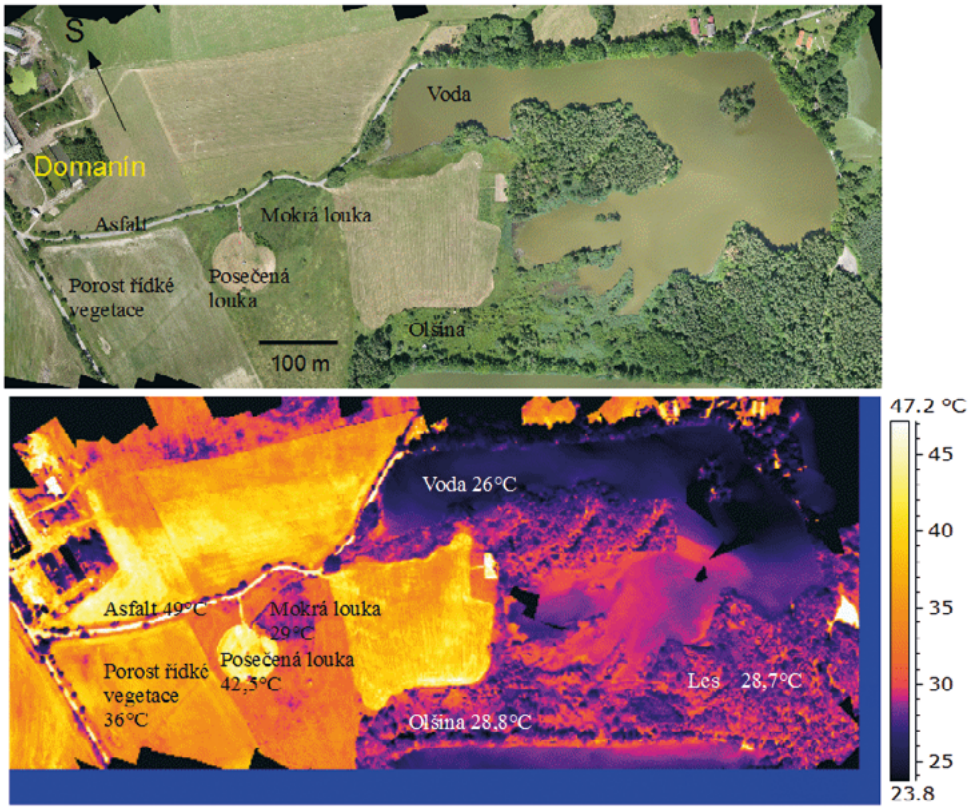
# Slunce – voda – rostliny – klima:

## Podklady k poznání a výuce





T A
Č R

Pedagogická fakulta
Faculty of Education

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

ENKI o.p.s.





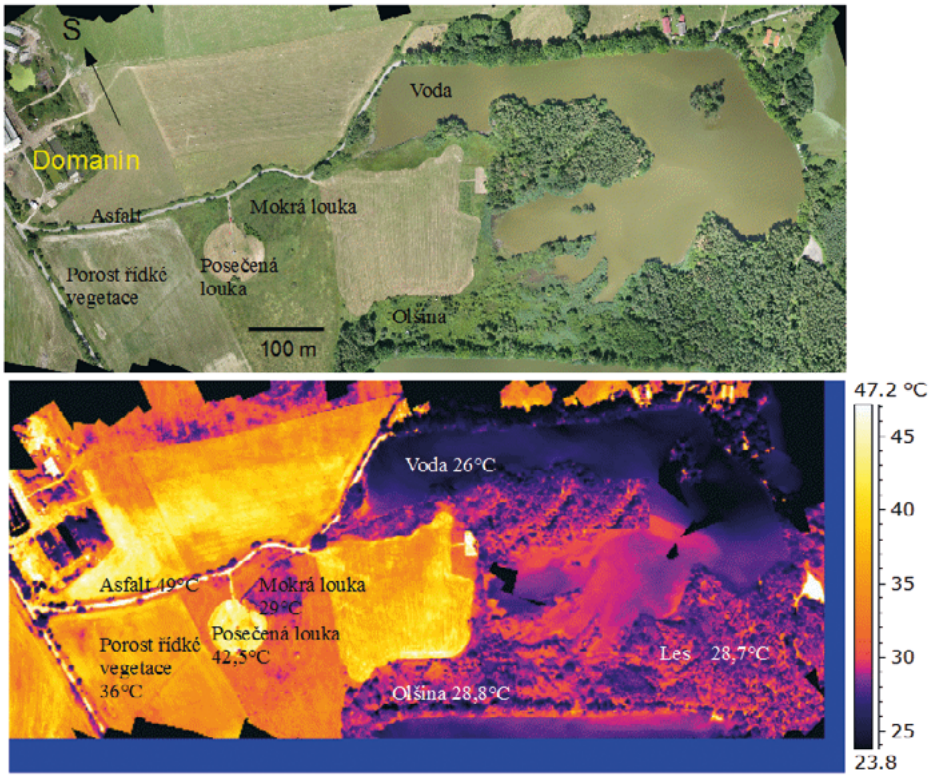

Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

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



# Slunce – voda – rostliny – klima:

## Podklady k poznání a výuce





T A
Č R

Pedagogická fakulta
Faculty of Education

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

ENKI o.p.s.

Tato kniha 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.*

2. vydání bylo podpořeno z projektu *Klima? Bez vody a vegetace to nepůjde! č. 5230200040, Program NPŽP-NPO 2/2023*

**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.

**Recenzenti:**
RNDr. Jana Dobroruková
Ing. Bořivoj Šourek, Ph.D.

*Fotografie: Archiv ENKI, o.p.s., termovizní snímek povrchových teplot různých typů krajinného pokryvu za slunného letního dne ( str. 175).*

Vydání 2., rozšířené. 2025 ENKI, o.p.s., Třeboň.
© 2025 ENKI, o.p.s., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

ISBN 978-80-908090-3-1

# Obsah

Úvod ..... 9

1. Civilizace odvodňují krajinu ..... 13
1.1. Lidské civilizace odvodňují krajinu a vyčerpávají zdroje ..... 13
1.2. Odvodnění zemědělské krajiny na území ČR ve druhé polovině 20. století ..... 18
1.3. Vývoj naší krajiny od posledního zalednění s ohledem na koloběh vody, odtok látek a tok sluneční energie ..... 19
1.4. Krátký (uzavřený) a dlouhý (otevřený) cyklus vody ..... 23
1.5. Zásady a kritéria setrvalého užívání krajiny – zdravý metabolismus krajiny ..... 25

2. Počasí a podnebí ..... 33

3. Slunce a Země ..... 40
3.1. Země bez Slunce ..... 40
3.2. Slunce a Země se vzájemně přitahují ..... 40
3.3. Záření Slunce a záření Země ..... 42
3.4. Sluneční konstanta a zářivost Slunce ..... 44
3.5. Sluneční záření dopadající na naši planetu ..... 45
3.6. Průchod slunečního záření atmosférou ..... 46
3.7. Slunce ..... 47

4. Toky energie v otevřených systémech ..... 52
4.1. Otevřené systémy ..... 54
4.2. Rostliny a ekosystémy v pojetí termodynamiky otevřených systémů ..... 57
4.3. Evapotranspirace a další procesy přeměn energie v ekosystémech ..... 59

5. Sluneční záření: denní chod krátkovlnného a dlouhovlnného záření za jasného a oblačného dne . . . . . 64
5.1. Metodika měření a popis modelové lokality . . . . . 64
5.2. Příklady měření denního toku slunečního krátkovlnného a dlouhovlnného záření . . . . . 68
5.3. Sluneční záření, vodní pára a jejich vliv na místní klima . . . . . 86
5.4. Skleníkový efekt v číslech: praktická ukázka výpočtu . . . . . 90

6. Voda a rostliny . . . . . 96
6.1. Voda v rostlině . . . . . 96
6.2. Pohyb vody rostlinou a transpirace . . . . . 97
6.3. Vliv vnějšího prostředí na transpiraci . . . . . 103
6.4. Transpirace a fotosyntéza . . . . . 105

7. Evapotranspirace . . . . . 108
7.1. Hodnoty hlavních toků sluneční energie v ekosystémech a zásadní význam výparu vody... . . . . 109
7.2. Evapotranspirace potenciální, referenční a aktuální . . . . . 111
7.3. Měření rychlosti transpirace . . . . . 112
7.4. Metody stanovení evapotranspirace . . . . . 114
7.5. Radiační bilance porostů . . . . . 117
7.6. Krajinný pokryv určuje distribuci sluneční energie . . . . . 125

8. Lesy přitahují vodu evapotranspirací . . . . . 131
8.1. Jak lesy přitahují vlhký vzduch . . . . . 134
8.2. Výpar udržuje horizontální gradient tlaku indukovaný kondenzací . . . . . 137

9. Možnosti hodnocení úlohy vegetace v distribuci slunečního záření pomocí dálkového průzkumu Země . . . . . 145
9.1. Fyzikální podstata a základní principy DPZ . . . . . 146
9.2. Úvod do případových studií . . . . . 154
9.3. Případové studie . . . . . 162

10. Slunce, voda, rostliny, klima – a vzdělávání ..... 178
10.1. Proč učit o úloze vegetace ve škole ..... 178
10.2. Současná úroveň znalostí ..... 180

11. Doporučené formy a metody výuky ..... 187
11.1. Badatelsky orientované vyučování ..... 188
11.2. Příklad badatelské výukové aktivity ..... 192
11.3. Projektová výuka ..... 193
11.4. Příklad projektové výuky ..... 195
11.5. Místně zakotvená výuka ..... 199

12. Soubor ověřených otázek pro výuku ..... 204

13. Přístroje, pojmy a jednotky nezbytné pro měření ..... 212
13.1. Sluneční záření ..... 212
13.2. Teplota a teplo ..... 214
13.3. Vlhkost, teplota vzduchu a rosný bod ..... 218
13.4. Rychlost větru ..... 221
13.5. Srážky ..... 222
13.6. Meteorologické stanice používané ENKI, o.p.s. ..... 223
13.7. Doporučené měřicí přístroje pro výuku ..... 225

Summary ..... 230

Odborná charakteristika autorů ..... 234

Poděkování ..... 238

# Úvod

Po čtyřech letech od prvního vydání knihy „Slunce-voda-rostliny-klima: Podklady k poznání a výuce“ vychází její druhé, rozšířené vydání. Impulsem byl nečekaně velký zájem široké veřejnosti. Autorský tým proto reaguje na poptávku po dalších výtiscích a doplněním nových poznatků dokládá, jak se toto holistické pojetí procesů na úrovni ekosystémů a krajiny rozvíjí.

Efekt lidské činnosti na místní a globální klima patří k nejdiskutovanějším otázkám současnosti. Adaptace na klimatickou změnu a snaha o tlumení jejích dopadů se promítá do života celé společnosti, jednotlivce a ekonomiky. V době, kdy je klimatická změna spojována především s nárůstem skleníkových plynů, představuje zohlednění poznatků o přímé roli vegetace ve strategiích ochrany klimatu a hospodařením s vodou účinný nástroj pro její zmírnění. Naopak nesprávné hospodářské zásahy v krajině způsobené neznalostí a špatnou informovaností laické i odborné veřejnosti o zákonitostech role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu vody dopady klimatické změny prohlubují. Dochází tak k narůstání teplotních extrémů, zaznamenáváme delší období beze srážek přerušované přívalovými srážkami a postupné vysoušení krajiny. Neinformovanost veřejnosti pramení už z absence tohoto tématu ve školní výuce. Průzkum na základních, středních a vysokých školách prokázal systematické neznalosti jak o procesech přeměny sluneční energie na úrovni rostliny a krajinného pokryvu, tak i o úloze vody v těchto procesech. Také zaměstnanci státní správy a samosprávy často postrádají srozumitelné podklady pro porozumění a argumentaci o úloze a funkci zeleně a různého krajinného pokryvu v místním klimatu a životním prostředí.

V současné době hovoříme o tzv. plant blindness“, kdy jsme zapomněli, jaký význam mají rostliny v distribuci slunečního záření a oběhu vody díky procesu evapotranspirace, (nikoliv fotosyntézy), jak dokáží aktivně chladit sebe i okolí, přitahují vodu a utvářejí klima. Funkce rostlin v klimatu je často redukována na produkci/vázání skleníkových plynů. Neznalost základních fyziologických principů fungování vegetace vede k zavádějící interpretaci výsledků modelů, které se zabývají tzv. biofyzikálním vlivem vegetace na klima.

Jednou z dalších příčin nepochopení této problematiky je i absence celostního (holistického) vnímání dějů kolem nás. To pramení již z izolace výuky jednotlivých předmětů (konkrétně fyziky, chemie, biologie, základů meteorologie) na školách.

Kniha si proto klade za cíl překonat bariéry mezi obory. Snaží se srozumitelným způsobem podat exaktní podklady k porozumění vlivu lidské činnosti na změny toků sluneční energie, koloběhu vody a látek v krajině. Význam a úloha vegetace v hydrologii a klimatu byla známa a popisována již ve starověkém Řecku, procesy evapotranspirace se dostávají do popředí zájmu ve 20. století.

Kniha začíná kapitolou o vývoji historických civilizací, které archeologové nalézají převážně v oblastech dnešních pouští. Následují kapitoly o sluneční energii, podnebí a klimatu a dále vysvětlení úlohy vegetace pomocí nerovnovážné termodynamiky otevřených systémů. Na příkladech naměřených hodnot denních chodů přicházející a odražené sluneční energie a výměny tepla mezi povrchem Země a atmosférou je ukázána zásadní úloha vodní páry a oblaků v regulaci přicházející energie i vyzářeného tepla do atmosféry. Následují kapitoly o roli rostlin v distribuci sluneční energie mezi výparem vody a fotosyntézou na úrovni jedné rostliny a porostů. V kapitole založené na výsledcích dálkového průzkumu Země uvádíme příklady kvantifikace chladící schopnosti vegetace. Využíváme moderních metod měření v prostorovém kontextu (termovizní snímkování, zdokonalené přístrojové vybavení pro meteorologická měření a výpočty), které navazují na bodová měření. Ukazujeme, jak odlesněním a odvodněním stoupají povrchové teploty, stoupá teplota vzduchu za slunných dnů a krajina se vysouší.

Oproti prvnímu vydání jsme zařadili v kapitole 5 příklad měření radiační bilance při nočním mrazu na jaře a příklad „rozpouštění oblačnosti“ nad přehřátou odvodněnou plochou v pozdním létě. Seznam literatury jsme rozšířili o nejnovější práce v oblasti funkce vegetace v tvorbě regionálního až globálního klimatu. Zvláštní kapitola se zabývá popisem instrumentace použité pro výzkumné vědecké práce, tak přístroji doporučenými pro výuku.

V pedagogické části kniha přináší výsledky výzkumu znalostí role vegetace v koloběhu vody a distribuce sluneční energie v krajině, upozorňuje na zjištěné žákovské miskoncepce, na něž je potřeba se ve výuce tohoto tématu zaměřit. Přináší také přehled vhodných moderních didaktických metod k výuce tohoto tématu, společně s konkrétními náměty pro výuku.

Kniha je komplexně uspořádaným informačním zdrojem aktivně využitelným pro tvorbu adaptačních strategií měst a obcí a tvorbu krajiny se schopností klimatické autoregulace a přináší také potřebný teoretický základ i pro výuku. Podává odborný výklad k nově vytvořeným vzdělávacím metodikám k tématu sluneční energie – voda v krajině – vegetace ve třech variantách, a to: Metodice výuky pro VŠ studenty učitelství přírodopisu pro ZŠ a učitele z praxe, Metodice výuky pro žáky 9. ročníků ZŠ a víceletých gymnázií a Nové metodice vzdělávání pracovníků MěÚ na téma Sluneční energie – voda v krajině – vegetace k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima. Všechny metodiky, tato kniha i další doprovodné materiály jsou k dispozici ke stažení zdarma zde: https://projekty.pf.jcu.cz/svv/.

Zkušenosti z prvního vydání vedly i k mezinárodní spolupráci , jejímž výsledkem jsou další vzdělávací materiály: ERASMUS+ Education for Plant Literacy https://planteducation.eu/ , k tvorbě digitální interaktivní učebnice „Biomasa v trvale udržitelné krajině“ pro střední i základní školy“, která inovativním způsobem představuje téma fotosyntézy v ekologických souvislostech uvažujících roli fotosynteticky vytvořené biomasy v celkovém kontextu krajiny https://fotosyntezavkrajine.cz/ a k probíhajícímu projektu NPŽP-NPO 2/2023 „Klima. Bez vody a vegetace to nepůjde.“ který se zaměřuje na vysvětlení principů významu krajinného pokryvu pro lokální klima a vodní režim, které by měly být brány do úvahy při zmírňování a předcházení dopadů klimatické změny a je určen především pracovníkům státní správy.

Publikace vychází z výzkumů pracovníků ENKI, o.p.s., a Pedagogické fakulty JU v Českých Budějovicích, spojuje výsledky ekofyziologických a didaktických studií a nabízí cestu k překonání neznalostí prostřednictvím moderních výukových aktivit.

# 1. Civilizace odvodňují krajinu

Krajinou rozumíme část zemského povrchu s typickou kombinací přírodních a kulturních prvků. Žijeme v kulturní krajině, dlouhodobě využívané člověkem. Pouze v odlehlých místech Země a jen v některých národních parcích můžeme poznávat krajinu přirozenou, kterou neutváří člověk přímo svou činností. Sedm miliard obyvatel Země přetváří na začátku třetího tisíciletí svoji krajinu rychlým tempem, soustavným úsilím a globálně, a to i vzhledem k celosvětově sdíleným technologiím a principům hospodaření. Fosilní paliva umožnila průmyslovou výrobu, transport zboží denní potřeby i potravin na dálku, nastal exodus obyvatel z venkova do měst a tím odpoutání člověka od základního zdroje obživy – od půdy, od krajiny. V rozvinutých zemích pracuje v zemědělství méně než 5 % populace, obyvatelé měst ztratili kontakt s krajinou a neuvědomují si, že zemědělec a lesník určuje svým hospodařením množství a kvalitu vody v tocích, ovlivňuje klima a vytváří základní podmínky pro život včetně produkce potravin a obnovitelných zdrojů.

Současný anglický historik Clive Ponting (2019), uvádí ve své knize „Zelené dějiny světa“, že vývoj a zánik velkých lidských civilizací má společné rysy – člověk-zemědělec postupně odvodňuje močály, žďáří lesy a jeho stáda domestikovaných zvířat vypásají trvalé travní porosty. Na druhé straně se rozvíjejí města, kde převažují odvodněné plochy. V České republice ztrácíme denně 11 hektarů zemědělské půdy. V češtině vydaná kniha „Kolaps, proč společnosti přežívají či zanikají“ (Diamond 2008) popisuje pád civilizací následkem podcenění významu půdy a zemědělského hospodaření.

## 1.1. Lidské civilizace odvodňují krajinu a vyčerpávají zdroje

Dva miliony let se člověk živil na Zemi převážně lovem a sběrem. Teprve „nedávno“, v průběhu několika tisíc let, se způsob života člověka změnil – stal se zemědělcem, začal pěstovat plodiny a pást zvířata. Zemědělci produkovali dostatek potravy, takže se mohla rozvíjet města, organizované státní útvary – historické

civilizace. Tato nejdůležitější změna v historii člověka se odehrávala nejdříve v jihozápadní Asii, v Číně a ve Střední Americe. Vyšší produkce potravin vedla k růstu populace, vzniku sídlišť a rozvoji hierarchické společnosti.

Před 10 tisíci lety, tedy po konci poslední doby ledové, žily na Zemi asi 4 miliony lidí a populace pomalu vzrůstala na 10 milionů v průběhu dalších pěti tisíc let. Poté s rozvojem zemědělství počet lidí na Zemi začal růst rychleji. Populace se zdvojnásobovala přibližně za každé milénium až na 50 milionů před 1000 lety, další zdvojnásobení přišlo za 500 let, další za následujících 200 let, a poté během 300 let dosáhla světová populace dnešního stavu osmi miliard.

Prvním domestikovaným zvířetem byl pes v různých částech světa před více než 20 000 lety. Doklady o tom jsou z archeologických nálezů a nejnověji z genetických studií (Manwell & Baker 2010, Wayne & Vonholdt 2012). Ovce a kozy se začaly chovat před 8000 roky, skot zdomácněl ještě později. Většina civilizací až do dnešní doby pěstuje pšenici a ječmen (Mezopotámie, Egypt, Evropa). Tyto dvě obilniny byly vyšlechtěny ze stepních trav, vyžadují proto stepní podmínky a provázejí lidské civilizace od jejich počátku. Jejich kořeny nesnášejí zatopení, a proto musí být půda pro jejich pěstování odvodněna. V Řecku měnilo zemědělství krajinu postupně. Již od pátého tisíciletí před naším letopočtem se v průběhu několika tisíc let posunovaly zemědělské praktiky na sever do Evropy, kde se musel vykácet klimaxový les a obdělat půda. V mírném pásmu zaujímal původní les před rozvojem zemědělství přibližně 90 % plochy souše. Na území našeho státu se začalo systematicky odlesňovat na přelomu prvního a druhého tisíciletí, tedy v raném středověku. Současné lesní porosty se zásadně liší od lesa původního, jsou to převážně stejnověké kultury s převládajícím jedním druhem dřevin, které se sklízejí v mýtním věku a dřevo (biomasa) se odváží. Původní les byl složen z mnoha druhů dřevin různého věku, biomasa v porostech zůstávala. **Studium vodního a tepelného režimu zachovalých pralesních porostů prokázalo uzavřený koloběh vody a živin v těchto původních porostech oproti zemědělským plodinám a současným lesním porostům, které bývají často odvodněny.**

V Číně se pěstovaly i jiné plodiny (proso a rýže), chovala se drůbež a prasata. Rýže se pěstovala nejprve „na sucho“, zakládání klasických rýžovišť a pěstování rýže na zaplavené půdě přišlo až později. Tento druhý způsob pěstování představuje výjimečný způsob recyklace vody a látek, využívající též mikroorganismy (si-

nice) k vázání vzdušného dusíku. Byl to případ přirozeného hnojení, jaký známe u hlízkových bakterií bobovitých (vikvovitých) rostlin. Rýže se začala pěstovat brzy též v Indii a jihovýchodní Asii.

Před více než 5000 lety v Mezopotámii a v Egyptě, o několik století později v údolí Indu, o tisíc let později v Číně, a ještě o další dvě tisíciletí později na území Střední Ameriky se ustavily hierarchické militaristické společnosti vedené náboženskými a světskými (politickými) elitami. Většinu populace tvořili zemědělci, bezzemci a otroci. Vytvářely se různé státní útvary, které spolu bojovaly a potíraly se navzájem. Jejich způsob uspořádání a způsob hospodaření byl však v principu shodný. Podstatně poškozovaly prostředí, což je přivádělo k politickému krachu a podrobení se jiné mocnosti, která svoje prostředí ještě nestačila zdecimovat. Například civilizace středního Jordánu vyčerpala svoji krajinu již v šestém tisíciletí před naším letopočtem – po odlesnění se zrychlila eroze půdy a snížila její úrodnost. Zvykli jsme si, že archeologové objevují historii dřívějších civilizací ve zdevastované krajině bez stromů a trvalé funkční vegetace. Civilizace se rozvíjí v úrodné krajině s bohatou vegetací a dostatkem vody. Postupně však vysouší krajinu, poté zavlažuje, pšenice je nahrazována odolnějším ječmenem, zasolování půdy pokračuje a půda postupně přestává rodit (Ponting 2019). Zasolování půdy (salinizace) je běžným jevem v zavlažovaných půdách v suchém (aridním) klimatu, kde převažuje výpar vody nad množstvím srážek. Zasolení způsobuje nejčastěji hromadící se chloridy, zejména chlorid sodný.

V údolí Indu zkolabovala civilizace po odlesnění, kterým byla získávána půda pro zemědělství a dřevo na pálení cihel pro stavbu chrámů, a to v době okolo 1400 let př. n. l. Odlesnění povodí Žluté řeky v Číně a japonských řek způsobilo silnou erozi. Křesťanské království v Etiopii vyčerpalo v krátkém časovém období krajinu kolem roku 1000 (Eritrea) a bylo nuceno přesunout své hlavní město. Když se v roce 1883 stala hlavním městem Addis Abeba, situace se opakovala – a za dvacet let byl zdevastován les v okruhu více než 100 km. Lesy byly vykáceny a stromy použity na výrobu dřevěného uhlí. (Ponting 2019)

Postupné vysychání Austrálie působené velkým počtem býložravců, nadměrnou pastvou a později i původními obyvateli, kteří vypalovali vegetaci a následně krajinu odvodňovali, popisuje názorně s využitím paleobotanických studií Mary E. White (1994, 1997). Pozitivním příkladem možné nápravy degradované vyschlé zemědělské krajiny jsou postupy Natural Sequence Farming, které

praktikuje a propaguje australský farmář Peter Andrews (2006). Principem je zadržování vody, zvyšování hladiny podzemní vody, obnova půdy podporou mokřadů. V roce 2005 byl jeho příběh nejúspěšnějším filmem série Australian Story ve státní televizi. Ojedinělý program zadržování vody v horních povodích, který vycházel z koncepce New Water Paradigm (Kravčík et al. 2008) probíhal na Slovensku v letech 2010–2012. Za aktivní účasti 500 obcí bylo vytvořeno na 80 tisíc vodozádržných prvků (Program revitalizácie krajiny 2010).

Středomoří (mediterán): současná krajina s olivami, vinicemi, pastvinami a macchií (keře odolávající suchu) je výsledkem dlouhodobého odvodňování. Oliva patří k nejodolnějším stromům vůči suchu, kořenuje do hloubky přes deset metrů. Před rozvojem zemědělství zde byly duby, buky, cedry a borovice. Dřevo se spotřebovalo na pálení a stavbu lodí, tráva byla vypasena a půda odnesena erozí. V Libanonu se zachovalo jen několik cedrů, symbolu státu, stejně tak v Sýrii. Podobná je situace na Blízkém východě a ve střední Asii. Platon popsal sugestivně „plundrování" krajiny v Critias (str. 76, Ponting 2019): *„To, co zde nyní zůstalo, je ve srovnání s tím, co zde bylo dříve, jako kostra nemocného člověka; tuk a měkká zem odplaveny (promrhány) a zůstala holá kostra země… některé hory poskytují potravu pouze včelám, a přitom nedávno na nich rostly stromy."* Dále popisuje, jak *„voda po dešti rychle odtéká, zatímco dříve dešťovou vodu využívaly četné lesy a pastviny a bohatá jílovitá půda uchovávala vodu a napájela četné prameny"*. Řecká mytologie odkazuje na odlesnění, záplavy, zanášení zavodňovacích kanálů, zasolení půd i na kolaps sumerských městských států. Písemné záznamy 5000 roků staré dokumentují snižování výnosů pšenice ve srovnání s ječmenem, který toleruje více zasolení. Popisují též vytváření bílých ploch na polích, tedy míst, kde sůl vystoupala až na povrch a zasolená půda v suchých (aridních) podmínkách zcela ztratila úrodnost (Carpenter 1966, Jacobson 1958, Plimer 2009).

Zemědělství v Egyptě fungovalo po více než pět tisíc let, záplavy na dolním toku Nilu přicházely pravidelně, avšak s různou intenzitou a ovlivňovaly prosperitu společnosti v deltě jedné z nejdelších řek světa. Snahy regulovat výkyvy záplav vyvrcholily postavením Asuánské přehrady v padesátých letech 20. století. Půda však degraduje, protože sedimenty se usazují převážně v přehradě. Státy na povodí Bílého i Modrého Nilu se řídí smlouvami o sdílení nilské vody. Tyto smlouvy pocházejí z počátku dvacátého století, kdy tuto část Afriky ovládali Britové (Hassan 1998) a zaručují Egyptu minimální průtok Nilu. Státy na horním

toku nesmějí měnit tok řeky, odvádět vodu a stavět přehrady bez souhlasu Egypta. Přesto, či právě proto, je otázka množství odtékající vody do dalšího státu trvalým objektem diplomatických rozhovorů a zdrojem mezinárodního napětí.

A to člověk vnímá pouze vodu v jejím tekutém stavu a v tocích. Hovoříme o koloběhu vody, ale vnímáme pouze jeho jednu část, vodu tekutou. Nevnímáme vodní páru, která je nedílnou součástí koloběhu, nevnímáme vodu na plochách, v krajině, v půdě a v rostlinách. V této knize ukážeme, jak se velké odvodněné plochy přehřívají, od nich se ohřívá vzduch, který stoupá vysoko do atmosféry a odnáší vlhkost. Tímto způsobem krajina vodu ztrácí.

Nedávným názorným příkladem následku odlesnění je vývoj Mau Forest v oblasti Great Rift Valley v západní Keni. Na konci 20. století zde bylo novými osadníky během patnácti let odlesněno na 2000 km$^2$ a přeměněno na zemědělskou půdu. Řeky však ztrácí vodu, nepřichází období dešťů a obyvatelstvo v dolní části povodí trpí nedostatkem vody. Japonský investor postavil na řece Sondu-Miriu mohutnou hydroelektrárnu, která po dokončení v roce 2009 nemohla být uvedena do provozu pro nedostatek vody v řece. Později přišly naopak záplavy a hydroelektrárna opět nemohla pracovat – změnily se hydrologické podmínky. Keňská vláda se rozhodla vystěhovat z oblasti na 200 000 lidí a obnovit les, aby se voda vrátila zpět. Odlesnění a úbytek srážek proběhly velmi rychle a již v době, kdy povrch Země pravidelně monitorují družice. Na družicových snímcích je patrný vzestup teplot v odlesněných oblastech (Hesslerová & Pokorný 2010, Pokorný & Hesslerová 2011). Je pozoruhodné, že ve východní Africe se zalesněné hory nazývají „water tower“, tedy vodárny v krajině. Lidé ze zkušenosti znají i jejich hydrologickou funkci. Ve východní Africe bylo ještě v polovině 20. století 50 % povrchu pokryto původními lesy, nyní se udává pouhých nejvýše 10 %. Od počátku evropské kolonizace bylo v USA více než 50 % (459 000 km$^2$) mokřadů přeměněno na ornou půdu (Mitsch & Hernandez 2013). Uvidíme, že takové odvodnění a ztráta vegetace jsou spojeny s přehříváním krajiny za slunných letních dnů a změnami proudění vzduchu. Organizace pro výživu a zemědělství Spojených národů (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO uvádí: 20 000 000 km$^2$ zemědělské půdy, na které je odkázáno téměř 1,5 miliardy lidí, trpí nedostatkem vody, zemědělská produkce je zde nejistá, častá jsou období nedostatku dešťových srážek a následně neúroda a hlad (desertifikace). Na 120 000 km$^2$ zemědělské půdy ročně degraduje tak, že

se nevyplácí jí zemědělsky obdělávat, tj. Země ztrácí následkem nedostatku vody (desertifikace) 23 ha za jednu minutu (FAO b).

## 1.2. Odvodnění zemědělské krajiny na území ČR ve druhé polovině 20. století

Lidské civilizace systematicky budují města a odvádějí vodu z krajiny, protože hlavní zemědělské plodiny nesnášejí dlouhodobější zaplavení kořenů vodou. Obilniny pěstované v mírném pásmu byly vyšlechtěny ze stepních trav. Podobně nesnesou zatopení vodou ani kukuřice, brambory a řepka. Na polích bylo nutno zlepšit podmínky pro vodní režim plodin, tedy zabránit zatopení, odvodnit, meliorovat (améliorer = francouzsky zlepšit, odtud termín „meliorace"). Naše zemědělská krajina doznala následkem scelování a odvodnění v letech 1959 - 1989 podle Vašků (2011) těchto změn:

1 084 800 ha pozemků odvodněno trubkovou drenáží
(do evidence se údajně nedostalo dalších 450 000 ha odvodněných hektarů)
14 167 km upravených malých vodních toků
11 712 km odvodňovacích kanálů (z toho 4508 km zatrubněno)

Nutno podotknout, že meliorační systémy umožňují zbrzdit odtok dešťové vody regulačními prvky nebo i vodu přivádět z okolního zdroje. Těchto možností se využívá jen vyjímečně, vyžadují údržbu. Od roku 1948 do konce 80. let bylo v ČR rozoráno:

- 270 000 ha luk a pastvin,
- 145 000 ha mezí (což odpovídá těžko představitelné celkové délce mezí nejméně 800 000 km)
- 120 000 km polních cest,
- 35 000 ha lesíků, remízků, hájků ve volné krajině
- došlo k odstranění 30 000 km liniové zeleně.

V současné době ČR ztrácí průměrně 11,7 ha zemědělské půdy denně na rozšiřování měst, komunikací, nových výrobních prostor (MZe 2018).

Rozumíme následkům těchto totálních zásahů v celé kulturní krajině?

Scelování pozemků proběhlo ve druhé polovině 20. století v celé západní Evropě. S využitím mechanizace a fosilních paliv se počet pracovníků zaměstna-

ných v zemědělství zredukoval na cca 2 % z původních několika desítek procent. U nás bylo scelování pozemků a odvodnění umocněno kolektivizací. Zmizely meandrující potoky a drobné nivy, selský stav téměř vymizel a s ním individuální soustavná péče o drobné vodní zdroje. Struktura zemědělské krajiny se po roce 1989 nezměnila, na rozsáhlých odvodněných lánech dnes pracují většinou nájemci bez vztahu k půdě a vodě v krajině. Majitelé malých zemědělských pozemků na nich nehospodaří, pronajímají je. Zásadní roli hrají dotace, výkupní ceny zemědělských produktů a politická rozhodnutí. Zemědělci by měli zajišťovat potravinovou bezpečnost. Současně však také rozhodují o množství a kvalitě odtékající vody. Ukážeme si, jak hospodařením v krajině ovlivňujeme místní klima.

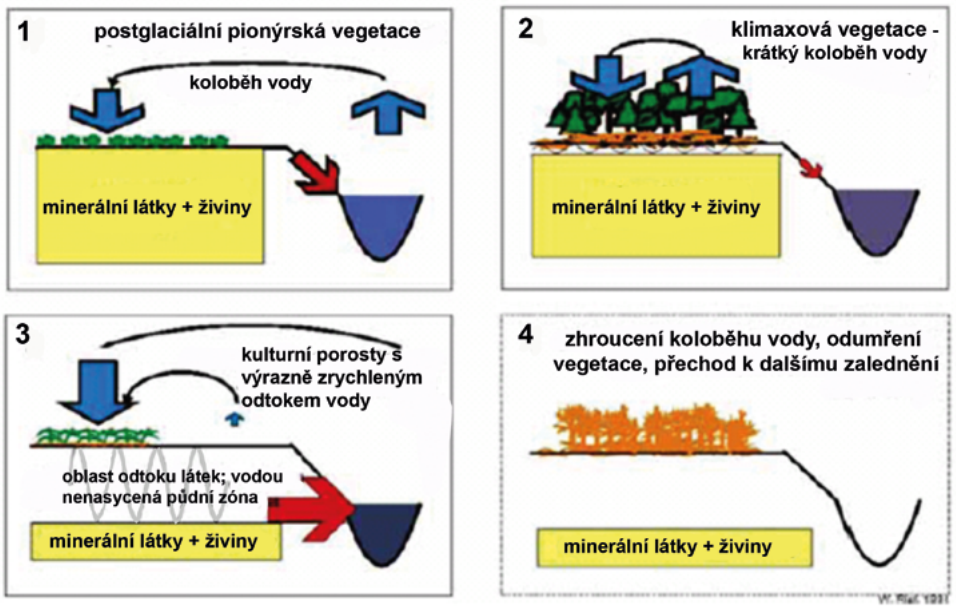
Odvodněním poklesla hladina podzemní vody, půda střídavě vysychá a sytí se vodou při dešti, půda je vystavena mineralizaci, rozkládají se organické látky, uvolňují se živiny a dávají se po deštích s odtékající vodou do pohybu. Uvolňování živin z půd vede k acidifikaci a degradaci půd na straně jedné a ke zvyšování obsahu živin v odtékající vodě, tedy k eutrofizaci vod, na straně druhé. Podstatně se mění životní podmínky na stanovištích, mění se biodiverzita. Po odvodnění stouply na mnoha místech řádově koncentrace dusičnanů, zejména následkem mineralizace půdy. Z hlediska ochrany přírody došlo k totální redukci diverzity stanovišť a druhů. Mizí mokřadní stanoviště a s nimi mokřadní druhy zejména druhy oligotrofní (žijící na půdách chudých na živiny), které jsou vytlačovány bujnou ruderální (rumištní) vegetací.

## 1.3. Vývoj naší krajiny od posledního zalednění s ohledem na koloběh vody, odtok látek a tok sluneční energie

Pochopení vývoje krajiny od jejího posledního zalednění bylo předmětem výzkumu jezer na jihu Švédska, které vedl počátkem 70. let dvacátého století Digerfeldt (1972). Z počátku sledovaného období, (12 000 př. n. l.), těsně po ústupu zalednění, byla rychlost zanášení jezer poměrně vysoká. Během dalších 3000 až 4000 let se snížila až 10 krát a udržovala se na nízké úrovni (0,1–0,2 mm za rok) až do druhé poloviny 19. století. Prudké zvýšení sedimentace nastalo poté, co města a příměstské zóny začaly odvádět své splašky do jezer. Tehdy vzrostla rychlost ukládání téměř 100 krát, na 8–10 mm za rok. Zároveň docházelo

k odvodňování krajiny (půdy), jehož důsledkem bylo zvyšování obsahu živin v povrchových vodách. Odvodnění půdy je provázeno rozkladem (mineralizací) organických látek v půdě, okyselováním a odtokem živin, zejména alkálií tedy solí vápníku, hořčíku, draslíku, sodíku.

Poznatky o vývoji koloběhu vody, látek a energie v naší krajině pod vlivem člověka znázornil v ikonickém ETR (energy-transport-reaction) modelu Ripl (1995, 2003).




**Obr. 1.1** Koloběh vody a odtok látek v různých stádiích vývoje evropské krajiny od posledního zalednění (Ripl 1995, Ripl et al. 1996).

### *1) Postglaciální pionýrská vegetace*

„Nedávno“, v době ledové, bylo na našem území sucho a chladno a vegetace připomínala tundru. Na sever od nás pokrýval krajinu ledovec. Po ústupu ledovců se formovaly vodní toky. Srážky byly spíše nepravidelné, voda, odtékající poměrně rychle z krajiny, byla bohatá na živiny. Převládal otevřený (dlouhý) koloběh vody mezi oceánem a pevninou.

### *2) Klimaxové porosty*

Krajina postupně porůstala vegetací, přirozeným vývojem (sukcesí) se na rozsáhlých plochách vytvořily dlouhodobě ustálené formy vegetace (klimax). Na území našeho státu to byl převážně smíšený les s nesčetnými druhy nejrůznějších organismů, které mají jedno společné – vážou ve svých tělech vodu a podle nabídky vody a živin se rozmnožují, rostou, odumírají a stávají se zdrojem obživy jiných organismů. Voda a živiny v takových ekosystémech obíhají. Provázány jsou toky sluneční energie, vody a látek. Voda odtéká z těchto porostů rovnoměrně, obsahuje málo živin a dalších látek, protože ty jsou využívány a vázány v tělech organismů. Převažuje uzavřený (krátký) koloběh vody – voda se energií slunečního záření odpařuje z rostlin i z povrchu půdy (evapotranspirace) a vzniklá vodní pára se později sráží na chladnějších místech. Srážení (kondenzace) vodní páry je provázeno uvolňováním skupenského tepla, vyrovnávají se tak teploty v prostoru (mezi místy) i v čase (mezi dnem a nocí). Při výparu se totiž sluneční energie spotřebovává (0,68 kWh. $l^{-1}$) a při kondenzaci se energie opět uvolňuje. Transport látek krajinou se zmenšil, řeky tekly klidně, jejich voda obsahovala málo rozpuštěných látek, snížila se též rychlost ukládání sedimentů. Jemné a homogenní sedimenty z té doby neindikují přívalové deště a časté povodně, nasvědčují spíše klimatu bez extrémů.

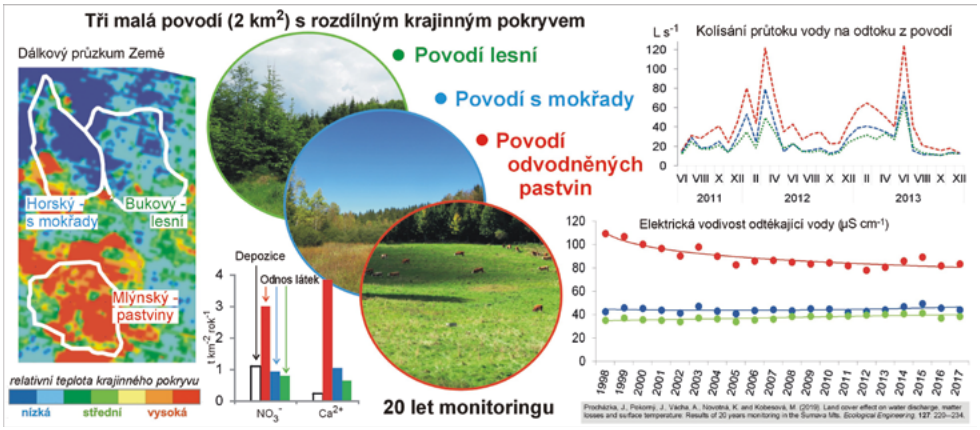
Další dvě stadia ukazují následky zásahů člověka v krajině:

### *3) Kolonizace krajiny – kulturní porosty se zvýšeným odtokem látek*

Klimaxové porosty se zachovaly v severní Evropě zhruba do doby 1500 let př. n. l., na našem území až do raného středověku, kdy je člověk začal se stoupající intenzitou kolonizovat, tedy přeměňovat na zemědělskou půdu. Při tehdejší populační hustotě ještě dovolovaly samoregulační mechanismy uvnitř systému udržitelný rozvoj. Na malých plochách se pěstovaly různé plodiny a domácí zvířata, cykly vody a živin byly ještě uzavřené. Postupně se však zvětšují pole, snižuje se druhová pestrost kultur, odvodňuje se půda a napřimují se vodní toky, vznikají města. V krajině ubývá voda vázaná do vegetace a půdy (zelená voda). Snižuje se hladina podzemní vody, půda je střídavě zaplavována a vysoušena, což vede k zrychlenému rozkladu organických látek v půdě, k okyselování půdy a odtoku (ztrátám) látek. Půda se okyseluje zrychleným odtokem alkálií, tedy solí vápníku, hořčíku, draslíku, povrchové vody trpí naopak nadbytkem živin (eutrofizace), zhoršuje se

kvalita odtékající vody, vytvářejí se vodní květy. Navíc voda odtéká nepravidelně, podle režimu dešťových srážek. Střídá se sucho a povodně, zvyšuje se četnost přívalových srážek. Krátký (uzavřený) cyklus vody je nahrazován cyklem dlouhým (otevřeným) – voda rychle odtéká z krajiny, snižuje se množství vody odpařované evapotranspirací, ubývá mlh, rosy a místních drobných srážek, zvyšují se proto teplotní rozdíly v krajině.

