání se zkušeností a kritickému hodnocení (přemýšlí o použitelnosti v praxi, dokáže se rychle orientovat v informačních zdrojích).
- Jiné úrovně než u dětí a mládeže dosahuje u dospělého způsob myšlení. Jeho přesnost a funkčnost bývá snížena stereotypy, což bývá kompenzováno schopností vyvozování ze zkušeností, z vlastní praxe.
- Paměť dospělého člověka ztrácí ve vyšším věku na jednu stranu mechanickou vlastnost pamatování si. Dostatečnou protiváhou je však schopnost zapamatovat si pomocí souvislostí, logické paměti a pochopení podstaty věci. Mechanické zapamatování není tak účinné jako logické a vyžaduje neustálé memořování. Logicko-operační paměť je trvalejší, rychlejší a nevyžaduje časté opakování.

Naopak překážkami ve vzdělávání dospělých mohou být:

- Receptivita – posluchači se „líbí“ jen přihlížet a naslouchat, objevuje se pasivita, konzumace. Potlačuje se potřeba diskutovat, upřednostňuje se „kolektivní“ názor a představa sdílená většinou školené skupiny (konzervativní postoj).
- Normativita – směrodatné je to, jak se chovají všichni, co říkají „vzory“, ke kterým se dospělý posluchač upíná. Celkově lze říci, že se projevuje jistá nesamostatnost, která vzniká z touhy po jistotě (obecně řešeno: jim to funguje, mně bude taky).
- Reflektivita – vše vnímám a posuzuji jako objekty, vše jsou jen prostředky a účely pro mé sebeprosazení a „hry“ s ostatními.

Důsledkem těchto překážek jsou úvahy o kompetencích, které potřebuje lektor k efektivnímu vzdělávání dospělých. Hlavní role lektora je založena na schopnosti pozvolna ovlivňovat posluchače, předkládat uvážlivě nové podněty k vzdělávání a tolerantně provádět poradenskou činnost. Demotivujícím je mentorování, moralizování, školometský přístup (autoritářský přístup).

Dospělý edukant má často problém s výběrem a vybavením uložených znalostí, je však schopen pomocí aktivizujících metod dosáhnout znovuvybavení v nových souvislostech, při řešení problému, v kooperaci s kolegy, v partnerské komunikaci. Znalosti jsou často zakódované v dovednostech a činnostech a zahrnuté ve znalostech komplexních. Dospělý edukant si např. nevybaví definici nebo vzorec, ale je schopen řešit problém nebo objasnit složitý odborný jev, aniž by musel vyslovit přesné znění definice.

Velký důraz budou dospělí klást na sdělení a diskutování cílů a na možnost promluvit do obsahu školení, kurzu, semináře. Mají také silnější vnitřní motivaci a dlouhodobě vnitřní cíle, čímž se odlišují od věkových kategorií žáků, studentů.

Velmi efektivním přístupem ve vzdělání dospělých je proto využívání konkrétní učební situace vztahující se především k vlastní praxi dospělého, účinné je především aktivní poznávání, řešení problémů z praxe, skupinová práce, učivo vztahující se k současným kontextům profese dospělého, a také aktivní podíl na tvorbě učebních úloh, potažmo možnost ovlivnění vzdělávacího obsahu. Efektivní učení dospělých je zaručeno v propojení se zkušeností a aplikovatelností v praxi. Týká se jak obsahu, tak metod. Tam, kde lze téma asociovat, vybavovat si vlastní zkušenost, vyzkoušet si konkrétní činnosti a aplikovat na vlastní praxi, je učení snazší.

Těchto základních principů andragogiky proto bylo využito při koncepci této vzdělávací metodiky. Na začátku její tvorby bylo provedeno šetření potřeb pracovníků městských úřadů vzhledem k jejich praxi a sonda jejich přístupu k problematice role vegetace v krajině.

Pomocí dotazníkového šetření provedeného mezi devadesáti čtyřmi respondenty, pracovníky MěÚ, bylo zjištěno, že cílová skupina je velmi různorodá, frekventanti mají různou úroveň a oblast absolvovaného vzdělání, liší se i ve zkušenostech v práci s měřicí technikou, mají různá zaměření od OŽP přes zemědělství až po technické obory a vzhledem k tomu požadují do metodiky zařadit aplikace pro velké spektrum situací (města, agrární krajina, lesy apod.) Na základě výsledků této úvodní sondy potřeb byly následně vytvořeny vzdělávací situace, které byly následně ověřovány v praxi během workshopů s pracovníky městských úřadů. Jednotlivé vzdělávací situace pak byly upravovány, doplňovány a na základě výsledků evaluace workshopů finalizovány dle připomínek vyplývajících z diskuzí s aplikačními garanty projektu.

6. Vzdělávací situace

6.1. Agrární krajina

Vzdělávací situace č.1:

Sklizená pole bez vegetačního krytu

Způsob hospodaření v zemědělské krajině může ovlivňovat teplotní poměry na daném území. Současný trend pěstování energetických plodin pro biomasu přinesl změny v agrárním hospodaření. Ubylo meziplodin zajišťujících přítomnost vegetace na velkoplošných lánech. Jak ovlivňují sklizená pole bez vegetačního krytu teplotní poměry na daném území?