Před zásahy člověka (tedy před středověkou kolonizací krajiny) byla elektrická vodivost vody (měřítko koncentrace iontů) v povrchové vodě 10–30 μS. $cm^{-1}$, odtok fosforu byl okolo 10 μg. $l^{-1}$ nebo méně a odtok dusíku byl zhruba 50–300 μg. $l^{-1}$. Elektrická vodivost postupně stoupla na 150–300 μS. $cm^{-1}$, koncentrace fosforu a dusíku na odtoku z krajiny stouply pětinásobně. Růst měst v průmyslové revoluci přinesl další dramatické skoky v úniku látek – ten je dnes 50krát až 150krát vyšší ve srovnání s nedotčenými půdními systémy (Ripl 2003). V zemědělských oblastech jsou plošné ztráty rozpuštěných pevných látek i přes tunu na hektar za rok, průměrné koncentrace fosforu v řekách se pohybují v současnosti v řádu stovek μg. $l^{-1}$, koncentrace dusíku 2 – 4 mg. $l^{-1}$ a elektrická vodivost vody mezi 200 – 1000 μS. $cm^{-1}$. Labem v Hřensku odteče řádově milion tun čistých kationtů ročně, jsou to zejména vápník, hořčík a draslík (Pokorný et al. 2003). Kdybychom toto množství měli nahradit, museli bychom přivážet zpět do povodí Labe na naše území každou druhou minutu kamion naložený vápencem a dalšími minerály. Odvodněné území má vyšší ztráty látek dlouhodobě ve srovnání s lesem nebo územím s mokřady. Tuto skutečnost vykazují výsledky dvacetiletého soustavného monitoringu tří malých povodí (každé o rozloze cca 2 $km^2$) na pravém břehu Lipna na Šumavě. Odvodněná pastvina se za slunného počasí přehřívá, odtékající voda má vyšší extrémy průtoků a trvale vyšší elektrickou vodivost, přestože zásoba alkálií v půdě je již nižší nežli v druhotném lese a povodí s mokřady. (Procházka et al. 2019; Pokorný et al. 2019)




**Obr. 1.2** Zhodnocení 20letého srovnávacího monitoringu tří povodí na pravém břehu Lipna. Odvodněná pastvina má na satelitním snímku nejvyšší teploty, nejvyšší odtoky dusičnanů a rozpuštěného vápníku (mineralizace půdy a její okyselování), nejvyšší elektrickou vodivost vody a nejvyšší kolísání odtoku vody. (Procházka et al. 2019)

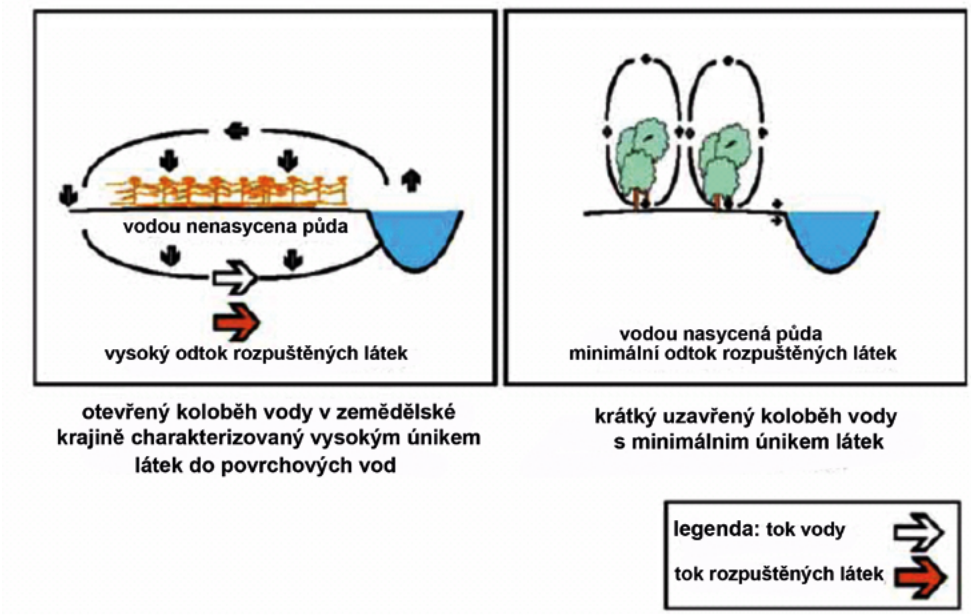
### *4) Zhroucení koloběhu vody*

Zásoby látek v půdě jsou konečné. Kontinenty, na nichž nedošlo k posledním zaledněním (Austrálie, Afrika, tropické oblasti Asie), mají chudé půdy, z nichž odtéká voda o nízkém obsahu rozpuštěných látek. Tyto látky již stačily odtéci. Výjimkou jsou mokřadní půdy, kde se hromadí rostlinný materiál s vázanými živinami, a zbytky deštných lesů s nahromaděnou biomasou. V půdě, která ztratila schopnost držet vodu a která ztrácí základní živiny, klesá pH a do roztoku se uvolňují těžké kovy i hliník. V takové půdě se špatně daří běžné vegetaci a může dojít k jejímu odumírání až kolapsu. Snižuje se odolnost vegetace a ta podléhá houbovým chorobám, hmyzu, polomům, suchu nebo mrazu. Chřadnutí vegetace je provázeno zhroucením vodního cyklu a změnou klimatu. Krajina bez vody a vegetace se sluneční energií přehřívá.

## 1.4. Krátký (uzavřený) a dlouhý (otevřený) cyklus vody

V krajině lze v zásadě rozlišovat uzavřený nebo otevřený koloběh vody. Jinými slovy krátký nebo dlouhý. Schematicky jsou oba typy koloběhu vody znázorněny na obr. 1.3. Dlouhý koloběh vody je v klasické hydrologii používán ve smyslu

výměny vody mezi pevninou a oceánem. Lze jím však označit i oběh vody v současné kulturní krajině s městy a zemědělskou půdou i v aridních (suchých) oblastech. Voda z krajiny rychle odtéká, a pokud se odpaří, tak se v této krajině nesráží (nekondenzuje), protože tlak vodních par nedosahuje rosného bodu. Vodní pára je potom unášena vzdušnými proudy v atmosféře do vzdálených hor nebo do moře (Makarieva & Gorškov 2007, Hesslerová et al. 2019). Srážky bývají nepravidelné, po stále se prodlužujících obdobích sucha přicházejí často přívalové deště, které působí erozi a odnášejí z krajiny rozpuštěné i nerozpuštěné látky. Vytvářejí se velké teplotní rozdíly mezi dnem a nocí (extrémním příkladem jsou pouště) i značné teplotní rozdíly mezi místy. Otevřený koloběh vody jako výsledek lidské činnosti v krajině vytváří průkazné změny klimatu a vede k rychlému vyčerpávání půd.




**Obr. 1.3** Schéma krátkého (uzavřeného) a dlouhého (otevřeného) koloběhu vody (Ripl 1995, Ripl et al. 1996).

Naproti tomu krátký koloběh vody je charakteristický pro krajinu s dostatkem vody a vegetace. Odpařená voda se sráží na povrchu rostlin a zůstává v porostu, po nočním poklesu teplot se tvoří mlhy a sráží se rosa. Voda obíhá v krátkém cyklu a opakovaně je využívána rostlinami. Výpar vody rostlinami (transpirace) a ce-

lým porostem včetně půdy (evapotranspirace) tlumí přehřívání krajiny ve dne, v noci tlumí pokles teploty skupenské teplo, které se uvolňuje srážením vodní páry (Pokorný 2001). Tzv. aprílové počasí je typickým projevem krátkého oběhu vody. Rostoucí vegetace vypařuje vodu a ta ve formě vodní páry stoupá vzhůru, sráží se, a vrací se zpět v podobě krátkých dešťových přeháněk. Na vysokých horách jsou to odpolední deště s bouřkou, kdy můžeme pozorovat tvorbu mraků; proto horolezci vyrážejí brzy ráno, aby je odpolední déšť nezastihl. Krajina s uzavřeným cyklem vody má vyrovnané teploty v čase (den  noc) i v prostoru (mezi místy). Častější a pravidelnější srážky udržují vysokou hladinu spodní vody, což snižuje reaktivitu a mikrobiální aktivitu v půdě, a odtékající voda odnáší jen málo rozpuštěných látek. Vysoká hladina spodní vody znamená vodou nasycené půdy, v nichž jsou metabolické pochody a tok energie pomalejší a  odtok látek z půdního systému minimální.

Krátký oběh vody, vázaný zejména na vyvinuté lesní porosty, je podmínkou dostatečného množství srážek v kontinentálních oblastech vzdálených od moře (Pearce 2020). V případě, že krátký oběh funguje uprostřed kontinentů, usnadňuje se tím i přísun srážek od moře pomocí tzv. principu biotické pumpy (Makarieva & Gorshkov 2007).  Na kontinentech pochází 40 % veškerých srážek spíše z pevnin nežli z oceánů. Často to bývá i více. Amazonská létající řeka dodává 70 % dešťových srážek Laplatské nížině. Překvapující je zjištění, že 80 % srážek v Číně pochází ze západu. Jedná se o vlhkost z Atlantiku, která je recyklovaná boreálními lesy Skandinávie a Ruska (Van der Ent 2010). V 19. století se poznáním úlohy lesních celků v klimatu, oběhu vody a dešťovým srážkám věnoval celý život Alexander von Humboldt (Wulf 2016), před odlesňováním varoval například Marsh (1864).

## 1.5. Zásady a kritéria setrvalého užívání krajiny – zdravý metabolismus krajiny

Člověk výrazně ovlivňuje svým hospodařením koloběh vody v krajině. Pokud použijeme analogii mezi krajinou jako živým systémem a organismem, jedná se vlastně o zásahy do metabolismu krajiny. Metabolismem rozumíme v širokém smyslu

látkovou výměnu, tedy chemické a energetické pochody probíhající v živém systému. Podobně jako jednotlivý organismus je i krajina otevřeným systémem pod příkonem energie (sluneční) a má tendenci využívat tuto energii k sebe-utváření. Wilhelm Ripl (1995, 2003) definoval chemické a energetické kritérium pro hodnocení krajiny, obě kritéria souvisejí s vodním cyklem. Chemickým kritériem jsou ztráty rozpuštěných látek z daného povodí. Nízké ztráty ukazují na vysoký stupeň recyklace látek, což je situace typická pro krátký koloběh vody – voda obíhá a látky jsou využívány organismy. Energetickým kritériem je poměr mezi teplem vázaným ve vodní páře (výpar – kondenzace) a teplem uvolňovaným ve formě tepla zjevného (navýšení teploty povrchu). Nízké výkyvy teplot v čase (mezi dnem a nocí) i rozdíly mezi místy v povodí ukazují na krátký koloběh vody, kdy se většina sluneční energie disipuje (rozptyluje) přes výpar a kondenzaci vody. Ztráty látek lze měřit jako množství rozpuštěných látek odtékajících s vodou (průtok vody x koncentraci látek), disipaci sluneční energie lze hodnotit z termálních družicových snímků v kombinaci s pozemními meteorologickými měřeními (Ripl 2003, Pokorný et al. 2019; Procházka et al. 2019).

Ukázali jsme, že lidské snažení směřuje k odvodnění krajiny. Města jsou zcela odvodněna, voda se vede odděleně v potrubí. Na družicovém snímku je město v létě vždy jedním z nejteplejších míst. Odvodněny jsou silnice, letiště, sídliště, technologické plochy, odvodněny jsou rozsáhlé plochy zemědělských polí. Porovnáním naší současné krajiny s mapou stabilního katastru ze čtyřicátých let 19. století zjišťujeme, že za minulých 150 let jsme ztratili z krajiny okolo 50 % trvalé vegetace nasycené vodou, i když v té době žilo na venkově několikanásobně více obyvatel než dnes. Návrat trvalé vegetace a vody do krajiny je podmínkou obnovy půdy a zachování základního zdroje obživy.

V České republice máme pozitivní příklady krajiny vytvářené a užívané člověkem po staletí. Jsou to rybníkářské oblasti jižních Čech v Třeboňské a Českobudějovické pánvi. Tato člověkem vytvářená vodní díla vznikala jako umělé vodní systémy od středověku. Dnes budí dojem přirozené jezerní krajiny, jsou předmětem mezinárodních smluv na ochranu přírody, a přitom jsou ekonomicky soběstačná. Není mnoho míst na Zemi, kde se takové funkční vodohospodářské systémy zachovaly. Dnes je na území našeho státu přibližně 55 000 ha rybníků, na konci 16. století byla jejich plocha přibližně třikrát větší.

Fotografie na konci této kapitoly dokumentují na několika příkladech vysušenou krajinu ve východní Africe, Austrálii a střední Asii (Turkmenistán, okolí Ašchabádu). Fotografie byly pořízeny při řešení projektů EU a spolupráci s jednotlivci a organizacemi, které se snaží zmírnit extrémy klimatu návratem vody do krajiny a obnovou vegetačního krytu.





**Obr. 1.4** Etiopie, tráva je vypásána domácími zvířaty a nestačí dorůstat. Krajina se přehřívá a produkce rostlin je nízká (Projekt Bomosa EU FP6- INCO č. 32103, byl zaměřen na udržení vodních ploch ve vysychající zemědělské krajině, ENKI, o.p.s. byla spoluřešitelem projektu).






**Obr. 1.5** Keňa, povodí jezera Nakuru. Nepřišlo období dešťů, jak patrno z nápisu na ceduli, odběr vody z řeky Njoro je zakázaný. Řeka Njoro pramení v oblasti Mau Forest (projekt BOMOSA).





**Obr. 1.6** Keňa, oblast Mau Forest, kde bylo vykáceno koncem 20. století na 2000 km$^2$ horského lesa. Lidé se živí výrobou a prodejem dřevěného uhlí z poražených stromů. Plodiny se pěstují mezi pařezy nedávno poražených stromů. Vláda podniká kroky, ve kterých se snaží odsunout nové osadníky a navrátit původní les, protože krajina vysychá a méně prší. (Projekt BOMOSA, Hesslerová a Pokorný 2010)







**Obr. 1.7** Farmář v oblasti jezera Naivasha zadržuje dešťovou vodu v půdě, vrací organické látky do půdy a udržuje ji co nejvíce pokrytou plodinami a stromy. I v suchých letech měl na polích vysokou produkci plodin.






**Obr. 1.8** Eroze půdy je následek lidské činnosti a nadměrné pastvy. Zamezení erozi výsadbou odolných rostlin a zasakováním vody je velmi obtížný a dlouhodobý proces (Keňa, oblast Viktoriina jezera).





**Obr. 1.9** Do okolí Aščhabadu, hlavního města Turkmenistánu, je snahou navrátit les. Každý nově zasazený strom je zavlažován vodou z hadičky. V létě však není vody dostatek. Nedostatek vody se postupně prohluboval od počátku našeho letopočtu. V té době začali hloubit studny (Obr. 1.9), protože klesala hladina podzemní vody. Dokumenty a modely v muzeu v Aščhabadu ukazují, jakým způsobem se před 2 tisíci lety čerpala podzemní voda. Právě čerpání podzemní vody a její urychlený výpar z přehřáté krajiny s chudou vegetací urychlily vysychání.



**Obr. 1.10** Model studny v muzeu v Aščhabadu







**Obr. 1.11** Natural Sequence Farming Nový Jižní Wales Austrálie. Peter Andrews zvedá hladinu podzemní vody, sází stromy, přehrazuje drobné vysychající toky a zakládá mokřady, na nichž se rychle tvoří půda z odumřelé rostlinné hmoty. Po dvaceti letech tlumí stromy extrémy teplot mezi dnem a nocí a udržují vyšší vlhkost půdy. (Andrews, 2006, Norris & Andrews 2010)

## Literatura

Andrews, P. (2006). Back from the Brink, How Australia´s landscape can be saved. ABC Books Sydney NSW (As seen on Australian Story), 244 s.

Carpenter, R., (1966). Discontinuity in Greek civilisation. Cambridge University Press, s. 77

Diamond, J. (2008). Kolaps, proč společnosti přežívají či zanikají. Academia, Praha, 752 s.

Digerfeldt, G. (1972). The Post-Glacial Development of Lake Trummen. Regional vegetation history, water level changes and palaeolimnology. In: Folia Limnologica Scandinavica 16, 104 s.

FAOa [online]. 2021[cit. 4.1.2021]. Dostupné z http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL

FAOb [online]. 2021[cit. 4.1.2021]. Desertification and land degradation. Dostupné z http://www.fao.org/in-action/action-against-desertification/overview/desertification-and-land-degradation/en/

Hassan, F.A., (1998). Climatic change, Nile floods and civilisations. Nature and Resources 34: 34–40.

Hesslerová, P., Pokorný, J. (2010). Forest clearing, water loss and land surface heating as development costs. *International Journal on Water* 5 (4), s. 401–418.

Hesslerová, P., Pokorný, J., Huryna, H., Harper, D. (2019). Wetlands and Forests Regulate Climate via Evapotranspiration. In: S. An., J. T. A. Verhoeven (eds.), Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use, Ecological Studies 238, Springer Nature Switzerland AG https://doi.org/10.1007/978-3-030-14861-4_4

Jacobsen, T., Adams, R.M., (1958). Salt and silt in ancient Mesopotamian agriculture: Progressive changes in soil and salinity and sedimentation contributed to the break up of past civilisations. Science 128: 1251–1258.

Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M., Tóth, E., (2008). Water for the Recovery of the Climate – A New Water Paradigm, Municipalia, 122 s.

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), s. 1013–1033

Manwell,C., Baker, A.M.C., (2010) Domestication of the dog: hunter, food, bed-warmer, or emotional object?, Zeitschrift für Tierzüchtung und Züchtungsbiologie, 10.1111/j.1439-0388.1984.tb00043.x, **101**, 1-5, 241–256.

Marsh, G. P. (1864). Man and Nature, or Physical Geography as Modified by Human Action. Marsh to Spencer F. Baird, 21 May 1860, Baird Corr., Smithsonian Institution

Mitsch, W. J., Hernandez, M. I. (2013). Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquatic Science,* 75, s. 133–149.

Ministerstvo zemědělství ČR (2018). Situační a výhledová zpráva. Půda. Ministerstvo zemědělství, 146 s. Dostupné z http://eagri.cz/public/web/file/611976/SVZ_Puda_11_2018.pdf

Norris, D., Andrews, P. (2010). Re-coupling the carbon and water cycles by Natural Sequence Farming, *International Journal on Water*, 5(4), 386–395.

Pearce, F. (2020). Weather Makers, Forests suply the world with rain. A contraversial Russian theory claims they also make wind. *Science,* 368(6497), s. 1302–1305. Dostupné z: https://www.sciencemagazinedigital.org/sciencemagazine/19_june_2020/MobilePagedArticle.action?articleId=1595196&app=false#articleId1595196

Plimer, I., (2009). Heaven and Earth, global warming the missing science. Taylor Trade Publishing, 504 s.

Pokorný, J. (2001). Dissipation of solar energy in landscape – controlled by management of water and vegetation. *Renewable Energy* 24, 641–645.

Pokorný, J., Hesslerová, P. (2011). Odlesňování a klima. Klimatické změny v Mau Forest v západní Keni. *Vesmír,* 90, 573–577.

Pokorný, J., Ďurišová, K., Hesslerová, P., Nábělková, J., Procházka, J., J., P., Kröpfelová, L., Šulcová, J. a Baxa, M. (2019). Metodika identifikace vlivu bodových a nebodových zdrojů znečištění na drobné vodní toky. Hodnocení úlohy krajinného pokryvu v tocích sluneční energie (distribuce povrchových teplot), vody a ztrát látek. ENKI, o.p.s. Třeboň, 132 s.

Ponting, C. (2019). Zelené dějiny světa. Životní prostředí a kolaps velkých civilizací. Nakladatelství Karolinum, 476 s.

Program revitalizácie krajiny a integrovaného manažmentu povodí (Landscape Revitalisation and Integrated River Basin Management Programme for Slovak Republic, (2010), Vládní program

Procházka, J., Pokorný, J., Vácha, A., Novotná, K. a Kobesová, M. (2019). Land cover effect on water discharge, matter losses and surface temperature: Results of 20 years monitoring in the Šumava Mts. *Ecological Engineering,* 127, 220–234.

Ripl, W. (1995). Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy – transport –reaction (ETR) model. *Ecological Modelling,* 78 (1 – 2), 61–76.

Ripl, W., Pokorný, J., Eiseltová, M., Ridgill, S., (1996). Holistický přístup ke struktuře a funkci mokřadů a jejich degradaci. In: Eiseltová, M. (Ed.): Obnova jezerních ekosystémů – holistický přístup, *Wetlands International* 32, 16–35.

Ripl, W. (2003). Water the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 358 (1440),1921–1934.

Vašků, Z. (2011). Zlo zvané meliorace. *Vesmír,* 90, 440–444.

Wayne, R.K., Vonholdt, B. M., (2012) Evolutionary genomics of dog domestication. Mammalian Genome 23 (1 – 2), 3–18.

White, M. E. (1994). After the Greening, The Browning of Australia. Kangaroo Press Ltd. Australia, 288 s.

White, M. E. (1997). Listen-our land is crying: Australia's environment problems and Solutions. Kangaroo Press Ltd., Australia, 296 s.

Wulf, A. (2016). Vynález přírody, dobrodružství zapomenutého objevitele Alexandera von Humboldta v Severní Americe. Knihy Omega, Dobrovský s. r. o. 530 s.

Desertification and land degradation | Action Against Desertification | Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org) http://www.fao.org/in-action/action-against-desertification/overview/desertification-and-land-degradation/en/

Film České televize o projektu EU „Integrated BOMOSA cage fish farming systém in reservoirs, ponds and temporary water bodies in Eastern Africa" https://www.ceskatelevize.cz/ivysilani/10183932142-naucte-je-chytat-ryby/

# 2. Počasí a podnebí

Denně sledujeme předpověď počasí. Zajímá nás, zda bude svítit slunce nebo bude zamračeno nebo dokonce pršet, jaká bude teplota, abychom věděli, jak se obléci. Jak se přizpůsobit **počasí**, které bývá vrtkavé, často se změní. Počasí je tedy okamžitý stav klimatického systému.

Naopak dlouhodobý charakter teplot, srážek a obecně atmosféry nazýváme **podnebí** neboli **klima.** Klima je ovlivňováno hydrosférou, pevninami, kryosférou (ledem a sněhem) a biosférou. Klima zůstává po mnoho roků téměř stejné a pro danou oblast je typické. K podstatným změnám dochází za dlouhá geologická období. V současné době dochází k diskutované změně klimatu poměrně rychle. Podnebí je dlouhodobý průměr počasí. Dlouhodobý znamená zhruba za desetitisíce roků. Závěry o náhlých změnách klimatu lze dělat hodnocením časových period nejméně řádu desítek let. Počasím se zabývá **meteorologie** a podnebí studuje **klimatologie** (ČMeS 2017).

Události na Slunci, sluneční vítr v prostoru mezi Sluncem a Zemí, stav magnetosféry, ionosféry a ozonosféry ovlivňují počasí v troposféře. Ovlivňují naše zdraví a činnost technologických systémů. Toto tzv. kosmické klima nemůžeme ovlivnit.

V této knize se budeme zabývat efektem vody a vegetace na místní klima. Na zemi je 8 miliard lidí a žijí na všech obyvatelných místech pevniny. Ukážeme si, jak člověk svým hospodařením v krajině výrazně ovlivňuje distribuci slunečního záření a tím i teploty a oběh vody. V předchozí kapitole jsme připomněli, jak historické civilizace v průběhu několika tisíciletí odlesňovaly, odvodňovaly, vysoušely krajinu a tím měnily klima na svém území. Klademe si otázku, zda jsme se poučili.

**Klimatická změna na našem území** se projevuje úbytkem vody v krajině. V létě vysychají drobné toky, opakovaně v posledních letech nenatékají rybníky v menších povodích. Několik let po sobě poklesla produkce pícnin a v oblastech nejvíce zasažených suchem klesá i výnos obilnin, které jsou vyšlechtěny ze stepních trav a měly by snášet nedostatek vody i jarní ranní mrazíky. **Nedostatek vody**

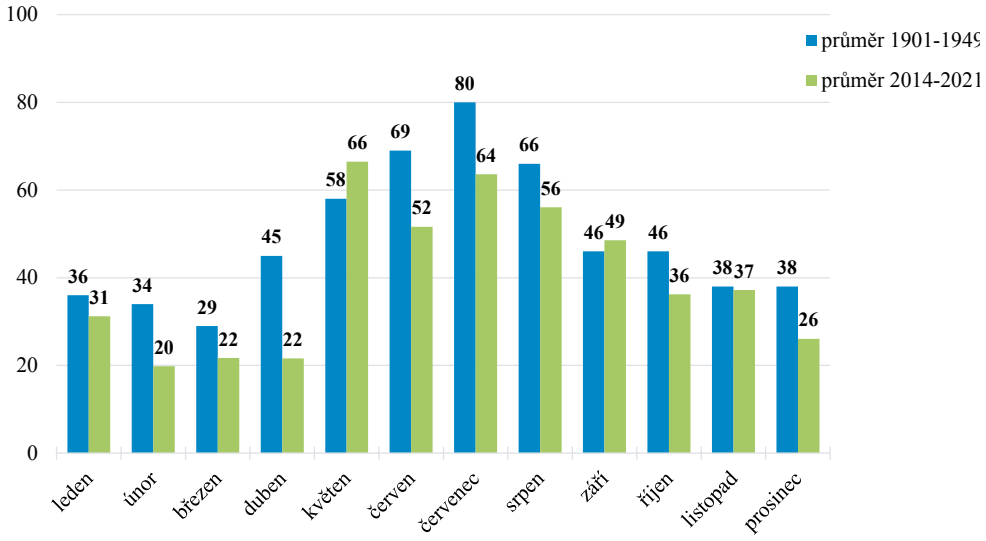
limituje místní produkci zeleniny a ovoce. Budování nádrží pro závlahy je zatíženo rizikem nedostatku vody, tedy obavou, že se nádrž vodou nenaplní. Stoupá počet lesních požárů. Místně usychají i hluboko kořenující borovice, smrky stresované suchem podléhají kůrovci. Řeky mají málo vody, po dlouhá období jsou nesplavné. Některé loděnice na dolním toku Labe omezují výrobu, protože vyrobené lodě nelze dopravit po vodě zákazníkům. Méně vody v řekách znamená méně vyrobené elektrické energie. Monitoring podzemní vody vykazuje dlouhodobý pokles hladiny, především hlubokých zvodní (souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině). Mnohé obce pociťují nedostatek vody a do některých se musí voda dovážet. Díky přehradám „teče voda z kohoutků“, to ovšem vyvolává iluzi dostatku vody v obci zásobené ze vzdálené přehrady.

**Prodlužují se období beze srážek a přibývá místních přívalových dešťů.** Ubylo ranních mlh a drobných dešťů. **Snižuje se relativní vlhkost vzduchu a zvyšuje se počet tzv. tropických dnů a nocí,** kdy teplota vzduchu přes den stoupá nad 30 °C a v noci neklesá pod 20 °C. Zimy jsou většinou mírné a trvalá sněhová pokrývka je pouze v nejvyšších nadmořských výškách. I na horách je nedostatek vody. Dokládají to potíže se zásobením vodou pro zasněžování, rozkolísané stavy vody v malých tocích, pokles vody ve studních.

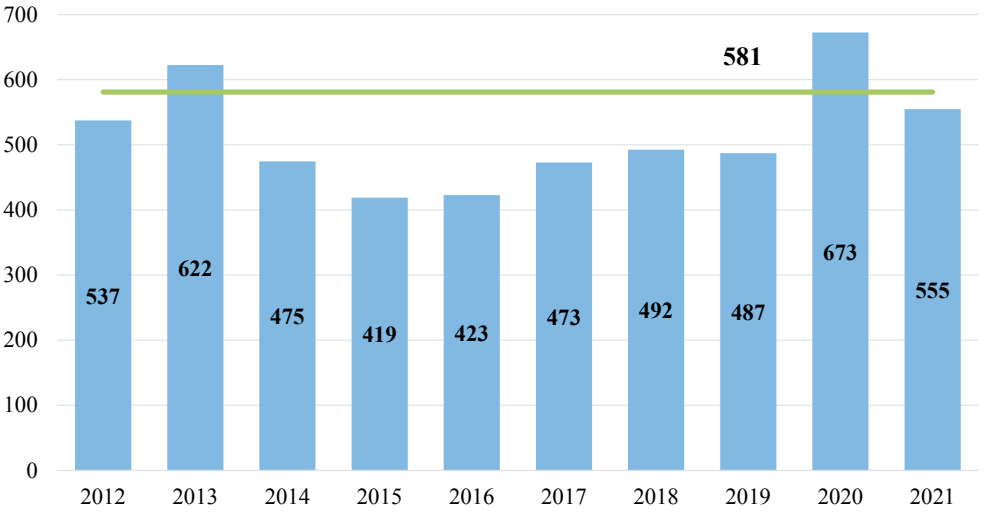
V ČR **stoupají průměrné roční teploty**, klesá relativní vlhkost vzduchu. Ukážeme, že jsou regiony, kde ve srovnání s minulým stoletím došlo k poklesu srážek. Přitom pozorujeme prohlubující se nedostatek vody v krajině i v lesích ve svém okolí. Mění se též směr větru. Dříve převládající západní vítr přinášející oblačnost a srážky od Atlantiku je méně častý. Převládá proudění od jihovýchodu a jihu, které vodu nepřináší, naopak vysušuje. V původním střídavém typu podnebí na rozhraní oceánského a kontinentálního začínají častěji převažovat vlivy vnitrozemské. Zejména na jaře zaznamenáváme vysoký rozsah denních amplitud teplot vzduchu. Dřívější, tzv. aprílové počasí, kdy byl krátký déšť vystřídán slunečním svitem, je výjimkou. V březnu a dubnu zažíváme vícedenní období vysokého tlaku, jasné oblohy, silného slunečního svitu a teploty vzduchu přes den i nad 20 °C; v noci a k ránu klesají teploty za jasné oblohy pod bod mrazu, mrznou pupeny a květy stromů. Někdy klesají přízemní teploty i pod -5 °C a poškozeny jsou zemědělské plodiny. Tyto, zejména jarní, **vysoké rozdíly denních a nočních teplot** a jasná obloha jsou typické pro suché vnitrozemské oblasti. Uvidíme, že příčinou je nedostatek vody v krajině.

Kritériem (měřítkem) změny klimatu je **průměrná teplota**. Změna (nárůst) globální průměrné teploty se uvádí 0,09–0,24 °C za desetiletí (dekádu) v období 1961–2016 (FAO 2020), pro Evropu se uvádí větší rozsah 0,05–0,4 °C za dekádu. V České republice monitoruje a vyhodnocuje klima Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Průměrná roční teplota v České republice narostla za posledních 59 let o 2 °C (0,34 °C za desetiletí). Trendy v oteplování jednotlivých měsíců jsou však různé. Největší nárůst teplot je v lednu, červenci a srpnu – tyto měsíce se mezi roky 1961 až 2019 oteplily o více než 2,5 °C. Vyšší teploty v letních měsících se projevují jako vlny veder, narůstá počet tropických dní (tedy dní, kdy teplota přesáhne 30 °C) a tropických nocí (kdy teplota neklesne pod 20 °C). Zásadní pro vegetaci jsou extrémy teplot. V témže roce jsou na jaře ranní mrazy a v létě vyšší počet dnů s teplotami vzduchu nad 30 °C. Tyto extrémy ovšem nemohou být zachyceny, pokud hodnotíme pouze průměry teplot, jak upozorňují například Rožnovský a Střeštík (2019).

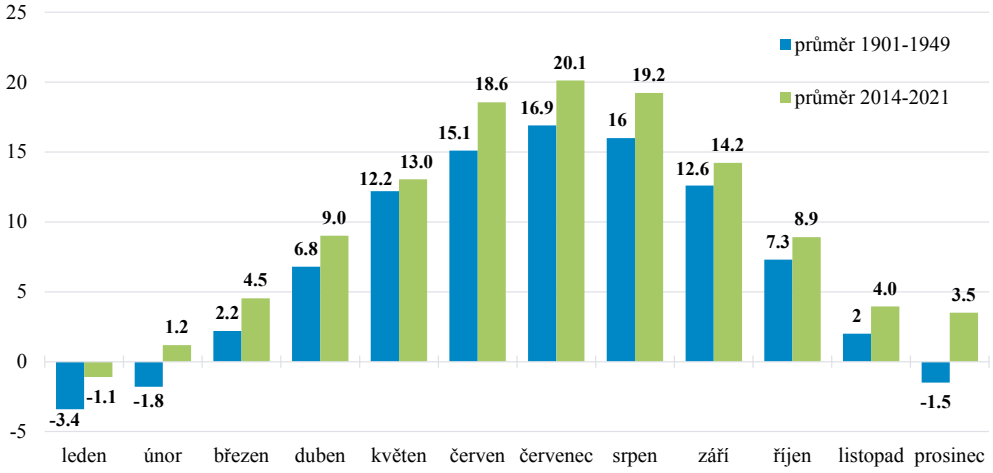
Místní změny se od průměru často liší. Z následujících grafů získaných od ČHMÚ (stanice Kostelní Myslová) a z dat měřených na stanici Hradištko u Dačic je zřejmé, že na Dačicku klesly podstatně dešťové srážky (obr. 2.1, 2.2) a stouply průměrné roční teploty o 2,5 °C oproti první polovině 20. století (obr. 2.3, 2.4). Grafy jsou převzaty ze studie zadané MŽP (Pokorný et al. 2019), data vyhodnotil ing. K. Kupec, který obsluhuje stanici Hradištko v areálu Lesů Města Dačice. Tato studie řešila stav a funkci lesů v majetku města Dačice a dokumentuje odumírání smrkových porostů následkem kůrovcové kalamity. Studie dále na základě zpracovaných satelitních snímků ukazuje nárůst povrchových teplot a pokles evapotranspirace v místech odumřelých lesních porostů (Hesslerová et al. 2022). Tento vzestup teplot je dáván do souvislosti se změnami krajinného pokryvu a rozšiřujícím se suchem z oblasti jižní Moravy. Tyto trendy odpovídají nárůstu příkonu sluneční energie od osmdesátých let 20. století na mnoha stanicích ve světě (Wild 2009). Brightening (rozjasnění) je působeno úbytkem oblačnosti a projevuje se i v ČR (Pokorný et al. 2023), viz kapitola 5.



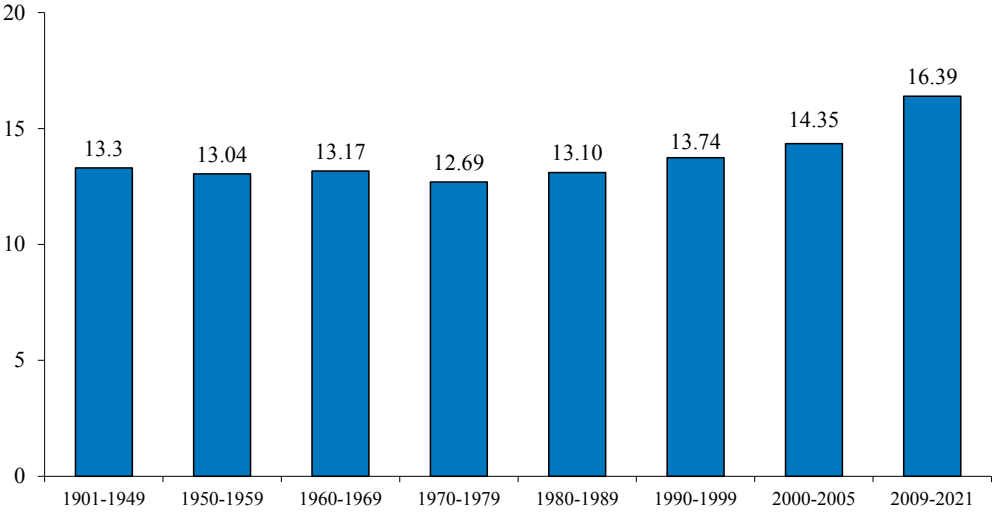

**Obr. 2.1** Porovnání měsíčních úhrnů srážek (mm) za období 1901 – 1949 a 2014 – 2021. Data ze stanic Hradištko u Dačic a Kostelní Myslová (stanice ČHMÚ; starší data Piro 1964).




**Obr. 2.2** Úhrny srážek (mm) 2012 – 2021; (Hradištko, LM Dačice), dlouhodobý průměr na stanici Kostelní Myslová za období 1961 – 1990 byl 581 mm.




**Obr. 2.3** Měsíční průměry teplot (°C) v časových obdobích 1901 – 1949 a 2014 – 2021; pro stanici Kostelní Myslová a Hradištko (starší data Piro 1964)




**Obr. 2.4** Průměrné teploty (°C) ve vegetačním období (1901 – 2021) pro stanici Kostelní Myslová; Hradištko Nápadný je vzestup od konce 20. století (starší data Piro 1964).

Rožnovský et al. (2020) ukazují na rozdíl ve vývoji srážek na území ČR v závislosti na zeměpisné délce za období 1961–2019. Západní část území ČR vykazuje mírný nárůst srážek (s výjimkou nížiny kolem řeky Labe), zatímco východní část vykazuje buď velmi malý nárůst, nebo častěji pokles srážek s výjimkou horských oblastí Jeseníků a Beskyd. Lze tak konstatovat, že na území ČR ubývají srážky směrem k východu. Nejvíce srážek v ČR je v letních měsících, nejméně v zimě, v poslední době je patrný pokles srážek na jaře, zejména v dubnu.

V období 1961–2017 stoupaly průměrné roční teploty vzduchu (Rožnovský a Střeštík 2019). Nejvíce se teplota zvyšuje v létě (0,4 °C/10 let), naopak malý je vzestup na podzim. Autoři upozorňují, že nárůst průměrné teploty neznamená oteplení pro bezpečné pěstování teplomilnějších plodin. Narůstá dynamika teplot vzduchu, tedy jejich kolísání. Mírná zima navozuje dřívější nástup vegetačního období, například dřívější kvetení ovocných stromů. Ty jsou potom ohroženy jarním přílivem arktického vzduchu, kdy za jasné oblohy klesají minimální přízemní teploty vzduchu i minimální teploty vzduchu měřené ve 2 metrech výrazně pod bod mrazu. Děje se tak i v poslední třetině dubna. Nejvyšší průměrné teploty vykazuje Praha, což si vysvětlujeme efektem tzv. tepelného ostrova, tedy velkého podílu odvodněných a zpevněných ploch (střechy, silnice, parkoviště).

Z uvedeného stručného přehledu je patrné, že trendy dešťových srážek a teplot se místně a regionálně liší. Rozdíly jsou často až několikanásobné oproti uváděným průměrným celorepublikovým hodnotám. Nárůst průměrné teploty je provázen extrémy teplot, tedy jak vzrůstem letních maxim, tak častějšími jarními ranními mrazy. Častěji se vyskytují přívalové deště způsobující místní povodně při dlouhodobém nedostatku vody v půdě. Je tedy otázkou, jak rozumět narůstající dynamice teplot a srážek a zda ji můžeme nějak tlumit. V následujících kapitolách ukážeme, jak voda a vegetace vyrovnávají extrémy teplot a přesvědčíme se o tom měřením množství přicházející sluneční energie a měřením teplot.

## Literatura

Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník (eMS), 2017 [cit. 28.8.2021]. Dostupné z: http://slovnik.cmes.cz

FAO (2020). *Temperature Change Statistics 1961-2019: Global, regional, and country trends*. FAOSTAT Analytical Brief Series No 2. Rome.

Hesslerová, P., Huryna, H., Pokorný, J., Kozumplíková, A., Vyskot, I. (2022). Změny klimatizační funkce lesních porostů jako následek plošného odumření po gradaci lýkožrouta smrkového na Dačicku. Zprávy lesnického výzkumu 67, 311 – 320.

Piro, B. (1964). *Projekt rekonstrukce zámeckého parku v Dačicích.* Lednice na Moravě: SŠ VŠZ Brno, 21 s.

Pokorný, J., Procházka, J., Jirka, V., Huryna, A., Hesslerová, P., (2023). Lze nárůst příkonu sluneční energie a teplot vysvětlit jinak než úbytkem oblačnosti a vody v ovzduší? Vodní hospodářství 12/2023, str. 2–7.

Pokorný, J., Vyskot, I., Hesslerová, P, Kozumplíková, A., Huryna, H. (2019). Posouzení stavu a funkcí lesů na vybraném lesním majetku v měnících se ekosystémových podmínkách Studie zadaná MŽP, řešitelé ENKI, o.p.s. UEPZ FRRMS MENDELU, 249 s.

Rožnovský, J. a Střeštík, J. (2019). Dynamika a trendy teploty vzduchu na území České republiky. Úroda 12. roč. LXVII, vědecká příloha. Praha: Profi Press, s. 65–71.

Rožnovský, J., Střeštík, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P. (2020). The dynamics of annual and seasonal precipitation totals in the Czech Republic during 1961 – 2019. *Acta Hydrologica Slovaca*, 21(2), 197–203.

Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review, Journal of Geophysical Research, Vol. 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470, 2009

# 3. Slunce a Země

## 3.1. Země bez Slunce

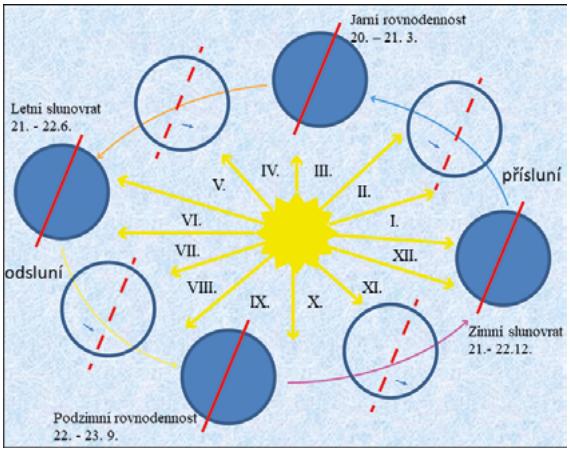
Náš významný astronom, Josip Kleczek, vyzýval své čtenáře a posluchače k zamyšlení nad tím, co by se stalo, kdyby Země přišla o Slunce. Kdyby někdo zlý ukradl Slunce, jak to vypráví Wolkerova pohádka. Nebo si představme, že by přestala působit přitažlivost mezi Sluncem a Zemí. Pak by Země setrvačností a rychlostí 30 km za sekundu letěla rovinou ekliptiky pryč od Slunce do některého zvířetníkového souhvězdí. Zkrátka - ať v pohádce nebo kvůli zmizení gravitační přitažlivosti - naše Země by se ocitla v ledové temnotě kosmického prostoru. Ostatní hvězdy jsou příliš daleko, aby nahradily světlo mizejícího Slunce. Teplota by klesla na několik Kelvinů (odhaduje se na - 263 °C), voda by ztuhla v led, i atmosféra by byla tuhá, protože teplota by klesla pod bod tuhnutí dusíku a kyslíku. Obloha by byla černá a posetá zářivými hvězdami. Nebyl by den, protože by nevyšlo Slunce. Nebyla by modrá obloha, protože modř oblohy je způsobena rozptýlením slunečního světla na molekulách vzduchu v atmosféře. Vymřel by všechen život v biosféře.

Slunce je základním zdrojem energie pro Zemi. Jeho středová oblast je dokonalý atomový reaktor, kde se slučují čtyři jádra vodíku na jádro helia (říkáme termonukleární, protože jaderné reakce probíhají za vysoké teploty). Cestou k povrchu – tj. do fotosféry – se energie přemění ve viditelné světlo. Z celého svého povrchu vysílá Slunce do okolního kosmického prostoru obrovský tok záření, nazývaný sluneční zářivost ($3{,}8 \times 10^{26}$ watt). Jen nepatrný zlomek (necelá stomiliontina) sluneční zářivosti se zachytí na tělesech sluneční soustavy a ostatek uniká do mezihvězdného prostoru. (Kleczek 2011)

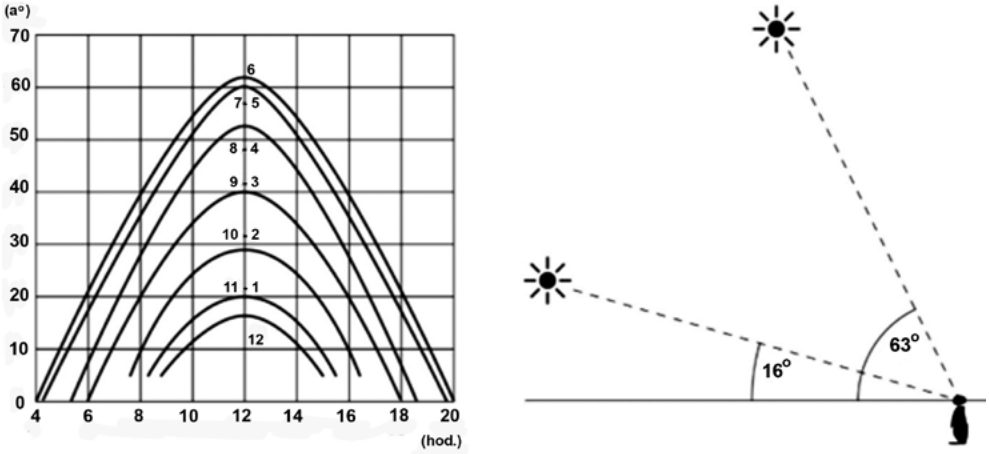
## 3.2. Slunce a Země se vzájemně přitahují

Slunce a Země se přitahují obrovskou gravitační silou. Podle Newtonova gravitačního zákona je to síla $18 \times 10^{66}$ newtonů. Newton je jednotka síly, která urychlí

jeden kilogram o jeden metr za sekundu. Úžasná přitažlivost mezi hvězdou Slunce a její planetou způsobuje, že Země neodletí do kosmického prostoru, ale drží se v blízkosti Slunce (Kleczek 2011). Země si naopak stejnou silou přitahuje k sobě Slunce, které však má 330 tisíc krát větší hmotnost – takže střed Slunce a Země obíhají kolem společného těžiště. Střed Slunce je od společného těžiště vzdálen jen 500 kilometrů, kdežto Země je od něho vzdálena 150 milionů kilometrů. Tím je dána eliptická trajektorie oběhu Země kolem Slunce, která se jen málo liší od kruhové dráhy. Obě tělesa oběhnou společné těžiště za jeden rok. Země obíhá okolo společného těžiště rychlostí 30 000 $m.s^{-1}$, kdežto střed Slunce jen 0,1 $m.s^{-1}$.