Pomocí IR teploměru nebo termovizní kamery změřte povrchovou teplotu půdy a teplotu a vlhkost okolního vzduchu na asfaltové ploše, sklizeném poli, louce se vzrostlým nesekaným travním porostem

a uvnitř lesního porostu. Srovnávejte osluněná místa o podobném příkonu sluneční energie. Pomocí tabulky č.1. v příloze zjistíte přibližné množství vodní páry ve vzduchu na jednotlivých lokalitách. Relativní vlhkost vzduchu je možno měřit IR teploměrem se zabudovaným čidlem pro měření vlhkosti vzduchu nebo samostatným přístrojem pro měření teploty a vlhkosti vzduchu. Porovnejte množství vodní páry s množstvím oxidu uhličitého (aktuální množství CO₂ je cca 400 ppm).



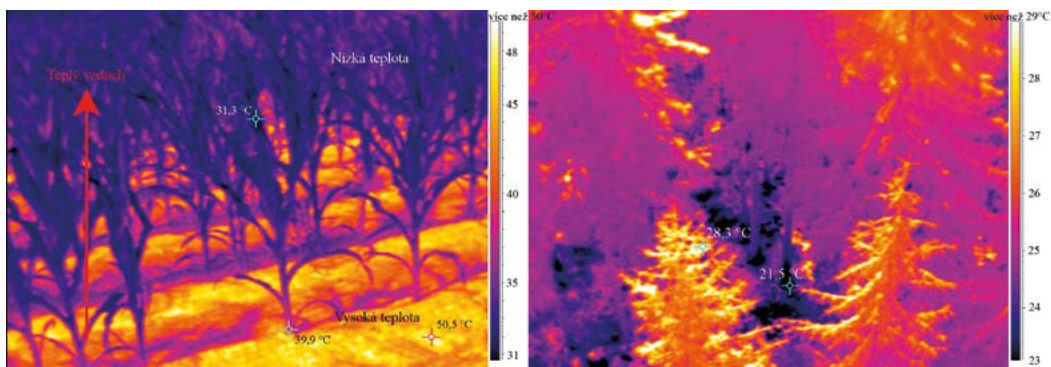
Obř. 15: Povrchová teplota asfaltu (49,1 °C) a podobná hodnota teploty sklizeného pole (48,1 °C), intenzita slunečního záření 650 W.m⁻²

	Globální sluneční záření [W.m ⁻²]	Povrchová teplota [°C]	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]	Přibližné množství vodní páry
Asfaltová plocha					
Sklizené pole					
Nekosená louka					
Lesní porost					

Vzdělávací situace č. 2:

Širokořádkové plodiny

Pomocí IR teploměru nebo termovizní kamery změřte povrchovou teplotu půdy mezi řádky kukuřice. Změřte teplotu a relativní vlhkost vzduchu a zjistěte rosný bod. Jak vysoko musí vystoupat vzduch nad kukuřičným polem (sklizeným polem), aby se vodní pára opět srazila na vodu, která se ve formě srážek vrátí zpět do krajiny? (uvažujme, že teplota vzduchu klesá přibližně o 0,65 °C na každých 100 m výšky).



Obr. 16: Půda kukuřičného pole má vyšší teplotu nežli listy kukuřice zatímco ve vzrostlém lese je při zemi nižší teplota nežli v korunách stromů. Chladný vzduch je těžší a drží se při zemi v porostu a tak se ve vzrostlém lesním porostu udržuje vlhkost.

	Globální sluneční záření [W.m ²]	Povrchová teplota [°C]	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]	Rosný bod
Pole (sklizené či mezi řádky kukuřice)					

Odpověď: Ohřátý vzduch o nižší relativní vlhkosti musí vystoupat výše, aby dosáhl rosného bodu, nežli vzduch chladný o vyšší relativní vlhkosti. Jak jste zjistili měřením, vzduch nad sklizeným polem nebo řídkou vegetací není absolutně suchý, je v něm obsaženo určité množství vodní páry. Ta je ovšem dříve než stačí zkondenzovat odnášena z krajiny, ze které se vypařila a tato krajina se dále vysušuje.