**Obr. 3.1** Oběh Země kolem Slunce. V zimním slunovratu je severní polokoule odkloněna od Slunce a v letním slunovratu je severní polokoule přikloněna ke Slunci. Protože paprsky slunečního záření dopadají u nás v zimě pod menším úhlem (Slunce je zdánlivě na jižní polokouli), je chladněji, i když je právě Země trochu blíže Slunci nežli v létě. Upraveno podle Velký atlas světa (2000).



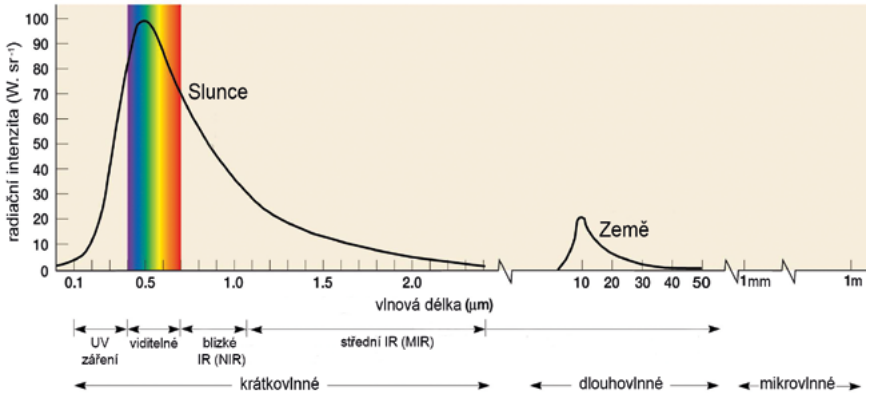

**Obr. 3.2** Úhel Slunce nad obzorem v průběhu dne pro jednotlivé měsíce v roce na 50. rovnoběžce. Při letním slunovratu (21.6) je úhel Slunce nad obzorem v poledne 63°, při zimním slunovratu (21.12) je úhel Slunce 16° nad obzorem (Matuška 2009).

## 3.3. Záření Slunce a záření Země

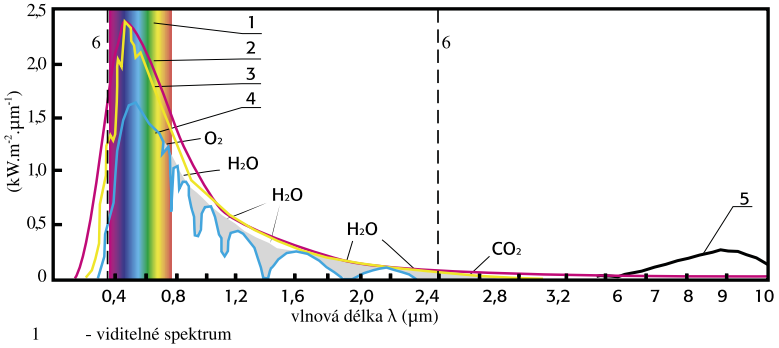
Přes den nás světelnými fotony zaplavuje Slunce a v noci jich poskrovnu přichází od dalekých hvězd – případně blízkých planet a Měsíce. Už čtyři a půl miliardy let dopadá nepřetržitě na naši planetu proud vysoce kvalitních slunečních fotonů. Je to nevyčerpatelný zdroj, neboť Slunce má vodíku – tj. termojaderného paliva – v hlubokém nitru ještě na dobu sedmi miliard let. Země se otáčí kolem své osy a sluneční energie přichází v rytmu den a noc. V zimě přichází v mírném pásmu, kde žijeme, několikanásobně méně sluneční energie nežli v létě. Oběh Země kolem Slunce je znázorněn a popsán na obrázku 3.1. V létě je Slunce nejvýše nad obzorem, v naší zeměpisné šířce kolem 50. rovnoběžky je úhel Slunce nad obzorem v letním slunovratu 63°. Naopak při zimním slunovratu je úhel Slunce nad obzorem 16°. Chod Slunce nad obzorem a délka dne jsou znázorněny na obrázku 3.2.

Největší část sluneční energie je ve světle a zhruba pětina v infračerveném záření. Spektrum slunečního krátkovlnného záření (200–2400 nm) a vlnová délka dlouhovlnného záření (tepla) vysílaného Zemí jsou na obr. 3. 3. Světelné fotony přinášejí největší část sluneční energie. Pro život na Zemi jsou ze všech fotonů nejdůležitější. Země vyzařuje dlouhovlnné záření (teplo) o vlnové délce okolo

10 000 nm. Sklo propouští krátkovlnné záření a nepropouští dlouhovlnné záření. Diagram na obr. 3.4 ukazuje spektrum záření černého tělesa při 6000 K (povrchová teplota Slunce), spektrum slunečního záření na hranici zemské atmosféry, na zemském povrchu, tepelné záření zemského povrchu a dále absorpční pásy vodní páry ve viditelné části spektra.




**Obr 3.3** Intenzita radiačního toku slunečního záření (krátkovlnné) a tepelného záření Země (dlouhovlnné). Největší podíl energie vysílá Slunce v oblasti světelného (viditelného) záření (0,4 – 0,7 μm, tedy 400 – 700 nm). Podstatně nižší podíl krátkovlnného záření tvoří IR = infračervené záření (infrared), to se skládá z blízkého IR –NIR (near-infrared) a středního IR - MIR (mid-infrared). (McKnight & Hess 2007, upraveno). Jednotka W.sr$^{-1}$ vyjadřuje intenzitu záření dopadající na plochu vymezenou jednotkovým prostorovým úhlem.




1 - viditelné spektrum
2 - diagram intenzity záření černého tělesa o teplotě K = 6000 K podle Planckova zákona
3 - diagram intenzity slunčního záření na hranici zemské atmosféry
4 - diagram intenzity slunčního záření na zemském povrchu
5 - diagram intenzity záření zemského povrchu o teplotě 300 K podle Planckova zákona
6 - spektrální propustnost skla

**Obr 3.4** Intenzita záření černého tělesa při 6000 K, slunečního záření na hranici atmosféry, na zemském povrchu při jasné obloze a intenzita záření zemského povrchu (tepelné záření). Znázorněny jsou též absorpční pásma vodní páry, kyslíku a oxidu uhličitého (dle Rosenberg 1974).

Energie slunečních fotonů po dopadu na Zemi zahřívá pevniny, vodstvo, atmosféru a vytváří vhodné prostředí pro život. Země své teplo vyzařuje jako infračervené záření zpět do kosmického prostoru. Fotony vysílané Zemí obsahují energii přibližně desetiny elektronvoltu (tj. kinetická energie, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu). V porovnání s fotony dopadajícími ze Slunce je to asi dvacetkrát méně. Země má totiž dvacetkrát nižší teplotu (přibližně 300 K) než Slunce (6 000 K, viz obr. 3.4), proto je její maximální intenzita vyzařování v infračervené oblasti okolo vlnové délky setiny milimetru (10 μm). Infračervené záření Země je transformované záření Slunce. Vlnová délka vysílaného záření závisí na povrchové teplotě zářiče. Tuto závislost popsal na základě měření Wilhelm Wien v 19. století a později teoreticky odvodil Max Planck. Podle Wienova zákona posuvu se maximální množství energie vyzářené černým tělesem mění s vlnovou délkou. Vlnová délka, jíž přísluší maximální intenzita vyzařování, je nepřímo úměrná teplotě. To znamená, že těleso o vyšší termodynamické teplotě maximálně vyzařuje v kratších vlnových délkách, tj. vyšších frekvencích. Celkovou vyzářenou energii za jednotku času z jednotkové plochy absolutně černého tělesa vyjadřuje Stefanův-Boltzmannův zákon (viz kapitola 5).

## 3.4. Sluneční konstanta a zářivost Slunce

Sluneční konstanta je míra sluneční energie dopadající na Zem, a to na plochu jeden metr čtvereční za jednu sekundu. Plocha 1 $m^2$ je přitom kolmá k dopadajícím paprskům a umístěná ve vzdálenosti 1 astronomické jednotky nad zemskou atmosférou (astronomická jednotka je přibližně definována jako střední vzdálenost Země od Slunce, tj. 149 597 870 700 m). Hodnota intenzity slunečního záření se po průchodu zemskou atmosférou snižuje. Proto se sluneční konstanta měří na družicích. Díky excentricitě (výstřednosti) oběžné dráhy Země okolo Slunce v průběhu roku kolísá její hodnota. ECSS Standard (2020) udává hodnotu solární konstanty 1361 $W.m^{-2}$. Když je Slunce na eliptické dráze Zemi nejblíže (perihelion, přísluní), dopadá na horní hranici atmosféry 1407 $W.m^{-2}$, když je nejdále (aphelion, odsluní) dopadá 1316 $W.m^{-2}$. Další autoři, např. Geiger et al. (2003), Kopp et al. (2005) udávají hodnotu solární konstanty 1367 $Wm^{-2}$ a rozsah 1321 až 1412 $W.m^{-2}$. Josip Kleczek uvádí střední hodnotu 1353 $W.m^{-2}$ a rozsah 1345 až

1438 $W.m^{-2}$ (Kleczek, 2011). Je pochopitelné, že uváděné hodnoty se liší v rozsahu více než 10 $W.m^{-2}$, měření intenzity slunečního záření družicemi s přesností větší než 1% není technicky možné. Této skutečnosti bychom si měli být vědomi při následných výpočtech a modelování.

## 3.5. Sluneční záření dopadající na naši planetu

Země obíhá kolem Slunce po eliptické trajektorii blízké kružnici a vzdálenost Země od Slunce se pohybuje v rozmezí 147 mil. km (začátek ledna) až 152 mil. km (letní slunovrat). Záření potřebuje přibližně osm minut, aby urazilo vzdálenost od Slunce na naši planetu. Vzdálenost Země od Slunce neovlivňuje střídání ročních období. Střídání ročních dob na různých místech planety vychází ze sklonu zemské osy. Při oběhu okolo Slunce zachovává skloněná osa svůj směr (nehledě na mírné změny náklonu = precesní pohyb), takže někdy k nám paprsky dopadají pod větším, jindy pod menším úhlem. Na severní polokouli v létě dopadají sluneční paprsky pod větším úhlem (Slunce je výše nad obzorem) a v zimě, kdy je slunce nízko nad obzorem (viz obr. 3.1 a 3.2) pod úhlem menším. Energie na jednotku plochy je tedy nižší, proto je chladněji. Z celkového záření vysílaného do vesmíru Sluncem (ze sluneční zářivosti $3{,}83 \times 10^{26}$ W) dopadá na Zemi pouze 180 000 TW. O velikosti popisovaného jevu se snadno přesvědčíme, když průřez Země ($\pi \times R_Z^2$) vynásobíme sluneční konstantou. Ve výrazu v závorce značí $R_Z$ poloměr Země 6378 km (Kleczek 2011).

I když je 180 000 TW z lidského hlediska nesmírné množství zářivé energie, je to jen půl miliardtina ze sluneční zářivosti. Avšak i tato nepatrná část sluneční zářivosti, kterou Slunce planetě Zemi posílá, stačí na to, aby na naší planetě Zemi udržovala život a vytvářela pro něj příznivé podmínky. Sluneční energie ohřívá naši planetu o přibližně 280°C. Sluneční energie přichází na naši planetu 4,5 miliardy let a zásoby vodíku na Slunci jsou na další miliardy let. Budeme se zbývat osudy sluneční energie při jejím průchodu atmosférou a po dopadu na vodstvo, pevninu a její různý povrch s městskou zástavbou, zemědělskými poli, lesy atd. Ukážeme, jak člověk mění obrovské toky sluneční energie hospodařením v krajině a urbanizací a jak proces výpar vody/kondenzace vyrovnává rozdíly teplot a tlaků.

## 3.6. Průchod slunečního záření atmosférou

Přibližně jedna třetina dopadajícího slunečního záření (to je třetina z 180 000 TW čili 60 000 TW) se odráží zpět do vesmíru od oblaků a povrchu Země. Proto lze Zemi z kosmu vidět a pořizovat její snímky. Při průchodu slunečního záření atmosférou dochází ke snižování jeho intenzity i ke změně jeho vlastností, a to procesy rozptylu a pohlcování.

**1) Rozptyl záření v atmosféře**. Při průchodu atmosférou molekuly dusíku a kyslíku rozptylují část slunečního záření, především jeho modrou část. "Rozptylují" znamená „zachytí a pošlou jiným směrem". Rayleighův zákon intenzitu molekulárního rozptylu definuje následovně: Intenzita rozptylu záření o vlnové délce $\lambda$ je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky a přímo úměrná intenzitě přímého záření a koeficientu, který závisí na indexu lomu vzduchu a počtu molekul v jednotkovém objemu. Jinými slovy, čím je kratší vlnová délka, tím je vyšší intenzita rozptylu záření. Maximum rozptylu je vázáno na modrou část spektra (krátké $\lambda$), proto je obloha modrá. Modrá obloha je rozptýlené sluneční světlo na molekulách vzduchu. Při východu či západu Slunce je dráha procházejících paprsků atmosférou delší (dvakrát delší $\lambda$), obloha se tak barví do oranžova až červena. Molekulární rozptyl modrého záření je šestnáctkrát větší než rozptyl záření červeného. Astronauti vidí shora stejné modré záření rozptýlené v atmosféře jako my zespodu. Proto se Zemi říká „modrá planeta". K dalšímu rozptylu dopadajícího slunečního záření dochází na prachových mikročásticích a aerosolech. Aerosolový rozptyl závisí spíše na velikosti a množství rozptylujících částic, než na vlnové délce. Intenzita obou typů rozptylu ve vyšších vrstvách atmosféry klesá.

**2) Pohlcení záření v atmosféře a na povrchu Země**. Jednotlivé plyny tvořící směs vzduchu (především $O_2$, $CO_2$, $O_3$ a vodní pára) pohlcují, částečně či úplně, některé vlnové délky slunečního záření. Při pohlcování dochází k přeměnám energie na tepelnou, případně ve vysokých vrstvách atmosféry na elektrickou. Se skleníkovým efektem souvisí pohlcování tepla (dlouhovlnného záření), které vysílá (emituje) zemský povrch. Význam vodní páry v atmosféře, která je nejvíce zastoupeným skleníkovým plynem, je obsahem kapitoly 5. *Sluneční záření: denní chod krátkovlnného a dlouhovlnného záření za jasného a oblačného dne.*

Viditelná část slunečního záření je při průchodu atmosférou jen málo ovlivněna. Zato záření gama, rentgenové a ultrafialové je atmosférou pohlceno. Tyto

krátkovlnné složky slunečního spektra ($\lambda < 400$ nm) představují sice jen malou část dopadající sluneční energie, ale přesto jsou životu nebezpečné. Atmosféra je pohlcuje už ve vysokých vrstvách, kde rozkládají (disociují) molekuly dusíku ($N_2$) a kyslíku ($O_2$) a vytrhávají z nich elektrony (odborně řečeno „ionizují" vzduch). Ve výškách od 50 km až asi do 500 km je atmosféra ionizovaná a volné elektrony dobře vodí elektřinu. Tato vrstva atmosféry – nazývaná ionosféra - odráží rádiové vlny a slouží radiové komunikaci. Ultrafialové záření proniká pod ionosféru do výšek 15 km – 50 km nad zemským povrchem. Fotony ultrafialového záření hν o vlnové délce 180 - 240 nm mají dostatečnou energii ke štěpení molekul kyslíku $O_2$ na dva atomy:

$$O_2 + h\nu \rightarrow O + O$$

Volné atomy kyslíku se spojí s nerozloženými molekulami kyslíku na ozon $O_3$:

$$O_2 + O \rightarrow O_3$$

Molekuly ozonu pohlcují ultrafialové záření a jsou jím rozkládány zpět na molekuly kyslíku. Tyto dva procesy, vznik a zánik ozonu, jsou v rovnováze zhruba mezi 15 až 50 km (s maximem ve 20-25 km). V této vrstvě atmosféry - nazývané ozonosféra - se pohlcuje nejvíce slunečního ultrafialového záření. Celkové množství ozonu v ozonosféře je malé, za normálního tlaku by vytvořil ozon vrstvu silnou asi 3 mm. Silné zeslabení ozonu nad určitou oblastí (např. nad Antarktidou) se nazývá ozonová díra. Ozonová díra propouští ultrafialové záření kratších vlnových délek a představuje zdravotní rizika pro člověka i další organismy. (Kleczek 2011) Ultrafialové záření, které pronikne až k zemskému povrchu, se obvykle podle vlnové délky dělí na tři druhy označené velkými písmeny A (390-320 nm), B (320 – 280 nm) a C (kratší vlnové délky než 280 nm), které je zdraví nebezpečné (Netopil a kol. 1984).

## 3.7. Slunce

**...a teplo Země**

Povrch Země a atmosféra pohlcují dvě třetiny dopadajícího slunečního záření. Přibližně jedna třetina se ho odráží zpět, aniž by dopadla na Zemi. Pohlcené

sluneční záření tak vytváří příznivé teplotní prostředí pro život. „Pohlcení" totiž znamená „přeměněnu záření v teplo". Jinak řečeno: fotony předávají energii svých kmitů (hv) povrchu země, vodní hladině, molekulám vzduchu a životním pochodům v ekosystémech, které se díky této energii utvářejí. Energie dopadajícího záření se při pohlcení mění v pohybovou energii molekul, to je v teplo. Celkem Země přeměňuje 120 000 TW slunečního záření na teplo (Kleczek 2011) a Slunce tak vytváří na Zemi příznivé teplotní prostředí pro život. Díky této přeměně energie slunečního záření v teplo je na Zemi průměrná teplota kolem 15°C.

Země své teplo získané od Slunce vyzařuje zpět do vesmíru, ale ve formě dlouhovlnného infračerveného záření o vlnových délkách kolem setiny milimetru (10 um). Země se tedy chová ke slunečnímu záření jako obrovský transformátor. Mění kvalitní světlo v méně kvalitní záření infračervené Množství (energie) pohlcovaného slunečního světla by se mělo rovnat energii, kterou Země vyzařuje v infračervených (tepelných) vlnových délkách. (Kleczek 2011). Dlouhovlnné záření Země (teplo) je částečně pohlcováno atmosférou, tzv. skleníkovými plyny, z nichž nejvýznamnějším je vodní pára. Násobně až řádově méně je oxidu uhličitého, metanu a oxidů dusíku. Díky skleníkovým plynům je teplota na Zemi vyšší cca o 30 °C. Na Zemi plyne život, což jsou procesy přeměn sluneční energie od stovek $W.m^{-2}$, spotřebovaných na výpar vody (evapotranspirace), po jednotky $W.m^{-2}$ (fotosyntéza, bakteriální rozklad, oxidačně redukční procesy, srážení a rozpouštění látek). Procesy přeměn energie studuje obor termodynamika, které je věnována zvláštní kapitola této knihy. Zásadní úlohu v přeměnách sluneční energie hraje vegetace a voda. Těmito pochody se budeme zabývat v dalších kapitolách a ukážeme si způsoby, jak je měřit. V kapitole 5 ukazujeme na měřených datech, jak vodní pára, mlha a mraky zásadně snižují množství přicházející sluneční energie i množství tepla, které odchází do atmosféry.

**...a vzduch**

Zahřívání zemského povrchu není všude stejné. Například vyprahlá pevnina se zahřívá více než moře. Nad teplejším místem se vzduch ohřívá, rozpíná se a stoupá nahoru. Na jeho místo proudí chladnější vzduch. Energie tornáda pochází zejména ze skupenského tepla vody, tedy z tepla uvolňovaného při kondenzaci vodní páry zpět na vodu kapalnou. Proudění vzduchu, vítr, obsahuje velkou pohybovou energii, která je slunečního původu. Čím rychleji vítr fouká, tím větší

energii s sebou nese. U nás vanou nejrychlejší větry na hraničních horách a na Českomoravské vrchovině. Průměrná rychlost větru, naměřená za mnohaleté období ve výškách kolem 1500 m nad mořem, je kolem 9 $m.s^{-1}$. Pohybovou energii větru odhadneme, když kilogram vzduchu vynásobíme čtvercem jeho rychlosti a podělíme dvěma. Krychlový metr vzduchu má hmotnost přibližně 1,2 kg, s klesající teplotou hmotnost vzrůstá.

**... a voda**

Voda je v neustálém pohybu – na pevnině, v moři a v atmosféře. Je to nekončící koloběh z povrchu moří do atmosféry a odtud zpět na povrch moře nebo pevniny. A z pevniny do moře nebo pod zemský povrch jako podpovrchová voda. Pohybová energie mořských proudů, řek a oblaků jakož i polohová energie oblaků a vody v přehradách, je přeměněná sluneční energie.

Oběh vody je pro biosféru - a tedy i pro nás - nepostradatelný jako zdroj pitné i užitkové vody. Je poháněn sluneční energií a gravitační přitažlivostí Země. Ročně se oběhu účastní přibližně $5,8 \times 10^{14}$ $m^3$ vody, což je přibližně 0,04 % z celkového množství vody na Zemi. (Kleczek, 2011) Ovšem obrat této vody je vysoký, voda obíhá v řádu dnů až týdne. Objem kapalné sladké vody na pevnině (v řekách, jezerech a umělých nádržích 13,5 mil. $km^3$), je velmi malý ve srovnání s objemem vody v oceánech (1338 mil. $km^3$). Sladká voda je vlastně voda vypařená z oceánů, která přišla jako vodní pára a následovně jako déšť na pevninu. (Netopil a kol. 1984)

Odhadněme, jak velká je polohová gravitační energie, kterou Slunce vložilo do oblaku. Velký oblak může obsahovat až 300 000 tun vody (tj. $3 \times 10^8$ kg). Průměrná výška velkých oblaků je kolem 4 000 metrů. Na zvednutí 1 kg vody do výšky jednoho decimetru je třeba vynaložit energii 1 joule (J). Zvednout 1 kg do výšky 1 metru znamená práci 10 joulů. To znamená, že Slunce vykonalo práci $3 \times 10^8 \times 4\,000 \times 10$ joulů, aby vyneslo vodní páru od hladiny oceánu až do hladiny kondenzace, kde vznikají oblaka.

To je velká energie - $12 \times 10^{12}$ joulů. Joule je wattsekunda, takže polohová energie velkého oblaku je přes 3 000 000 kilowatthodin. Jen malá část této gravitační energie se zachytí v přehradě, a to tím více, čím je přehrada vyšší a čím má větší objem. Vodní elektrárna_pod přehradou mění polohovou energii vody na elektrickou energii. Elektřina z vodní elektrárny je tedy slunečního původu

(Kleczek 2011). Výkon vodní elektrárny se zhruba vypočte z výškového rozdílu (m) a průtoku vody ($m^3/s$). Například turbína na potoce o průtoku 100 litrů za sekundu a výškovém rozdílu 15 metrů má následující výkon: 0,1 x 15 x tíhové zrychlení 9,81 je rovno zhruba 15 kW při 100% účinnosti. Voda v řece má pohybovou energii. Je to malá část původní polohové energie oblaku, přeměněná v pohybovou energii proudící řeky.

Jak je uvedeno na konci kapitoly 4. *Termodynamika*, výpar vody je spojen se spotřebou velkého množství energie (skupenské/latentní teplo výparu). Z jednoho litru kapalné vody vzniká přibližně 1200 litrů vodní páry, která obsahuje 2,45 MJ (0,68 kWh) energie. Tato energie se opět uvolňuje, když se vodní pára sráží na vodu kapalnou. Právě prostřednictvím změny skupenství mezi vodou tekutou a vodní párou se přeměňuje i transportuje obrovské množství energie. Důležité jsou i změny tlaku spojené s touto změnou skupenství. Podle Avogadrova zákona má jeden mol látky v plynném stavu objem 22,4 litru a počet molekul $6{,}022 \times 10^{23}$. Jeden mol vody má molekulovou hmotnost 18 gramů (objem 18 ml) v kapalném stavu. Z 18 ml vody vznikne 22 400 ml vodní páry.

Slunce je zdrojem veškerého tepla a pohybu na naší planetě. Dává energii lidem a celé biosféře. Bez Slunce a bez jeho záření by věci nebyly tím, čím jsou. A my bychom tu ani být nemohli. Na Zemi bez Slunce by byl mráz (- 263°C = 10 K), byla by tuhá atmosféra. Nemohl by se vyvíjet život, téměř by ustal pohyb. Nic takového však nehrozí a Slunce nám bude dávat světlo a teplo ještě nejméně 7 miliard let. Na tak dlouhou dobu má ještě zásoby vodíku pro termonukleární reakce.

SINE SOLE NIHIL SUM – „Bez Slunce jsem ničím“, praví stará moudrost. Věnujeme poznání toků sluneční energie odpovídající pozornost? V kapitole 10 poukazujeme na limitované znalosti. V následujících kapitolách si ukážeme, jak my, lidé ovlivňujeme distribuci sluneční energie svým hospodařením.

## Literatura

ECSS-E-ST-10-04 C (2020). Rev1 standard attachment, page 5, Table 6–2

Geiger, R., Aron, R., H. a Todhunter, P. (2003). The Climate Near the Ground, Rowman & Littlefield, Lanham, ML., 584 s.

Kleczek, J. (2011). Život se Sluncem a ve vesmíru. Paseka Praha, 2011, 296 s.

Kopp, G., Lawrence, G. a Rottman (2005). The total irradiance monitor (TIM): science results. Solar Physics, 230 (1), s. 19–140.

McKnight, W.S., Hess, D. (2007). Physical geography: a landscape appreciation. 9th ed., Upper Saddle River, New Jersey, 720 s.

Matuška, T. (2009). Solární tepelné soustavy Praha, STP,192 s.
Netopil, R. a kol. (1984). Fyzická geografie I. SPN, 272 s.
Rosenberg, V. J. (1974). Microclimate: the biological environment. New York: Wiley. 528 s.
Velký atlas světa (2000). Kartografie Praha, a.s., 6. přepracované vydání, 288 s.

*Autoři této kapitoly děkují českému astronomovi a slunečnímu fyzikovi, a hlavně široce vzdělanému člověku a milému staršímu kolegovi, jakým byl doc. Josip Kleczek (1923–2014). S vděkem vzpomínáme na společné přednáškové kurzy na téma využití sluneční energie a otázek klimatu. Z jeho rozsáhlého díla doporučujeme pozornosti například: Velká encyklopedie Vesmíru, Academia 2002, Voda ve vesmíru, na zemi, v životě a v kultuře. Radioservis, Praha, 2011, 672 s., Toulky vesmírem 2013, 400 s. AGA, Astronomical Dictionary in Six Languages, 1961, ČSAV, Naše Slunce, Albatros 1984, 299 s., Energie ve Vesmíru a ve službách lidí, Albatros 2002.*

# 4. Toky energie v otevřených systémech

Na rozdíl od jiných planet sluneční soustavy i všech dalších známých těles ve vesmíru je na Zemi život. Jeho nejmohutnější složkou jsou autotrofní organismy vytvářející organickou hmotu. Podmínkou života je voda. Na Zemi se dostala z vesmíru s kometami. Voda je z 89 % tvořena kyslíkem. Ten je z vody uvolňován rostlinami. Rostliny štěpí vodu při fotosyntéze na kyslík a vodík a dodávají tak kyslík do atmosféry. Rostliny vypařují vodu (transpirace) a tím chladí sebe a okolí, vyrovnávají rozdíly teplot, udržují krátký oběh vody a přitahují tak vláhu od oceánů na pevninu (atmosférické řeky). V této kapitole zmíníme, jak fyzika chápe život v pojmech toků a přeměn energie. Věda zabývající se vztahy mezi teplem a dalšími formami energie se nazývá termodynamika.

Přeměny energie uvažované v uzavřených a tepelně izolovaných nádobách (adiabatické boxy) vedou k vyrovnání teplot a ukončení chemických reakcí, až se dosáhne nejpravděpodobnějšího stavu, tj. termodynamické rovnováhy: teploty se vyrovnají a chemické reakce proběhnou do konce - systém dosáhl maximální entropie. Procesy ustaly, teploty, tlaky jsou vyrovnány. Neexistují rozdíly, které by se mohly vyrovnávat. Tento stav se někdy nazývá „termodynamická smrt“. Vedou se debaty o tom, zda a kdy taková smrt čeká celý vesmír. Aby nastaly nějaké procesy, aby se „něco dělo“, je nutno dodat energii. Slunce bude dodávat naší planetární soustavě energii ještě miliardy let. Pojďme se tedy zabývat toky energie v systémech, které energii dostávají, tedy systémy otevřenými, jak vývoj jejich poznání popsali například Capra (2004), Schneider a Sagan (2005).

Na začátku 19. století se vědci a konstruktéři snažili zvýšit účinnost parního stroje pro jeho lepší praktické použití. Francouzský fyzik Sadi Carnot přičítal porážku Francie v napoleonských válkách nedostatečnému využití technologie, a proto se rozhodl práci parního stroje zlepšit. Carnot pozoroval, že teplo se vždy pohybuje od vyšších teplot k nižším, od horka k chladu, a nikdy směrem opačným a že tento tok tepla může generovat výkon. Položil tak základy termodynamiky a ukázal význam přeměny tepla na práci. Ve věku 26 let (1822) vysvětlil, jak by pracoval ideální parní stroj v reversibilním/vratném (Carnotově) cyklu. Dále zdůraznil, že k práci stroje nestačí pouze kotlem produkovaná horká pára, ale nutný

je i chladič, **a především rozdíl teplot**. Teplo samotné nestačí, musí proudit do chladu. Rozdíl na určité vzdálenosti (gradient) je podmínkou procesu. Čím je větší gradient, tím vyšší je schopnost (síla) konat práci.

James Prescott Joule (1843) ukázal, že mícháním vody se zvýší její teplota. Lopatky poháněl definovaným závažím, takže mohl vypočítat, kolik práce (hmotnost závaží x délka dráhy) bylo nutno vykonat, aby se daný objem vody ohřál o jeden stupeň. Propojil Newtonovu mechaniku s termodynamikou. Joule ukázal, že energie se prací (mícháním) přeměňuje na teplo, neztrácí se. To je základ prvního principu termodynamiky: energie se neztrácí, ale má různé formy, přeměňuje se. První zákon termodynamiky (zákon zachování energie) říká, že celková energie izolované soustavy je stálá. Energie v izolované soustavě nemůže samovolně vznikat ani zanikat. Druh energie se však může měnit, například mechanická energie (míchání) může přecházet na teplo.

Emanuel Clausius (1854) zavedl poměr mezi teplem (množství energie) a teplotou (intenzita energie). Tento poměr nevyhnutelně stoupal s časem. Zavedl pro tento úkaz název „entropie“, jako míru jednosměrné přeměny energie ve tření a teplo.

Pomocí pojmu entropie statisticky vyložil právě nevratnost (ireversibilitu) některých přírodních dějů. Entropie v řečtině znamená „plynutí směrem k nějakému stavu“, tedy přeskupení energie. Každý uzavřený systém má tendenci dostat se do rovnovážného stavu, který je statisticky nejpravděpodobnější. Po dosažení tohoto stavu pak už takový systém bez dodávek energie z vnějšku není schopen konat práci. Podle Clausia tedy entropie v každém takovém systému během času nutně stoupá, zatímco energie postupně degeneruje. To je důvod, proč se někdy entropie vysvětluje jako míra neuspořádanosti. Neuspořádanost je veličina těžko definovatelná. Kodíček a Karpenko (2000) vysvětlují entropii jako míru pravděpodobnosti stavu systému: „neuspořádanost či uspořádanost jsou projevy pohříchu subjektivní, zatímco pravděpodobnost je přesně vyjádřitelná“. Tito autoři podávají fundovaný výklad a příklady užití klasické (rovnovážné) termodynamiky při studiu biologických systémů.

Clausius navázal na Carnotovu práci a formuloval **prvý a druhý zákon termodynamiky**. První zákon říká, že množství energie se v uzavřeném systému nemění, pouze se přeměňuje z jednoho druhu na jiný. Druhý zákon se týká kvality energie v systému a říká, že energie degraduje a stává se nevyužitelná pro práci

v daném systému: energie plyne od teplejšího ke studenějšímu a nemůže plynout opačným směrem, chladnější nemůže předávat energii (teplo) teplejšímu tělesu.

## 4.1. Otevřené systémy

Ludwig Boltzmann ve druhé polovině devatenáctého století zavedl do termodynamiky teorii pravděpodobnosti a propojil s ní tendenci systémů směřovat do rovnovážného stavu. Boltzman byl inspirován Darwinem a snažil se vysvětlit projevy života termodynamickou statistikou. Systémy směřující k termodynamické rovnováze, tak jak je popisovala dosavadní termodynamika, směřují k chaosu, náhodnosti, degradují. Tyto systémy se chovají právě opačně nežli Darwinem popsaný evoluční rozvoj komplexity živých systémů. Život rozvíjí organizované struktury a bezpočet chemických reakcí, které by se nemohly udržet v uzavřeném boxu. Navíc, živé systémy se organizují do stále složitějších (rostou, vytvářejí ekosystémy) a minimalizují tak svoji vnitřní entropii. Živé systémy jsou opakem uzavřených systémů, které popsali výše uvedení zakladatelé termodynamiky. Boltzman v roce 1886 jasnozřivě prohlásil, že energetický gradient na Zemi vytvářený Sluncem pohání životní procesy. Boltzman popsal soutěž (kompetici) Darwinova stylu mezi živými systémy o energii: „Aby tuto přeměnu mohly provádět v co největší míře, rostliny rozkládají svoji rozsáhlou listovou plochu po zemi, aby zachytily energii Slunce, než dopadne na zem a než její teplota klesne. Využívají ji k rozličným chemickým reakcím, o nichž naše laboratoře dosud nemají tušení."

J. W. Gibbs rozšířil termodynamiku do **otevřených systémů**, které umožňují výměnu energie s vnějším světem. Jeho koncept volné energie (free energy, exergy) uvolnil systém z uzavřeného prostředí. Volná energie systému je rovna množství užitečné práce, kterou tato energie může poskytnout.

Po Darwinovi a Boltzmanovi potřebovala termodynamika nové nástroje. Schrödingerova kritika (1944) vyžadovala odpověď na otázku: jak je možné, že se živé systémy vyvíjejí do vyšší komplexnosti a vyšší organizace? Je to v souladu s termodynamikou? Otevřené systémy využívají tepla přísunu energie a látek a jejich výměny s okolím. Jsou to systémy, které na místo, aby dosahovaly předem určený (predeterminovaný) konec v rovnováze a vymizení, zrychlují ustavení rovnováhy ve svém okolí a sami se rozvíjejí. Uzavřené (izolované) systémy před-

vídatelně se měnící v ruiny jsou v reálném světě jen výjimečně. Téměř všechny reálné systémy kromě těch, které studovala termodynamika ve svém klasickém období, jsou otevřené.

Mikulecky (1993) studoval vyrovnávání teplot na modelovém systému dvou nádrží a ukázal, jak druhý zákon termodynamiky vysvětluje redukci gradientů v čase. Gradient je rozdíl/změna na jednotku vzdálenosti. Pokud je systém izolován a dosahuje rovnováhy, potom redukuje gradienty. V nerovnovážných ustálených stavech (steady states) tato tendence vyrovnávat gradienty trvá, systém ovšem dostává energii z vnějšku, a tak je výsledkem proud energie – kontinuální disipace energie (nevratná změna, například z teplejšího na studenější). Redukce gradientů je stejně důležitou zásadní vlastností termodynamiky, jako samotná změna v entropii. Soustředění pozornosti na snižování (destrukci) gradientů, nejenom na vzrůst entropie, umožňuje úplnější analýzu těchto systémů. Pohled na svět se změní a je úplnější, když ho sledujeme prismatem nevratného zmenšení gradientu a nejenom jako snižování nebo zvyšování entropie. Přesvědčíme se měřením o tom, jak rostliny svými životními projevy snižují rozdíly teplot.

Alfred Lotka (1922) předstihl své vrstevníky o generaci, když chápal život jako disipativní metastabilní proces (zdánlivě/jinak stálý). „I když je život stabilní a chybně chápán jako „věc“, ve skutečnosti je život procesem živeným sluneční energií“. Lotka zdůraznil, že život na Zemi je otevřený systém, je to bioenergetický, biofyzikální a termodynamický jev. Systémy nerovnovážné vypadají jako stálé, neměnné, ale ve skutečnosti jsou „stálým stavem – steady state“ živeným z gradientu. I chemické složení Země je takovým metastabilním stavem. Není stálé proto, že se dostalo do nejpravděpodobnějšího stavu, ale proto, že se neustále tvoří nové látky i organismy a staré mizí. Jednoduchým připodobněním je pingpongový míček vznášející se v proudu vzduchu vycházejícího z vysavače. Výška míčku závisí na síle proudu vzduchu, když vysavač vypneme, míček spadne. Podobné je to s organismy, „nespadnou“ do rovnováhy, protože dostávají stále novou a novou energii. Je to energie Slunce a prvotním gradientem je rozdíl teplot mezi Sluncem (6000 K) a Zemí (c. 300 K). Hovoříme o rovnovážném stavu ekosystémů, je to ovšem dynamický stav zásobený sluneční energií, díky které mohou ekosystémy existovat a rozvíjet se.

Prigogine rozpracoval termodynamiku systémů vzdálených rovnováze. Tyto systémy energii zachycují a přeměňují, rozdělují a pohánějí tak i toky látek.

Popularizoval termín „disipativní struktura“ zavedený Lotkou. Disipativní struktury jsou nerovnovážné, otevřené a dynamické systémy. Nalézají se uvnitř gradientu, ze kterého si berou energii, tím gradient snižují a energii degradují. Prakticky to znamená, že snižují rozdíly teplot, rozdíly koncentrací. Disipativní systémy se přeměnou energie (snižováním gradientů) zdokonalují (sebe-organizují). Prigogine a Stengers (1985) dále popsali, jak tyto systémy „tlačené“ od rovnováhy procházejí náhlými přeměnami (bifurkace) z jednoho stavu do druhého.

Organizovaný systém využívá energii gradientu rychleji, příkladem je vodní vír. Voda z lahve odtéká pomalu („odbublává“), odtok vody úzkým hrdlem je zdržován vzduchem postupujícím „po bublinách“ do vyprazdňovaného prostoru láhve. Když lahví zatočíme tak, aby se vytvořil vír, odtok se výrazně zrychlí, gravitační potenciál (gradient) tedy zmizí rychleji. „Tornádo“ v lahvi je efektivnější nežli lineární pohyb. Skutečná tornáda, bouře, hurikány jsou disipativními procesy a jsou poháněny gradienty tlaku. Jde o vztah tlak – objem – teplota, popsaný již v základech termodynamiky. Nikde jinde v přírodě se síla gradientu neprojeví tak mocně jako v tornádech a hurikánech. Ve středu tornáda stoupá vzduch prudce vzhůru a barometrický tlak klesá. Gradient tlaku napříč tornádem je tak obrovský, že když tornádo přechází obydlené oblasti, domy explodují. Dům má tendenci vyrovnávat svůj tlak s klesajícím vnějším tlakem, a proto exploduje. Hurikány vznikají nad teplým oceánem. Gradient, který žene hurikán, tj. rozdíl teploty mezi povrchem oceánu a chladným vzduchem v atmosféře, je 27 °C a více.

Zde Schneider a Sagan (2005) výstižně formulují: *„Termodynamika života je disciplínou nerovnovážné termodynamiky, zůstává ovšem esoterickou, tedy veřejnosti neznámou disciplínou provozovanou úzkou skupinou zasvěcených. Věda, poznání, a hlavně výuka je rozdělena na obory, které často nekomunikují. Navíc mnoho biologů tvrdí, že fyzika nepřispívá přímo k poznání života. Mnoho biologů, včetně evolučních biologů, ignoruje fyziku a termodynamiku. To, co nazýváme životem, není něco vzdáleného materii ani to není pouhá živá hmota, ale je to informační a energetický proces na povrchu Země“.*

## 4.2. Rostliny a ekosystémy v pojetí termodynamiky otevřených systémů

Lindeman (1942) klasifikoval organizmy podle trofických hladin na autotrofy (primární producenty), herbivory (býložravce), karnivory (masožravce) a ukázal, že jen určitý podíl energie přechází do dalšího patra potravní pyramidy. Toto je biologický příklad druhého zákona termodynamiky. Na každé úrovni přechodu (například zooplankton živící se fytoplanktonem) se velká část energie biomasy mění v teplo. Sluneční energie navázaná do rostlinné biomasy fotosyntézou degraduje v potravním řetězci v teplo. Potravní pyramida má spoustu uskladněné energie na dolní úrovni (v rostlinách) a málo energie na vrcholu pyramidy (dravci). Lindeman ukázal, že energie se nikdy zcela nevyužije v dalším, vyšším patře potravní pyramidy. Taky proto neexistuje více pater trofické pyramidy nežli 5 až 6. Účinnost přeměny (přenosu) energie mezi stupni potravní pyramidy (potravního řetězce) je okolo 10 %, zatímco 90 % se ztrácí jako teplo.

Margalef (1968) studoval ekologickou sukcesi vodních ekosystémů a poukázal na mezeru mezi pohlcením sluneční energie a jejím pozdějším uvolněním. Formuloval, že doba, po kterou se energie zadržuje v ekosystému, se prodlužuje s vyspíváním ekosystému. Prosazoval myšlenku metabolického poměru mezi primární produkcí a celkovou biomasou. Studoval, jak vysoká primární produkce je nutná k udržení jednotky biomasy v ekosystému. Tento poměr považoval za měřítko účinnosti ekosystému. Rostoucí ekosystém je jako dítě a adolescent, spotřebovává hodně potravy ve svém raném vývoji. Později biomasa nepřirůstá a systém je energeticky účinný, organizovaný, dospělý. Hutchinson (1978) a jeho následovníci nepohlíželi na život jako na organizmy nebo populace organizmů, spíše život považovali za „tekutá společenstva“ vyměňující látky a energii, vytvářející funkční struktury, které jsou více než pouhé jednotlivé organizmy. Podobně Margalef tvrdil, že: populace musíme považovat spíše za proces nežli za stav.

James Lavelock dostal nabídku od NASA (Národní úřad pro letectví a vesmír, USA), aby se podílel na vývoji přístroje pro detekci života na Marsu. NASA plánovala vyslat vesmírnou loď na Mars, která bude hledat život v místě svého přistání. Počítalo se s řadou experimentů prováděných s půdou přímo na místě. Lovelock si kladl obecnější otázku: „Jak si můžeme být jisti, že odhalíme život na Marsu, pokud vůbec nějaký je, když budeme využívat testy, které vycházejí

z vlastností života na Zemi?“ Jak píše Capra (2004), Lovelock si uvědomil skutečnost, že všechny živé organismy přijímají energii a látky a zbavují se odpadních produktů. To je nejobecnější charakteristikou života, kterou mohl definovat. Pokud je na Marsu život, měla by atmosféra Marsu prokázat některé zvláštní kombinace plynů, zjistitelné též na Zemi. Složení atmosféry Země a Marsu se velmi liší. Oproti Zemi je na Marsu velice málo kyslíku, naopak vysoké koncentrace oxidu uhličitého a žádný metan. Metan a kyslík spolu ochotně reagují, jejich přítomnost obnovují právě živé organismy. V naší atmosféře je směs plynů vzdálených od chemické rovnováhy, zatímco na Marsu se ustavila dokonalá chemická rovnováha – reakce doběhly do konce. Lavelock (1988) tak vyloučil existenci života na Marsu.

Jedním z nejzřetelnějších rysů sukcese ekosystémů je vzestup množství biomasy v čase. Biomasa se obvykle měří v gramech sušiny na $m^2$, často se její množství vyjadřuje jako množství vázaného uhlíku. Množství biomasy na $m^2$ v počátečních fázích lučního porostu je podstatně nižší, nežli množství biomasy na $m^2$ v dospělém lese; rozdíl jsou gramy vůči stovkám kg. Čím vyšší živá biomasa ekosystému, tím více energie se v ekosystému pohltí, tím více sluneční energie (fotonů vysoké energie) se využívá (degraduje) v procesech jako je transpirace, fotosyntéza a další reakce metabolismu. Růstová křivka biomasy se ustaluje z několika příčin: genetická predispozice a zejména nedostatek světla, vody, živin v hustém porostu. Pokud uvažujeme ekosystém jako termodynamický disipativní systém, potom je takový systém v klimaxu v jakoby stálém stavu a je uzpůsoben k degradaci dostupných energetických gradientů, jak autotrofním, tak heterotrofním způsobem. Ekosystém je obrovským reduktorem gradientů. Gradienty/rozdíly jsou udržovány přicházející sluneční energií.

Vyvinuté ekosystémy recyklují vodu a živiny v propletených potravních sítích. Látková výměna „poháněná sluneční energií“ mezi organismy probíhá na krátké vzdálenosti, a je zprostředkována vodou. Takové ekosystémy mají vyrovnané teploty, probíhá v nich nesčetně životních pochodů a odtéká z nich čistá voda. „Děravé ekosystémy“, tzv. časná stádia „r“ ekosystémů většinou ztrácejí živiny, zatímco vyvinuté/dospělé ekosystémy si udržují své zdroje uvnitř systémů. Deštný les recykluje většinu svých látek a energie a využívá vlastní zdroje vody a živin. Podobně se chová vyvinutý mokřad nebo klimaxový les mírného pásma (Ripl 2003). Oběh a recyklace jsou všudypřítomné procesy ekosystémů.

Lesy a stromy jsou hlavní technologií biosféry na redukci gradientů. Úloha, jakou les a stromy hrají v přeměnách sluneční energie a zejména redukci gradientů, nebyla dosud doceněna. Vztah mezi sluncem a stromem je asi tím nejlepším názorným příkladem našeho termodynamického paradigmatu. Stromy „sahají po slunci" a optimálně pohlcují energii gradientu mezi sluncem a chladnou zemí. „Rostliny jsou snad tím dosud nejpokročilejším vyvinutým nástrojem pro využití (degradaci) přicházejícího slunečního záření. K likvidaci gradientů mají vyvinuty různé struktury, které zároveň udržují v chodu procesy toku látek a přeměn energie. Lze si představit, a musíme si to jen představit, protože tento proces nelze pozorovat pouhým okem, že náš strom uprostřed pole je gigantickou disipativní strukturou pohlcující sluneční záření a degradující většinu této energie do latentního tepla výparu. Je to obrovská vodní fontána, ze které prýští voda ve formě skupenského tepla vodní páry" (Schneider et Sagan 2005). Je pozoruhodné, že necelé 1 % sluneční energie rostliny využívají na vytvoření svého malého těla, které potom řídí obrovský disipativní proces. Na vytvoření 1 kg rostlinné biomasy (vyjádřeno v sušině) se odpaří přes průduchy až několik set kilogramů vody, vyrovnají se teploty a tlak. Při vytvoření 1 kg rostlinné biomasy rostlina vypařila přes listy (transpirovala) několik stovek litrů vody a ochladila sebe a své okolí v součtu o několik stovek kWh (Pokorný et al. 2010). Trvalá vegetace je podmínkou vyrovnávání teplot a tlumení klimatických extrémů. Ukážeme, že vegetace svojí transpirací přitahuje vodu a ztráta trvalé vegetace vede k přehřívání krajiny a vysychání.

## 4.3. Evapotranspirace a další procesy přeměn energie v ekosystémech

Způsob distribuce slunečního záření v ekosystémech, které se vyznačují vysokým množstvím strukturované živé biomasy dobře zásobené vodou a v ekosystémech, které se vlastnostmi blíží fyzikálním povrchům, tj. s nízkým množstvím biomasy, se navzájem liší. Důvodem je interakce slunečního záření s molekulami vody.

Voda se jako energetický procesor a dynamická součást krajiny podílí na distribuci sluneční energie na úrovních:

- fyzikálních procesů – evapotranspirace a kondenzace,
- biologických procesů – fotosyntéza a dýchání,
- chemických procesů – slučování a rozklad

Wilhelm Ripl (1995, 2003) navrhl holistický ETR (Energy – Transport – Reaction) model, popisující interakci těchto procesů. Hlavním hybatelem těchto procesů je gradient sluneční energie. Procesy jsou zpomalovány v zimě, kdy je její příkon nižší, naopak jsou urychlovány v létě. Stejná fluktuace se objevuje mezi dnem a nocí. Voda je pro tyto procesy nezbytná.

**1) Fyzikální proces výpar (evaporace) a srážení (kondenzace) vody**

Skupenské výparné teplo vody udává, kolik energie je potřeba dodat k výparu 1 kg vody. Skupenské výparné teplo vody je při běžné teplotě 20 ˚C rovno 2,45 $MJ.kg^{-1}$. To je přibližně 0,68 kWh (přepočet 1 kWh= 3600 kJ, 2 450 : 3600 = 0,68 kWh).

Při výparu 1 litru vody je tedy ve vodní páře „uschováno“ přibližně 0,68 kWh sluneční energie (latentní teplo výparu = skryté neprojevující se teplo).

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 kg vody se vytvoří 1245 litrů vodní páry (standardní molární objem $Vm=22{,}414\ dm^3$ při 0 ˚C a normálním tlaku), 1 kg vody obsahuje 55,55 mol vody. 1 litr vody má při teplotě 4 ˚C a normálním tlaku vzduchu hmotnost 0,9985 kg.

Molární hmotnost vody je 16+2 = 18 g. Při výparu vody tlak vzduchu roste, při kondenzaci vodní páry na vodu kapalnou tlak vzduchu klesá.

Vegetace zásobená vodou vypaří za slunného dne několik litrů vody z jednoho $m^2$. Každý vypařený litr vody představuje tedy spotřebu 0,68 kWh, což je kapacita běžné autobaterie. Transpirací (vypařování vody rostlinou) a evapotranspirací (vypařování vody porosty) se budeme zabývat v následujících kapitolách.

V přírodě probíhá též běžně tuhnutí vody v led a tání zpět na vodu, patří sem i tvorba jinovatky na listech rostlin. Skupenské teplo tání ledu na vodu kapalnou je 334 $kJ.kg^{-1}$. Při tuhnutí vody v led se teplo uvolňuje, při tání ledu/jinovatky se teplo spotřebovává.

**Akumulace tepla** se zjišťuje z měrného tepla (měrná tepelná kapacita, specifické teplo), což je množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 ºC. Hodnoty měrného tepla najdeme běžně v tabulkách. Pro praktické účely nás ovšem zajímá

měrné teplo jednotkového objemu látky, protože půda je několikrát těžší nežli voda. Pro srovnání vyjadřujeme akumulaci tepla jako energii k ohřátí jednotkového objemu ($dm^3$) o 1 °C. Na ohřátí 1litru ($dm^3$) vody o 1 °C je potřeba 4,2 kJ, na ohřátí 1 $dm^3$ vlhké půdy o 1 °C je potřeba 3,6 kJ a na ohřátí suché půdy, betonu, žuly je potřeba 2 – 2,8 kJ. Na ohřátí 1 $dm^3$ železa je potřeba 3,6 kJ, tedy méně nežli na ohřátí 1 $dm^3$ vody. Na ohřátí 1 kg vody o jeden stupeň (°C, K) je tedy potřeba přibližně 4,2 kJ. Měrné teplo suché půdy se udává 0,8 kJ/kg a půdy nasycené vodou 1,5 kJ/kg. Měrná hmotnost půdy je okolo 2,6 kg/$dm^3$. Jeden $dm^3$ mokré půdy má tedy nižší teplotní kapacitu (3,9 kJ) nežli 1dm (kg) vody (4,2 kJ).

**2) Biologické procesy – fotosyntéza a dýchání**

Rozklad vody na kyslík a vodík a slučování vodíku a kyslíku na vodu jsou provázeny spotřebou/uvolněním 285,8 $kJ.mol^{-1}$ (79,4 $Wh.mol^{-1}$), tj. 4,4 kWh na jeden litr vody. V přírodě se voda rozkládá na vodík a kyslík fotolýzou při fotosyntéze. Kyslík je vylučován do atmosféry a vodík enzymatickými reakcemi redukuje oxid uhličitý na cukry. Dýchání (respirace) je potom procesem opačným, při kterém se cukry oxidují kyslíkem, uvolňuje se energie a vzniká oxid uhličitý a voda.

Pokud převažuje v biomase celulóza a škrob, je její energetický obsah roven 16 – 18 $MJ.kg^{-1}$ , u olejnatých semen dosahuje průměrně 26 $MJ.kg^{-1}$.

V přirozených porostech za optimálních podmínek v mírném pásmu lze pro přibližná stanovení počítat s roční produkcí sušiny do 1 $kg.m^{-2}$ a denní primární produkcí do 10 $g.m^{-2}$. Rychlost fotosyntézy za optimálních podmínek vyjádřená v energetických jednotkách může dosahovat hodnot několika $W.m^{-2}$. Produkci 10 $g.m^{-2}.den^{-2}$ odpovídá průměrný energetický tok 4 $W.m^{-2}$ (Pokorný et al. 2010). Množství sluneční energie vázané do biomasy fotosyntézou se stanovuje z energetického obsahu biomasy. Je nutné rozlišovat nadzemní a podzemní biomasu, která se od té nadzemní stanovuje velmi obtížně, a proto bývá podhodnocena. V celosvětovém měřítku byly spolehlivé údaje o primární produkci získány v Mezinárodním biologickém programu (Cooper 1975).

**3) Chemické procesy**

Rozpouštění a srážení, redukce a oxidace, rozklad a slučování jsou provázeny uvolňováním nebo spotřebou energie. Hodnoty změn obsahu tepla (entalpie) pro základní chemické reakce uvádí například Atkins et de Paula (2010).

Po odvodnění mokřadů, vykácení nebo uschnutí lesa se půda provzdušní a nastává rozklad organických látek a oxidace anorganických sloučenin zprostředkovaná bakteriemi. Například oxidace amonného dusíku na dusičnany, sulfidu na sírany. Tyto procesy jsou provázeny uvolňováním protonů (okyselování) a následným rozpouštěním sloučenin kovů alkalických zemin. Výsledkem je zvýšený odtok iontů vápníku, hořčíku a draslíku z půdy i zvýšená koncentrace dusičnanů a síranů. Za těchto podmínek probíhá též oxidace železnatých iontů na železité a manganu na oxid manganičitý. V ekosystémech jsou tyto procesy zprostředkovány bakteriemi a nutná je přítomnost vody, jsou provázeny změnami pH a přeměnami energie (Pokorný et al. 2016; 2017a,b). Fyzikální chemie studuje toky energie jednotlivých reakcí a jejich energetické bilance jsou kvantifikovány jako kladná (energie se spotřebovává) nebo záporná (energie se uvolňuje) entalpie. Známe je pod pojmem endotermická a exotermická reakce. V ekosystémech jde o značné toky energie a návaznou produkci nebo spotřebu tepla. Ekosystémové studie se těmito toky energií soustavně nezabývají.

Z uvedeného je patrné, že voda v ekosystémech přeměňuje (transformuje) sluneční energii třemi základními způsoby: a) se změnou jejího skupenství, b) rozkladem na vodík a kyslík a c) zpětnou reakcí na vodu a akumulací tepla. Proto jsou rozdíly teplot ve vodním prostředí a ve vegetaci dobře zásobené vodou nižší nežli v prostředí bez vody. Navíc, vodní pára vytváří mraky, které odrážejí a absorbují sluneční energii a tlumí příkon krátkovlnného slunečního záření i tok tepla zpět do atmosféry. Distribuci sluneční energie mezi povrchem Země a atmosférou lze měřit, což si ukážeme v následující kapitole.

## Literatura

Atkins, P., & de Paula, J. (2010). Physical Chemistry, 9th ed. W.H. Freeman and Company, New York

Capra, F. (2004). Tkáň života. Nová syntéza mysli a hmoty. Academia Praha. Originál: The Web of Life, A new synthesis of mind and matter, HarperCollins Publishers 1996, 320 s.

Cooper, J.P. (1975). Photosynthesis and Productivity in Different Environments, Cambridge University Press, London

Hutchinson, G.E. (1978). An Introduction to population ecology, New Haven: Yale University Press, 271 s.

Kodíček M., Karpenko V. (2000). Biofyzikální chemie, Academia Praha, 337 s.

Lavelock, J.E. (1988). The ages of Gaia: A biography of our living Earth. New York: W.W.Norton, 252 s.

Lindeman, R.L. (1942). The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology,* 23, s. 399 – 418.

Lotka, A.J. (1922). Contribution to the energetics of the evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA,* 8, s. 148 – 154.

Margalef, R. (1968). Perspective in ecological theory. Chcago: University of Chicago Press, 111 s.

Mikulecky, D. (1993). Application of network thermodynamics to problems in biomedical engineering. New York: New York University Press.

Pokorný, J., Brom, J., Čermák, J., Hesslerová, P., J., Huryna, H., Nadezhdina, N., a Rejšková, A. (2010). Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal on Water*, 5(4), s. 311 – 336.

Pokorný, J., Květ, J., Rejšková, A., a Brom, J. (2010). Wetlands as energy dissipating systems. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology,* 37, 1299-1305

Pokorný, J., Hesslerová, P., Huryna, H., a Harper, D. (2016). Indirect and direct thermodynamics effects of wetland ecosystems on climate. In: Vymazal, J. (ed.): Natural and Constructed Wetlands. Nutrients, heavy metals and energy cycling, and flow. Springer, s. 91 - 108.

Pokorný, J., Hesslerová, P., Huryna, H., a Harper, D. (2017a). Nepřímý a přímý termodynamický vliv mokřadů na klima – část 1. *Vodní hospodářství*, 67, s. 2 -5.

Pokorný, J., Hesslerová, P., Huryna, H., a Harper, D. (2017b). Nepřímý a přímý termodynamický vliv mokřadů na klima – část 2. *Vodní hospodářství*, 67, s. 21 – 24.

Prigogine, I., Stengers I. (1985). Order out of Chaos, man´s new dialogue with nature, Flamingo, London, 349 s.

Ripl, W. (1995). Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy-transport-reaction (ETR) model. *Ecological Modelling,* 78, s. 61-76.

Ripl, W. (2003). Water: the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 358(1440), s. 1921-1934.

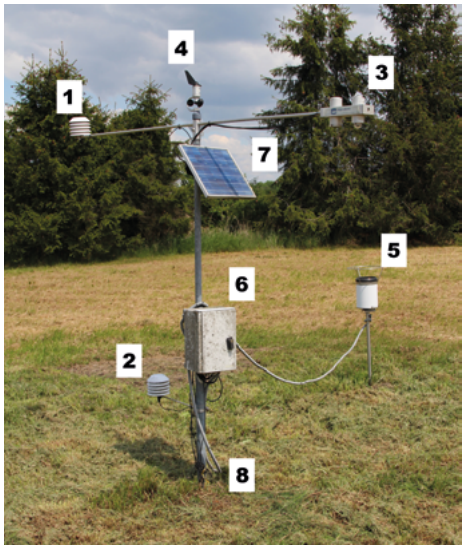
Schneider, E.D., a Sagan, D. (2005). Into the cool (Energy Flow, Thermodynamics and Life) The University of Chicago Press, 378 s.

Schrödinger, E. (1944). What is Life? The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press. 92 s.

# 5. Sluneční záření: denní chod krátkovlnného a dlouhovlnného záření za jasného a oblačného dne

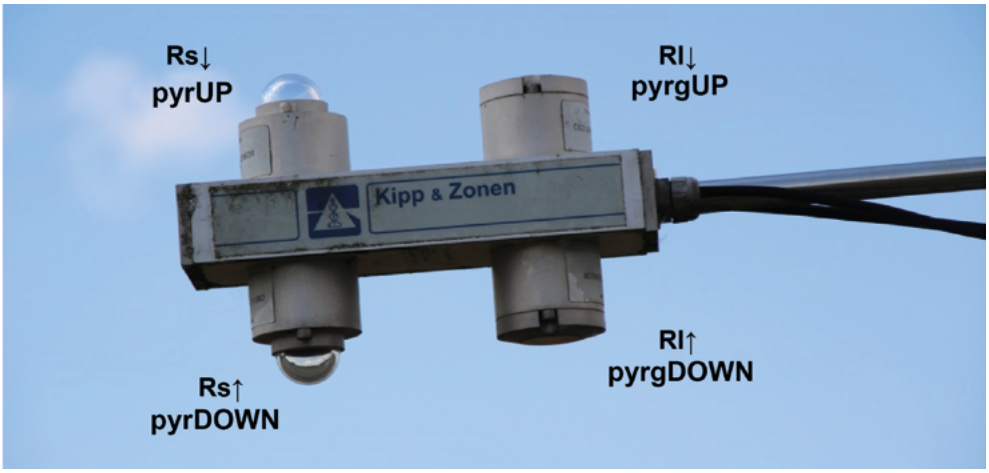
## 5.1. Metodika měření a popis modelové lokality

Pro pochopení přeměn sluneční energie jsme na pokosenou louku v lokalitě Domanín u Třeboně umístili meteorologickou stanici s automatickým záznamem dat v desetiminutovém intervalu a analyzujeme data z několika modelových dnů: jasno, polojasno a zataženo z konce dubna až konce června 2020 a konce června 2017, 2019. Stanice (obr. 5.1) je osazena netradiometrem, který měří dopadající i odražené sluneční záření v krátkovlnné (pyranometr 305-2800 nm) i dlouhovlnné (pyrgeometr 4500 - 42 000 nm) oblasti spektra. Radiační (zářivý) tok je vyjádřen ve wattech na metr čtvereční ($W.m^{-2}$). Měřena je také teplota tělesa radiometru, což je důležitá vztažná hodnota pro výpočet toku dlouhovlnného záření vůči zemi a vůči obloze. Dále jsme měřili teplotu vzduchu a relativní vlhkost vzduchu (rH) ve 2 m a 0,3 m nad porostem kombinovaným čidlem RVT 11 umístěným v radiačním krytu a teplotu půdy Pt teploměrem v hloubce 5 cm.




1. Čidlo teploty a rH 2 m
2. Čidlo teploty a rH 0,3m
3. Netradiometr
4. Anemometr
5. Člunkový srážkoměr
6. Stanice s přenosem dat
7. Fotovoltaický panel
8. Půdní teploměr

(rH = relativní vlhkost/ humidita)




**Obr. 5.1** Meteostanice v Domaníně a detail netradiometru s označenými čidly Rs↓(PyrUP), Rs↑ (PyrDOWN) pro měření slunečního (krátkovlnného záření) a čidly Rl↓(PyrgUP), Rl↑(PyrgDOWN) pro měření dlouhovlnného záření (tepla) a dalších meteorologických prvků. Schema radiační bilance porostu viz Obr. 7.2.

### 5.1.1. Sluneční záření (radiace)

Měřili jsme čtyři následující toky záření (radiační toky), čidla jsou popsána na obr. 5.1.

- dopadající krátkovlnné globální záření (PyrUP, Rs↓) na vodorovnou plochu (radiační tok v $W.m^{-2}$), měřené pyranometrem (305–2800 nm; viditelné a blízké infračervené záření), orientovaným horizontálně do nadhlavníku ve výšce 2 m nad travnatým posekaným povrchem. Měřenou hodnotu globálního záření ovlivňuje roční období, tj. úhel dopadu a délka dráhy paprsku atmosférou, oblačnost a jiná znečištění atmosféry, která pohlcují sluneční záření.
- odražené krátkovlnné záření (PyrDOWN, Rs↑). Měří se totožným čidlem, pyranometrem (305-2800 nm) umístěným ve výšce 2 m nad porostem a orientovaným směrem k zemi. Rozdíl hodnot dopadající a odražené radiace udává, kolik energie, dopadající ze Slunce na zemský povrch, vstupuje do fyzikálních a biologických pochodů na rozhraní porost (nebo půda) – atmosféra. Nejčastěji je tato hodnota vyjádřena pomocí podílu A (albedo), což je poměr mezi odraženým a dopadajícím zářením. Albedo běžně

v porostech dosahuje hodnot okolo 0,2, což znamená, že se okolo 20 % dopadající krátkovlnného slunečního záření odráží.

- zářivý (radiační) tok (PyrgUP, Rl↓) je energetická výměna mezi čidlem (radiometrem) a oblohou ve spektrální oblasti 4500–42 000 nm (dlouhovlnné resp. tepelné záření). Tato hodnota slouží spolu s teplotou čidla (radiometru) k výpočtu zdánlivé (efektivní) radiační teploty oblohy s využitím Stefanova Boltzmannova zákona. Měřená hodnota toku tepla (dlouhovlnného záření) vůči obloze bývá většinou záporná, protože obloha bývá chladnější než čidlo a nabývá hodnot -200 $W.m^{-2}$ i méně. Jasná obloha má efektivní teplotu pod 0 °C. Pokud radiometr není vyhřívaný, je nezbytné pro interpretaci sledovat teplotu rosného bodu, abychom eliminovali ta měření, kdy na čidle zkondenzuje voda, která je pro teplotní záření nepropustná a zkreslí výsledek měření.
- zářivý (radiační) tok (PyrgDOWN, Rl↑) je energetická výměna mezi čidlem a povrchem porostu (půdy) ve spektrální oblasti (4500–42 000 nm; tepelné záření). Tato hodnota spolu s teplotou čidla (radiometru) při využití Stefanova Boltzmannova zákona slouží k výpočtu radiační teploty povrchu, v našem případě pokoseného trávníku. Vzhledem k tomu, že čidlo je umístěno ve výšce 2 m nad povrchem, kde je teplota vzduchu blízká teplotě povrchu, nabývá měřené tepelné záření jak kladných, tak záporných hodnot v rozmezí několika desítek $W.m^{-2}$.

### 5.1.2. Teplota

Při vyhodnocení dat se setkáváme se třemi typy teplot:

a. Teplota tělesa – přímo měřená kontaktním teploměrem (těleso radiometru, půda); teplota termodynamická tzn., jsou vyrovnány teploty tělesa a teploměru.
b. Teplota vzduchu měřená v radiačním krytu ve výšce 2 m teploměrem, jehož teplota je vyrovnaná s teplotou vzduchu
c. Radiační (jasová) teplota povrchu – vypočítaná z naměřených energetických toků. Tuto teplotu lze měřit též přímo IR teploměrem, bezkontaktně.

Více informací o termodynamické a radiační teplotě je uvedeno v kapitole „Teplota krajiny a její měření pomocí dat DPZ“.

**Tvz 2 m** je teplota vzduchu ve 2 m nad zemí, měřená kombinovaným čidlem RVT 11 pro měření relativní vlhkosti a teploty, kde teplota je měřena odporovým čidlem Pt 100. Čidlo je umístěno v radiačním krytu, který jej chrání před přímým osluněním, které by mělo za následek jeho ohřátí. Teplota vzduchu je dána teplotou povrchu a prouděním vzduchu. Teplota povrchu je dána jeho pohltivostí, odrazem (albedo), výparem vody a tokem tepla do půdy a vůči obloze.

**Tpyr** je teplota tělesa netradiometru. Její hodnotu určuje především teplota okolního vzduchu ale také vzájemná radiační interakce s okolím. Těleso netradiometru je v podstatě zavíčkovaný hliníkový eloxovaný profil, který se ve dne ohřívá dopadajícím slunečním zářením, ale současně také energii vyzařuje vůči obloze i zemskému povrchu. Výsledná teplota je tedy dána radiací, oblačností, povrchem atd., ale především je stejná pro všechna 4 čidla (2 pyranometry, 2 pyrgeometry) a můžeme k ní vztáhnout výpočet radiační teploty povrchu trávníku a oblohy.

**Tr obl** je teplota oblohy, vypočítaná z teploty radiometru a energetické výměny, tedy naměřeným tokem dlouhovlnného záření (Rl↓,PyrgUP) mezi radiometrem a oblohou. Počítá se podle Stefanova Boltzmannova zákona.

$$I = \varepsilon \sigma T^4$$

kde $\varepsilon$ je emisivita (*poměrná hodnota k vyzařování absolutně černého tělesa, viz kapitola 13)*

$\sigma$ – Stefanova-Boltzmannova konstanta $5{,}6704.10^{-8}\ W.m^{-2}K^{-4}$

$I$ – celková intenzita záření (podíl výkonu a plochy; $W.m^{-2}$), v našem případě naměřená hodnota dlouhovlnného záření

$T$ – termodynamická teplota (K), v našem případě teplota radiometru/čidla.

Z dopadajícího záření vypočítáme rozdíl teploty mezi zářičem (oblohou) a radiometrem

$$\Delta T = \sqrt[4]{I / \varepsilon * \sigma}$$

Vzhledem k tomu, že známe teplotu radiometru Tpyr a hodnotu radiace PyrgUP, dokážeme vypočítat radiační teplotu oblohy Tr obl. Pro zjednodušení emisivitu bereme $\varepsilon$=1, což je blízko skutečnosti.

Potom Tr obl = (T pyrg+273)^4+PyrgUP/0,0000000567)^0,25) - 273 (°C)

**Tr pov** je radiační teplota povrchu, obdobně vypočítaná z teploty radiometru a energetické výměny (tokem dlouhovlnného záření Rl↑,PyrgDOWN) mezi radiometrem a travnatým povrchem. Počítá se podle Stefanova Boltzmannova zákona.
Potom Tr pov = (T pyrg+273)^4+pyrgDOWN/0,0000000567)^0,25) - 273 (°C)

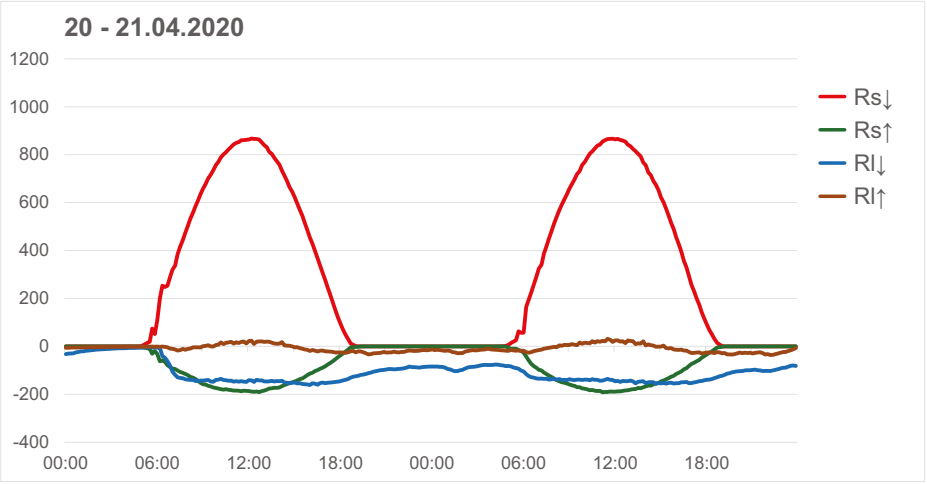
## 5.2. Příklady měření denního toku slunečního krátkovlnného a dlouhovlnného záření

Pro hodnocení vztahu vodní páry v atmosféře (oblačnosti) a radiační bilance jsme vybrali několik modelových příkladů zohledňujících stupeň oblačnosti i příkon slunečního záření. Vybrali jsme jasné dny 20. a 21. dubna 2020, kdy přicházelo na vodorovnou plochu až 865 $W.m^{-2}$, avšak v noci byl mráz, který zničil květy meruněk a poškodil i další ovocné stromy a vinohrady. Dále uvádíme příklady z oblačného dne a dne, kdy byla obloha po celý den zatažená. Z doby kolem letního slunovratu uvádíme, jak 21. 6. 2020, kdy bylo zataženo, tak příklad jasného dne 20. 6. 2017. Pro srovnání uvádíme též příklad zimního jasného dne 1.–2. 1. a zimního dne se zataženou oblohou 28. 12. 2019. Tab. 5.1 obsahuje přehled modelových případů.

**Tab. 5.1** Přehled dnů, pro které uvádíme zhodnocení radiační bilance, tj. toků krátkovlnného a dlouhovlnného záření. Zohledněny byly různé meteorologické podmínky.

| Datum | Obloha | Specifikum |
|---|---|---|
| 20. - 21. 4. 2020 | jasno | Noční mráz |
| 6. 5. 2020 | střídavá oblačnost | |
| 31. 5. 2020 | zataženo | |
| 20. - 21. 6. 2020 | zataženo | Letní slunovrat, maximální příkon záření |
| 20. 6. 2017 | jasno | Blízko letního slunovratu, maximální příkon záření |
| 28. 12. 2019 | zataženo | Blízko zimního slunovratu, minimální příkon záření |
| 1.– 2. 1. 2020 | jasno | Blízko zimního slunovratu, minimální příkon záření |

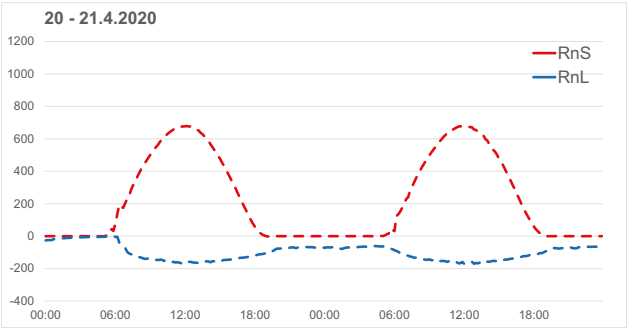
### 5.2.1. Záření (W.m$^{-2}$) a teploty (°C) za slunného, jasného dne (20. 4. a 21. 4. 2020)



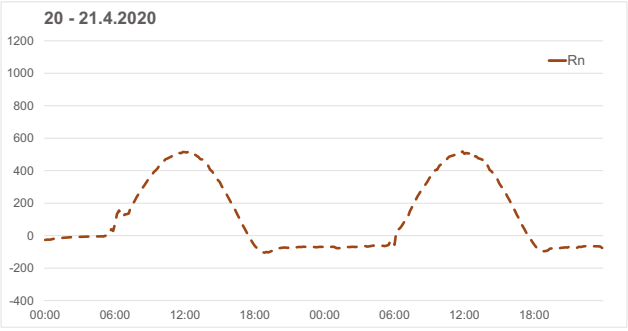

**Obr. 5.2a** Denní chod přicházejícího (Rs↓, PyrUP ) a odraženého (Rs↑, PyrDOWN) slunečního záření (W.m$^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou (Rl↓, Pyrg UP) a dále mezi čidlem a povrchem Země (Rl↑, PyrgDOWN).

Pravidelný a hladký průběh hodnot přicházejícího krátkovlnného záření (Rs↓, PyrUP) odpovídá dennímu chodu slunce nad obzorem a ukazuje na bezoblačnou jasnou oblohu, kdy v daný den měřenou hodnotu ovlivňuje především úhel dopadu slunečních paprsků. Maximální hodnota 865 W.m$^{-2}$ byla dosažena v pravé astronomické poledne, kdy je úhel dopadu paprsků slunečního záření nejblíže kolmici. Spojitý průběh odraženého záření (Rs↑, PyrDOWN) odpovídá chodu přicházejícího globálního záření ($R_S$↓, PyrUP) a dosahuje hodnot do 200 W.m$^{-2}$. Za bezoblačného počasí dne 21. 4. 2020 se hodnoty toku tepla/dlouhovlnného záření (Rl↓,PyrgUp) mezi tělesem radiometru a oblohou pohybují v rozmezí 80 až 180 W.m$^{-2}$. Ve dne je tok tepla vzhůru od země do oblohy vyšší (až 180 W.m$^{-2}$) nežli v noci. Pokles v nočních hodinách přičítáme zvýšené relativní vlhkosti vzduchu a tvorbě přízemních mlh, které snižují tok dlouhovlnného záření (tepla) směrem vzhůru a nižší teplotě radiometru.

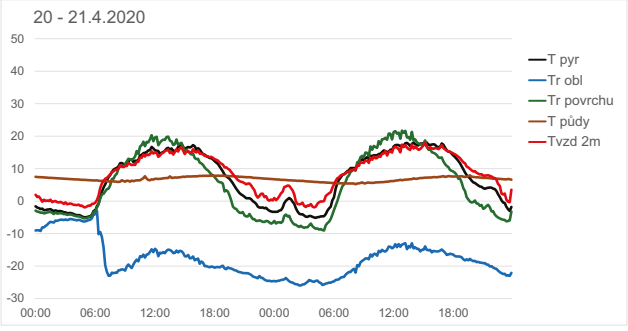
Teplota tělesa radiometru a tedy i v něm umístěných čidel se většinou příliš neliší od teploty porostu a proto Rl↑, PyrgDOWN, tj. měřené tepelné záření mezi radiometrem a porostem nabývá jak kladných, tak záporných hodnot v rozmezí nejvýše několika desítek W.m$^{-2}$.




**Obr. 5.2b** Čisté krátkovlnné záření RnS (sluneční energie přicházející po odečtení sluneční energie odražené) a čisté dlouhovlnné záření RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem Země a oblohou).



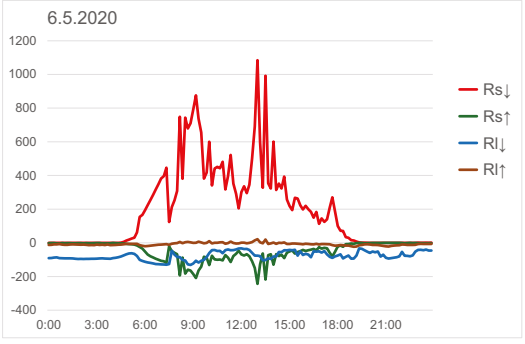

**Obr. 5.2c** Čisté záření (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla" k dalším procesům (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza).



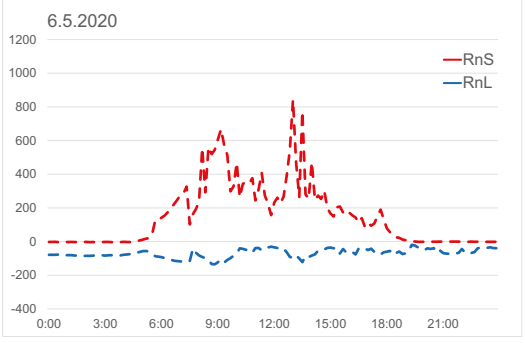

**Obr. 5.2 d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd: teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr: teplota čidla (tělesa radiometru) a Tr obl: radiační (efektivní, zdánlivá) teplota oblohy (- 28 až – 12 °C), vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a oblohou. Teplota půdy je měřena v hloubce 5 cm Pt teploměrem.

V noci 20. 4. 2020, kdy bylo jasno, a teplota klesla pod bod mrazu, došlo k tvorbě jinovatky na pyrgeometru, který vykazoval nulový signál až do odtání okolo 7. hodiny, což se následně projevuje i na radiačních teplotách. Pozoruhodný je noční a ranní pokles teploty povrchu porostu až k -10 °C, tedy hluboko pod bod mrazu. Teplota jasné oblohy se v noci pohybovala okolo -25 °C. Teplota vzduchu měřená stíněným teploměrem ve výšce 2 m klesla jen mírně pod nulu. Porost vyzařoval teplo (dlouhovlnné záření) proti velmi chladné bezoblačné obloze. V této noci zmrzly květy ovocných stromů a mrazem byly poškozeny i plodiny na polích. Teplota povrchu hluboko pod bodem mrazu se neprojevila na teplotě vzduchu ve 2 m, protože chladný vzduch nestoupá vzhůru. Listy a květy mají značnou plochu a nízkou hmotnost, akumulují málo tepla a chladnou rychle proti jasné obloze.

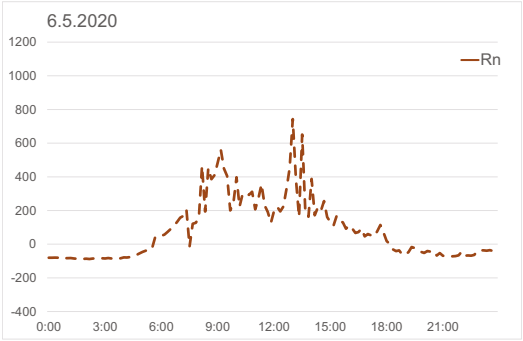
## 5.2.2. Záření (W.m$^{-2}$) a teploty (°C) při střídavé oblačnosti (6. 5. 2020)




**Obr. 5.3 a** Přicházející (Rs↓,PyrUP) a odražené (Rs↑, PyrDOWN) sluneční záření a dlouhovlnné záření odcházející od čidla do oblohy (Rl↓, PyrgUP) a od čidla k zemi (Rl↑,PyrgDOWN).

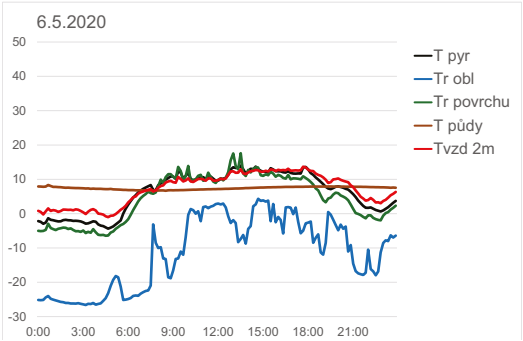



**Obr. 5.3 b** Čisté krátkovlnné RnS (sluneční energie po odečtení sluneční energie odražené) a čisté dlouhovlnné záření RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem Země a oblohou).




.

**Obr. 5.3c** Čisté záření (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla" k dalším procesům (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza).



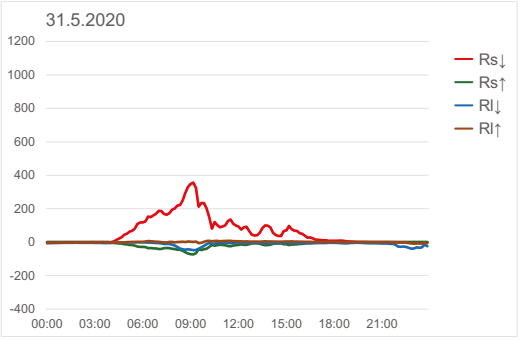

**Obr. 5.3d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd 2m: teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr: teplota čidla (tělesa radiometru) a Tr obl: radiační teplota oblohy (- 25 °C až + 3 °C) a teplota půdy v hloubce 5 cm (T půdy).

Hodnoty přicházejícího slunečního záření ($R_S\downarrow$,PyrUP) ukazují efekt střídavé oblačnosti v průběhu dne. Při porovnání naměřených hodnot s jasným dnem 21. 4. 2020 vidíme pozoruhodný jev: za proměnlivé oblačnosti byla naměřena ve 13:00 hodnota 1084 $W.m^{-2}$, zatímco za jasného dne 21.4, kdy byla obloha bezoblačná, dosáhla maximální hodnota ve 13:00 hodnoty pouze 835 $W.m^{-2}$. Pro vysvětlení se musíme vrátit k principu měření globálního záření. Čidlo (pyranometr), které je meteorologickým normálem, má zorný úhel 180° a kosinovou charakteristiku. To znamená, že načítá signál z celého poloprostoru (obr. 5.1). Zatímco za jasného dne je veškerá energie slunce soustředěna do paprsků přímého

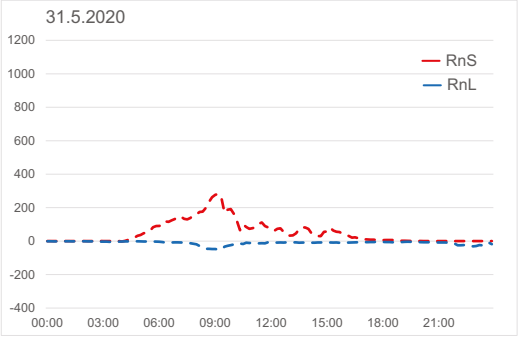
záření a zbytek oblohy dodává pouze malou difuzní část (okolo 50 W.m$^{-2}$). Při proměnlivé oblačnosti občas nastane případ, kdy jsou na obloze mraky částečně propustné pro sluneční záření. Tyto mraky tvoří bílou difuzní matnici vyzařující až 500 W.m$^{-2}$.Pokud se v těchto mracích mezi slunečním diskem a radiometrem objeví díra, potom se na radiometru sečte složka přímá s difuzní a výsledkem mohou být hodnoty, přesahující 1250 W.m$^{-2}$. Odražené sluneční záření (Rs↑, PyrDOWN) opět odpovídá průběhu dopadajícího záření a má cca pětinovou hodnotu. Od krátce sečeného trávníku se tedy odráží přibližně 20 % dopadajícího krátkovlnného slunečního záření. Tepelné vyzařování (Rl↓, PyrgUP) povrchu do oblohy je podstatně nižší než za slunného dne, neboť rozdíl teplot mezi povrchem a mraky je ve srovnání s jasným dnem 21. 4. 2020 malý. Ve dne byl rozdíl teplot mezi oblohou a travnatým povrchem kolem 10 °C, v noci nejvýše 20 °C. Tomu odpovídá maximální tok tepla do oblohy 100 W.m$^{-2}$. Mraky se ohřívají od povrchu země a teploty se vyrovnávají, pouze při rozjasnění se vyzařování tepla vůči obloze zvýší. Přesně řečeno, měříme vyzařování radiometru vůči obloze. Teplota radiometru umístěného 2 m nad porostem je velmi blízká teplotě porostu, radiační výměna mezi nimi je proto nízká, (Rl↑, PyrgDOWN) je nízká.

**Noční teploty oblohy hluboko pod 0 °C (Tr obl) ukazují, že v noci bylo převážně jasno. Tomu odpovídají i noční hodnoty teplot radiometru (pyranometru Tpyr) a travnatého povrchu (Tr pov) pod bodem mrazu. S východem slunce přišla proměnlivá oblačnost a všechny tři hodnoty teplot se vyrovnaly, neboť nepravidelný přísun zářivé energie slunce nestačí na vytvoření větších teplotních rozdílů. Se západem slunce se opět teploty diferencují, protože ustal příkon sluneční energie a na chladnutí mají vliv vlastnosti jednotlivých povrchů. Teplota oblohy (Tr obl) se při oblačnosti přiblížila teplotám povrchů i vzduchu, neboť mraky se zespodu ohřívají tepelným zářením od zemského povrchu a shora jsou izolovány obsahem vody, která tepelné záření nepropustí výše do velmi chladné oblohy.**

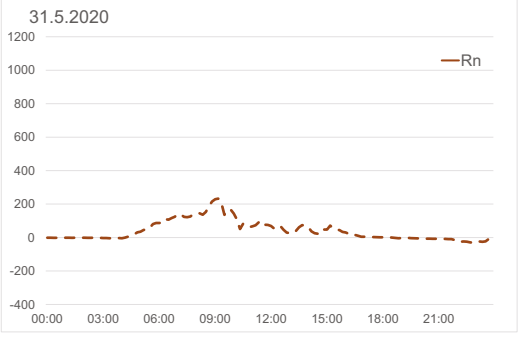
## 5.2.3. Záření (W.m$^{-2}$) a teploty (°C) při zatažené obloze 31. 5. 2020



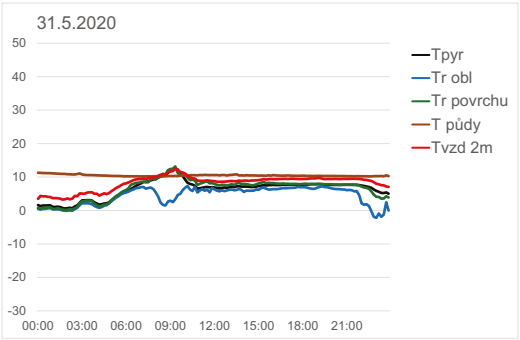

**Obr. 5.4a** Denní chod přicházejícího (Rs↓, PyrUP) a odraženého (Rs↑, PyrDOWN) slunečního záření (W.m$^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou (Rl↓,PyrgUP) a mezi čidlem a povrchem Země (Rl↑, PyrgDOWN).




**Obr. 5.4b** Čisté krátkovlnné RnS (sluneční energie po odečtení sluneční energie odražené) a čisté dlouhovlnné záření RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem Země a oblohou).