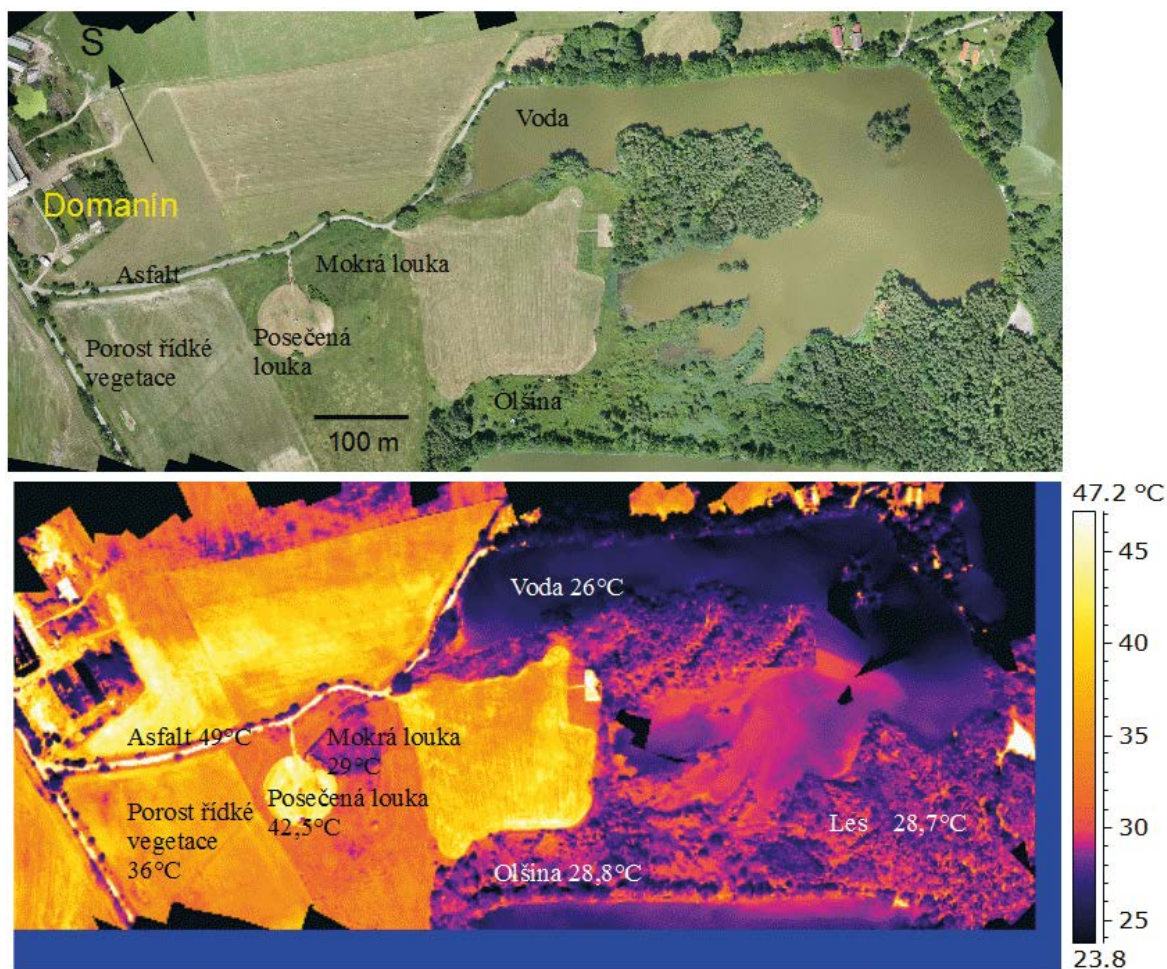
Vzdělávací situace č. 3:

Pohled z výšky

Termovizní technika umožňuje zaznamenat povrchové teploty v krajině. Termovizní snímek pořízený ze vzducholodi v okolí obce Domanín u Třeboně (obr.17), ukazuje povrchovou teplotu různých typů krajinného pokryvu v horkém letním dni (T vzduchu 30 °C). Nejchladnějšími povrchy jsou (kromě vody 26 °C) díky evapotranspiraci, olšina, les a mokrá louka (cca 29 °C). Teplota suché posečené louky (42,5 °C) se blíží teplotě asfaltového povrchu (49 °C). Na malé ploše vznikají teplotní rozdíly více než 20 °C.

Rychle se rozvíjející využívání dronů umožňuje snímání povrchových teplot pomocí velmi lehkých termovizních kamer. Jindy je možné pořídit termovizní snímek z věže nebo rozhledny a porovnat tak povrchové teploty, které se v naší kulturní krajině pohybují v letním dni za slunného počasí v rozsahu 25–50 °C.

Na takovém snímku si potom uvědomíme, jak měníme toky sluneční energie. Les, mokřady, vodní plocha se chladí evapotranspirací (v rozsahu stovek wattů na 1 m²), zatímco plochy s teplotou okolo 40 °C uvolňují zjevné teplo (ohřátý vzduch) o intenzitě stovek wattů na 1 m². Pokud přepočteme tyto hodnoty na desítky hektarů odvodněných ploch, dostáváme se k hodnotám zjevného tepla, které zřejmě ovlivňují proudění vzduchu a oběh vody na lokální úrovni.



Obr. 17: Termovizní snímek pořízený ze vzducholodi v okolí obce Domanín u Třeboně (9. července 2009 ve 14:00)

Vzdělávací situace č. 4:

Dvojitý klimatizační efekt vegetace

Je vhodné pěstovat plodiny náchylné na mraz v blízkosti lesních porostů? Kde očekáváte větší ranní mráz, v lese nebo na volném prostranství? Při zatažené obloze nebo při jasné obloze?

V ranních hodinách v brzkém jarním období změřte pomocí kombinovaného čidla pro měření teploty vzduchu a vzdušné vlhkosti teplotu uvnitř lesního porostu a na volném prostranství ve větší vzdálenosti od lesa či vodní plochy. Pomocí IR teploměru změřte radiační teplotu oblohy. Měření proveďte ve dvou různých dnech, při zatažené a jasné obloze. Porovnejte rozdíly a zjištěné závěry vysvětlete.

Lokalita	Teplota vzduchu (jasno) [°C]	Relativní vlhkost vzduchu (jasno) [%]	Radiační teplota oblohy (jasno [°C]	Teplota vzduchu (zataženo) [°C]	Relativní vlhkost vzduchu (zataženo) [%]	Radiační teplota oblohy (zataženo) [°C]
V lese						
Volné prostranství						

Odpověď: vzrostlý les vytváří „závětrí“, vzdušná vlhkost lesa se v noci a ráno sráží a uvolňuje se latentní teplo výparu, případně se tvoří mlha, která zastíní chladnou oblohu a sníží vyzařování tepla vůči obloze. Jasná obloha má podstatně nižší teplotu nežli oblaka. Lze se o tom přesvědčit měřením IR teploměrem s výhradou, že námi používané teploměry neměří většinou pod hodnotu -29 °C (rozsah měřených teplot je uveden na štítku teploměru). Za jasného dne bude teplota okolního vzduchu uvnitř lesa a v jeho těsné blízkosti vyšší. Les tak částečně chrání před jarními mrazy i plodiny pěstované v jeho těsné blízkosti.