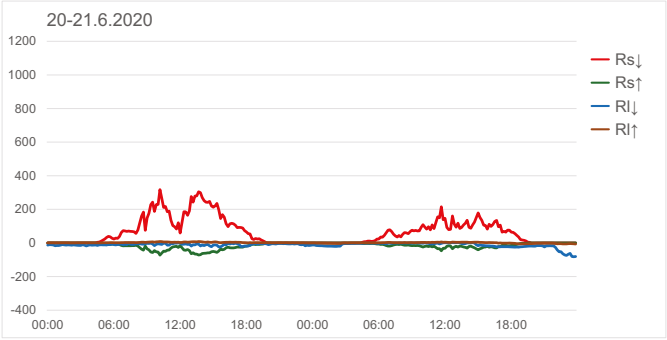

**Obr. 5.4c** Čisté záření (net-radiation), tj. energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla" k dalším procesům (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza).



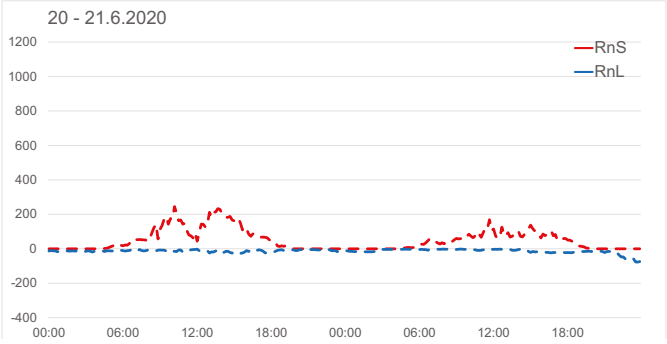

**Obr. 5.4d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd 2m je teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr je teplota čidla (tělesa radiometru) a Tr obl: radiační teplota oblohy, T půdy je teplota půdy v hloubce 5 cm.

Pokud je zataženo, všechny teploty se vyrovnávají, protože příkon dopadající sluneční energie je nízký. Vzhledem k tomu, že je konec jara tak i při částečném vyjasnění oblohy a polovičním příkonu sluneční energie (do 500 $W.m^{-2}$) se travnatý povrch, těleso radiometru i vzduch ohřívají na cca 20 °C. Se západem slunce ustává příkon sluneční energie a povrchy a drobná tělesa chladnou, zatímco teplota půdy v 5 cm hloubce se téměř nemění, protože půda má vysokou tepelnou kapacitu. Při zatažené obloze je pozoruhodná poměrně vysoká teplota oblohy, převážně nad 0 °C. Srovnejme s teplotou jasné oblohy kolem -25 °C ve dnech 21. 4. 2020 a 6. 5. 2020 (Obr. 5.2d, 5.3d).

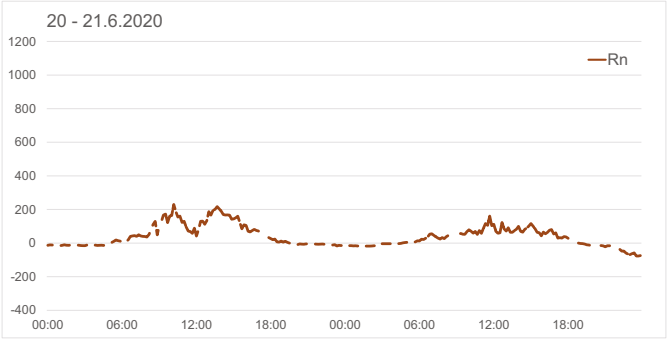
## 5.2.4. Záření (W.m$^{-2}$) a teploty (°C) při zatažené obloze v letním slunovratu 20. – 21. 6. 2020



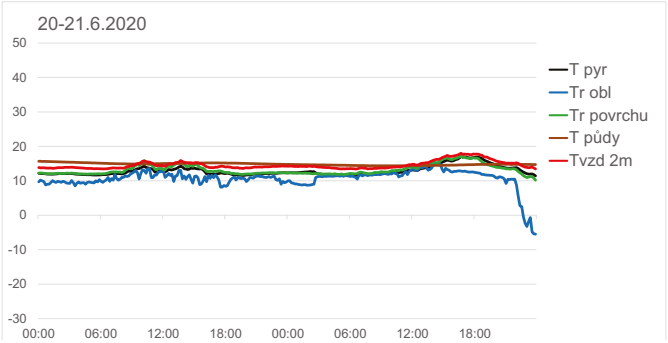

**Obr. 5.5a** Denní chod přicházejícího (Rs↓, PyrUP) a odraženého (Rs↑, PyrDOWN) slunečního záření (W.m$^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou (Rl↓, PyrgUP) a mezi čidlem a povrchem Země (Rl↑, PyrgDOWN ).




**Obr. 5.5b** Čisté krátkovlnné RnS (sluneční energie po odečtení sluneční energie odražené) a čisté dlouhovlnné záření RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem Země a oblohou).



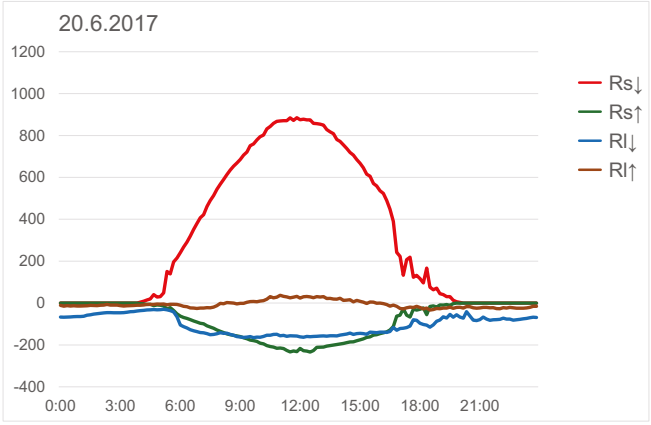

**Obr. 5.5c** Čisté záření (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla" k dalším procesům (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza).



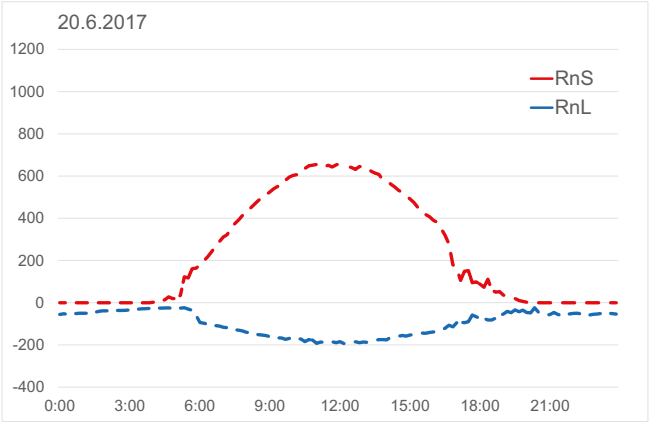

**Obr. 5.5d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd 2m je teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr je teplota čidla (tělesa radiometru) a Tr obl je radiační teplota oblohy a teplota půdy v hloubce 5 cm (T půdy).

V době letního slunovratu je příkon sluneční energie nejvyšší. V roce 2020 byl tlumen oblačností. Pro srovnání uvádíme hodnoty za jasného dne letního slunovratu z roku 2017.

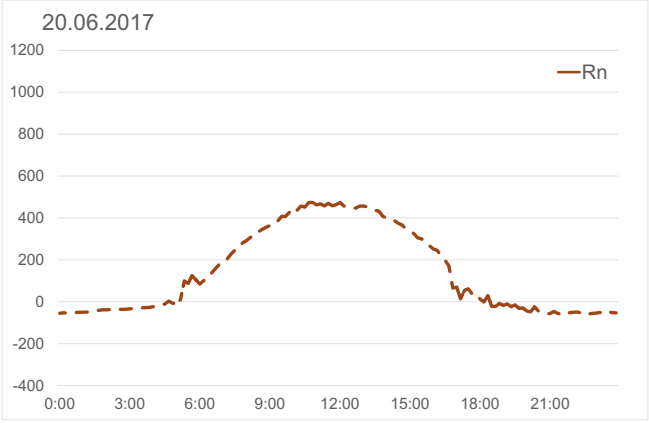
## 5.2.5. Záření (W.m$^{-2}$) a teploty (°C) při jasné obloze letního slunovratu 20. 6. 2017



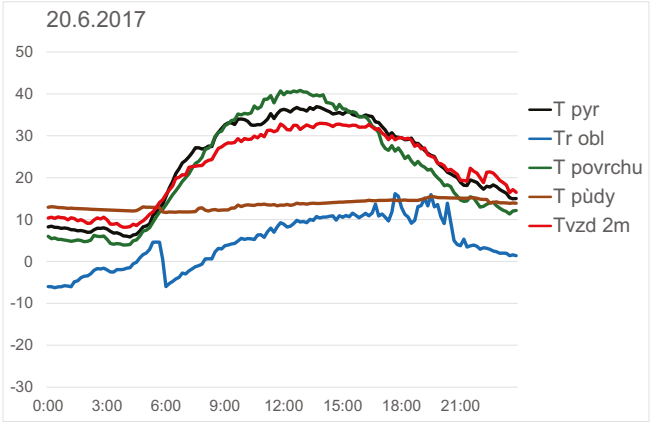

**Obr. 5.6a** Denní chod přicházejícího (Rs↓, PyrUP) a odraženého (Rs↑, PyrDOWN) slunečního záření (W.m$^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou (Rl↓, PyrgUP) a mezi čidlem a povrchem Země (Rl↑, PyrgDOWN).




**Obr. 5.6b** Čisté krátkovlnné RnS (sluneční energie po odečtení sluneční energie odražené) a čisté dlouhovlnné záření RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem Země a oblohou).




**Obr. 5.6c** Čisté záření (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla“ k dalším procesům (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza).




**Obr. 5.6d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd 2m je teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr je teplota čidla (tělesa radiometru) a Tr obl je radiační teplota oblohy a teplota půdy v hloubce 5 cm (T půdy).

V letním slunovratu je slunce nejvýše nad obzorem a na zem přichází za jasného dne nejvíce sluneční energie. Oblačnost ovšem redukuje přicházející sluneční záření několikanásobně. Za oblačného dne 20. a 21. 6. 2020 dosahovala denní maxima 200 - 300W.m$^{-2}$, zatímco za jasného dne 20. 6. 2017 přicházelo až 900 W.m$^{-2}$.

**20. – 21. 6. 2020 (zatažený den)**

Bylo zataženo, místy déšť, relativní vlhkost nad 80 %. Maximální hodnoty přicházejícího slunečního záření se pohybovaly v rozsahu hodnot 200 až 300 W.m$^{-2}$. Úměrně nízké okolo 20 % byly hodnoty odraženého slunečního záření. Toky dlouhovlnného záření od čidla do oblohy se pohybovaly v rozsahu desítek W.m$^{-2}$, tok dlouhovlnného záření mezi čidlem a povrchem Země v jednotkách W.m$^{-2}$, protože teploty byly vyrovnané. Oblačnost pohlcuje dlouhovlnné záření vysílané povrchem Země i odražené krátkovlnné záření, takže rozdíl teplot mezi zemským povrchem a oblohou je pouze několik stupňů. Hodnoty čisté radiace jsou vesměs pod 200 W.m$^{-2}$. 21. 6. večer se obloha vyjasňovala, tok tepla do oblohy se zvýšil a zřetelně se snížila radiační teplota oblohy.

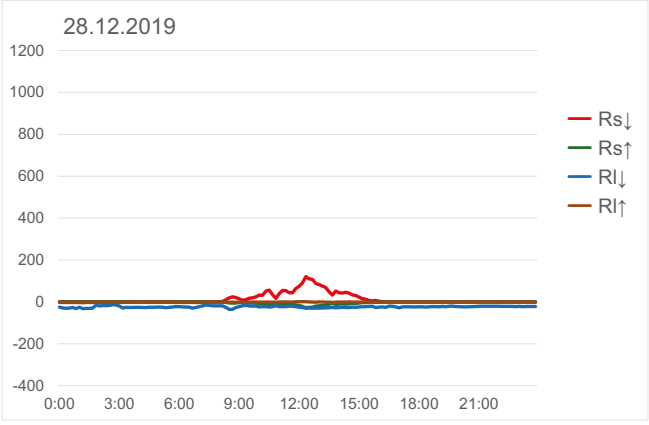
### 20. 6. 2017 (jasný den)

Na rozdíl od letního slunovratu v roce 2020, kdy bylo zataženo, za jasného dne letního slunovratu roku 2017 dosahovala sluneční radiace hodnot přes 900 W.m$^{-2}$ a maximální hodnoty odraženého slunečního záření 230 W.m$^{-2}$. Dlouhovlnné záření do jasné oblohy dosahuje až k hodnotě 200 W.m$^{-2}$ a maximální rozdíl povrchové teploty sekaného trávníku a oblohy je více než 30 °C. Hodnota čisté radiace je maximálně okolo 400 W.m$^{-2}$, je zřejmé, že se projevuje vysoký tok tepla do jasné oblohy za dne, kdy se krátce sekaný trávník ohřívá na povrchovou teplotu 30 až 40 °C. Náhlé změny teplot oblohy Tr obl okolo 6:00 (Obr. 5.6c) jsou způsobeny zarosením povrchu čidla a následným odpařením rosy. Rosa je pro dlouhovlnné záření neprostupná. Novější netradiometry mají těleso vyhřívané, aby se předešlo zaclonění dlouhovlnného čidla (PyrgUP) rosou (Jirka et al. 2021).

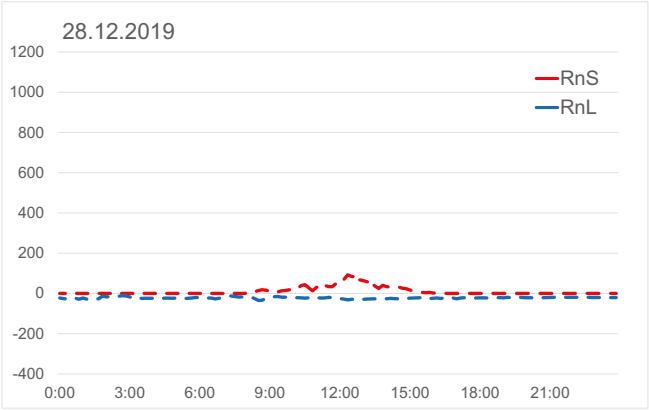
## 5.2.6. Záření (W.m$^{-2}$) a teploty (°C) při zatažené (28. 12. 2019) a jasné (1. – 2. 1. 2020) obloze kolem zimního slunovratu.

Radiační bilanci nejkratších dnů okolo zimního slunovratu s minimálními hodnotami příkonu slunečního záření uvádíme pro srovnání s radiační bilancí okolo letního slunovratu, kdy je příkon záření nejvyšší.

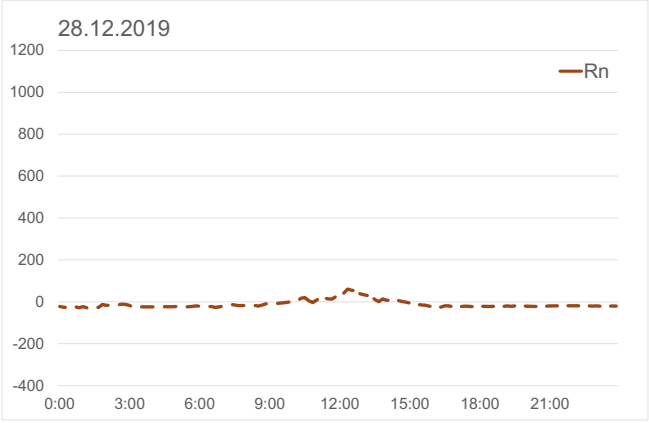
### 28. 12. 2019 (zataženo)



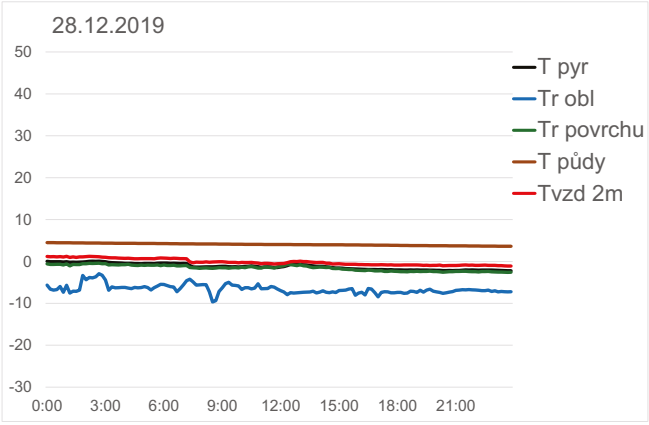

**Obr. 5.7a** Denní chod přicházejícího (Rs↓, Pyr UP) a odraženého (Rs↑, pyrDOWN) slunečního záření (W.m$^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou (Rl↓, PyrgUP) a mezi čidlem a povrchem Země (Rl↑, PyrgDOWN).




**Obr. 5.7b** Čistá krátkovlnná RnS (sluneční energie po odečtení sluneční energie odražené) a čistá dlouhovlnná radiace RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem země a oblohou).

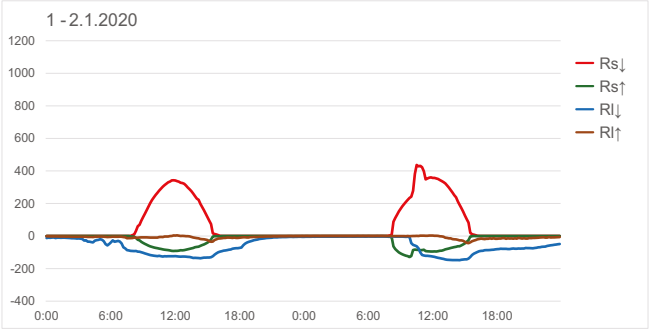



**Obr. 5.7c** Čistá radiace (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla“ k dalším procesům, je velmi nízká.

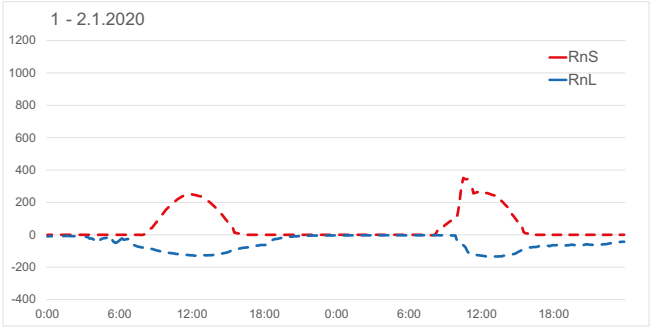



**Obr. 5.7d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd 2m je teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr je teplota čidla (tělesa radiometru) a Tr obl: radiační teplota oblohy a teplota půdy v hloubce 5 cm (T půdy).

## 1.- 2. 1. 2020 (jasný den)



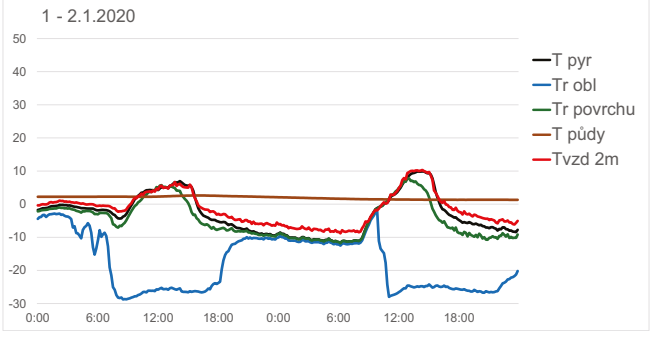

**Obr 5.8a** Denní chod přicházejícího (Rs↓, PyrUP) a odraženého (Rs↑, PyrDOWN) slunečního záření (W.m$^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou (Rl↓, PyrgUP) a mezi čidlem a povrchem Země (Rl↑, PyrgDOWN ).




**Obr. 5.8b** Čistá krátkovlnná RnS (sluneční energie po odečtení sluneční energie odražené) a čistá dlouhovlnná radiace RnL (dlouhovlnná radiace/tok tepla mezi povrchem Země a oblohou).




**Obr. 5.8c** Čistá radiace (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbyla" k dalším procesům (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza).




**Obr. 5.8d** Denní průběh teploty povrchu porostu (Tr pov: radiační teplota vypočtená z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem), Tvzd 2m je teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem), Tpyr je teplota čidla (tělesa radiometru) a Trobl: radiační teplota oblohy a teplota půdy v hloubce 5 cm (T půdy).

Při zimním slunovratu je slunce v poledne ve výšce 16° nad obzorem. Při zatažené obloze přicházelo maximálně 100 $W.m^{-2}$ na vodorovnou plochu, úměrně nízké byly i další toky energie. Radiační teplota oblohy byla vyrovnaná v rozsahu – 3 až -10 °C. Teploty travnatého povrchu, čidla i vzduchu ve 2 m byly téměř shodné a stálé mírně pod 0 °C. Tok dlouhovlnného záření do oblohy odpovídal většinou rozdílu teplot 5 °C, tedy 25 $W.m^{-2}$. Při jasné obloze se maximální hodnota přicházejícího slunečního záření blížila 400 $W.m^{-2}$, pozoruhodná je poměrně vysoká hodnota toku dlouhovlnného záření do oblohy (Rl↓). Efektivní teplota oblohy se během dne pohybuje v rozsahu -25 až -30 °C, zatímco teplota travnatého povrchu, vzduchu i čidla vystupuje nad 0 °C, takže tok dlouhovlnného záření do oblohy za dne je okolo 150 $W.m^{-2}$. V noci se rozdíly teplot vyrovnávají díky mlze, která brání toku tepla do oblohy. Na obr. 5.8a je nápadný nepravidelný vzestup přicházejícího slunečního záření dne 2. 1. 2020. Vysvětlujeme si to jinovatkou na půlkulovém skleněném krytu čidla (pyranometr), která působí jako matnice a převádí více záření do čidla. Jinovatka (na trávě) způsobila i vyšší odraz slunečního záření od trávy (Rs↑) a v ranních hodinách „oslepila“ čidlo dlouhovlnného záření (Rl↓PyrgUP).

### 5.2.7. Souhrnné denní bilance sluneční energie na sečeném travnatém porostu

Pro hodnocené termíny uvádíme denní úhrny slunečního záření – krátkovlnného, i dlouhovlnnou bilanci, včetně hodnot čisté radiace. Tabulka je doplněna o teoretické vypočítané hodnoty dopadající solární radiace (Rs global Teor) (Cihelka 1994), zpracované pro potřeby projektantů Ing. B. Šourkem do výpočtového sešitu EXCEL pro oblast Třeboň. Softwarový nástroj počítá teoretickou hodnotu dopadající energie přímého a difusního záření na plochu zvolené orientace. Základ výpočtu tvoří sluneční energie dopadající na povrch atmosféry a trajektorie pohybu Země okolo Slunce. Program také kromě roviny dopadu, dané výškou a azimutem, zohledňuje nadmořskou výšku a znečištění ovzduší, a to pomocí zvoleného atmosférického modelu. Pokud jsou v létě sumy naměřené radiace větší než teoretické, je to dáno tím, že v letním období dlouhých dní je měřitelné světlo i po západu slunce za obzor, kdy teoreticky již žádné nesvítí a do výpočtu to není

zahrnuto. Na měřicích stanicích ENKI, o.p.s. jsme brali časovou hranici dne po dobu, kdy čidla zaznamenávala radiaci, zatímco model je omezen od 4 do 20 hodin.

**Tab. 5.2** Souhrnná denní bilance slunečního záření pro vybrané termíny za různých meteorologických podmínek

| Souhrnná denní bilance (Wh.m$^{-2}$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Datum** | **Rs global Teor (Wh.m$^{-2}$)** | **ΣRs↓ (Wh.m$^{-2}$)** | **ΣRs↑ (Wh.m$^{-2}$)** | **ΣRl↕ (Wh.m$^{-2}$)** | **% podíl* ΣRl↕ na ΣRs↓** | **Rn (Wh.m$^{-2}$)** |
| **20. 4. 2020 jasno** | 7028 | 7136 | -1690 | -2191 | 30,7 | 3255 |
| **6. 5. 2020 střídavá oblačnost** | 7837 | 4734 | -1105 | -1666 | 35,2 | 1963 |
| **31. 5. 2020 zataženo** | 8829 | 1524 | -310 | -252 | 16,5 | 1032 |
| **20. 6. 2020 zataženo** | 8961 | 1955 | -472 | -290 | 14,8 | 1193 |
| **20. 6. 2017 jasno** | 8961 | 7763 | -1950 | -1666 | 21,4 | 3473 |
| **28. 12. 2019 zataženo** | 1321 | 326 | -77 | -534 | 163,8 | -285 |
| **1. 1. 2020 jasno** | 1392 | 1671 | -478 | -1327 | 79,4 | -134 |

* kolik % z přicházející sluneční energie se za 24 hodin vyzářilo do atmosféry ve formě tepla

Cílem kapitoly bylo zhodnotit rozsah toků dlouhovlnného záření mezi povrchem země (sekaný trávník) a oblohou v závislosti na oblačnosti a vlhkosti vzduchu. Za jasného dne přichází na vodorovnou plochu až 900 W.m$^{-2}$ a při částečné oblačnosti mohou být naměřeny maximální hodnoty výrazně nad 1000 W.m$^{-2}$, kdy mrak působí jako matnice a na čidlo přichází současně jak přímé sluneční záření, tak difuzní záření mraku (viz 6. 5. 2020).

Vyhodnocené denní sumy radiační bilance ukazují vliv oblačnosti na celkovou sumu přicházející sluneční energie. To je zejména patrné ze srovnání sumárních hodnot v letním slunovratu v roce 2020, kdy bylo zataženo (21,8 % z dosažitelné teoretické hodnoty) a v roce 2017, kdy bylo jasno (86,6 % z dosažitelné teoretické hodnoty). Naměřené hodnoty toku tepla do atmosféry při jasné obloze dosahovaly hodnot až 180 W.m$^{-2}$ (20. 4. 2020) a 190 W.m$^{-2}$ (20. 6. 2017). Těmto tokům

tepla odpovídá podle Stefan Boltzmannova zákona rozdíl mezi efektivní teplotou oblohy a povrchovou (radiační) teplotou povrchu 30 až 40 °C. Naopak při zatažené obloze je tok tepla do atmosféry nízký v rozsahu nejvýše desítek $W.m^{-2}$, protože teplo vyzařované povrchem země je absorbováno vodní párou v mracích a teploty se vyrovnávají na rozdíl několika stupňů.

Pozoruhodný je velký rozptyl hodnot podílu vyzářeného tepla do atmosféry ($\Sigma Rl\uparrow$) na celkové sumě dopadající sluneční energie ($\Sigma Rs\downarrow$). Pohybují se v rozsahu 14,8 % (v zatažených dnech) po 79 % (při jasné zimní obloze). Specifická hodnota 163 % v případě zimní zatažené oblohy je způsobena intenzivnějším vyzařováním povrchu, oproti velmi nízkým hodnotám přicházejícího záření (326 $Wh.m^{-2}.den^{-1}$). Tok dlouhovlnného záření (tepla) od země do atmosféry je měřítkem skleníkového efektu. V případě zatažených či oblačných dnů dopadá na zemský povrch nejen o 75–83 % méně slunečního záření, ale podstatně se snižuje intenzita dlouhovlnného vyzařování zemského povrchu.

Příklady denních průběhů bilance slunečního záření a toků tepla ukazují zásadní úlohu oblačnosti v množství přicházející sluneční energie a vyzářeného tepla do atmosféry. V dalších kapitolách ukážeme, jak člověk hospodařením v krajině (změnou krajinného pokryvu) ovlivňuje oblačnost.

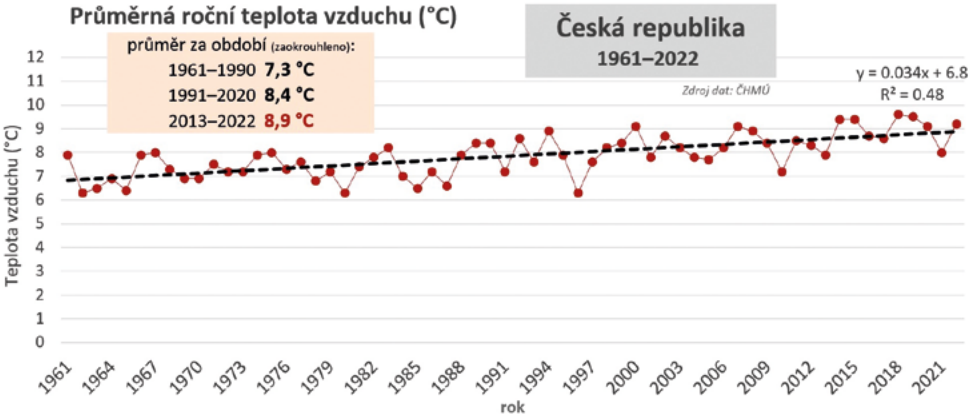
## 5.3. Sluneční záření, vodní pára a jejich vliv na místní klima

V této kapitole propojujeme dlouhodobá data z meteorologické stanice s úvahami o vlivu vodní páry v atmosféře. Ukazujeme, jak měření radiační bilance za posledních 15 let souvisí s jevy jako je skleníkový efekt (obsah vodní páry v atmosféře a oblačnost), jarní mrazy či potřeba vegetace v krajině i na konci léta. Aneb, jak porozumět pranostice „na suché pole neprší“.

Sluneční záření ohřívá povrch Země krátkovlnným zářením, odpovídajícím teplotě povrchu Slunce kolem 6000 K – většinu tvoří viditelné světlo. Bez něj by teplota Země byla jen několik stupňů nad absolutní nulou (-273,15 °C). Země, ohřátá zhruba na 290 K (cca 17 °C), vyzařuje teplo (dlouhovlnné záření) zpět do atmosféry a vesmíru. Nicméně významná část je absorbována atmosférou, především vodní párou a dalšími plyny. Právě tento proces nazýváme skleníkovým efektem. Vodní pára je nejvýznamnějším skleníkovým plynem v atmosféře. Její

obsah se však velmi rychle mění v čase i prostoru – může tvořit až 4 % objemu atmosféry. Změny koncentrace vodní páry v atmosféře ovlivňují jak množství sluneční energie dopadající na zem, tak i rychlost ochlazování zemského povrchu. Tyto procesy lze dobře popsat fyzikálními zákony. Přesto je její vliv na klima často podceňován nebo opomíjen. Důvodem je mimo jiné to, že vodní pára prochází rychlými fázovými změnami (kondenzace, vypařování, sublimace), které jsou obtížně modelované, a proto se v klimatických modelech ne vždy přesně zohledňují. Letní extrémy teplot, vysychání krajiny a další klimatické extrémy jsou přičítány zvýšenému skleníkovému efektu atmosféry v důsledku zvyšující se koncentrace $CO_2$. Atmosféra však nemá vyšší teplotu nežli povrch země, a proto nemůže zemi ohřívat.

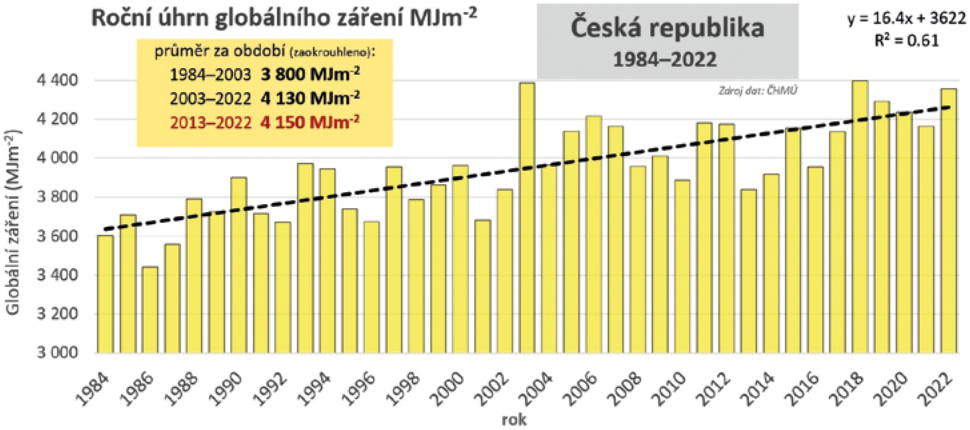
Průměrná roční teplota v České republice roste rychleji než globální průměr. Zatímco podle Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) globální teplota stoupá rychlostí 0,2 °C za dekádu, v ČR je to až 0,34 °C. Od roku 2011 se ale růst ještě zrychlil – průměrná teplota vzrostla o 0,84 °C za deset let. To nás přivádí k otázce: čím je tento prudký nárůst způsoben?




**Obr. 5.9** Vzestup průměrných teplot v České republice v období 1961–2022 (Pokorný et al. 2023).

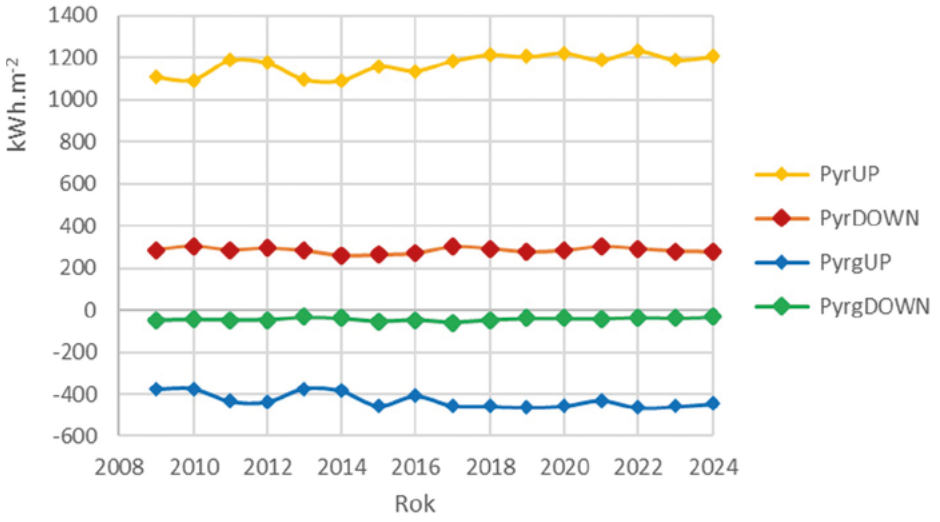
Od 80. let 20. století zaznamenávají stanice na světě i v ČR nárůst dopadající sluneční energie, nikoliv kvůli vyšší sluneční aktivitě, ale spíše v důsledku úbytku oblačnosti a aerosolů (Wild 2009; Pokorný et al. 2023). Méně aerosolů znamená méně oblačnosti – a tím i více přímého slunečního záření dopadajícího na zemský

povrch. Bez trvalé a funkční vegetace, jako jsou např. lesy a mokřady, krajina ztrácí schopnost ochlazovat se výparem a vytvářet podmínky pro vznik oblačnosti a vypadávání srážek. Tím se dál přehřívá. Pokud už oblačnost vznikne, je často příliš teplá, než aby z ní mohly vypadnout srážky. Ztrácíme tak jeden z klíčových prvků, který reguluje klima: skleníkový efekt tvořený vodní párou.

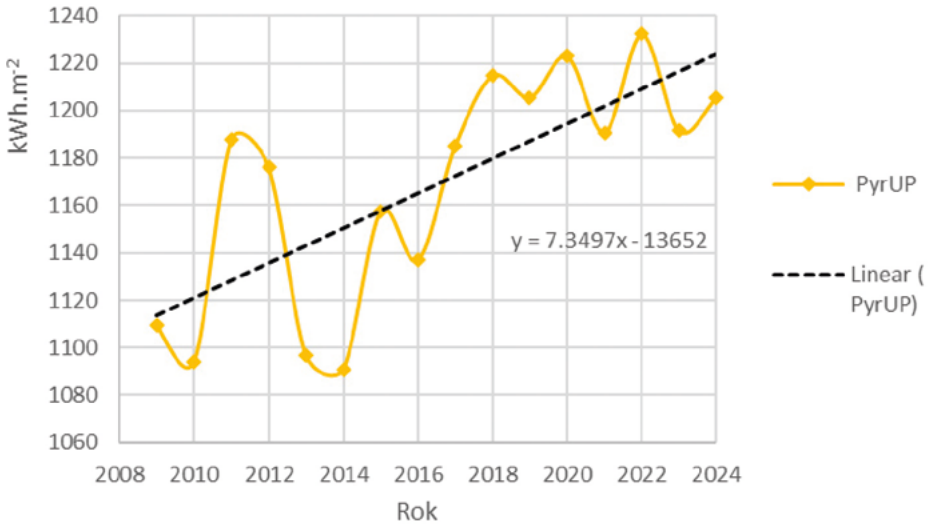



**Obr. 5.10** Roční úhrn globálního záření (MJ.m$^{-2}$) s vyjádřením změny průměrných hodnot pomocí lineární spojnice trendu a pomocí průměrů za různá období

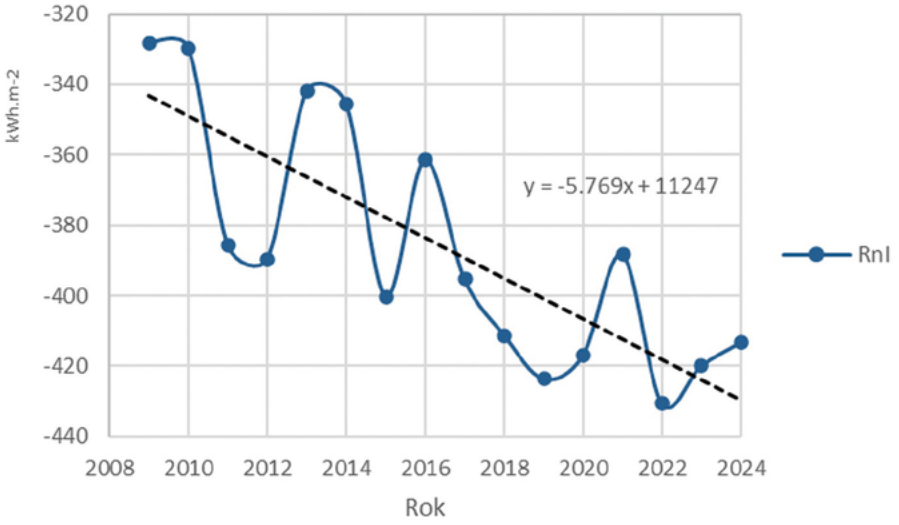
Na experimentální lokalitě v Domaníně u Třeboně (jižní Čechy) dlouhodobě měříme dopadající a odražené záření, tok tepla mezi povrchem a atmosférou a další meteorologické veličiny. Měření mezi lety 2009–2024 potvrzují nárůst dopadajícího krátkovlnného záření a současně i nárůst vyzařovaného dlouhovlnného záření od povrchu země – což je přímým důsledkem menší oblačnosti (Obr. 5.11 – 5.13). Měření jasně ukazují, jak důležitou roli v energetické bilanci zemského povrchu hraje právě vodní pára a oblačnost.




**Obr. 5.11** Roční sumy jednotlivých naměřených radiačních toků v období 2009–2024 - dopadajícího slunečního záření (PyrUP), odraženého slunečního záření (PyrDOWN), tepelná výměna mezi čidlem a zemským povrchem (PyrgDOWN) a čidlem a atmosférou (PyrgUp). Z naměřených výsledků je zřejmý nárust energie dopadající na zemský povrch emitované sluncem v krátkovlnné oblasti (PyrUP). Současně je měřitelný nárust energie emitované zemským povrchem do atmosféry (PyrgUP)




**Obr. 5.12** Roční sumy dopadajícího krátkovlnného záření a směrnice trendu pro detailnější zobrazení rostoucího trendu.




**Obr. 5.13** Roční sumy toku dlouhovlnného záření mezi povrchem země a atmosférou (RnI) měřené Netradiometrem Kipp&Zonen. Záporná hodnota odpovídá toku tepla od země do atmosféry/oblohy. V radiační bilanci má tok dlouhovlnného záření záporné znaménko, protože povrch zemský chladne (Jirka et al. 2021, Pokorný et al. 2023)

## 5.4. Skleníkový efekt v číslech: praktická ukázka výpočtu

Skleníkový efekt můžeme odhadnout nejen sofistikovanými přístroji, ale i pomocí infračerveného teploměru. Teplotní rozdíl mezi povrchem Země a oblohou (či mraky) určuje tok dlouhovlnného záření a lze ho spočítat podle Stefanova–Boltzmannova zákona. Stačí znát teplotu povrchu a teplotu oblohy:

I - celková intenzita záření absolutně černého tělesa ($Wm^{-2}$)

σ – Stefanova-Boltzmannova konstanta $5{,}6704.10^{-8}$ $W.m^{-2}$ $K^{-4}$

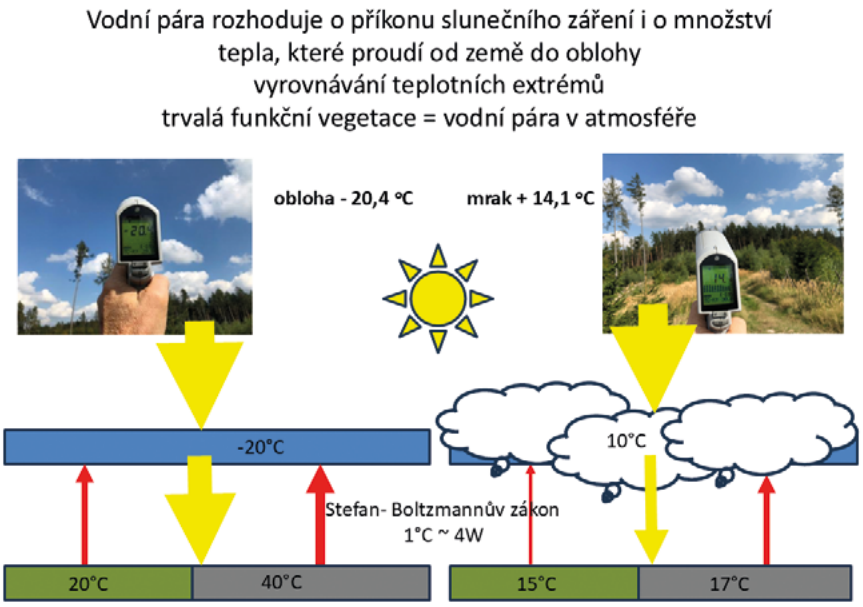
T – termodynamická teplota [K]

ε – emisivita povrchu tělesa (obloha má emisivitu 1, vlhká tmavá plocha dlažby, vegetace 0,95)

Uvedeme názorný příklad. Při jasné noci 29. 2. 2024 v Jindřichově Hradci měla obloha teplotu -26 °C (247 K), zatímco mokrá dlažba měla 4 °C (277 K). Obloha vyzařuje 211 $W.m^{-2}$, povrch země vyzařuje 334 $W.m^{-2}$, výsledný tok od povrchu země do atmosféry je 334–211 = 123 $W.m^{-2}$.

Tok dlouhovlnného záření od povrchu země do oblohy je cca 120 W.m$^{-2}$. Rozdíl teplot mezi povrchem země a oblohou je 30 °C. Rozdílu teploty 1 °C odpovídá tok dlouhovlnného záření 4 W.m$^{-2}$. Při zatažené obloze se teplota povrchu země a efektivní teplota oblohy (oblaků) téměř vyrovnává. Spolehlivým měřením toku dlouhovlnného záření mezi zemským povrchem a atmosférou pomocí netradiometru, stejně jako orientačním měřením pomocí IR teploměru zjistíme, že podle oblačnosti a vlhkosti vzduchu naměříme toky od několika W.m$^{-2}$ až ke 200 W.m$^{-2}$.

Obdobná situace bude i v letním období za jasných dnů. Teplota jasné oblohy v létě dosahuje -20 °C (253 K), teplota dlažby +40 °C (313 K). Pokud využijeme jednoduchý odhad (vycházející opět ze Stefanova-Boltzmannova zákona), že na teplotní rozdíl 1 °C připadá cca 4 W, pak je výsledný tok od zemského povrchu do atmosféry 240 W.m$^{-2}$. Pokud budeme uvažovat trávník o teplotě 20 °C, bude tento tok nižší, a to 160 W.m$^{-2}$. Jiná situace nastane v případě zatažené oblohy. Teplota mraků dosahuje např. 10 °C, teploty povrchu jsou víceméně vyrovnané, např. 15 °C. V tomto případě pak tok mezi zemským povrchem a atmosférou dosahuje jen 20 W.m$^{-2}$. Z uvedeného vyplývá, že zemský povrch je víceméně vždy teplejší




**Obr. 5.14** Oblačnost a její význam při tepelné výměně mezi zemským povrchem a atmosférou.

než atmosféra. Tepelná výměna mezi dvěma tělesy je určena výhradně jejich teplotou a vždy je směřována z teplejšího tělesa do chladnějšího. To znamená, že ve většině situací atmosféra nemůže ohřívat Zemi – vždy je teplejší těleso tím, které předává energii. Případy, kdy jsou mraky teplejší, než zemský povrch nastávají velice zřídka a nikdy nemají dlouhého trvání.

Na závěr této kapitoly si ukážeme, jak lze z meteorologických dat vyhodnotit různé situace, se kterými se potkáme v běžném životě. Co se stane, když v atmosféře chybí vodní pára, nebo naopak, i když je jí v atmosféře dostatek, ale přehřátá a odvodněná krajina neumožní její kondenzaci a vypadávání srážek.

## Dva příklady z praxe

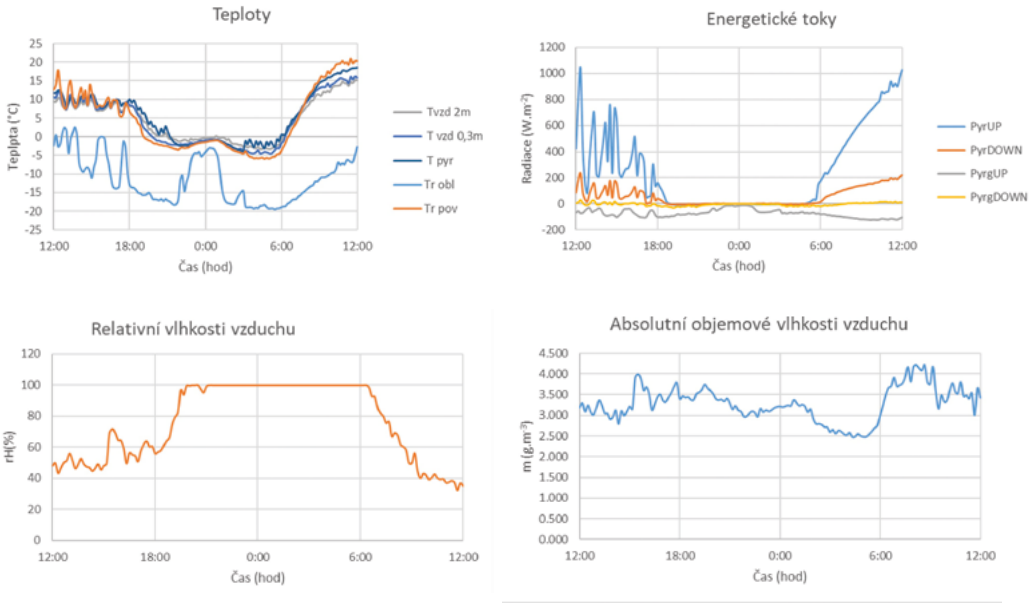
### 5.4.1 Jarní mráz 25.–26. 4. 2024

Jak důležitý je tlumící efekt vodní páry v atmosféře v jarním období, kdy by dostatek vodní páry měl tlumit např. vliv jarních mrazů? Vycházíme z meteorologických měření na stanici Domanín.

25.4. 2024 se teploty vzduchu ve 2 m pohybovaly okolo 13 °C kolem poledne, při západu slunce poklesly k 8 °C. Jednalo se o slunečný den, v odpoledních hodinách se dopadající sluneční záření pohybovalo okolo 780 $W.m^{-2}$. Relativní vlhkost vzduchu byla 50–60 %, po západu slunce až k 6:00 následujícího dne vzrostla ke 100 %. Nicméně po přepočtení na absolutní hodnoty obsahu vody se jednalo o hodnoty 3,5 $g.m^{-3}$ přes den a 2,5 $g.m^{-3}$ v noci, přičemž k ránu hodnoty klesaly až ke 2 $g.m^{-3}$, tedy k nižším hodnotám, než jaké se dosahují na poušti. Jen pro porovnání v Rijádu se tyto hodnoty pohybují mezi 4–6 $g.m^{-3}$. Zároveň teplota oblohy dosahovala -20 °C, obloha byla jasná. Za těchto podmínek se květy „vyzářily“ do oblohy, ve které chyběla vodní pára a nefungoval skleníkový efekt. Květy se ochladily pod teplotu okolního vzduchu a zmrzly. Tato situace tak velice dobře ilustruje, jak vysušováním krajiny úspěšně měníme klima na pouštní – vysoké teploty přes den a v noci klesající pod bod mrazu. Důvodem je nedostatek vodní páry v atmosféře.

Pro popsání tohoto jevu je velice důležité měřit teploty různými metodami. Na stanici měříme teploty vzduchu ve výškách 2 a 0,3 m, teplotu tělesa net-radiometru a dopočítáme radiační teploty povrchu a efektivní teplotu oblohy. Radiační

teplota porostu se nejvíce blíží jeho skutečné teplotě, kterou je ale obtížné dotykově měřit. Z naměřených hodnot je patrné, že radiační teplota je o několik stupňů nižší než teploty vzduchu. V kombinaci s hodnotou radiačního toku lze vyvodit, že k ochlazení (až zmrznutí) porostu (květů) došlo „vyzářením“ do chladné otevřené oblohy.



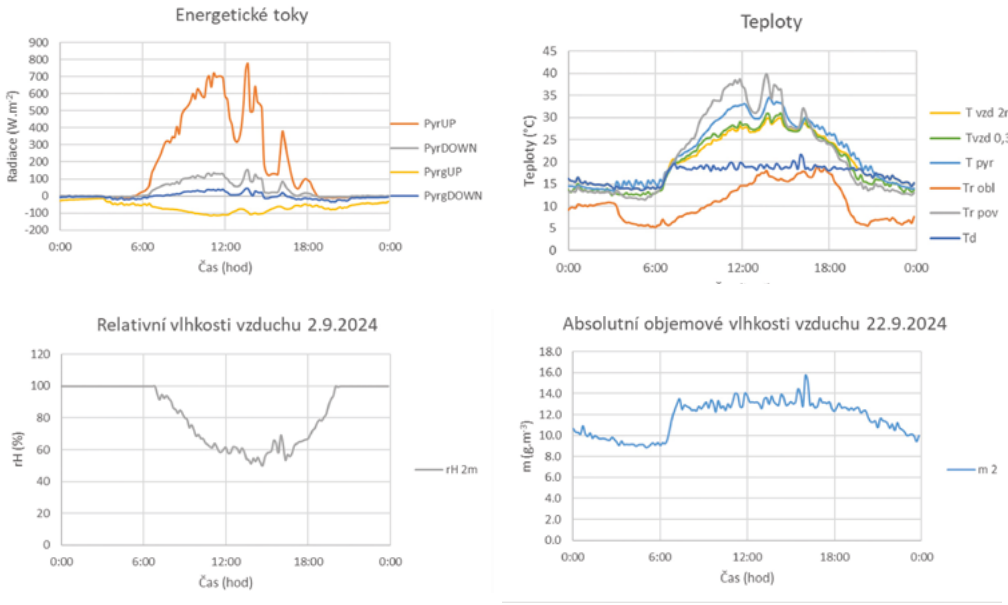

**Obr. 5.15** Naměřené hodnoty meteorologických veličin pro situaci v noci 25. – 26.4. 2024, kdy v okolí Domanína zmrzly květy. Teplota – teplota vzduchu ve 2m (T vzd 2m), teplota vzduchu ve 30 cm (T vzd 0,3m), teplota oblohy (Tr obl); Energetické toky krátkovlnného (PyrUP, PyrDOWN) a dlouhovlnného záření (PyrgUP, PyrgDOWN). Relativní vlhkost vzduchu měřená ve 2 m. Absolutní vlhkost vzduchu ve 2 m je vypočtena.

### 5.4.2 Proč 2. 9. 2024 nezapršelo?

Další modelový příklad ukazuje situaci, kdy byla po delším bezsrážkovém období očekávána srážková epizoda, ke které však nakonec nedošlo. Na tomto modelovém příkladu ukazujeme důležitost kondenzačních míst v krajině pro tvorbu oblačnosti. Opět vycházíme z meteorologických měření na stanici Domanín, které jsou nezbytné pro vysvětlení popisované události.

Jasný horký den, s teplotami po poledni okolo 30 °C. V odpoledních hodinách došlo k tvorbě a přísunu oblačnosti. Relativní vlhkost vzduchu dosahovala v od-

poledních hodinách 50–60 %, absolutní se pohybovala poměrně vysoko, okolo 13–14 g.m$^{-3}$. Teplota půdy přesahovala 40 °C. Od ohřáté půdy se ohřála nasouvající se oblačnost z 5 °C v 6:00 téměř na 20 °C v 18:00 (Obr. 5.16, Teploty). Tím, se hřála oblaka na teplotu blízkou rosnému bodu, nenastaly podmínky vhodné ke kondenzaci. Mraky se ohřály, začaly stoupat a oblačnost se postupně rozpadla, aniž by došlo k vypadávání srážek. Bylo po žních a v krajině zbavené vegetace nebyla dostatečně chladná místa, která by umožnila kondenzaci a vypadávání srážek z oblačnosti. S tímto jevem se častěji setkáváme ve druhé polovině léta, kdy jsou pole sklizena a nejsou na ně vysety žádné meziplodiny. Na půdě se vytvoří vyschlá krusta, která se ve dne ohřeje až na 50 °C, netvoří se na ní rosa. Pokud přijde přívalová srážka, nedochází k infiltraci, ale rychlému povrchovému odtoku.




**Obr. 5.16** Naměřené hodnoty meteorologických veličin na stanici Domanín 2. 9. 2024. Energetické toky – dopadající sluneční záření (PyrUP), odražené sluneční záření (PyrDOWN), tepelná výměna mezi čidlem a zemským povrchem (PyrgDown) a čidlem a atmosférou (PyrgUP). Teploty – teplota vzduchu ve 2 m a 30 cm (T vzd), teplota oblohy (Tr obl), teplota rosného bodu (Td). Relativní vlhkost vzduchu měřená ve 2 m. Absolutní vlhkost vzduchu ve 2 m je vypočtena.

Z měřených a vypočítaných teplot se soustředíme na počítanou radiační efektivní teplotu oblohy (mraků) Tr obl a počítanou teplotu rosného bodu Td. Je zřejmé, že při nasouvání oblačnosti nad sledovanou lokalitu teplota oblohy stou-

pá. Když dorazí bouřkový mrak mezi 13. a 15. hodinou, jeho teplota dosáhne téměř teploty rosného bodu Td - a je po srážkách.

## Na závěr…

Data, příklady i fyzikální zákony ukazují, že krajina bez vegetace a bez vody ztrácí schopnost ochlazovat se, vytvářet oblačnost a srážky. Vodní pára, vegetace a oběh vody hrají zásadní roli v udržování rovnováhy klimatického systému. Pokud chceme pochopit a pozitivně ovlivnit klima, musíme věnovat více pozornosti krajině, vodě a především tomu, jak fungují rostliny v našem prostředí.

## Literatura

Cihelka, J. (1994). Solární tepelná technika. T. Malina, 208 s.

Jirka, V., Hesslerová, P., Huryna, Pokorný, J. (2021). Energetická výměna mezi zemským povrchem a atmosférou v závislosti na meteorologických podmínkách bez ohledu na obsah $CO_2$. *Vytápění, větrání, instalace 5*, s. 178 – 183.

Jirka, V., Šourek,B., Pokorný, J., Zicha, J., (2023). Vliv výšky travního porostu na teplotu povrchu a tepelná bilance na rozhraní země a atmosféry. Vytápění, větrání, instalace 1/2023, str. 36–43.

Pokorný, J., Procházka, J., Jirka, V., Huryna, A., Hesslerová, P., (2023). Lze nárůst příkonu sluneční energie a teplot vysvětlit jinak než úbytkem oblačnosti a vody v ovzduší? Vodní hospodářství 12/2023, str 2–7.

# 6. Voda a rostliny

## 6.1. Voda v rostlině

Voda je pro rostlinu limitující životní podmínkou. Pokud je zásobování vodou omezeno, dochází ke zpomalení fyziologických dějů v rostlinném těle včetně fotosyntézy, ke snížení aktivity enzymů a následně ke zpomalení celkového vývoje rostliny. Extrémní vysušení nebo dlouhodobě omezený přísun vody může mít pro rostlinu letální účinky.

Voda představuje největší část objemu rostlinného těla. Její množství v rostlinném těle je proměnlivé. Liší se mezidruhově, v závislosti na věku a vývojovém stádiu rostliny i mezi jednotlivými rostlinnými orgány. Většina rostlin obsahuje ve svém těle přibližně kolem 80 % vody, největší množství vody, až 98 %, obsahují řasy či dužnaté plody, suchá semena naopak pouze 5 % (Šebánek et al. 1983, Procházka et al. 1998, Taiz & Zeiger 2002). Naprostá většina vody v rostlině je **voda transportní**, sloužící jako transportní médium nejrůznějších látek mezi buňkami. Jen menší část (cca 5–10 %) je voda **chemicky vázaná** v různých složkách protoplazmy jako **voda hydratační.** Je spojena s ionty a je **rozpouštědlem** pro mnohé organické molekuly a makromolekuly.

Voda je pro rostlinu důležitým **termoregulačním činitelem**. Většinu sluneční energie, která dopadá na její povrch, rostlina využije na výpar vody z listů – **transpiraci** (Pokorný 2019). Chladí tak především sebe, ale zároveň i své okolí (viz kapitola 7 Evapotranspirace). Voda je chemickým prostředím všech metabolických reakcí, které probíhají v rostlinném těle. Je vázána v buněčných stěnách, v cytoplazmě, je ukládána do zásoby ve vakuolách. Nasycení pletiv vodou (hydratura) je důležité k **zachování tvaru rostliny**. Významnou roli hraje voda při **fotosyntéze**. Kyslík, který se při fotosyntéze uvolňuje do ovzduší, pochází právě z molekuly vody. Vodíkové ionty jsou pak při fotosyntéze nezbytné k syntéze energetických sloučenin.

## 6.2. Pohyb vody rostlinou a transpirace

Pohyb vody v rostlině od kořenů do listů zajišťuje především proces transpirace, jehož hnací silou je sluneční energie. Transpirace zajišťuje kontakt rostliny se dvěma rozdílnými prostředími: atmosférou prostřednictvím průduchů v listech a půdou prostřednictvím kořenových vlásků. Atmosféra je však pro suchozemské rostliny prostředím relativně suchým, zatímco půda je za ideálních podmínek pro rostliny prostředím relativně vlhkým. Rostliny se snaží svými vnitřními procesy tyto rozdíly vybalancovat. Díky transpiraci rostlina na jedné straně uvolňuje do atmosféry vodní páru z listů a na straně druhé nasává vodu s minerálními látkami kořeny. Rostlinou se tak pohybuje souvislý vodní sloupec, který se nazývá **transpirační proud**. Vzdálenosti, které musí transpirační proud urazit, nejsou rozhodně malé, vždyť mohutné stromy dosahují výšky několika desítek metrů.
Jak se tedy voda dostane z půdy až vysoko do listů? Prochází přitom mnoha různými prostředími, a její pohyb je ovlivňován mnoha procesy, vysvětlitelnými na základě známých fyzikálních principů.

### 6.2.1. Vodní potenciál

Jakýkoliv samovolný pohyb vody z místa na místo je založen na gradientu jejího chemického potenciálu. Voda se pohybuje z prostředí o vyšším chemickém potenciálu do prostředí s chemickým potenciálem nižším (Nobel 2009).

Rostlina je však pro vodu specifickým prostředím. Uvnitř rostlinných buněk je voda vystavena značnému tlaku (turgor). V rostlině se navíc nevyskytuje voda zcela čistá, nýbrž ve formě roztoku, její chemický potenciál je tedy ovlivňován množstvím látek v ní rozpuštěných.

V rámci fyziologie rostliny byla proto zavedena veličina **vodní potenciál** (Slatyer & Taylor 1960) která se vyjadřuje v jednotkách tlaku, nejčastěji megapascalech (MPa) a je označována řeckým písmenem ψ (velké psí). Vodní potenciál je odchylka volné energie vody v rostlině od volné energie destilované vody vztažená na jednotku objemu ($m^3$). Charakterizuje fyziologický stav rostlinné buňky z hlediska obsahu vody.

Hodnotu vodního potenciálu lze vypočítat podle rovnice:

$$\psi_{\omega} = \psi_{\pi} + \psi_{p} + \psi_{g},$$

kde $\psi_{\pi}$ je osmotický potenciál odpovídající osmotickému tlaku protoplastu buňky, záporná veličina (posuzuje se vzhledem k osmotickému tlaku čisté vody)

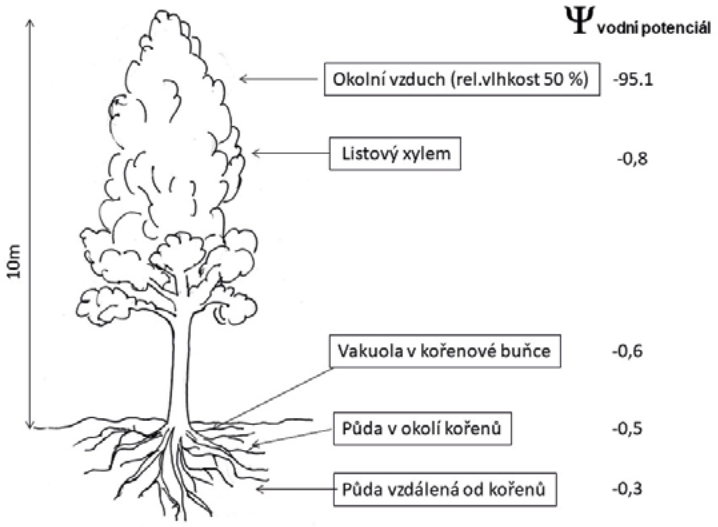
$\psi_{p}$ je tlakový potenciál neboli turgorový tlak, kladná veličina (posuzuje se vzhledem k atmosférickému tlaku)

$\psi_{g}$ je gravitační potenciál, jehož hodnoty jsou v porovnání s ostatními složkami vodního potenciálu zanedbatelné.

$\psi_{w}$ je veličina záporná. Čím nižší je vodní potenciál buňky (čím je jeho hodnota negativnější), tím větší je její schopnost přijmout vodu. Jak vyplývá z výše uvedené rovnice, největší schopnost nasávat vodu tedy má buňka s co možná nejzápornější hodnotou osmotického potenciálu a co možná nejnižší kladnou hodnotou potenciálu turgorového, což je teoreticky vzato buňka zcela suchá (přičítáme-li k číslu zápornému číslo kladné, je výsledek tím zápornější, čím zápornější je záporný sčítanec a čím menší je kladný sčítanec). Naopak buňka turgescentní, neboli buňka nasycená vodou, která má tedy největší turgorový potenciál, má logicky nejmenší schopnost nasávat vodu.

Gradient vodního potenciálu je hlavním faktorem umožňujícím pohyb vody v rostlinném těle. Voda v rostlině se tak pohybuje z míst s vyšším (pozitivnějším) vodním potenciálem na místa s nižším (negativnějším) vodním potenciálem (Ryplová 2014).

Celý transpirační proud se tedy pohybuje rostlinou od kořenů do listů na základě gradientu vodního potenciálu. K transpiraci dochází průduchy v listech, nejnižší vodní potenciál mají proto buňky v těsné blízkosti průduchů. Protože vodní potenciál má tendenci se vyrovnávat, nasávají tyto buňky vodu z buněk postavených níže, tedy dále od průduchu a tento proces se pak posouvá po celé délce rostlinného těla. Na základě rozdílů ve vodním potenciálu se tak voda může transpiračním proudem pohybovat proti směru působení gravitační síly i na vzdálenosti několika desítek metrů (Obr. 6.1).




**Obr. 6.1:** Gradient vodního potenciálu (údaje v MPa, Ryplová (2014) podle Taize & Zeigera (2002), upraveno)

Pohybu vody v rostlině napomáhají i další fyzikální procesy. V mezibuněčných prostorách a uvnitř buněčných stěn je to **difuze**, pohyb na základě koncentračního spádu. V prostředích oddělených polopropustnou cytoplazmatickou membránou pak **osmóza**. Přes membránu mohou pronikat pouze molekuly vody, nikoli molekuly rozpuštěné látky. Protože obě oddělená prostředí mají tendenci vyrovnávat své koncentrace, dochází k proudění vody z prostředí s nižší koncentrací rozpuštěné látky do prostředí s koncentrací vyšší. Rostlina jako celek je v podstatě osmotickým systémem (Ryplová, 2014).

Zejména v jarním období se projevuje tzv. **kořenový vztlak**. Následkem zvýšené hydratace pletiv kořene se v jarním období mění osmotické děje v kořeni. Prozatím však není vytvořena dostatečná listová plocha, aby se rozhodující měrou mohla uplatnit transpirace. Kořenový vztlak se tak projevuje roněním mízy stromů v předjaří.

V pohybu na velmi krátké vzdálenosti pomáhají vodě také kohezní síly (koheze = soudržnost) mezi molekulami. **Koheze** tak napomáhá soudržnosti vodního sloupce. Vodivé svazky, kterými se pohybuje voda vzhůru rostlinným tělem, jsou systémem trubicovitých elementů, cév a cévic, které představují v podstatě malé

kapiláry. Mezi stěnami těchto kapilár a molekulami vody se tak mohou uplatnit také **adhezní síly** (adheze = přilnavost), které napomáhají pohybu vody vzhůru cévními svazky.

### 6.2.3. Pohyb z půdy do rostliny

Z půdy do rostliny se voda dostává prostřednictvím kořenů, konkrétně jejich nejjemnějších částí, kořenových vlásků. Pohyb vody půdou směrem ke kořenům je velmi komplexní proces, závisející na mnoha parametrech. I zde se uplatňuje gradient vodního potenciálu. Voda se z půdy do kořenů dostává tehdy, pokud je vodní potenciál kořenů nižší, než vodní potenciál půdy v jejich okolí neboli kořeny musí být „sušší“ než půda. Pohyb z půdy do rostliny tak závisí např. na typu půdy. Písčité půdy mají větší půdní částice, voda jimi po srážkách prosakuje rychleji, půda má větší „drenážní schopnost“. Naopak hlinité půdy s menšími póry mezi půdními částicemi, větším obsahem půdních koloidů a organických látek poutají vodu pevněji. Obsah vody v půdách nasycených vodou po prosáknutí tzv. vody gravitační se nazývá polní kapacita půdy. Nejnižší je u půd písčitých, nejvyšší u černozemě. Vyšší polní kapacita půdy je pro rostliny výhodná, protože umožňuje rostlině delší přežití v období sucha. Rychlost příjmu vody z půdy závisí také na velikosti tzv. aktivní kořenové plochy neboli styčné plochy kořenů a půdy v prostoru prostoupeném kořeny. Pokud je dostupná voda v půdě v blízkosti kořenů vyčerpána, rostliny se snaží dosáhnout na vodu prostřednictvím zvětšováním styčné plochy kořenů s půdou a rozšiřováním kořenového systému do dalších půdních prostor směrem do míst, kde ještě voda dostupná je (Larcher 1988, Šebánek 1983). K dalším faktorům ovlivňujícím transport vody z půdy do rostliny patří také teplota půdy. Při velmi nízkých i příliš vysokých teplotách je pohyb vody z půdy do rostliny zpomalen, záleží však na typu konkrétní rostliny.

### 6.2.4. Vodivé svazky

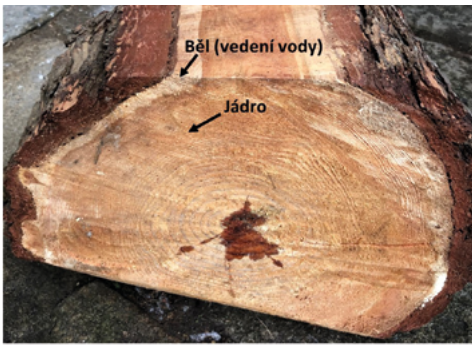
Na dlouhé vzdálenosti, z kořenů do listů, je potom voda v rostlině rozváděna pomocí vodivých svazků, které procházejí celým rostlinným tělem (Obr. 6.2, 6.3).

Vodivé svazky se skládají z části dřevní (xylém) a části lýkové (floém). Dřevní částí proudí voda a v ní rozpuštěné minerální látky z půdy směrem od kořenů vzhůru do listů. Lýkovou částí cévních svazků naopak proudí rostlinou produkty fotosyntézy z listů do dalších částí rostlinného těla.





**Obr. 6.2** O existenci vodivých svazků a transpiračního proudu, který jimi probíhá, se lze snadno přesvědčit, pokud ponoříme rostlinu na několik hodin do roztoku obarveného netoxickým barvivem (např. inkoustem) a umístíme na světle, abychom zajistili podmínky průběhu transpirace. Obarvená kresba na rostlině pak znázorňuje cévní svazky. Zde na foto jsou vodivé svazky nejlépe vidět v oblasti květu a ve špičkách listů.




**Obr. 6.3** U dřevin proudí transpirační proud vnější částí dřevnaté části kmene. U některých dřevin se tato část jeví jako výrazně světlejší a označuje se jako běl.

Dřevní částí vodivého svazku je tedy voda dovedena až do listu. V těsné blízkosti průduchových dutin se z vodivých svazků dostává přivedená voda do listového mezofylu a do svěracích buněk průduchů. V případě, že průduchy jsou otevřené, odpařuje se pak voda ze spodních stěn svěracích buněk a mezofylových buněk lemujících průduchovou dutinu.

### 6.2.5. List a průduch

Listy zajišťují kontakt rostliny s atmosférou prostřednictvím průduchů. Průduchy (stomata) jsou útvary v pokožce listu, jejichž hlavní funkcí je výměna plynů mezi rostlinou a atmosférou. Prostřednictvím průduchů rostlina do atmosféry uvolňuje řadu plynných látek, které sama produkuje, a zároveň přijímá látky z atmosféry (včetně polutantů, jako jsou např. oxid siřičitý, prachové částice apod.). Především ale průduchy spojují dva významné fyziologické děje v rostlině, transpiraci a fotosyntézu. Přes průduchy rostlina uvolňuje do atmosféry vodní páru, zároveň ale přijímá také oxid uhličitý, který využívá při fotosyntéze a uvolňuje kyslík, který při fotosyntéze vzniká. Pokud je rostlina vystavena nedostatku vody v půdě, snaží se snížit transpiraci zavřením průduchů, aby zabránila nadměrným ztrátám vody. Tím je však zároveň omezen přísun oxidu uhličitého pro fotosyntézu, jejíž výkon se tak logicky v důsledku sucha snižuje. Některé typy rostlin si proto vyvinuly různé strategie, jak se s tímto dilematem vyrovnat.

Základní stavba všech typů průduchů je v hrubých rysech shodná. Vždy jsou tvořeny dvěma svěracími buňkami, které uzavírají průduchovou štěrbinu. Ta ústí do dýchací dutiny pod průduchem (Sitte et al. 2002). Otevírání a zavírání štěrbin závisí na turgoru (tedy nasycení vodou) svěracích buněk a přilehlých pokožkových buněk. Při zvýšení turgoru svěracích buněk se průduchy otvírají, při jeho poklesu zavírají. Zvyšování turgoru je komplexní osmoregulační proces, závislý na řadě faktorů, např. transportu $K^+$ a $Cl^-$ iontů přes membránu svěracích buněk. Rostlina má proto řadu mechanismů, pomocí nichž může otevírání a zavírání průduchů regulovat (Larcher 1988).

Průduchy jsou u většiny rostlin umístěny na spodní straně listu, tyto listy se označují jako hypostomatické. Některé rostliny mají průduchy také na svrchní straně listu, tyto listy se označují jako amfistomatické, leknín atd.,

mají průduchy jen na svrchní straně - listy epistomatické. Hustota průduchů v pokožce listu se liší mezi jednotlivými druhy rostlin především v závislosti na podmínkách vnějšího prostředí. Pohybuje se v rozmezí několika desítek až set průduchů na 1 $mm^2$ listové plochy (Taiz & Zeiger 2002).

### 6.2.6. Shrnutí: sluneční energie a pohyb vody rostlinou

Jak tedy vyplývá z výše uvedeného, pohyb vody v rostlině je založen především na procesu transpirace. **Transpirace je hnána výparem vody z listů, uskutečňuje se tedy díky sluneční energii, kterou rostliny váží ve formě latentního tepla do vodní páry.** Pokud jsou otevřené průduchy, rostlinou se pohybuje souvislý sloupec transpiračního proudu vody na základě rozdílů ve vodním potenciálu. Díky tomu pak také dochází k nasávání vody z půdy prostřednictvím kořenů. Tento typ transpirace je označován jako **transpirace stomatální,** (průduchy = stomata). Hlavním transpiračním orgánem rostliny je proto list. Velmi malé procento vody je z listu odváděno i mimo průduchy, přes kutikulu, jako **transpirace kutikulární**. Minimální je také množství vody odvedené prostřednictvím tzv. transpirace peridermální (označované také jako lenticelární) prostřednictvím prasklin v borce či přes lenticely (Larcher 1988).

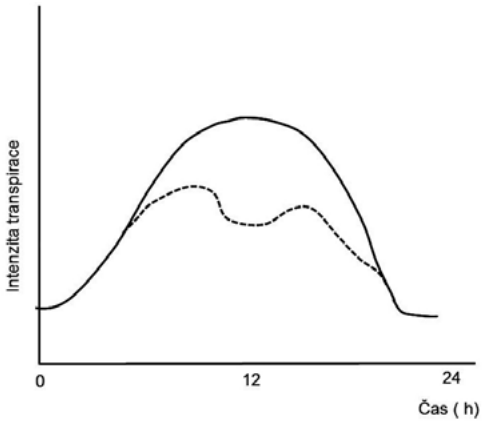
## 6.3. Vliv vnějšího prostředí na transpiraci

Otevírání a zavírání průduchů závisí na podmínkách vnějšího prostředí rostliny i vnitřních regulačních mechanismech v rostlinném těle. Zásadní podmínkou je **dostupnost vody v půdě**. Ta v našich klimatických podmínkách mírného pásma většinou souvisí se zvyšující se **teplotou okolního prostředí** v letním období.

Jedním z regulačních mechanismů umožňujících zavírání průduchů při nedostatku vody v půdě je důležitý rostlinný hormon, kyselina abscisová (označována zkratkou ABA). Jedná se o stresový hormon, který rostliny syntetizují ve zvýšené míře v kořenech při nedostatku vody v půdě. Zvýšené množství kyseliny abscisové proudí při snížené dostupnosti vody z kořenů velmi rychle vodivými svazky až ke svěracím buňkám průduchů. Kyselina abscisová ovlivňuje transport iontů draslíku přes membránu svěracích buněk a v důsledku toho dochází k pokle-

su jejich turgoru a následnému uzavření. Tato reakce proběhne velmi rychle, proto rostliny stačí omezit transpiraci uzavřením průduchů dříve, než dojde k jejich poškození suchem. (Ma et al. 2009). V našich podmínkách mírného pásma bývají v letních dnech v odpoledních hodinách vysoké teploty, dostupnost vody v půdě klesá a rostliny na to proto reagují zavřením průduchů. To vede k tzv. popolední depresi fotosyntézy, která je následkem omezení intenzity transpirace v této době (Obr. 6.4). Schopnost vyrovnat se s nedostatkem vody v půdě se liší u různých typů rostlin. Na stanovištích se nedostatkem vody v půdě jsou zvýhodněny rostliny s nejnižším vodním potenciálem (tj. s nejvyšší „savou silou"), k nimž patří např. slunobytné rostliny (heliofyty) adaptované na podmínky vysoké ozářenosti, či rostliny suchobytné (xerofyty), které mají vodní potenciál obvykle v rozmezí -1,5 až -4,0 MPa. Naopak u rostlin s větším vodním potenciálem (tj. nižší savou silou), jako jsou rostliny vlhkobytné (hydrofyty) či stínobytné (sciofyty) dosahující vodního potenciálu -0,6 až -0,8 MPa (Slavíková 1986), je schopnost vyrovnat se s nedostatkem vody v půdě velmi omezená.

Otevření průduchů, které je nezbytným předpokladem transpirace, je u většiny našich rostlin podmíněno **dostatečnou ozářeností**. Průduchy se ráno s východem slunce otevírají a večer zavírají. Podnětem pro otevření průduchů na světle je modrá část světelného spektra, kterou rostlina vnímá čidlem umístěným přímo ve svěracích buňkách průduchu (Procházka et al. 1998).




**Obr. 6.4:** Denní průběh rychlosti transpirace. Plnou čárou je znázorněn hypotetický denní průběh transpirace u rostliny dobře zásobené vodou, čárkovaně denní průběh transpirace u rostliny vystavené v poledních hodinách nedostatku vody, která proto transpiraci omezuje (Ryplová 2014, podle Šebánka 1983, upraveno).

Na 1 mm$^2$ listu může být 20–2000 průduchů, nejčastěji se jejich počet pohybuje v rozmezí 30–350 na 1 mm$^2$ (Procházka et al. 1998). Množství průduchů je druhově specifické a záleží také na přizpůsobení rostlin životním podmínkám. Rostliny se mohou přizpůsobovat prostředí, ve kterém žijí, také způsobem uložení průduchů v pokožce. Při adaptaci na suché prostředí bývají průduchy často umístěny pod úrovní povrchu pokožky. Tím je zabráněno cirkulaci vzduchu v těsné blízkosti průduchu a snižuje se proto i odvod vodních par do atmosféry. Snahou rostlin žijících ve vlhkém prostředí je naopak odvádět co největší množství vodní páry, vystavují proto průduchy proudícímu okolnímu vzduchu, který tak snadněji odvádí vodní páru. Tyto rostliny mají průduchy umístěné v pokožce co nejvýše, často i na vyvýšených papilách na listu (Sitte et al. 2002).

Odvod vodní páry z listů je ovlivňován i **vlhkostí okolního vzduchu a rychlostí jeho proudění**. Při vyšší vlhkosti vzduchu roste jeho vodní potenciál (vzduch o relativní vlhkosti 100% má vodní potenciál 0 MPa) a schopnost přijímat vodní páru z průduchů se tedy snižuje a tím se snižuje rychlost transpirace. Vyšší proudění vzduchu rychleji odvádí vodní páru z okolí listu, tím klesá jeho vodní potenciál a schopnost přijímat další vodní páru z listu se proto zvyšuje.

## 6.4. Transpirace a fotosyntéza

Otevření a uzavření průduchů ovlivňuje dva klíčové děje v rostlině, fotosyntézu a transpiraci. Pro fotosyntézu rostlina potřebuje přijímat oxid uhličitý otevřenými průduchy, těmi však zároveň odchází i vodní pára. Pokud tedy rostlina při nedostatku vody musí omezit transpiraci přivřením či úplným uzavřením průduchů, je tím zároveň omezena i fotosyntéza. Dostatek vody v půdě je proto limitující podmínkou i pro fotosyntézu. Množství vodní páry procházející průduchy je přitom mnohonásobně vyšší než množství oxidu uhličitého.

K tvorbě biomasy založené na fixaci oxidu uhličitého, potřebují různé rostliny rozdílné množství vody. Na každý gram vytvořené suché biomasy (tzv. sušiny, tj. hmoty, která zbyde z rostlinného těla po absolutním odpaření veškeré vody) rostlina přijme asi 500 g vody (Taiz & Zeiger 2002). Pro vyjádření spotřeby vody nutné k vytvoření jednotky biomasy byl zaveden tzv. **transpirační koeficient**. Transpirační koeficient vyjadřuje množství transpirované vody v litrech

za vegetační období potřebné k vytvoření jednoho kilogramu sušiny. U většiny našich běžných obilovin se tento transpirační koeficient pohybuje kolem hodnot 500–650, u kukuřice pouze kolem 300 (Larcher 1988).

Naprostá většina našich rostlin (včetně většiny obilovin) rostoucích v podmínkách mírného pásu patří k tzv. **C3** rostlinám. Fotosyntéza u nich probíhá podle Calvinova cyklu. Tento typ rostlin se vyznačuje v našich podmínkách popolední depresí fotosyntézy. Uzavření průduchů na světle vede k procesu **fotorespirace** (dýchání na světle), během něhož je oxid uhličitý naopak uvolňován, což snižuje výkon fotosyntézy (tzv. čistou fotosyntézu).

Lépe se s podmínkami rostoucí teploty vypořádávají tzv. **C4** rostliny, žijící v místech svého původu v podmínkách sucha, vysoké ozářenosti a relativně nízké vzdušné vlhkosti. K tomuto typu rostlin patří z důležitých zemědělských plodin u nás v současnosti pěstovaných především kukuřice, dále pak např. laskavec, proso, čirok, některé savanové druhy travin. Tyto rostliny mají z důvodu snížení transpirace nižší vodivost průduchů než $C_3$ rostliny, avšak čistá fotosyntéza je u nich poměrně vysoká, dokonce i vyšší než u $C_3$ rostlin. C4 rostliny totiž mají odlišný způsob fotosyntetického fixování oxidu uhličitého, označovaný jako Hatch–Slackův cyklus, v němž vystupují čtyřuhlíkaté sloučeniny (odtud označení C4). Tyto rostliny dokáží částečně eliminovat negativní vliv fotorespirace a mají také v porovnání s C3 rostlinami relativně nižší transpirační koeficient.

**CAM** rostliny, které se adaptovaly na pouštní podmínky, žijí ve svých původních oblastech v podmínkách vysokých denních teplot a sucha, velké intenzity slunečního záření a relativně nižších nočních teplot, (např. netřesky, tlustice, kaktusovité rostliny). Tyto rostliny jsou na pouštní podmínky adaptované již celou svou morfologickou i anatomickou stavbou. Uvnitř buněk mají velké vakuoly pro uchovávání zásoby vody, povrch těla je pokryt silnou kutikulou a voskovou vrstvou omezující tzv. kutikulární transpiraci. Aby zabránily odpaření vody a udržely ji uvnitř buněk, mají i během dne průduchy zavřené. Průduchy otevírají naopak až v noci, kdy je chladněji. Tyto rostliny mají zvláštní fotosyntetický metabolismus. Během dne využívají pro fotosyntézu oxid uhličitý uvolněný z malátu přítomného uvnitř buněk. Fotosyntéza tak u nich může probíhat ve dne i přes to, že uzavřené průduchy neumožňují příjem oxidu uhličitého z atmosféry. CAM rostliny mají tedy velmi omezenou transpiraci. Transpirační koeficient je u CAM rostlin velmi nízký, podle Larchera (1988) se pohybuje kolem hodnot 50–100.

## Literatura

Larcher, W. (1988). Fyziologická ekologie rostlin. Academia Praha, 368 s.

Ma, Y., Szostkiewicz, I., Korte, A., Moes, D., Yang, Y., Christmann, A., & Grill, E. (2009). Regulators of PP2C phosphatase activity function as abscisic acid sensors. Science, 324(5930), 1064-1068.

Nobel, P.S. (2009). Physicochemical and Environmental Plant Physiology, fourth edition, Elsevier Inc., 604 s.

Procházka a kol. (1998). Fyziologie rostlin. Academia Praha.

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

Sitte, P.,Weiler E.W., Kadereit J. W., Bresinsky A., Körner C., Strasburger E., (2002). Strasburger - Lehrbuch der Botanik für Hochschulen Hardcover – August 22, 2002

Slatyer, R. O. Taylor, S. A. (1960). Terminology in Plant- and Soil-Water Relations Nature 187, 922 – 924.

Slavíková J. (1986). Ekologie rostlin, SPN Praha, 366 s.

Šebánek a kol. (1983). Fyziologie rostlin, SZN Praha, 560 s.

Taiz, L., Zeigler, E. (2002). Plant Physiology. Sinauer Associates, Inc., Publishers.

# 7. Evapotranspirace

Evapotranspirace porostu (E) je úhrnné množství vody vypařené na určitém místě z půdního povrchu a povrchu rostlin (evaporace) a vydané průduchy rostlin (transpirace). Evapotranspirace se vyjadřuje v litrech vody na metr čtvereční nebo v mm, podobně jako úhrn srážek. Množství vypařené vody ovlivňují dvě skupiny faktorů:

1) vlastnosti a stav porostu (stáří porostu, pokryvnost listoví, schopnost vodivých pletiv převádět vodu od kořenů do listů, vodivost a otevřenost průduchů),

2) vnější prostředí obklopující vegetaci (množství energie dodané pro výpar vody, odvádění vodních par od výparného povrchu do vyšších vrstev vzduchu, množství vody přístupné rostlinám v půdě).

Evapotranspiraci lze považovat za nejmohutnější proces přeměny sluneční energie na pevnině. Zatímco fotosyntézou se přemění nejvýše 1 % dopadající energie slunečního záření, přeměnou vody v páru, tedy evapotranspirací, se může přeměňovat v porostech dobře zásobených vodou až 75 % dopadající sluneční energie. Je zřejmé, že hospodařením s vegetací a s vodou člověk účinně mění způsob přeměny sluneční energie. Pokud se totiž sluneční energie nespotřebuje na přeměnu skupenství vody v páru, mění se v teplo. Množství vody, které se z dobře zásobeného porostu odpaří, závisí na množství přicházející energie. Ta přichází jak přímo ve formě slunečního záření, tak ve formě teplého suchého vzduchu z okolí (advekce).

V hydrologických bilancích bývá evapotranspirace považována za „ztrátu vody výparem“. V oblastech trpících nedostatkem vody je zemědělský výzkum zaměřen na plodiny s vysokou účinností transpirace, tedy na plodiny, které spotřebují poměrně málo vody na vytvoření 1 kg biomasy. Evapotranspirací zemědělských plodin ve vztahu k efektivnímu zavlažování se zabývají výzkumné ústavy v dlouhodobých programech, viz např. Itenfisu et al. (2003), Irmak (2015), Ryszkowski (2020). Transpirační účinnost (transpirační koeficient) dosahuje hodnot několika set kg vody na vytvoření jednoho kilogramu sušiny rostlinné biomasy. Na jednu molekulu přijatého oxidu uhličitého odpaří rostlina průduchem několik stovek molekul vody (You et al. 2009). V rostlinné fyziologii je

transpirace spojována s transportem vody a živin od kořenů do listů, význam chlazení rostliny a okolí výparem vody nebývá zmiňován (Lambers et al. 1998).

Intenzita evapotranspirace a množství vody spotřebované za rok se liší u různých druhů. Například kukuřice podle klimatických podmínek spotřebuje za rok 500–800 mm (500–800 litrů na $m^2$), vojtěška (*Medicago sativa*) 800–1600 mm, z tropických rostlin jsou náročné na vodu banánovníky (1200–2200 mm v suchých/aridních podmínkách). Naproti tomu olivovník (*Olea europea*) je znám svoji nízkou spotřebou vody a odolností k suchu (400–600 mm). Nejvíce vody vypaří mokřadní rostliny (orobinec, vrby) rostoucí v menších mokřadech obklopených odvodněnými plochami, které se přehřívají. Naproti tomu sukulenty mají velmi nízkou spotřebu vody spojenou ovšem s nízkou produkcí biomasy (Pokorný 2019). V této kapitole ukážeme evapotranspiraci jako nejmohutnější proces přeměny sluneční energie, kterým rostliny chladí sebe a své okolí a vyrovnávají teplotní rozdíly.

## 7.1. Hodnoty hlavních toků sluneční energie v ekosystémech a zásadní význam výparu vody

Hlavní toky přeměn sluneční energie v porostech a ekosystémech lze měřit přímo. Reálné rozsahy hodnot těchto toků lze odvodit z denních nebo sezónních množství vypařené vody evapotranspirací, množství vytvořené biomasy (primární produkce) a množství rozložené biomasy v půdě. V přirozených porostech za optimálních podmínek v mírném pásu lze pro přibližná stanovení počítat s roční produkcí sušiny do 1 $kg.m^{-2}$ a průměrnou denní primární produkcí do 10 $g.m^{-2}$. Rychlost fotosyntézy za optimálních podmínek, vyjádřená v energetických jednotkách, může dosahovat hodnot několika $W.m^{-2}$. Fotosyntetické produkci 10 $g.m^{-2}.den^{-1}$ odpovídá průměrný energetický tok 4 $W.m^{-2}$. Rozklad organických látek v půdě (mineralizace), vyjádřený v energetických jednotkách, může nabývat hodnot až několikrát vyšších, než je rychlost tvorby a akumulace organických látek v procesu primární produkce: několik $W.m^{-2}$ až desítky $W.m^{-2}$ (Pokorný et al. 2007, Pokorný et al. 2010a).