6.2. Urbánní krajina

Vzdělávací situace č. 5:

Ulice bez stromořadí vs. městský park

Pomocí IR teploměru nebo termovizní kamery změřte povrchovou teplotu na chodníku nestíněném stromy (obr.18) a v městském parku s travnatou plochou ve stínu stromů. Změřte teplotu a relativní vlhkost vzduchu a zjistěte rosný bod v obou lokalitách. Pomocí tabulky č.1 v příloze zjistěte přibližné množství vodní páry ve vzduchu na jednotlivých lokalitách. Vysvětlete, proč je nižší teplota ve stínu stromů.



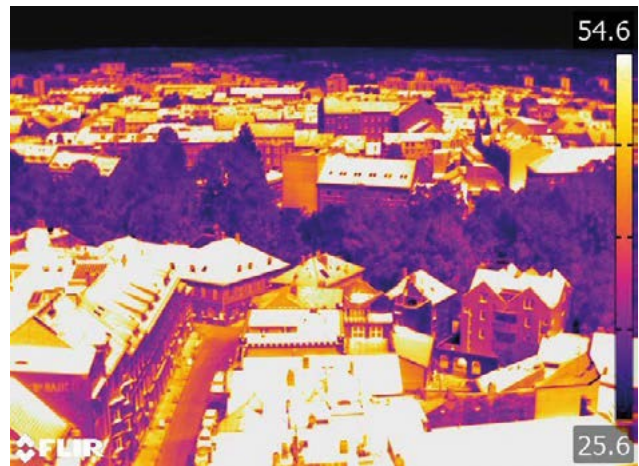
Obr. 18: Na ulici bez stromů má za slunného letního dne povrch chodníku teplotu přes 50 °C, sluneční energie se přeměňuje převážně na zjevné teplo (Gočárova třída v Hradci Králové). V parku pod stromem je povrchová teplota nižší než teplota lidského těla. Člověk se tedy ve stínu stromu ochlazuje.

Lokalita	Globální sluneční záření [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Povrchová teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]	Relativní vlhkost vzduchu [%]	Rosný bod	Přibližné množství vodní páry
Ulice bez stromů						
Městský park						

Vzdělávací situace č. 6:

Pohled z městské věže

Při pohledu z městské věže změřte pomocí termovizní kamery povrchovou teplotu střech budov a povrchovou teplotu korun stromů. Potom pořídte také termovizní snímky ze země přímo ve stínu stromů v městském parku a ve stínu budovy. Ve stínu domu může být podobná teplota jako ve stínu stromu. Má stín budovy podobný efekt na životní prostředí jako živý strom?



Obr. 19: Nahoře pohled z Černé věže v Českých Budějovicích. Zatímco povrchové teploty střech budov přesahují 50 °C, povrchové teploty stromů v městském parku se pohybují kolem 26 °C. Termovizní snímek pořízený přímo v městském parku ukazuje pod korunami stromů teploty kolem 22 °C. Povrchové teploty těl osob v parku jsou vyšší, než teploty ve stínu stromů. Lidské tělo se tedy ve stínu stromů ochlazuje.

Odpověď: strom se chladí výparem vody a proto má i osluněný povrch koruny stromu poměrně nízkou teplotu. Ve stínu budovy je sice poměrně nízká teplota, ovšem osluněná střecha budovy má povrchovou teplotu výrazně vyšší a zvyšuje tak efekt tepelného ostrova města.

Vzdělávací situace č. 7:

Úprava městského parku

Do architektonické soutěže na úpravu městského parku se přihlásí dva projekty. První navrhuje nízko-údržbové betonové prostranství s vodními fontánami a prvky ornamentální výsadby hrnkových letniček a sukulentních rostlin. Druhý projekt navrhuje parkovou úpravu se vzrostlými stromy, půdo-pokryvnými křovinami a trávníkem, avšak bez vodních prvků. Který projekt má výhodnější klimatizační efekt pro městské klima?

Odpověď: *odvodněné pevné povrchy se na slunci přehřívají. Hrnkové letničky a sukulenty se chladí výparem (transpirací) vody jen málo. Fontána se chladí výparem vody, ale nevytváří stín. Vzrostlé stromy a trávník chladí sebe a své okolí transpirací a vzrostlé stromy svojí vysokou pokryvností listoví (několik m² listové plochy nad jedním m² půdy) redukuje přicházející sluneční záření na desetinu i méně a vytvářejí tak příjemný stín. Pro klima města je též důležité umožnit zasakování dešťové vody na trávnicích.*

Vzdělávací situace č. 8:

Dlážděné parkoviště

Developer chce rozšířit vydlážděnou plochu parkoviště na místo stávajícího parku se vzrostlými stromy až k městskému koupališti za parkem. Může mít rozšíření parkoviště vliv na spotřebu vody v koupališti?