Na evapotranspiraci se při rychlosti výparu vody 100 mg. $s^{-1}$. $m^{-2}$ spotřebovává 240 $W.m^{-2}$, rychlost evapotranspirace bývá i dvojnásobná. Sluneční ener-

gie se váže do vodní páry ve formě latentního (skrytého) tepla, a proto se teplota nezvyšuje. Na suché ploše se přicházející sluneční energie uvolňuje jako zjevné teplo. Rozdíl v distribuci sluneční energie na odvodněné ploše a ve vegetaci dobře zásobené vodou je za slunného dne v rozsahu několika set $W.m^{-2}$. Evapotranspirace má dvojnásobný klimatizační efekt – ochlazuje výparem a ohřívá kondenzací obzvlášť v noci. Ochlazují se místa s nadbytkem energie a ohřívají jen místa chladná, kde dochází ke kondenzaci vodní páry zpět na vodu kapalnou a uvolňuje se skupenské (skryté, latentní) teplo. Část sluneční energie ohřívá též půdu. Tok tepla do půdy může dosahovat hodnot několika $W.m^{-2}$ až desítek $W.m^{-2}$. Tok tepla do půdy se snižuje s vysycháním půdy a je též nízký v zapojených porostech. Důležitou roli má odrazivost, která souvisí s barvou povrchu. Světlá betonová plocha odráží až 30 % přicházející sluneční energie, vodní hladina kolem 10 % a tmavá vegetace kolem 20 %, přičemž vegetace dobře zásobená vodou odráží méně a vegetace suchá více. Pro odrazivost se vžil termín albedo (bělost), což je poměr mezi energií odraženou a přicházející. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, kterou lze vyjádřit i v %. Za slunného dne má světlý beton vyšší povrchovou teplotu nežli vegetace zásobená vodou, přestože beton má nižší albedo (více odráží světlo). Vegetace se totiž chladí výparem vody, evapotranspirací (Pokorný et al. 2010b).

Toky sluneční energie, vody a činnost rostlin jsou vzájemně propojeny v perfektní, nedostižný klimatizační systém. Představme si, že vodou bohatou na živiny, často závadnou (např. zředěná močůvka), zalijeme trávu a stromy. Rostliny přijmou vodu a živiny, vodu vypaří přes průduchy listů, přitom se ochladí okolí. Čím více sluneční energie, tím vyšší výpar a tím účinnější chlazení. Vodní pára se sráží na chladných místech a vyrovnává teploty mezi místy i v čase (ranní rosa). Rostliny ochlazují místa s přebytkem energie, přitom rostou, vytvářejí potravu, čistí vodu na kvalitu vody destilované a ohřívají pomocí vodní páry místa chladná a přenášejí energii z teplého dne do chladné noci. Klimatizační zařízení vyrobené člověkem spotřebovává elektrickou energii, ochlazuje místnost a v těsném sousedství ohřívá prostředí odpadním teplem. Jako média nepoužívá vodu, ale toxické látky. Větší strom vydá transpirací (odebere z půdy a vypaří) v teplém dni i několik stovek litrů vody. Transpirace 100 litrů vody je spojena s vázáním 69 kWh energie – takové množství tepla se neprojeví zvýšením teploty, naopak přispívá k ochlazování. Při následné kondenzaci vodní páry se tato energie uvolní a ohřeje místa chladná. Příroda si sama vyrovnává teplotní rozdíly. Člověk zásahy (cílenými

i nechtěnými) do rostlinného pokryvu a vodního režimu v krajině zásadním způsobem ovlivňuje místní klima, kvalitu i množství odtékající vody.

## 7.2. Evapotranspirace potenciální, referenční a aktuální

Evapotranspirace z plně zapojeného porostu, který je optimálně zásobený vodou, dosahuje maximálních možných hodnot a nazývá se potenciální evapotranspirace (PE). Je to tedy schopnost okolního vzduchu přijímat další vodu ve formě vodní páry. Hodnota PE závisí na množství přicházející sluneční energie, na relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti proudění vzduchu. Potenciální evapotranspirace se počítá zpravidla podle Penmana nebo podle Penmana – Monteithe (Monteith 1975, Monteith & Unsworth 1990). PE se vztahuje k nízkému, zelenému a zcela zapojenému porostu, který je dobře zásoben vodou. Hlavními vstupy pro výpočet PE jsou čistá radiace, teplota vzduchu, rychlost větru nad porostem a sytostní doplněk vodních par ve vzduchu. Alternativním termínem je referenční evapotranspirace, což je evapotranspirace referenčního porostu o dané výšce (12 cm), povrchovém odporu 70 $s.m^{-1}$ a albedu 23 %. Hodnoty referenční evapotranspirace pro Českou republiku jsou uvedeny v Klimatologickém atlase ČR, podrobněji k výpočtu viz Kohut (2005). Od potenciální evapotranspirace odlišujeme aktuální evapotranspiraci, která vyjadřuje evapotranspiraci konkrétního porostu při daném klimatickém stavu ovzduší a hydropedologickém stavu půdy.

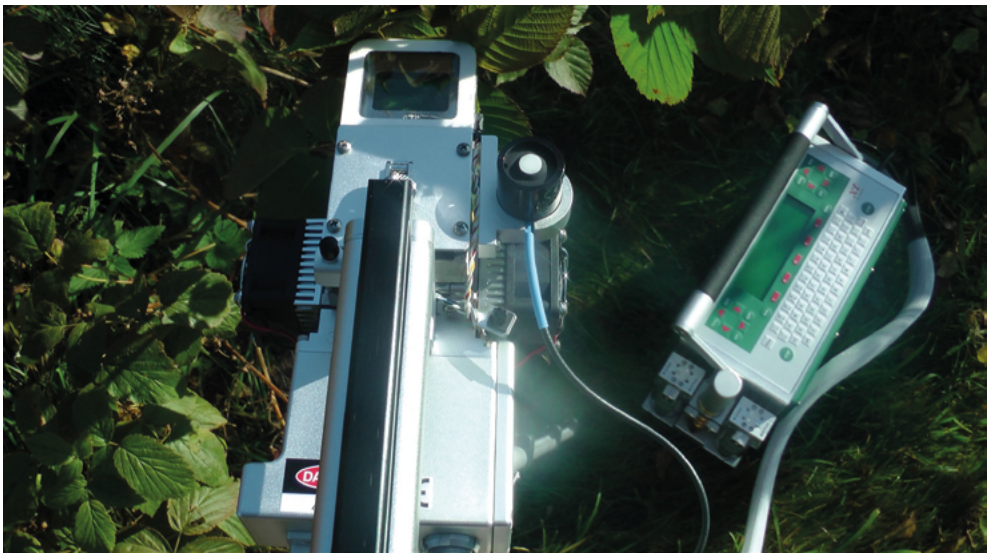
Množství vody, které se z dobře zásobeného porostu odpaří, závisí na množství přicházející energie. Ta přichází jak přímo ve formě slunečního záření, tak ve formě teplého suchého vzduchu z okolí (advekce). Advekcí přenášená energie má zejména význam v porostech menší rozlohy (např. pobřeží vodních toků, úzké litorální pásmo rybníků nebo malé mokřady uprostřed polí) a může podstatně zvyšovat výpar z těchto porostů. V experimentálních nádobách s trvalým přítokem vody umístěných na odvodněných polích byla za slunného dne naměřena evapotranspirace mokřadních rostlin i přes 20 litrů za den z metru čtverečního (Kučerová et al. 2001). Advekce zvyšuje podstatně evapotranspiraci i v rozsáhlých zavlažovaných kulturách sousedících s aridními oblastmi – například ze zavlažovaných polí v australském Novém Jižním Walesu se vypařuje za den více než 10 mm vody následkem přísunu teplého suchého vzduchu z vnitrozemí.

Hodnoty aktuální evapotranspirace porostů bývají i v našich podmínkách nižší než potenciální evapotranspirace hlavně proto, že porosty trpí po několika slunných dnech nedostatkem vody. Evapotranspirace lučních i lesních porostů dosahuje u nás v létě hodnot několika mm za den. Naopak transpirace jednotlivých stromů dobře zásobených vodou může být i několikrát vyšší nežli vypočtená potenciální evapotranspirace. Koruna stromu je osvětlena z velké části a chová se spíše jako trojrozměrné těleso, navíc se uplatňuje přísun teplého vzduchu z okolí (advekce).

## 7.3. Měření rychlosti transpirace

Transpirace umožňuje zásobování částí rostlin vodou a minerálními látkami, ochlazuje povrch listů a umožňuje tak metabolické pochody. Jednou z nejstarších metod studia transpirace a její intenzity je vážková 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. Tato jednoduchá metoda je vhodná pro názornou ukázku transpirace jako výparu vody listem.

Dnes zná moderní věda mnoho dalších a přesnějších možností k měření transpirace. Na úrovni listu bývají nejčastěji užívané metody **gazometrické**. Jsou založeny na schopnosti vodních par absorbovat dlouhovlnné červené záření. Podle absorbance pak lze usuzovat na množství měřené vodní páry. Na stejném principu je založeno i současné měření fotosyntézy, neboť i oxid uhličitý má schopnost absorbovat dlouhovlnné červené záření. Rychlost čisté fotosyntézy $P_N$ je vyjádřena jako rychlost příjmu $CO_2$ jednotkou listové plochy za jednotku času. Rychlost transpirace E je vyjadřována jako množství vody vypařené jednotkou listové plochy za jednotku času. Principu gazometrie využívá např. přístroj pro měření fotosyntézy a transpirace LI 6400 XT (obr 7.1).



**Obr.7.1** Přístroj pro gazometrické měření fotosyntézy a transpirace LI 6400 XT

Miniaturní infračervené plynové analyzátory pro měření koncentrace oxidu uhličitého a vodní páry jsou u tohoto přístroje vestavěny přímo v měřící hlavici, což umožňuje vysokou přesnost měření. Součástí měřící hlavice je měřící komůrka, do níž je uzavřen list rostliny. Přístroj pracuje na principu tzv. otevřeného systému, tj. měřící komůrkou s listem je prohánět vzduch. Z rozdílů množství $CO_2$ a $H_2O$ ve vzduchu, který vstupuje do komůrky a vzduchu, který z komůrky vystupuje je vypočítávána čistá fotosyntéza $P_N$ a transpirace E. Výpočet obou těchto parametrů je prováděn automaticky pomocí softwaru nainstalovaného v přístroji. Během gazometrického měření nedojde k poškození rostliny, jedná se o tzv. metodu neinvazivní, což je její nespornou výhodou. Naopak velkou nevýhodou je vysoká pořizovací cena přístroje.

Další metodou, jak odhadnout rychlost výparu, je měření vodivosti (odporu) listu pro difúzi vodní páry a obdobně též pro $CO_2$. Tyto hodnoty můžeme získat například **porometrickým** měřením. Přehled klasických metod pro měření výdeje vody a vodní bilance u rostlin uvádějí např. Slavík et al. (1965), Bannister (1986). Další z metod měření transpirace je metoda měření transpiračního toku „sap flow“. Používá se u stromů a výdej vody se měří na základě šíření teplotních pulsů kmenem. Varianty a využití této metody a popis instrumentace uvádí Čermák et al. (2014).

## 7.4. Metody stanovení evapotranspirace

Evapotranspiraci a její intenzitu lze studovat pomocí různých metod, které lze rozdělit na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody patří využití lyzimetrů a výparoměrů, mezi nepřímé pak řada mikrometeorologických metod (Novák 1995, Allien et al. 1998) a metody dálkového průzkumu Země.

### 7.4.1. Přímé metody

**Použití lyzimetru:** 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 množství půdy, teplota a vlhkostní poměry kolem kořenů se 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. Přehled literatury o lyzimetrech uvádějí například Soltysiak & Rakoczy (2019).

**Použití výparoměru:** 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.

### 7.4.1. Nepřímé metody

Evapotranspirace se zjišťuje výpočtem z naměřených meteorologických dat. Mikrometeorologické metody jsou vhodné pro studium evapotranspirace a ostat-

ních 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, struktura porostu, listová pokryvnost apod. Mezi mikrometeorologické metody patří řada metod, od jednoduchých až po metody instrumentálně a výpočetně značně složité. Mikrometeorologické metody se využívají pro zjišťování potenciální a aktuální evapotranspirace.

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, která vychází z poměru zjevného tepla a latentního tepla výparu nad vodní hladinou (porostem), jak ho definoval Bowen (1926). Poměr, v jakém se energie dělí na zjevné (ohřevné) teplo unikající z porostu do ovzduší a na latentní teplo výparu, se nazývá Bowenův poměr. Bowenův poměr je bezrozměrná veličina. V porostech zásobených vodou je nižší než 1, nad tropickým oceánem se udává i nižší než 0,1. Naopak při nedostatku vody je výpar vody nízký, povrch se sluneční energií ohřívá, od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch, převažuje tvorba zjevného tepla, Bowenův poměr je vyšší než 1. Podrobný popis aplikace této metody, Bowenův poměr pro různé plodiny a betonovou plochu i aplikaci Penman-Monteithovy metody podává Huryna et al. (2013).

**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 dodatková energie.

**Metoda vířivé (eddy) kovariance** je založena na principu přímého spektroskopického měření obsahu vodní páry a $CO_2$ ve vzduchu v kombinaci s ultrasonickým měřením pohybu vzduchu v trojrozměrném prostoru. Hodnoty jsou zaznamenávány ve frekvenci 20 Hz a integrovány zpravidla ve 30ti minutových intervalech. Jedná se o analytickou metodu, která je instrumentálně i výpočetně značně náročná. Používá se v současné době zejména na stanovení toků $CO_2$ v různých typech ekosystémů. (Kaimal & Finningan 1994, Foken 2008)

**Metody dálkového průzkumu Země** se intenzivně rozvíjejí od osmdesátých let 20. století a umožňují plošné odhady evapotranspirace. Hodnocení evapotranspirace je založeno na kombinaci různých typů dat – termálních, viditelných i infračervených – s daty pozemního měření a je spojeno s hodnocením energetické bilance (Kustas & Norman 1996). Především se jedná o kvantifikaci latentního tepla výparu z dat DPZ. (Kalma et al. 2008; Li et al. 2009) V závislosti na použitých metodách je nezbytné mít k dispozici měření nejen meteorologických veličin (např. teploty vzduchu, vlhkosti, rychlosti větru, slunečního záření atd.) v době přeletu družice, ale i parametry porostu (jeho výška, index listové plochy apod.) či půdy. Výpočet energetických toků je ovlivněn kvalitou a dostupností dat, dále pak přesností empirických koeficientů použitých ve výpočtech, ale i velikostí hodnoceného území. Hodnocení evapotranspirace je vztaženo ke kvantifikaci latentního tepla výparu, kdy například při teplotě 20 °C odpovídá toku 240 $W.m^{-2}$ rychlost výparu 100 $mg.s^{-1}.m^{-2}$. Za jednu hodinu se při takové rychlosti vypaří 0,36 litru vody z $1m^2$ (0,36 mm). V grafu 7.4 jsou uvedeny rychlosti evapotranspirace v průběhu slunného letního dne, naměřené v různých porostech. Výpar 100 $mg.s^{-1}.m^{-2}$ je realistickou střední hodnotou. Odhady evapotranspirace z různých typů dat DPZ mají využití především v zemědělství (monitoring sucha, zavlažování, výnosy plodin, vodní stres vegetace apod.). Příklad hodnocení energetické bilance krajiny je uveden v případové studii 2 (kapitola 9).

Pro hodnocení charakteristik povrchu spojených s výparem se používá řada družicových systémů (např. družice Landsat, TERRA Aster, AQUA MODIS, Terra MODIS, NOAA AVHRR, Sentinel 3) s různým prostorovým rozlišením. Satelity s kilometrovým rozlišením (meteorologické družice) umožňují získat data i v denním kroku, avšak s velkou mírou nejistoty danou heterogenitou pixelu. Dostupná jsou např. z platformy Earth Explorer (USGS). Pro podrobnější studium heterogenní kulturní krajiny chybí dostupný monitoring rozložení teplot.

Uvážíme-li, kolik prostředků se dává na zkoumání klimatické změny a dynamiku uhlíku, je pozoruhodné, že, kromě družice Landsat, nejsou volně (bezplatně) k dispozici termální data s vyšším prostorovým rozlišením (pod 100 metrů). Termální data s vysokým prostorovým rozlišením lze pořídit pomocí systémů umístěných na leteckých nosičích, či bezpilotních leteckých prostředcích. Na těchto nosičích většinou bývají umístěny termální širokopásmové kamery. Výhodou těchto dat je možnost operativního a opakovaného snímání zájmového území v rozlišení metrů (až centimetrů). Nevýhodu představuje vyšší finanční náročnost, nároky na technické vybavení i komplikovanější (před)zpracování dat, ale i legislativní omezení provozování těchto nosičů. Současné pořízení dat v jiných částech elektromagnetického spektra, které by umožnilo kvantifikaci energetických toků, je zatím omezeno přístrojovým vybavením, ale lze očekávat výrazný posun v rozvoji těchto technologií.

## 7.5. Radiační bilance porostů

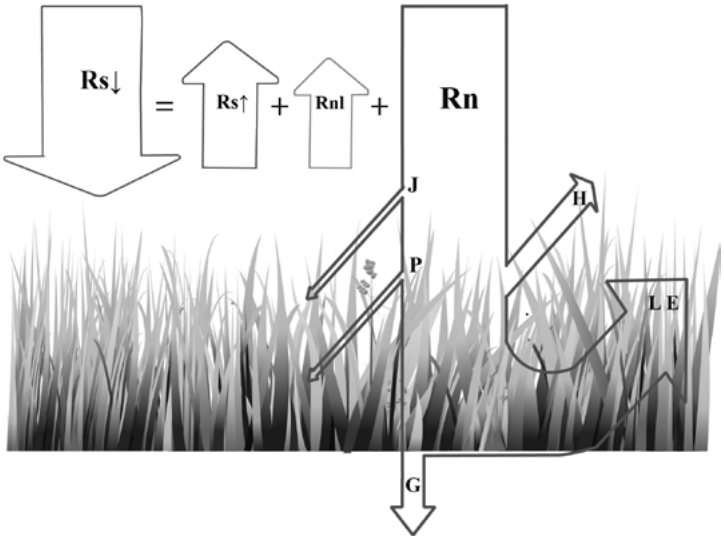
V kapitole 5 je popsána distribuce slunečního záření v různé roční době a při různé oblačnosti na sekaném trávníku, který je standardním povrchem pro meteorologická měření. V této kapitole se zabýváme efektem různého typu porostů (vegetace) na distribuci slunečního záření, přičemž nejdůležitějším procesem přeměny sluneční energie je evapotranspirace. Na obrázku 7.2 je schéma bilance slunečního záření v krajině, které navazuje na výsledky měření netradiometrem uvedené v kapitole 5. Sluneční energie ve formě krátkovlnného záření (RS↓ = short wave radiation) dopadá na povrch země a částečně se odráží (Rs↑), povrch země se sluneční energií ohřívá a do atmosféry vyzařuje dlouhovlnné záření (RnL = net long wave radiation). „Zbytek“ - čisté záření (Rn = net radiation) se váže do výparu vody (L.E = evapotranspirace), od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch (H = zjevné teplo, sensible heat), ohřívá se půda (G = tok tepla do půdy, ground heat flux), ohřívá se biomasa rostlin (J) a energie se váže fotosyntézou do rostlinné biomasy (P = photosynthesis).

V kapitole 5 jsme ukázali, že v daném ročním období ovlivňuje množství dopadající sluneční energie zejména oblačnost. Ve vegetační sezóně za jasného dne a při střídavé oblačnosti, kdy přichází za den až 8 kWh.m$^{-2}$, má zásadní význam pro distribuci sluneční energie stav vegetace a její zásobení vodou. Na obrázku

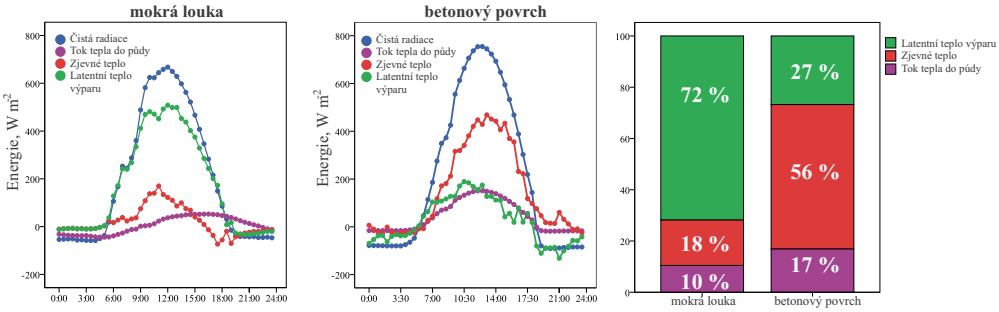
7.3 je znázorněn průběh rozložení denních toků sluneční energie na Mokrých lukách u Třeboně a nedaleké betonové ploše v areálu čistírny odpadních vod. Čisté záření (Rn) přesahuje v poledne hodnotu 600 $W.m^{-2}$. Na Mokrých lukách se až 500 $W.m^{-2}$ váže do latentního tepla výparu, spotřebuje se na evapotranspiraci. Na betonové ploše se většina čistého záření uvolňuje jako zjevně teplo. Na Mokrých lukách se za den 72 % čisté radiace spotřebovalo evapotranspirací a navázalo do vodní páry. Na betonové ploše se 52 % čistého záření uvolnilo jako zjevné teplo, které urychluje vzestupné turbulentní proudění vzduchu. Betonová plocha, na které stála meteorologická stanice, byla poměrně malá (cca 100 $m^2$) a měření bylo ovlivněno okolní vegetací a otevřenými nádržemi s vodou. Betonová plocha v noci vyzařuje teplo, chladne a ráno se na ní sráží vlhkost z okolí. Na velkých odvodněných plochách bez vegetace je podíl sluneční energie uvolněný jako zjevné teplo ještě vyšší.

Počítáme-li denní sumu čisté radiace v letním jasném dnu okolo 5 $kWh.m^{-2}$, potom 72 % je 3,6 kWh, což odpovídá výparu 5 l vody z jednoho $m^2$ (průměrný výpar 280 $W.m^{-2}$, 115 mg. $s^{-1}.m^{-2}$). Naproti tomu 56 % na betonové ploše odpovídá 2,8 kWh sluneční energie uvolněné během jednoho dne jako zjevné teplo, tedy ohřev vzduchu. Denní průběh evapotranspirace na Mokrých lukách, poli s ječmenem, louce/pastvině a betonové ploše vyjádřený v energetických jednotkách ($W.m^{-2}$) a v množství vody vypařené za sekundu z jednoho metru čtverečného je na obrázku 7.4. Je zřejmé, že rychlost výparu vody z Mokrých luk i pastviny je po většinu letního jasného dne vyšší než 100 $mg.s^{-1}.m^{-2}$ (240 $W.m^{-2}$). Takový porost má potom i vysokou produkci rostlinné biomasy, protože růst není omezen nedostatkem vody.

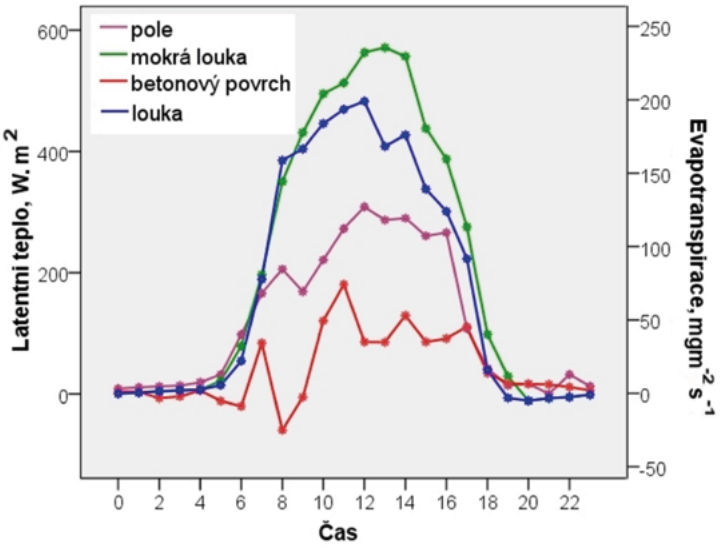
Na obrázku 7.5 je znázorněn poměr energie spotřebované na evapotranspiraci (latentní teplo výparu), na zjevné teplo a tok tepla do půdy pro pole s ječmenem, mokré louky, betonový povrch a pastvinu. Vyhodnoceny jsou slunné dny od 1. května do 31. srpna 2008. Slunný den byl definován sumou globálního záření větší než 6 $kWh.m^{-2}$. Na Mokrých lukách se 90 % čisté radiace spotřebovalo na evapotranspiraci, na pastvině 79 % a poli s ječmenem 75 %. Betonová plocha transformovala většinu čisté radiace na zjevné teplo (64 %) a 26 % do výparu vody.



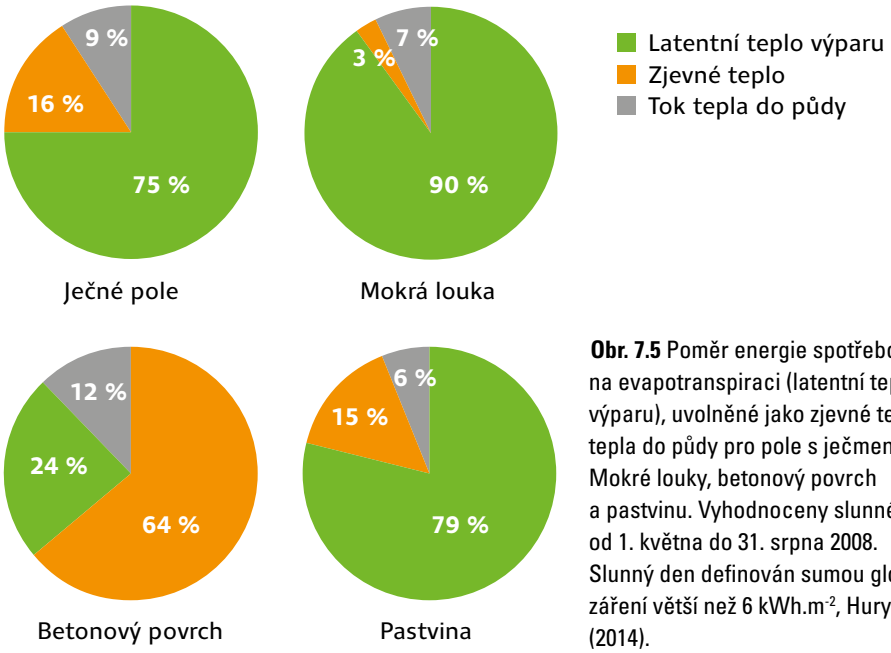

**Obr. 7.2** Radiační bilance porostu: $R_s\downarrow$ sluneční záření dopadající, Rs↑ sluneční záření odražené, RnL tok tepla od povrchu porostu/země do atmosféry, Rn čisté záření a jeho složky H zjevné teplo, L.E latentní teplo výparu (evapotranspirace), G tok tepla do půdy, J ohřev porostu, P fotosyntéza (upraveno, Huryna et al. 2014).




**Obr. 7.3** Denní průběh čisté radiace (Rn), latentního tepla výparu (L.E, evapotranspirace), zjevného tepla (H) a toku tepla do půdy (G) ve $W.m^{-2}$ měřený 29.7. 2008 na Mokrých loukách u Třeboně a na betonovém povrchu čistírny odpadních vod. Mokré louky spotřebovaly 72 % z čisté sluneční radiace na evapotranspiraci, 18 % se uvolnilo do zjevného tepla a 10 % energie ohřálo půdu. Na betonovém povrchu se uvolnilo 56 % energie jako zjevné teplo, 17 % přešlo hlouběji do betonu a 27 % se spotřebovalo na výpar vody, což si vysvětlujeme ranní rosou i faktem, že beton neměl dostatečnou plochu a projevil se efekt nasávaného vlhkého vzduchu z okolí.




**Obr. 7.4** Denní průběh latentního tepla výparu ($W.m^{-2}$) vyjádřeného též jako rychlost evapotranspirace ($mg.m^{-2}.s^{-1}$) na Mokrých lukách u Třebně, obhospodařované louce, poli s ječmenem a betonovém povrchu (upraveno podle Pokorný et al. 2010).

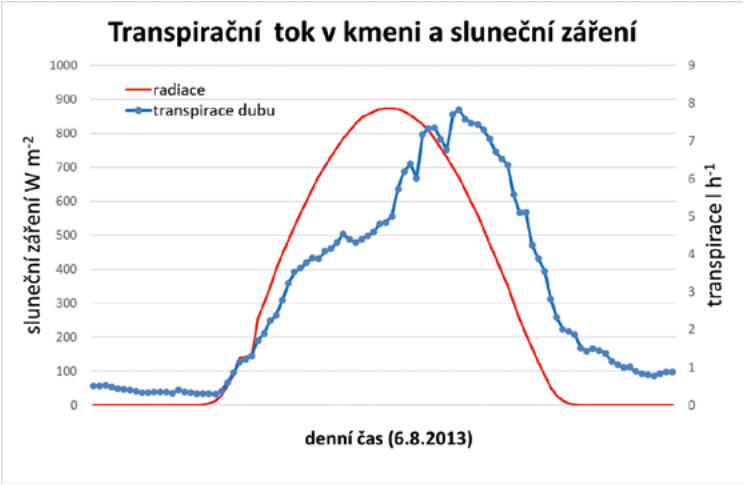



**Obr. 7.5** Poměr energie spotřebované na evapotranspiraci (latentní teplo výparu), uvolněné jako zjevné teplo a tok tepla do půdy pro pole s ječmenem, Mokré louky, betonový povrch a pastvinu. Vyhodnoceny slunné dny od 1. května do 31. srpna 2008. Slunný den definován sumou globálního záření větší než 6 $kWh.m^{-2}$, Huryna et al. (2014).

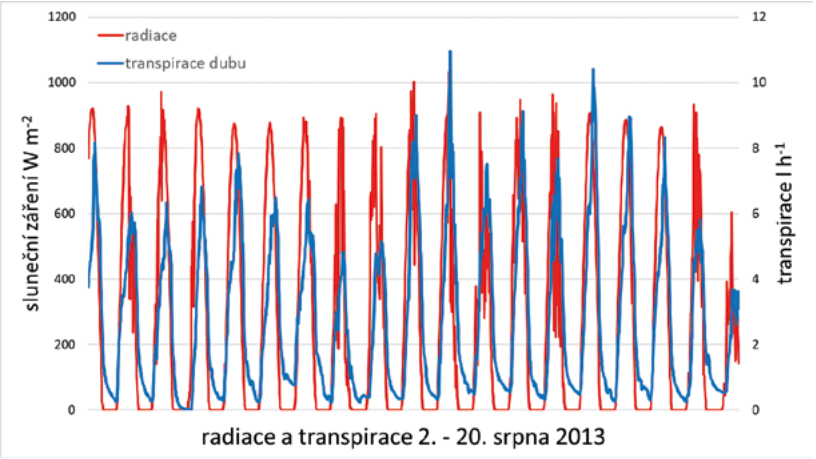
Měření evapotranspirace lesních porostů meteorologickými metodami je technicky náročné a finančně nákladné, vyžaduje totiž záznam teploty a vlhkosti vzduchu na povrchu porostu a referenční záznam vysoko nad porostem. Představu o evapotranspiraci zapojeného lesního porostu poskytuje měření transpiračního toku vybraných typických stromů (Čermák et al. 2004, 2007). Nutno zdůraznit, že výpar z povrchu listů a jehlic tvoří podstatnou část evapotranspirace vzrostlého lesa, protože stromy zachycují na povrchu listů část srážek a „vyčesávají" vodu ze vzduchu (horizontální srážky). O metodách stanovení evapotranspirace lesa je rozsáhlá literatura, přehled podávají například Sun et al. (2016).

Denní průběh transpiračního toku v kmeni názorně ukazuje, jak strom reaguje na příkon sluneční energie. Na obrázku 7.6 je vynesen průběh globálního slunečního záření ($W.m^{-2}$) a transpiračního toku měřeného v kmeni dubu zimního (*Quercus petrea)* metodou „sap flow". Výzkumný les v Soběšicích u Brna v té době trpěl nedostatkem vody. Duby dostatečně zásobené vodou v říční nivě transpirují za den až 400 litrů vody (Čermák et al. 1982). Dub v Soběšicích vypařil za den 66 litrů vody. Je tedy pravděpodobné, že měl v důsledku suché půdy a nízké vlhkosti vzduchu zavřené průduchy a jeho fotosyntetická produkce byla omezena (Verbeeck et al. 2007). Na obrázku 7.6 je též patrné zpoždění transpiračního toku kmenem o cca 3 hodiny a v noci se transpirační proud zcela nezastavil. Dub zřejmě ještě nebyl v kritické situaci, protože reagoval zvýšeným transpiračním tokem (sap flow) na srážky 4., 9. a 10. srpna, a to s jedno- až dvoudenním zpožděním, což naznačuje větší zastoupení hlubších kořenů (obr. 7. 7).

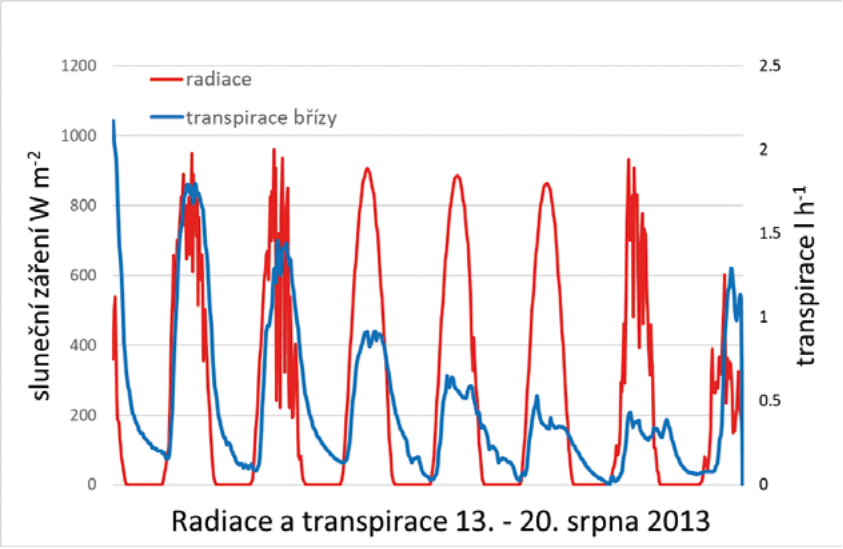
Odlišnou dynamiku transpiračního toku vykazovala bříza bělokorá na témže stanovišti (obr. 7.8). Patrné jsou rozdíly v transpiračním toku mezi jednotlivými dny. Bříza má mělké kořeny, takže vyčerpala vodu po dešti z 9. a 10. srpna a její transpirace klesla po několika dnech na čtvrtinu. Reagovala ovšem rychle na drobnou srážku z 19. na 20. srpna.




**Obr. 7.6** Denní průběh globálního slunečního záření (W.m$^{-2}$) a transpiračního toku měřeného v kmeni dubu zimního (Quercus petrea) metodou „sap flow" dne 6. srpna 2013. Výška stromu 22 m, obvod kmene 96 cm, plošný půdorys koruny 43 m$^2$, pokryvnost listoví 3 (3 m$^2$ listové plochy nad 1 m$^2$ půdy), Soběšice, výzkumný pozemek Mendelovy univerzity. (Tomková 2014)




**Obr. 7.7** Denní průběhy slunečního záření (W.m$^{-2}$) a transpiračního proudu (l.h$^{-1}$) dubu zimního od 2. 8. do 20. 8. 2013. Patrný je mírný pokles k 10. 8., kdy v noci zapršelo, doplnila se voda a transpirační tok se opět zvýšil. (Tomková 2014)

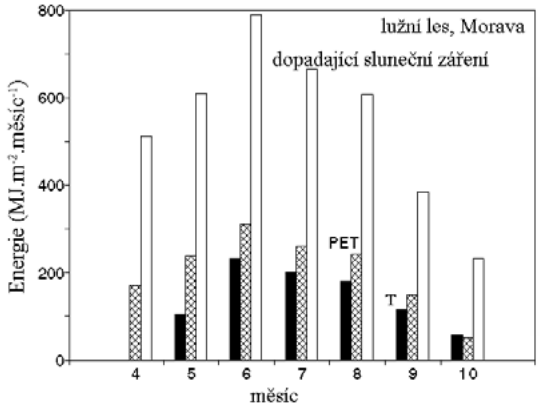



**Obr. 7.8** Denní průběhy slunečního záření a transpiračního toku v kmeni břízy bělokoré (*Betula alba*). Bříza má kořeny pouze při povrchu, a proto transpirační proud při nedostatku vody rychle klesá a obnovuje se i po menším dešti. Výška stromu 20 m, obvod kmene 76 cm, plošný půdorys koruny 20 $m^2$. (Tomková 2014)





**Obr. 7.9 a,b** Soběšice, Výzkumný pozemek Mendelovy univerzity, kde probíhala měření transpiračního toku. Instalace sond na měření transpiračního toku v bříze bělokoré (na snímku prof. Jan Čermák).




**Obr. 7.10** Měsíční sumy dopadajícího slunečního záření, potenciální evapotranspirace (PET) a transpirace (T) měřené jako transpirační proud ve kmeni (sap flow). Měřeno v lužním lese na soutoku Dyje s Moravou. (Čermák et al. 2004, Pokorný et al. 2010b)

Transpirace (T) jednotlivých stromů (dub zimní *Quercus petraea*) rostoucích v říční nivě je vyjádřena v MJ.m$^{-2}$.měsíc$^{-1}$ (1 kWh = 3,6 MJ, skupenské výparné teplo 1 kg vody při 25 ˚C = 2,4 MJ). Měsíční sumy transpirace naměřené metodou „sap flow" se v letních měsících pohybují okolo 200 MJ.m$^{-2}$, což odpovídá výparu cca 80 litrů vody na 1 m$^2$ půdorysu koruny. Množství vody transpirované stromem (změřené jako transpirační proud kmenem/sap flow) odpovídá 18 % sluneční energie, která na 1 m$^2$ dopadla v měsíci květnu a okolo 30 % v červnu, červenci, srpnu, září. Je zřejmé, že strom měl dostatek vody, protože zvýšené množství přicházející sluneční energie bylo provázeno zvýšenou transpirací, jak je patrno v měsících květnu a červnu. Za vegetační sezónu převedl strom do latentního tepla výparu transpirací 910 MJ.m$^{-2}$ sluneční energie (250 kWh.m$^{-2}$), což odpovídá výparnému teplu 380 litrů vody. Hodnoty transpirace se se pohybují okolo ¾ potenciální evapotranspirace. K transpiraci stromů změřené metodou „sap flow" je nutno připočítat výpar (evaporaci) z povrchu půdy a hlavně z povrchu listů a celého povrchu rostlin. Srážková voda ulpívá na povrchu vegetace (intercepce), navíc listy a jehlice „vyčesávají" vodu z mraků a vlhkého vzduchu. Tento proces tzv. horizontálních srážek se významně podílí na příjmu vody lesa s rostoucí nadmořskou výškou i v lužních lesích, kde je vysoká relativní vlhkost vzduchu (Chang 2013). Podíl sluneční energie, který se váže do skupenského tepla výparu v lužním lese, může být i dvojnásobně vyšší, než je 30 % změřených

jako transpirační proud ve kmeni. Intercepce a horizontální srážky v lužním lese ve vegetační sezóně přispívají průměrně minimálně 1 mm denně k vodní bilanci a podílejí se na tzv. mikro – oběhu vody (Dawson 1998; Kedziora a Olejnik 2002; Bruijnzeel 2005; Prada 2009). Evapotranspirace lužního lesa byla blízká potenciální evapotranspiraci. Lužní les udržuje vysokou relativní vlhkost vzduchu a hodnoty evapotranspirace se pohybují v rozsahu několika litrů na 1 $m^2$, tedy několika mm za den.

## 7.6. Krajinný pokryv určuje distribuci sluneční energie

Evapotranspirace je hlavním procesem, který v krajině transformuje tok sluneční energie v řádu až stovek wattů na metr čtverečný. Pokud voda v krajině chybí, vzrůstá povrchová teplota, uvolňuje se zjevné teplo, ohřívá se vzduch, který stoupá vzhůru. Tento jev je letcům znám pod pojmem termika. Odvodnění a odstranění vegetace na velkých plochách má za následek změny distribuce sluneční energie a změny proudění vzduchu, změny regionálního klimatu (Pielke et al. 1998; Snyder 2010). Ztráta vegetačního pokryvu, odvodnění a eroze půdy vedou v prvé řadě k poklesu evapotranspirace a ohřevu krajiny, nárůstu teplotních extrémů. Zvýšení albeda (zvýšení odrazivosti sluneční energie) po odlesnění má nízký efekt na teplotu (Pielke et al. 2011, Eiseltová et al. 2012, Hesslerová et al. 2013). Osluněný písek, beton, sklizené pole či uschlý les mají teplotu podstatně vyšší nežli vegetace zásobená vodou, přestože mají vyšší albedo (Hesslerová et al. 2019). Lze se o tom snadno přesvědčit měřením IR teploměrem.

Shukla et al. (1990) a Nobre et al. (1991) popisují významný vzestup průměrné povrchové teploty s poklesem evapotranspirace a s tím související pokles dešťových srážek po přeměně tropického lesa na pastviny v Amazonii. Prodloužilo se též období sucha na jihu Amazonie. Hurt et al. (2006) vyhodnotili, že od 18. století bylo postupně 42–48 % plochy kontinentů ovlivněno lidskou činností, hospodářskými zásahy (odvodnění, zemědělská pole, pastviny, těžba dřeva). Výše v textu jsme ukázali, že za slunného počasí je pokles evapotranspirace o 100 $mg.s^{1}.m^{-2}$ provázen uvolněním zjevného tepla 240 $W.m^{-2}$. To na 1 $km^2$ (100 ha) představuje tok tepla 240 MW. Podobně denní pokles evapotranspirace o 3 mm na 1 $km^2$ je provázen uvolněním zjevného tepla 2000 MWh (Pokorný &

Rejšková 2008). Bradshaw (2012) ukázal, že Austrálie ztratila 40 % lesních ploch od počátku evropského osídlení. Rozsáhlé odlesnění vedlo k nárůstu průměrných teplot ve východní Austrálii a poklesu dešťových srážek na jihovýchodě a vzestupu srážek na severozápadě Austrálie (Nicholls & Lavery 1992, Nicholls et al. 2006). Andrich & Imberger (2013) doložili, že pokles srážek ve vnitrozemí na západě Austrálie není způsoben globální klimatickou změnou, ale odlesněním, protože srážky blíže pobřeží na západě Austrálie se po odlesnění ve vnitrozemí nezměnily. Esau & Lyons (2002) ukázali, jak přeměna přirozené, původní vegetace na zemědělskou půdu vede ke změně distribuce sluneční energie a významnému horizontálnímu toku tepla a vlhkosti ze zemědělské oblasti směrem k přírodní vegetaci. Mitsch a Hernandez (2013) na základě historických dat odvodili, že více než 51 % z původní celkové plochy mokřadů na území USA bylo po příchodu Evropanů odvodněno a přeměněno na zemědělskou půdu, což představuje plochu 46 x $10^6$ ha (460 000 $km^2$). Při poklesu evapotranspirace o 100 $mg.s^{-1}.m^{-2}$ (240 $W.m^{-2}$) se produkuje za slunného počasí z této plochy 110 400 GW. To je ohromné množství energie ve formě vzestupného turbulentního proudění ohřátého vzduchu, které ovlivňuje dynamiku proudění v atmosféře a zvyšuje teplotu vzduchu, který potom může způsobovat oteplení na severu.

Výpar vody rostlinou (transpirace) a porosty (evapotranspirace) je tradičně ve fyziologii rostlin pokládán „za nutné zlo“, nazýván ztrátou vody výparem. Počítány jsou ztráty vody v zemědělství při zavlažování. Zemědělský výzkum vyhledává plodiny s nízkou spotřebou vody, neboť jednou z cest adaptace na klimatickou změnu je využití rostlin přizpůsobených na nedostatek vody. (Watanabe et al. 2004, Attarod et al. 2009, Silva et al. 2012). Počítá se vodní stopa hospodářských zvířat i vodní stopa plodin a stromů.