Odpověď: *v parku se vzrostlými stromy je teplota pod 30 °C a vlhkost se udržuje v porostu. Zatímco odvodněná plocha parkoviště se ohřeje na teplotu okolo 50 °C, od přehřáté plochy se ohřívá vzduch, který stoupá vzhůru a strhává i vodní páru z vodní plochy koupaliště, které tak ztrácí vodu.*

Vzdělávací situace č. 9:

Travníky ve městě

V horkém letním dnu změřte za pomoci IR teploměru nebo termovizní kamery povrchovou teplotu pravidelně sekaného trávniku sekačkou s nízkou výškou sečení a teplotu travního porostu koseného 1 – 2x za rok. Srovnajte povrchové teploty obou lokalit s teplotami zpevněného povrchu.

Odpověď: *krátce posečený trávník se přehřívá, nemůže se chladit výparem vody. Trávník o výšce několika decimetrů udržuje půdní vlhkost a mírně se chladí výparem vody i okolním vzduchem. Tráva je vystavena plnému slunečnímu svitu a uzavírá po většinu dne průduchy, trpí nedostatkem vody.*

Vzdělávací situace č. 10:

Nejlevnější klimatizační zařízení

V běžném letním dnu se teplota ve stínu vzrostlého městského parku příliš neliší od teploty udržované klimatizačními zařízeními např. v supermarketech a velkých nákupních centrech. Změřte teplotu v parku a porovnejte s teplotou v klimatizovaném supermarketu. Zjistěte příkon elektřiny klimatizačního zařízení konkrétního supermarketu a vypočítejte finanční náročnost této klimatizace. Porovnejte s finanční náročností chladící schopnosti vzrostlého parku. Je ještě nějaký podstatný rozdíl mezi klimatizačním efektem stromů v parku a technologickou klimatizací supermarketu?



Obr. 20: Termovizní snímek dokumentuje chladící efekt stromů v parku. Nejnižší povrchová teplota je na travnaté ploše ve stínu stromu (23,4 °C), nejvyšší na povrchu plechové střechy (52,6 °C)

Odpověď: technologická klimatizace chladí vnitřek supermarketu a teplý vzduch vypouští do okolí; podobně jako chladnička chladí uvnitř svého prostoru a ohřívá místnost (ve výparníku se chladicí kapalina vypařuje/ chladí, v roštu na zadní stěně páry kondenzují a teplo se uvolňuje). Strom se chladí výparem vody. Kam odevdává skupenské teplo? Vodní pára se sráží na chladných místech, vysoko ve vzduchu tvoří mlhu a mrak nebo se sráží jako rosa ráno a ohřívá chladné okolí. Technologická klimatizace chladí místnost a ohřívá město, zatímco vegetace chladí své okolí a teplo se uvolňuje při srážení vodní páry na chladných místech, vegetace má tedy dvojitý klimatizační efekt. Technologická klimatizace využívá chladicí kapaliny různého stupně toxicity, vegetace využívá vodu, kterou navíc při transpiraci čistí téměř na úroveň vody destilované.

Vzdělávací situace č. 11:

Klimatizační role nemocničního parku

V letních vedrech narůstají požadavky na klimatizaci nemocnic pro zajištění uspokojivých podmínek pro pobyt pacientů. Nemocnice č. 1 je obklopena vzrostlým parkem a investuje do pěstování zeleně. Nemocnice č. 2. preferuje strojově sekaný nízký trávník, který v letním období zcela vysychá. Započítáme-li finanční náročnost klimatizace, která nemocnice více ušetří?

Odpověď: vzrostlé stromy a trávník zásobený vodou se chladí výkonem několika set $W.m^{-2}$. Vegetace zásobená vodou má povrchovou teplotu nejvýše 30 °C, zatímco povrchová teplota posekaného trávníku se na průměrném slunečním svitu blíží 50 °C. Ohřátý vzduch stoupá k oknům nemocničních pokojů a dlouhovlnné záření vysílané zahřátou plochou posekaného trávníku navíc ohřívá budovu a okna intenzitou více než $100W.m^{-2}$. Chladný povrch stromů a zalitého trávníku naopak přijímá teplo ohřáté budovy, protože je chladnější nežli povrch budovy (Stefanův – Boltzmannův zákon). Mohli bychom vyjádřit chladicí efekt vegetace i peněžně. Například $300W.m^{-2}$ po dobu 6 hodin představuje 1,8kWh, což je při ceně 4 Kč za kWh 7,20 Kč a při ploše

parku 400m² šetříme 2880 Kč denně za provoz klimatizace, která má v podobě parku chladící výkon 720kW (400 x 1,8kW).

Vzdělávací situace č. 12:

Revitalizace městské aleje

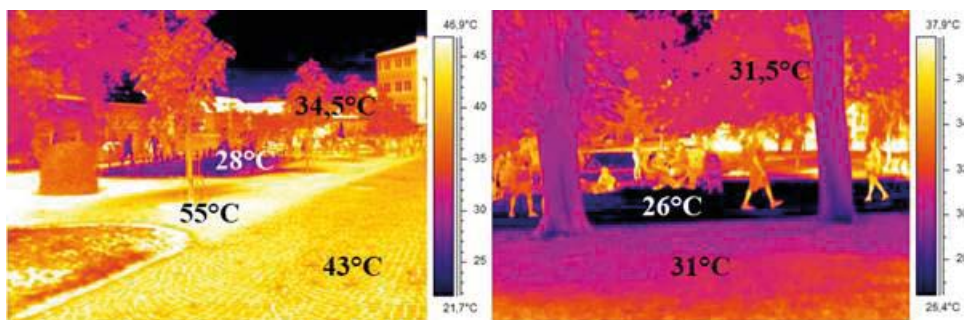
V horkém letním dnu změřte za pomoci IR teploměru nebo termovizní kamery povrchovou teplotu ve stínu mladých stromů vysazených v dlažbě s železnými rošty. Porovnejte s povrchovou teplotou pod mnohaletými vzrostlými stromy.

Modelový příklad: Hradební příkopy.

Hradební příkopy kolem historických měst sloužily jako skládky odpadu poté, co pozbyly svoji obrannou funkci. V 19. století byly takové hradební příkopy přeměňovány na parky iniciativou tzv. okrašlovacích spolků. Velmi často byly vysázeny aleje „koňských kaštanů“ (správný botanický název jírovec maďal, *Aesculus hippocastanum*). Jírovec nepatří mezi dlouhověké stromy, jako jsou dub, buk, jedle a vyžaduje odbornou péči arboristy. Mnohé městské parky vyžadují obnovu a výsledkem nákladných projektů revitalizace je často zvýšený podíl zpevněných ploch, úbytek trávníků, kde se voda zasakovala ke kořenům stromů a nově vysázené stromy jsou nízkokmenné s omezeným prostorem pro rozvoj kořenového systému. Za vysokých finančních nákladů se zrychlil odtok dešťové vody, rozšířil teplený ostrov města – zvětšila se plocha, která se za slunných dnů v létě přehřívá.

Na levé straně obr. 21 je „revitalizovaná část Husových sadů v Jindřichově Hradci, kde povrchová teplota dlažby přesahuje 50 °C. Chladnou plochu představuje betonový povrch skrápěný vodotrysky. Na pravé straně je „dosud nerevitalizovaná“ část, kde je pod vysokými stromy teplota povrchu trávníku o 20 °C nižší, nežli v části „revitalizované“.

Odpořď: *Ve stínu vzrostlých stromů je naměřená povrchová teplota výrazně nižší. Funkční vegetace, která chladí efektivně sebe a své okolí se vyvíjí dlouho, mnoho desítek let. Přitom kombinace vysokých stromů a trávníku je z hlediska údržby nejlevnější. Takový porost si vytváří své mikroklíma a v období suchých roků 2015 – 2019 nemusel být zaléván a stromy neuschly. Hluboký hradební příkop poskytl dostatek prostoru pro zadržení dešťové vody a vytvoření funkčního kořenového systému. Takové podmínky pro rozvoj kořenů nejsou v ulicích měst, proto je třeba takových lokalit, kde jsou podmínky pro vysoké stromy a jejich kořenový systém, využívat.*



Obr. 21: Vlevo „revitalizovaná“ a vpravo doposud nerevitalizovaná část parku v Jindřichově Hradci.

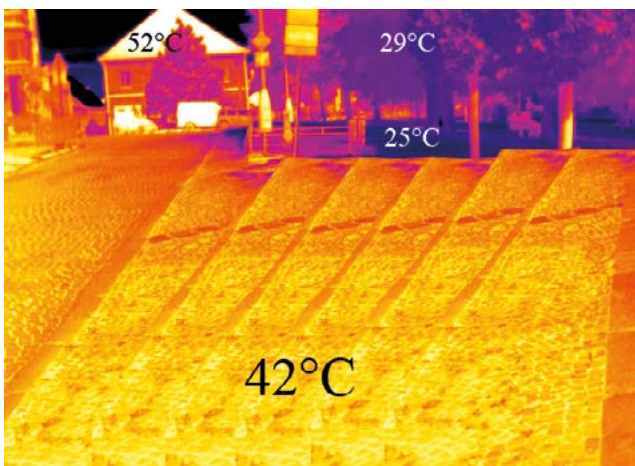
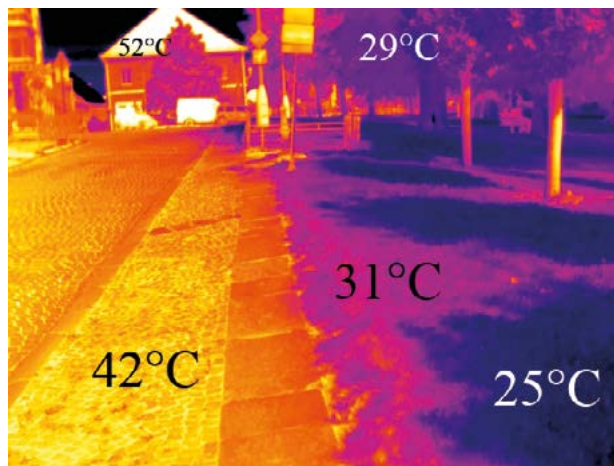
Vzdělávací situace č. 13:

Parkoviště před školou

Před školou je ráno před začátkem vyučování nedostatek parkovacích míst, auta přivázející školáky nemají kde zastavit. Město uvažuje o rozšíření parkovací plochy před školou na úkor přilehlé travnaté plochy se vzrostlými stromy. Posuďte, jak se změní teplotní poměry před školou? Jaký dopad to bude mít na ekonomiku provozu školy do budoucna?

Změřte pomocí termovizní kamery současné povrchové teploty vydlážděného chodníku (silnice) se stávajícími parkovacími plochami a povrchové teploty na travnaté ploše pod stromy. Nasimulujte naměřené povrchové teploty silnice na plochu plánovaného rozšíření parkoviště. Spočítejte klimatizační efekt současné vegetace a zvažte ekonomiku provozu klimatizace ve škole do budoucna.

Řešení: Jedná se o 500 m² plochy před školou. Z termovizního snímku (obr. 21) je patrné, že za slunného dne je povrchová teplota trávníku pod javory o více než 10 °C nižší nežli teplota vydlážděné silnice. Namísto 500 m² trávníku a stromů, kde se zasakovala dešťová voda, bude dlažba, která se bude za slunného dne ohřívat a vzestupný proud teplého vzduchu bude ohřívat budovu dalšími cca 100kW (500m² x 0,24kW = 120kW). Uvažujeme pokles výparu 100mg .m⁻² .s⁻¹. Výparné teplo vody při 20 °C je 2,45 kJ .kg⁻¹. Navíc ohřátá plocha vyzařuje teplo do stěn a oken školy. Do budoucna lze očekávat nutnost nákupu klimatizačního zařízení pro školu. Tím stoupnou náklady na energii a navíc okolní vzduch se bude dále ohřívat teplem uvolňovaným klimatizačním zařízením do okolí budovy.



Obr. 22: V horní části je zachycena současná situace před školou, termovizní snímek pořízený za jasného dne dokumentuje teplotní rozdíly povrchových teplot na dlážděné ploše a na trávniku ve stínu stromů. Dolní obrázek ukazuje simulaci, jak potenciálně stoupne teplota za slunného dne po vykácení stromů a přeměně trávniku na parkovací plochu.

7. Vyčíslení ekosystémových služeb

- Za jasného dne přichází 700 – 1000 W sluneční energie na 1 m² zemského povrchu, oblačnost snižuje intenzitu i pod 100 W na 1 m².
- Výparné teplo vody při 20 °C je 2,45 kJ . kg⁻¹ tj. 680 Wh. kg⁻¹. Z jednoho litru vody vznikne cca 1200 litrů vodní páry.
- Reálná hodnota výparu z 1 m² porostu vegetace je 100 mg . s⁻¹ za spotřeby energie 245 W. Tedy za hodinu se vypaří z 1 m² 360 g vody. Rostliny regulují rychlost výparu průduchy podle intenzity sluneční energie a dostupnosti vody.
- Pokud voda a vegetace chybí, ohřívá se terén a vzduch (zjevné teplo).
- 1000 m² stromů a trávníku za slunného dne chladí cca výkonem 245 kW, což odpovídá 70 klimatizacím o výkonu 3,5 kW. Při ceně 4 Kč za 1 kWh bychom za jediný den zaplatili za elektrinu na takové chlazení 9 800 Kč. Technická klimatizace ochlazuje místnost a ohřívá okolí, strom teploty vyrovnává.
- Na 1000 m² porostu se vytvoří za slunný den 10 kg biomasy a uvolní 10 kg kyslíku, který má hodnotu 3 500 Kč.
- Strom s průměrem koruny 5 m dobře zásobený vodou vypaří za slunného letního dne více jak 100 l vody. Na výpar spotřebuje tedy 68 kWh (pro výpar 1l vody je potřeba 0,68 kWh). Tato energie nemůže ohřát okolní vzduch, strom tedy chladí své okolí přibližně výkonem 6,8 kWh (uvažujeme-li v letním období cca desetihodinový sluneční svit)
- Zdravá vegetace čistí vzduch, zbavuje ho prachu, zvyšuje vlhkost, brání vzniku vzestupných vysušujících proudů.

8. Příloha

Tabulka č. 1: Maximální hodnoty absolutní vlhkosti vzduchu (100% vlhkost, rosný bod) při dané teplotě a za normálního tlaku vzduchu, vyjádřené v gramech na m³ a v objemových jednotkách ppm (ml.m⁻³) H₂O.

Teplota vzduchu [°C]	Max. absolutní vlhkost [gH ₂ O.m ⁻³]	ppm vodní páry [ml .m ⁻³]
0	4,8	5970
5	6,8	8400
10	9,4	11600
15	12,8	15900
20	17,3	21500
25	23,0	28600
30	30,4	37800
35	39,6	49200
40	51,1	63500

9. Literatura

- Bannister, P. (1986). Water relations and stress. In: Moore, P. D. & Chapman S. B. (Eds.), *Methods in Plant Ecology*. Blackwell Scientific Publications. s. 73-144.
- Brom, J. & Pokorný, J. (2017). Hydrologie mokřadů, vodní cyklus a klima. In: Čížková, H., Vlasáková, L. & Květ, J. (eds), *Mokřady: Ekologie, ochrana a udržitelné využívání*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice. s. 313-332, ISBN: 978-80-7394-658-6.
- Cihelka, J. (1997). *Solární tepelná technika*. Praha: Nakladatelství T. Malina.
- Čermák, J., Kučera, J. & Nadezhdina, N., (2004). Sap flow measurement with two thermodynamics methods, flow integration within trees and scaling up from trees to entire forest stands. *Trees – Structure and Function*, 18, s. 529 – 546. doi: 10.1007/s00468-004-0339-6
- Čermák, J., Nadezhdina, N., Trcala, M. & Simon, J. (2014). Open field-applicable instrumental methods for structural and functional assessment of whole trees and stands. *Lesnická a dřevařská fakulta. Mendelova univerzita v Brně*, 53 s.
- Dykyjová, D., a kol. (1989). *Metody studia ekosystémů*. Praha: Academia.
- Ellison, D. a kol. (2017): Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51 – 61.
- Helus, Z. (2008) Teoretická východiska pojetí učitele v době měnících se nároků na školu a vzdělávání. In: Spilková, V., Vašutová, J. et al. *Učitelská profese v měnících se požadavcích na vzdělávání*. Praha: PedFUK.
- Hesslerová, P. & Pokorný, J. (2010). Forest clearing, water loss and land surface heating as development costs. *Int. J. Water*, 5., s. 401–418.
- Jirka V. a kol. (2021): Energetická výměna mezi zemským povrchem a atmosférou v závislosti na meteorologických podmínkách bez ohledu na obsah CO₂. *Vytápění, větrání, instalace*. In press
- Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M. & Tóth, E. (2007). *Voda pre ozdravenie klímy – nová vodná paradigma*. Žilina: Municipalia.
- Kučera, J., Čermák, J. Penka, M. (1977). Improved thermal method of continua recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum*, 19(6), s. 413 – 420. doi: 10.1007/BF02922976
- 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, s. 1013–1033.
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G. & Li, B. L. (2009). Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological Complexity*, 6, s. 302-307.
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G. & Li, B. L. (2006). Conservation of water cycle on land via restoration of natural closed-canopy forests: implications for regional landscape planning. *Ecological Research*, 21, s. 897–906.
- Nadezhdina, N., David, T. S., David, J. S., Ferreira, M. I., Dohnal, M., Tesař, M., Gartner, K., Leitgeb, E., Nadezhdin, V., Čermák, J., Jimenez, M. S. & Morales, M. (2010). Trees never rest: the multiple faces of hydraulic redistribution. *Ecohydrology*, 3, s. 431 – 444. doi:10.1002/eco.148.
- Nadezhdina, N., Steppe, K., De Pauw, D. J., Bequet, R., Čermák, J. & Ceulemans, R. (2009). Stem-mediated hydraulic redistribution in large roots on opposing sides of a Douglas-fir tree following localized irrigation. *New Phytologist*, 184, s. 932–943. doi: 10.1111/j.1469.
- Pokorný, J. (2019). Evapotranspiration. In: Fath, B. D. (ed.), *Encyclopedia of Ecology, 2nd edition*. Oxford: Elsevier, s. 292–303.
- Pokorný, J. (2010). Energie v agroekosystémech. In: Šarapatka, B. a kol. (Eds.), *Agroekologie, východiska pro udržitelné zemědělské hospodaření*. Bioinstitut, Olomouc. S. 119 – 137.
- Pokorný, J., Brom, J., Čermák, J., Hesslerová, P., J., Huryna, H., Nadezhdina, N., Rejšková, A. (2010). Solar energy dissipation and temperature control by water and plants, *Int. J. Water*, 5, (4), 311 – 336.

Pokorný, J. & Hesslerová, P. (2019). Jak vysycháme – aneb, opravdu „kazí rybníky hydrologickou bilancí“? Sborník referátů 5. ročníku Odborné konference konané v Českých Budějovicích 14. a 15. února 2019. Rybářské sdružení ČR, FROV, Jihočeská univerzita v Č. Budějovicích. s. 37 – 43.

Procházka, M., Somr, M. (2008) Kapitoly z didaktiky vzdělávání dospělých. České Budějovice: V-studio, 2008, 100 s.

Procházka, M. (2011) Autorita lektora. In: Langer, T. a kol. Efektivní vzdělávání pro trh práce. Sborník z konference

Rosenberg, V. J., (1974). Microclimate: the biological environment. New York: Wiley.

Ryplová, R. (2014). Fyziologie rostlin. *Skripta pro studující učitelství přírodopisu pro 2. stupeň ZŠ*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 114 s.

Poděkování

Tato metodika je vytvářena s finanční podporou TAČR v rámci řešení projektu TL 01000294.

Autoři dále děkují aplikačním garantům, Městu Dačice a Městu Třeboň, kteří se na vytvářené metodice výrazně podíleli a umožnili její ověřování. Jmenovitě díky především ing. J. Müllerovi, ing. L. Skořepovi, ing. V. Fliegelové a ing. J. Fliegelovi, kteří přispěli cennými konzultacemi a připomínkami.

Metodika je k dispozici ke stažení zdarma zde: <https://www.pf.jcu.cz/projekty/svv/>

Autorský kolektiv: doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc.¹, RNDr. Renata Ryplová, Ph.D.², RNDr. Petra Hesslerová, Ph.D.¹,
ing. Vladimír Jirka, CSc.¹, PhDr. Miroslav Procházka, Ph.D.², Mgr. Zbyněk Vácha, Ph.D.²

¹ENKI, o.p.s., Dukelská 145, Třeboň

²Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, Jeronýmova 10, 371 15 České Budějovice

Foto na titulní straně: Zelená fasáda chladí výrobní halu a čistí odpadní vodu (se svolením LIKO-S, a.s.)

Ilustrace a termovizní snímky: archiv ENKI, o.p.s.

© ENKI, o.p.s., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích a Město Dačice, 2021