Ukázali jsme význam evapotranspirace v utváření mikroklimatu a regionálního klimatu a kvantitativně vyjádřili schopnost vody a rostlin snižovat teplotu v letních slunných dnech a vyrovnávat rozdíly teplot mezi dnem a nocí. Tyto procesy lze měřit a kvantifikovat a ukázat, jaké funkce poskytuje ekosystém (rostliny) zdarma. V následující kapitole 8 ukážeme, jak evapotranspirace lesů a mokřadů podporuje transport vlhkého vzduchu od oceánů do vnitrozemí.

## Literatura

Allen, R.G., Pereire, L.S., Raes, D. a Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Andrich, M.A. a Imberger, J. (2013). The effect of land clearing on rainfall and fresh water resources in Western Australia: a multi-functional sustainability analysis. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 20, s. 549 – 563.

Attarod, P., Aoki, M. a Bayramzadeh, V. (2009). Measurements of the actual evapotranspiration and crop coefficients of summer and winter seasons crops in Japan. *Plant, Soil and Environment* 55, s. 121– 127.

Bannister, P. (1986). Water relations and stress. In: Moore, P.D. a Chapman, S.B. (Eds.): Methods in Plant Ecology. Blackwell Scientific Publications, s. 73-144.

Bruijnzeel, L.S., Eugster, W. a Burkard R. (2005). Fog as a hydrologic input. In: Anderson, M.G. (Ed.). Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Ltd. s. 559 – 582.

Chang, M. (2013). Forest Hydrology: an introduction to water and forests. 3rd ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 598 s.

Čermák, J., Úlehla, J., Kučera, J. a Penka, M. (1982). Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur L.*) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. *Biologia plantarum (Praha)*, 24, s. 446-460.

Čermák, J., Kučera, J. a 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

Čermák, J., Kučera, J., Bauerle, W.L., Phillips, N. a Hinckley, T.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, s. 181–198.

Čermák, J., Nadezhdina, N., Trcala, M. a Simon. J. (2014). Open field-applicable instrumental methods for functional assessment of whole trees and stands. *iForest - Biogeosciences and Forestry,* 8, e1-e53. 10.3832/ifor1116-008.

Dawson, T.E. (1998). Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia*, 117, s. 476 - 485.

Eiseltová, M., Pokorný, J., Hesslerová, P. a Ripl, W. (2012). Evapotranspiration – a driving force in landscape sustainability. In: Irmak, A. (Ed.) Evapotranspiration – remote sensing and modeling. *InTech*, Croatia, s. 305–328.

Esau, I. N. a Lyons, T.J. (2002). Effect of sharp vegetation boundary on the convective atmospheric boundary layer. *Agriculture and Forest Meteorology*, 114 s. 3 – 13.

Foken, T. (2008). Micrometeorology [online]. Berlin: Springer [vid. 2012-12-19]. ISBN 978-3-540-74666-9. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74666-9

Irmak, S. (2015). Inter-annual variation in long-term center pivotirrigated maize evapotranspiration (ET) and various water productivity response indices: Part I. Grain yield, actual and basal ET, irrigation-yield production functions, ET-yield production functions, and yield response factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 141(5), s.1–17.

Itenfisu, D., Elliot, R.L., Allen, R.G. a Walter, I.A. (2003). Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6), s. 440–448.

Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. a 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, s. 145 – 154.

Hesslerová, P., Pokorný, J., Huryna, H. a Harper, D. (2019). Wetlands and Forests Regulate Climate via Evapotranspiration., In, S.An, J.T.A. Verhoeven (eds.),Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use. *Ecological Studies,* 238, s. 63 – 93.

Huryna, H., Brom, J. a Pokorný, J. (2014). The importance of Wetlands in the energy balance of an agriculture landscape. *Wetlands Ecology and Management*, 22(4), s. 363 – 381.

Huryna, H. a Pokorný, J. (2016). The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica*, 5, s. 191 – 208.

Jirka, V., Pokorný, J. (2013). Energetická bilance slunečního záření, dopadajícího na zemský povrch. *Vytápění, větrání, instalace*, 22/4, s. 184 – 188.

Kaimal, J. C. a Finnigan, J.J. (1994). Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. New York: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-506239-7.

Kalma, J.K., McVicar, T. a McCabe, M.F. (2008). Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics,* 29 (4), s. 421 – 469.

Kedziora, A. a Olejnik, J. (2002). Water balance in agricultural landscape and opnions for its management by change in plant cover structure of landscape. In: Ryszkowski, L. (Ed.).Landscape ecology in agroecosystems management. CRC Press, Boca Raton, Florida, s. 57-110.

Kohut, M. (2005). Referenční evapotranspirace. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (Eds.). Seminář „Evaporace a evapotranspirace" Brno, 23. března 2005, ISBN 80-86690-24-5, s. 25 38.

Kučerová, A., Pokorný, J., Radoux, M., Němcová, M., Cadelli, D. a Dušek, J. (2001). Evapotranspiration of small-scale constructed wetlands planted with ligneous species. In: Vymazal, J. (Ed.), Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands, Leiden, s. 410-427.

Kučerová, A., Čermák, J., Nadezhdina, N. a Pokorný, J. (2010). Transpiration of *Pinus rotundata* on a wooded peat bog in central Europe. *Trees, structure and function*, 24(5), s. 919 – 930.

Kustas, W. P. a Norman J. M. (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces, *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), s. 495-516.

Lambers, H., Chapin., F.S. a Pons, T.L. (1998). Plant Physiological Ecology, Springer, New York, 540 s.

Li, Z.L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G. a Zhang, X. (2009). A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9, s. 3801-3853.

Monteith, J.L. (Ed.) (1975). *Vegetation and the Atmosphere*, Vol. I., Academic Press, London.

Monteith, J.L.,Unsworth, M. (1990). *Principles of Environmental Physics*, 2nd edition. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Nicholls, N., Collins, D., Trewin, B., a Hope, P. (2006). Historical instrumental climate data for Australia—quality and utility for palaeoclimatic studies. *Journal of Quaternary Science* 21, s. 681 – 688.

Nicholls, N. a Lavery, B. (1992). Australian rainfall trends during the 20th-century. *International Journal of Climatology*, 12, s. 153–163.

Nobre CA, Sellers PJ, Shukla J (1991.) Amazonian deforestation and regional climate change. J Climate 4:957–988

Novák, V. (1995). Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava.

Pielke, R.A., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A.J., Zeng, X.B. a Denning, A.S. (1998). Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biology,* 4, s. 461–475.

Pielke, R.A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K.K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P. a de Noblet, N. (2011). Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Climate Change* 2, s. 828 – 850.

Pokorný, J., Rejšková. A. a Brom, J. (2007). Úloha makrofyt v energetické bilanci mokřadů, *Zprávy České Botanické Společnosti Praha*, 42(22), s. 47 – 60.

Pokorný, J. a Rejšková, A. (2008). Water cycle management. In: Jorgensen, E. a Fath, B. (Eds). Encyclopedia of Ecology 5. Elsevier Science, s. 3729 – 3737.

Pokorný, J., Květ, J., Rejšková, A. a Brom, J. (2010a). Wetlands as energy-dissipating systems. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 37, s. 1299 – 1305.

Pokorný, J., Brom, J., Čermák, Hesslerová, P., J., Huryna, H., Nadezhdina, N. a Rejšková, A. (2010b). Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal of Water*, 5(4), s. 311 – 336.

Pokorný, J. (2019). Evapotranspiration. In: Fath, B.D. (Ed) Encyclopedia of Ecology, 2nd edition, 2, s. 292–303.

Prada S. (2009). Fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal). *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6–7), s. 1179–1187.

Ryszkowski, L. (2020). Landscape Ecocology in Agroekosystems Management, CRC Press, 384 s.

Shukla, J., Nobre, C. a Sellers, P. (1990). Amazon deforestation and climate change. *Science* 247, s. 1322–1325.

Silva, V., Borges, C., Farias, C., Singh, V., Albuquerque, W. a Silva, B. (2012). Water requirements and single and dual crop coefficients of sugarcane grown in a tropical region, Brazil. *Agricultural Sciences*, 3, s. 274-286.

Slavík, B., a kol. (1965). Metody studia vodního provozu rostlin Nakladatelství ČSAV, Praha, 302 s.

Soltysiak, M. a Rakoczy, M. (2019). An overview of the experimental research use lysimeters. *Environmental and Socio –economic Studies,* 7(2), s. 49 – 56.

Snyder, P.K. (2010). The influence of tropical deforestation on the northern hemisphere climate by atmospheric teleconnections. *Earth Interaction*, 14, s. 1–34.

Sun, G., Domec, J.C. a Amatya, D.M. (2016). Forest Evapotranspiration: Measurements and Modelling at Multiple Scales. In: Amatya, D.M.Williams, T.M., Bren, L., de Jong, C. (Eds): Forest Hydrology: Processes, Management and Assessment,Publisher CABI, s. 32 – 50.

You, Ch.Y., Pence, H.E., Hasegava, P.M. a Mickelbart, M.V. (2009). Regulation of transpiration to improve crop water use. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(6), s. 410 – 431.

Tomková. A. (2014). Srovnání různých přístupů k hodnocení energetické bilance stromů. Diplomová práce, Katedra experimentální biologie PřF UK Praha, 90 s.

Verbeeck, H., Steppe, K., Nadezhdina, N., De Beeck, M.O., Deckmyn, G., Meirsonne, L., Lemeur, R., Čermák, J., Ceulemans, R. a Janssens, I.A. (2007). Stored water useand transpiration in Scots pine: a modeling analysis with ANAFORE. *Tree physiology*, 27, s. 1671-1685.

Watanabe, K., Yamamoto, T., Yamada, T., Sakuratani, T., Nawata, E., Noichana, C., Stributta, A. a Higuchi, H. (2004). Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. *Agriculture Water Management*, 67, s. 133–143.

# 8. Lesy přitahují vodu evapotranspirací

Země, pevniny jsou výše než hladina moře. Voda odtéká z pevniny řekami do moří. Celková zásoba sladké vody na pevnině je poměrně malá: všechna voda obsažená v ledovcích, jezerech a v půdě by řekami odtekla do moří během několika roků (L´vovitch 1979). Voda odtéká do moří gravitační silou, kterou využívají též hydroelektrárny. Návrat vody na kontinenty je fyzikálně možný jenom atmosférou ve formě vodní páry. Neustálý odtok vody z kontinentů je kompenzován proudem vlhkého vzduchu od moří na pevninu, kde vodní pára kondenzuje a padá ve formě deště, rosy a sněhu. Globální zásobení vodou je závislé na atmosférickém transportu vody z oceánů na pevninu.

V první kapitole jsme ukázali, jak historické civilizace ztrácely vodu následkem odlesnění a odvodnění krajiny. V předchozí kapitole 7 je evapotranspirace popsána jako mohutný proces přeměny sluneční energie vyrovnávající teplotní rozdíly mezi dnem a nocí i mezi místy. Odvodnění, ztráta trvalé vegetace vedou k přehřívání krajiny, vysychání a poklesu dešťových srážek.

Z vědeckého hlediska v celostním (holistickém) pojetí se funkcí lesa v klimatu zabýval již Alexander Humboldt v první polovině 19. století (Wulf 2016), později Marsh (1864). Oba poukazovali na úlohu lesa v oběhu vody a varovali před rozsáhlým odlesňováním. Světové společenství úmluvami opakovaně deklaruje, že lesy jsou světové přírodní bohatství a mají být spravovány pro zachování ekosystémových funkcí (Rio de Janeiro 1992). V preambuli Lesního zákona je psáno: „Účelem tohoto zákona je stanovit předpoklady pro zachování lesa, péči o les a obnovu lesa jako národního bohatství, tvořícího nenahraditelnou složku životního prostředí, pro plnění všech jeho funkcí a pro podporu trvale udržitelného hospodaření v něm“.

Lesů na planetě ovšem ubývá. V letech 2003 – 2018 byly celosvětové roční průměrné ztráty lesa 239 000 km$^2$, z toho 38 % připadá na lesní požáry (Wees et al. 2020). I když se v jednotlivostech údaje různých autorů a organizací liší, rozsáhlé úbytky lesů vzrostlého funkčního lesa, který se vyvíjel po staletí, jsou nesporné. Jsou obavy, že odlesnění může způsobit vyschnutí dalších oblastí, například severní části deštného amazonského lesa se mohou přeměnit na savanu.

Stejně tak jsou ohroženy i zemědělské oblasti Číny, afrického Sahelu a argentinské pampy. Četné velké městské aglomerace jsou závislé na dešťových srážkách, pocházejících ze vzdálených lesů, například Karáčí v Pakistánu, Wuhan a Šanghai v Číně, New Delhi a Kalkata v Indii. I malý pokles srážek způsobený změnou krajinného pokryvu na návětrné straně, může mít negativní dopad na dodávky vody do zalidněných oblastí dále ve směru větru. (Keys et al. 2018)

Je historickou zkušeností, že v lesnatých oblastech prší a odlesnění vede k poklesu srážek a vysychání. O tom, jak funguje les v oběhu vody, se vedou ovšem debaty. Proč prší na kontinentech daleko od oceánů, proč vzdálené oblasti uvnitř zalesněných kontinentů dostávají tolik srážek jako pobřeží a proč nezalesněná území uvnitř kontinentů vysychají?

Traduje se, že většina atmosférické vlhkosti, která kondenzuje v mracích a padá jako déšť, pochází z oceánů. Brazilští meteorologové uveřejnili studii o izotopovém složení dešťové vody v Amazonské nížině a ukázali, že polovina dešťových srážek v Amazonii pochází z transpirace lesa. Voda recyklovaná transpirací rostlin totiž obsahuje více molekul s těžkým izotopem kyslíku ($^{18}O$), nežli voda vypařená z oceánu (Salati et al. 1979).

Pearce (2020) popisuje, jak meteorologové sledovali atmosférické tryskové proudění směřující z východu na západ přes lesy Amazonie ve výšce okolo 1,5 km (South American Low-Level Jet), které se v oblasti And stáčí k jihu. Salati, Nobre a další ukázali, že tato trysková proudění přenáší množství vlhkosti, která pochází z transpirace lesů a nazvali ho létající řekou, protože podle odhadu nese tolik vlhkosti, jako ohromná řeka na kontinentu pod ním. Savenije (1995) ukázal, že směrem od pobřeží do vnitrozemí stoupá podíl dešťové vody, která pochází z lesů a ve vnitrozemí dosahuje 90 %. Toto zjištění pomohlo vysvětlit, proč se za posledních šedesát let vnitrozemí Sahelu vysušilo poté, co byly vykáceny lesy na pobřeží. Jeden ze Savenijových studentů, Ruud van der Ent rozvinul myšlenku dále, vytvořením globálního modelu toku vzdušné vlhkosti. Spojil měřené údaje o srážkách, vlhkosti vzduchu, rychlosti větru a teploty s teoretickými odhady výparu a transpirace. Vznikl tak první model toků vlhkosti pro území větší, než je obvykle modelované povodí řeky. Van der Ent et al. (2010) ukázali, že globálně 40 % veškerých srážek pochází spíše z pevnin nežli z oceánů. Často to bývá i více. Amazonská létající řeka dodává 70 % dešťových srážek Laplatské nížině. Van der Ent byl nejvíce překvapen zjištěním, že 80 % srážek v Číně pochází ze západu. Jedná

se o vlhkost z Atlantiku, která je recyklovaná boreálními lesy Skandinávie a Ruska. Tento koloběh trvající půl roku i déle, zahrnuje několik fází – cykly transpirace následované deštěm postupujícím po směru větru a opětovná transpirace. Čína sousedí s Tichým oceánem, přesto většina jejích srážek je vlhkost recyklovaná z pevniny daleko na západě.

To je v rozporu s dřívějšími znalostmi a dlouho uznávaným principem meteorologie: větry jsou poháněny z velké části různým ohřevem atmosféry. Když teplý vzduch stoupá, snižuje tlak vzduchu pod sebou a při zemi vytváří prostor, do kterého přichází vzduch z okolí. Například v létě se povrch země ohřívá rychleji a přitahuje vlhkou brízu (vánek) z chladnějšího oceánu. Tomu ostatně odpovídá střídání směru větru v létě na břehu větší vodní plochy: za slunného dne vane vítr od moře k pevnině. V noci země rychleji chladne a směr větru se obrací, vane od pevniny k moři. V roce 2007 časopis *Hydrology and Earth System Sciences* publikoval vizi biotické pumpy (Makarieva & Gorshkov 2007). Bylo to provokativní, protože teorie byla v rozporu s tímto dlouho uznávaným principem meteorologie. Autoři ukázali zásadní úlohu vodní páry uvolňované evapotranspirací: vodní pára nad lesem kondenzuje a tvoří se mraky. Plyn (vodní pára) se sráží na kapalinu, která má mnohem menší objem. Nad lesy v atmosféře se snižuje tlak vzduchu a dochází k horizontálnímu vtahování vzduchu z území, kde je kondenzace nižší. Prakticky to znamená, že kondenzace nad pobřežním lesem zrychluje brízu od moře a nasává vlhký vzduch na pevninu, kde případně vodní pára zkondenzuje a spadne jako déšť. Jestliže les v dostatečném poměru pokrývá pevninu dále do vnitrozemí, cyklus může pokračovat a udržuje proudění vlhkého vzduchu i několik tisíc kilometrů.

Tato teorie do jisté míry obrací tradiční myšlení: není to atmosférická cirkulace, která pohání hydrologický cyklus (oběh vody) ale hydrologický cyklus pohání cirkulaci vzdušných mas. Přičemž hnací silou je sluneční energie působící přes výparné teplo vody. Zopakujme si fyziku: výparné teplo vody při 25 °C je 2,4 MJ/litr (0,68 kW), což je ekvivalent kapacity jedné autobaterie. Z litru vody vznikne 1200 litrů vodní páry. Prostřednictvím výparu vody se přeměňují obrovská množství sluneční energie a povrchové teploty krajiny se liší i o desítky stupňů podle toho, jak se povrch chladí výparem vody (Hesslerová et al. 2019 a kapitoly 7 a 9).

Biotická pumpa (Obr. 8.1) vysvětluje tzv. paradox chladné Amazonie (Sheil 2018). Od ledna do června, kdy je Amazonská nížina chladnější nežli oceán, vane

silný vítr od Atlantiku směrem do Amazonie, tzn. opačným směrem, než bychom očekávali v případě závislosti směru větru na rozdílu teplot. Jinými slovy vítr by vál od chladnějšího kontinentu do teplejšího oceánu, jako je tomu v případě brízy. Autoři teorie biotické pumpy argumentují, že ten samý mechanismus ovlivňuje i tropické cyklony, které jsou poháněny uvolňovaným skupenským teplem, kdy vodní pára kondenzuje nad oceánem (Makarieva et al. 2013, 2017). Pokud pevninské lesy přitahují vlhký vzduch z míst, kde cyklony vznikají, tak brání vzniku hurikánů. To může být vysvětlením, proč se cyklony zřídka tvoří v jižní části Atlantského oceánu. Deštné lesy Amazonie a Konga přitahují z oceánu tolik vlhkosti, že je jí málo na to, aby byla dostatečným zdrojem energie pro vznik hurikánů.




**Obr. 8.1** Oběh vody mezi pevninou a oceánem poháněný sluneční energií prostřednictvím výparu a kondenzace vodní páry (Makarieva & Gorshkov 2010, upraveno).

## 8.1. Jak lesy přitahují vlhký vzduch

Klasická meteorologie vysvětluje oběh vody mezi oceánem a pevninou rozdílem (gradientem) teplot, zatímco teorie biotické pumpy vysvětluje transport vlhkosti z moří na pevninu poklesem tlaku v atmosféře následkem kondenzace vodní páry produkované terestrickou vegetací. Absence teoretické koncepce pro studium dynamiky atmosférické vlhkosti je hlavní překážkou vypracování teorie atmosférické cirkulace a návazně vysvětlení nedostatku vody na částech kontinentů, jejich vysychání. V regionálním měřítku byl studován efekt vegetace na albedo, distribuci zjevného a latentního tepla (Pielke 2001; Bonan 2008), roli lesních

celků ve vytváření tlakového gradientu v atmosféře, který pohání transport vlhkosti z oceánů na kontinenty, nebyla podrobně věnována dostatečná pozornost.

Většina kondenzované vodní páry odchází z atmosféry ve formě srážek, menší část zůstává v atmosféře se vzestupným proudem vzduchu. Na rozdíl od toku vodní páry, která kondenzuje, když stoupá do výšky, tok suchých složek vzduchu, které zachovávají svoji hmotu, nemůže být jednosměrný (vertikální), protože suchého plynu neubývá, když stoupá. Proto se objevují oblasti, kde se vzduch pohybuje horizontálně. Kondenzací vodní páry ve vzduchu stoupajícím vzhůru vznikají jak vertikální, tak horizontální tlakové gradienty. Jednoduše řečeno, vodní páry ve vzduchu kondenzací ubývá, a proto klesá tlak vzduchu. Přítomnost vodní páry v atmosféře, která je v kontaktu s kapalnou hydrosférou vede k trojrozměrné cirkulaci. Tyto pochody lze popsat stavovou rovnicí vlhkého vzduchu i suchého vzduchu (Makarieva & Gorshkov 2010).

Proces kondenzace ve stoupajícím vzduchu je provázen změnou poměru koncentrace vodní páry a ostatních složek vzduchu. Tlak nasycených vodních par klesá s klesající teplotou. Vzduch se pohybuje v teplotním gradientu směrem k nižší teplotě, potom může být tento pohyb provázen kondenzací vodní páry vyjádřenou jako molární rychlost kondenzace vodní páry na jednotku objemu ($mol.m^{-3}.s^{-1}$).

### Regiony dárce (donor) a příjemce (akceptor) kondenzačně indukované cirkulace

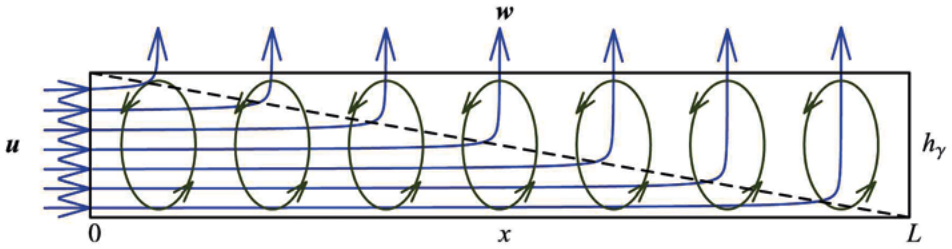
Oblast nízkého tlaku, ke které směřuje vzduch, nazýváme oblastí akceptoru (příjemce). Nižší vrstva vzduchu v atmosféře je nasávána do oblasti příjemce z okolí, kde je tlak vyšší a tuto oblast proto nazýváme donorem/dárcem.

Makarieva a Gorshkov (2010) uvažují stacionární cirkulaci velkého měřítka, kdy proud vzduchu přichází do oblasti příjemce podél horizontální osy-x daným průřezem a opouští tuto rovinu vertikálním pohybem po ose-z přes plochu DL (Obr. 8.2). L je délka a D je šířka oblasti příjemce počítaná podél osy-y, kolmé ke směru toku vzduchu. Maximální pokles tlaku mezi oblastí donoru a akceptoru na isotermálním povrchu je roven parciálnímu tlaku vodních par. To odpovídá situaci, kdy veškerá vodní pára z oblasti donoru byla využita (kondenzovala), když vzduch proudil v teplotním gradientu v oblasti příjemce. V horizontální rovině je rozdíl teplot (gradient) malý, zatímco ve vertikálním profilu je rozdíl teplot okolo

6 K (˚C) na každý kiometr. Horizontální teplotní gradient ovlivňuje kondenzaci vodních par velmi málo ve srovnání s vertikálním gradientem, ve kterém vzniká kondenzací indukovaný tlakový gradient.

**Lze shrnout:** uvolněné latentní teplo při kondenzaci může modifikovat externí teplotní gradient. Suchý vzduch, který adiabaticky, bez výměny tepla, klesá, se s klesající nadmořskou výškou ohřívá rychleji nežli se ochlazuje vlhký vzduch, který stoupá vzhůru. Následkem toho plocha, kde vzduch klesá, má při zemi vyšší teplotu nežli plocha, odkud vlhký vzduch stoupá (akceptor oblast), protože se suchým vzduchem přichází do oblasti dárce (donor) latentní teplo uvolněné při kondenzaci.

Budeme se věnovat případu, kdy horizontální rovina je izotermální. Na tomto příkladu lze ukázat rozdíl mezi konvenčním paradigmatem rozdílu tlaků spojeným s rozdílnou teplotou povrchu země (Gill et al. 1982) a kondenzací indukovaným gradientem, kterého může být dosaženo na izotermální rovině.




**Obr. 8.2** Schéma toků vzduchu nad lesními porosty oblasti příjemce délky L a výšky $h_\gamma$ Rovnice kontinuity je: $u*h_\gamma = w*L$. Pravidelné horizontální rozložení vertikálních částí proudění odpovídá konstantní rychlosti kondenzace kdekoli v oblasti pokryté lesy. Celkový tok vodní páry, který dosáhne úrovně bodu x je proporcionální počtu horizontálních proudů, které křižují vertikální rovinu vzdušného proudu v bodě x. Tento horizontální tok lineárně ubývá s rostoucí vzdáleností x, jak proud vzduchu proniká hlouběji do vnitrozemí (přerušovaná čára). Uzavřené okruhy s šipkami znázorňují turbulentní horizontální víry (eddies), které jsou spojeny s lokální evapotranspirací a kondenzací a uvolňováním zjevného tepla a nejsou spojeny s transportem vlhkosti na dlouhé vzdálenosti. Osa rotace vírů může být ve směru paralelním/souběžném s hlavním tokem. Parciální tlak vodní páry představuje zásobu potenciální energie, která se převádí na kinetickou energii pohybu vzdušných mas. (Makarieva & Gorshkov 2010, upraveno)

Skutečnost, že oblačnost tvoří přibližně 50 % povrchu (Mokhin & Schlesinger 1994) ukazuje, že oblasti příjemce a dárce jsou průměrně stejné velikosti. Oblasti příjemce a dárce jsou propojeny horizontálním prouděním vzduchu;

jeden v nízké vrstvě atmosféry přináší vlhkost z oblasti dárce do oblasti příjemce, druhý výše v atmosféře vrací suchý vzduch z oblasti příjemce do oblasti dárce. Evaporace probíhá jak v oblasti dárce, tak v oblasti příjemce, kondenzace ovšem probíhá jen v oblasti příjemce. Voda vypařená v oblasti dárce je přenášena do oblasti příjemce, kde kondenzuje a vytváří srážky společně s místně vypařovanou vodou. Proto srážky v oblasti příjemce jsou vyšší nežli místní výpar. Srážky převyšují množství vypařené vody o vodu importovanou do oblasti. Pokud je oblast příjemce na pevnině, potom rozdíl mezi srážkami a lokálním výparem se vrací do moře řekami jako odtok. Koexistence hydrosféry, vodní páry a suchých, nekondenzujících plynů v gravitačním poli vede nezbytně ke kondenzačně indukované cirkulaci a rozdělení atmosféry na oblasti se srážkami a beze srážek.

**Z uvedeného plyne, že prevenci sucha nepomůže pouhé ochlazení povrchu krajiny, střech, případně odražení sluneční energie. Nutné je chlazení výparem vody, protože vodní pára se sráží v atmosféře a tím přitahuje vlhký vzduch.**

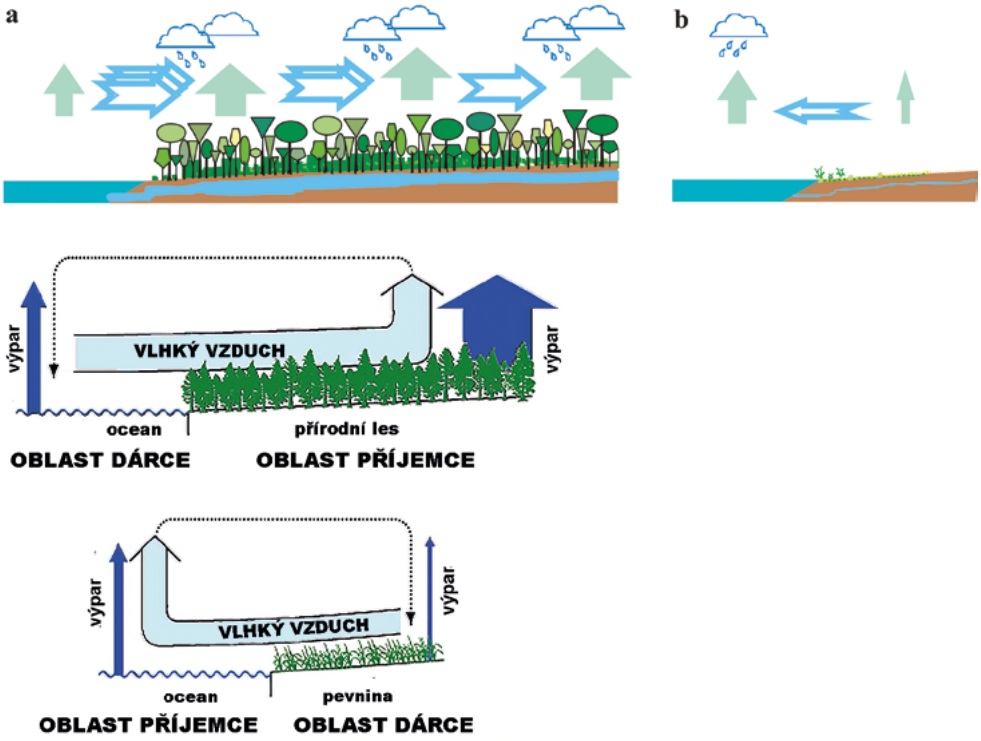
## 8.2. Výpar udržuje horizontální gradient tlaku indukovaný kondenzací

Adiabatický (bez výměny tepla) vzestup vlhkého vzduchu provázený kondenzací může probíhat jen, když vodní pára přichází horizontálním prouděním.

Výpar vody je proces specifický pro povrch Země, zatímco kondenzace je vázána na objem, proto probíhá především v atmosféře. Vypařená voda je dodávána do vzduchu turbulentním mícháním, které vyměňuje „balíčky vzduchu “ mezi saturovanou vrstvou při zemi nebo nad oceánem a ostatním objemem ve sloupci. Tyto víry mění poměr míchání vodní páry v horizontální ose.

Jak se vzduch pohybuje horizontálně podle gradientu klesajícího tlaku, klesá parciální tlak vodní páry i tlak vzduchu. Předpokládejme, že země je suchá a voda se z ní nevypařuje do horizontálního toku vzduchu. Vodní pára je nenasycena, jak se pohybuje. Jakmile adiabatický vzestupný proud nenasyceného vzduchu není provázen kondenzací, tak kondenzací indukovaný gradient tlaku není udržován, snižuje se a mizí. Horizontální proud polevuje a zastavuje se. Výpar vody ze zemského povrchu udržuje vzduch nasycený vodní párou v horizontálním toku a kondenzace v adiabatickém vzestupném vzduchu trvá.

Výpar vody je udržován sluneční energií a dosahuje určitého maxima, v době, kdy porost využívá veškerou přicházející sluneční energii i energii přicházejícího teplého vzduchu. Množství přicházející sluneční energie odpovídá globálnímu průměru výparu 2 m za rok (2000 mm.rok$^{-1}$), zatímco reálná průměrná globální evaporace je okolo 1 m.rok$^{-1}$ (L´vovitch 1979). To ukazuje na možnost zvýšení evaporace v lesních porostech, která je vyšší nežli evaporace z moří (Obr. 8.3). Kondenzační rychlost závisí na vzestupné vertikální rychlosti a nikoli na rychlosti evaporace. V oblasti donoru může být nulová, a přitom rychlost výparu je vyšší nežli v oblasti příjemce, jak je to v případě vzniku hurikánů a tornád. Se stoupající evaporací roste kondenzace rychleji nežli samotná evaporace. Oblast příjemce je proto oblastí, kde je výpar vyšší (například v lesích) nežli výpar z oceánu.




**Obr. 8.3** Vysoký výpar z lesního porostu umožňuje lesu zvítězit v soutěži o vodu s oceánem. Pokud krajina ztratí les a další trvalou vegetaci, sníží se evapotranspirace, krajina se přehřívá a roli příjemce přejímá oceán. (Makarieva & Gorshkov 2010, upraveno)

Cirkulace vzduchu v oblasti příjemce je superpozicí mocného přicházejícího proudění a místních vírů turbulentního proudění. Toto turbulentní proudění se podílí na lokálním cyklu evaporace – kondenzace; má horizontální velikost v řádu atmosférické výšky „h“ a rychlosti větru u = cca w (Obr. 8.2). Pokud neexistuje tok velkého měřítka, potom se lokální turbulentní proudění spojené s lokálním výparem a kondenzací pohybuje po krajině chaoticky a tato náhodnost pohybu v prostoru a absence převládajícího směru může vést k místním vírům, poruchám, bouřkám (u >>w), které se mohou spojovat na cyklony, hurikány nebo tornáda provázené záplavami a následované suchem. Pokud převládá rozsáhlý tok od oblasti donoru do oblasti příjemce, potom turbulentní proudění následuje směr rozsáhlého toku. Směr a rozdělení v prostoru i směr rotace jsou uspořádané a zabraňují turbulentnímu proudění, aby se spojovalo v prudké projevy. Cirkulace vzduchu je stabilizována oběhem vody.

**Stabilní zásobení kontinentu vlhkostí/vodou; role tření**

Lze si představit, že se les přetahuje s oceánem o vodu. Je nutné stabilizovat tok přicházející vlhkosti. Skutečně zásoba potenciální energie akumulovaná v gradientu kondenzačního tlaku může být uvolněna jako lavina produkující prudký vítr, přívalový déšť a povodeň. Při záplavě se objem dešťové vody ztrácí rychlým odtokem místo toho, aby byl využit pro transpiraci rostlin. Navíc probíhá půdní eroze. Na rozdíl od kondenzace, která může proběhnout téměř jako výbuch, je výpar vody postupný proces omezený absorbovaným množstvím sluneční energie. Po povodni, s tím, jak atmosféra postupně doplňuje vodní páru, může následovat sucho.

Tvorba prudkých, ničivých větrů je tlumena též třením (frikcí), část potenciální energie uvolněná při kondenzaci se spotřebuje na tření a není veškerá změněna na kinetickou energii větru. Efekt tření v mechanismu biotické pumpy je následující:

Pro zajištění dostatečného tření, prevence tvorby silného větru a výkyvům v přísunu vlhkého vzduchu, musí mít les délku L v řádu $10^3$ h (tj. výška sloupce atmosféry, kde probíhá kondenzace). V takovém případě pravidelný přísun vlhkosti biotickou pumpou brání chaotické kondenzaci. Biotická pumpa brání vzniku hurikánů jak v zóně akceptora, kde funguje, tak v přilehlé oblasti donora. Například hurikány nevznikají v Atlantiku tam, kde oceán sousedí s přirozenými lesy Konga a Amazonie (Makarieva & Gorškov 2010).

Navržená kondenzací indukovaná atmosférická dynamika není pouze mechanismem, který přivádí vlhkost z oceánu na pevninu a pohání oběh vody na pevnině; je to obecný fyzikální mechanismus, poháněj ící vítr, který za určitých okolností může transportovat vlhkost na pevninu.

**Biotická pumpa přírodního lesa vs. nelesní vegetace**

Lesní pumpa vlhkosti je typická tím, že biologická kontrola je prováděna výhradně přes evaporaci (transpiraci a intercepci) a kondenzaci. Listy mají velký evaporační povrch ve srovnání s vodní hladinou a jsou schopny regulovat výpar stomaty (průduchy). Les je schopný udržet evaporaci a kondenzaci na optimální úrovni určené biologickou potřebou půdní vlhkosti a množstvím přicházející sluneční energie. Velké stromy udržují horizontální rychlost proudění, minimalizují tak utváření hurikánů a tornád. Udržovaná kondenzace během celého roku podmiňuje v lesnatých oblastech stálý průtok řek (Makarieva & Gorshkov 2007, Makarieva et al. 2009). Pumpováním velkého množství atmosférické vody z oceánu les reguluje srážky rovnoměrně po povodí a voda se v tekuté formě vrací zpět do oceánu. Les kontroluje klima pomocí srážek. Brání se jejich nedostatku a suchu, stejně tak nadbytku a záplavám. Tlumení přívalových dešťů a povodní je důležité zejména u pobřeží, kde je největší proudění vlhkosti od oceánu do vnitrozemí.

Sporá a nízká (nelesní) vegetace s malou listovou plochou může dosáhnout evaporace, která je vyšší nežli evaporace moře pouze za podmínek, kdy má dostatek vody a sluneční energie. Za takových podmínek, jako například během tzv. vlhkého monzunu, tok vlhkého vzduchu postupuje od oceánu na pevninu. Avšak v tomto případě tok řek, který je proporcionální srážkám, není nelesní vegetací regulován. To vede k exponenciálnímu poklesu odtoku i srážek se vzdáleností od moře, zatímco v blízkosti pobřeží jsou silné srážky a záplavy.

Srážky v nezalesněných oblastech klesají exponenciálně v řádu 600 km od pobřeží do vnitrozemí. Exponenciální pokles odtoku a srážek svědčí o neschopnosti nelesní vegetace řídit odtok a srážky. Hydrologický cyklus se mění na střídání nedostatku vody, sucha a záplav provázených silným větrem. Obzvláště biologický systém savany je nestabilní. Buď se postupně vyvine v les bez disturbačních zásahů člověka nebo nakonec degraduje na poušť v případě, že antropogenní zásahy trvají. Beresford-Jones et al. (2009) pomocí teorie biotické pumpy popisují zánik peruánské civilizace Nazca jako následek rozsáhlého odlesnění pro získání

zemědělské půdy. Teorie poskytuje obecnou fyzikální platformu pro analýzu úlohy užití půdy (land use) v globální změně (McAlpine et al. 2009) a efektu krajinného pokryvu na cirkulaci vzduchu (Chikoore & Jury 2010).

Sibiřské lesy, včetně lesů Dálného východu, jsou unikátní, protože přitahují vlhkost ze tří oceánů: Atlantického, Severního a Tichého. Tyto lesy se udržely i poté, co byly lesy Evropy z velké části vykáceny a přeměněny na zemědělskou půdu. Původní rozsáhlé vnitrozemské lesy Austrálie, Arábie a v oblasti Sahary nepřežily v důsledku odstranění lesů v pobřežní zóně. Sibiřské lesy s volným přístupem k vlhkosti Arktického a Tichého oceánu byly schopny přitahovat vlhkost z Atlantického oceánu i přes značně odlesněnou Evropu. Zóna nízkého tlaku nad sibiřskými lesy přispěla k udržení pravidelného transportu vlhkosti západními větry přes Evropu. Díky fungování biotické pumpy lesů Sibiře a východní Evropy se Evropa nestala pouští.

Současné odstraňování velkých ploch přirozeného lesa na území Ruska, včetně Sibiře, má za následek nepravidelné proudění západního větru. Bezpříkladná vlna horka na jihozápadě Ruska v létě 2010 i suché roky s vysokými teplotami ve střední Evropě v letech 2015 – 2019 jsou ukázkou extrémů klimatu způsobených narušením oběhu vody. V pojmech teorie biotické pumpy: postižené oblasti s teplotami často převyšujícím dlouhodobý průměr o několik stupňů C, se změnily z akceptoru na oblast donoru, tj. místně vypařovaná voda byla odnášena do sousedních oblastí a působila povodně v jiných částech Evropy i Asie. Vzduch klesal v odlesněném suchém vnitrozemí a stoupal v oblastech blízkých oceánu. Donorové oblasti měly teplotu vzduchu v přízemní vrstvě o přibližně 10 °C vyšší nežli oblast příjemce/akceptoru. Toto pozorování ilustruje větší důležitost kondenzačně – indukované dynamiky pro pohon vzduchových mas ve srovnání s konvenční teorií rozdílu povrchových teplot působených sluneční energií. Rozvíjí se tak nový obor o zásadní úloze vegetace v oběhu vody a pohybu vzduchových mas opírající se o fyzikální zákony (Makarieva et al. 2022, Makarieva 2025)

Lesy jsou často přirovnávány k plicím kontinentů: díky fotosyntéze vylučují kyslík a  tvoří biomasu z oxidu uhličitého. Poslední dobou jsou však lesy přirovnávány také k srdci, protože zajišťují oběh vody a usměrňují pohyb vzduchu výparem vody. Na každou molekulu přijatého oxidu uhličitého a vyloučeného kyslíku se vypaří několik set molekul vody, které převádějí sluneční energii na latentní teplo výparu (chladí) a vodní pára potom v atmosféře působí kondenza-

cí indukovaný pohyb vzduchu. Lesy udržují uzavřený oběh vody a v ekosystému lesa se zadržují živiny a další látky. Z lesů odtéká rovnoměrně voda o nízkém obsahu živin, proto jsou v povodích vodárenských nádrží preferovány lesy (Seják et al. 2022). Komplexní funkce lesa shrnul pro Pařížskou konferenci o klimatu (COP21, 2015) mezinárodní tým formou Policy Brief WeForest (Pokorný 2016, Gutierrez 2016) a na úrovni současného vědeckého poznání doložili Ellison et al. (2017, 2024).

Lesy mají větší funkční význam, než se dříve myslelo. Jejich fungování lze ovlivnit způsobem hospodaření a dosáhnout tak krátkodobých i dlouhodobých zlepšení jak z hlediska dostatku vody, tak i fungování klimatu. A to v měřítku od jednotlivých povodí až po celé kontinenty. Lesy jsou zásadně významné v pěti procesech:

1. Lesy podporují vznik srážek.
2. Stromy a lesy jsou přirozené chladicí systémy.
3. Lesy generují toky vzduchu a vlhkosti.
4. Stromy a lesy přispívají k zásobování podzemních vod.
5. Lesy zmírňují dopady záplav a sucha.

S rostoucím nedostatkem vody, změnami klimatu a narůstajícím tlakem na lesní zdroje je životně důležité prohloubit znalosti o základních vztazích mezi lesy, vodou a klimatem. Nedostatek těchto znalostí představuje zásadní překážku v hledání politických i praktických opatření. Odstranění této překážky by vedlo k optimalizaci ekosystémových služeb a ke zlepšení socioekonomického využití lesů.

## Literatura

Beresford-Jones, D., Arce Torres, S., Whaley, O. a Chepstow-Lusty, A. (2009). The role of *prosopis* in ecological and landscape change in the samaca basin, lower inca valley, south coast Peru from the early horizon to the late intermediate period. *Latin American Antiquity*, 20(2), s. 303 – 332.

Bonan, G.B. (2008). Forests and climate change: forcing feedbacks and climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), s. 1444 – 1449.

Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., van Noordwijk, M., Creed, I.F., Pokorný, J., Gaveau, D., Spracklen, D.V., Tobella, A.B., Ilstedt,U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands,D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. a Sullivan, C.A. (2017). Trees, forests and water: cool insights for a hot world, *Global Environmental Change*, 43, s. 51–61.

Elliosn, D., Pokorný, J., Wild, M. (2024). Even cooler insights: On the power of forests to (water the Earth and) cool the planet. Glob. Change Biol. 2024; 30: e 17195. https://doi.org/10.1111/gcb. 17195

Gutierrez, V. (ed.). (2016). Management lesů a jeho význam pro vodu a klimatizaci krajiny. *Vodní hospodářství*, 2, s. 24 – 25. (Originál: Managing forest for Water and for Climate Cooling, WeForest)

Hesslerová, P., Pokorný, J., Huryna H. a Harper, D. (2019). Wetlands and forests regulate climate via evapotranspiration. In. An, S. and Verhoeven J. T.A. (Eds). Wetlands: Functions, Restoration and Wise Use. *Ecological Studies* 238, Springer, s. 63 – 93.

Chikoore, H. a Jury, M.R. (2010). Interseasonal variability of satellite derived rainfall and vegetation over Southern Africa. *Earth Interactions*, 14(3), s. 1 – 26.

Keys, P.W., Wang-Erlandsson, L. a Gordon, L.J. (2018). Megacity precipitation sheds reveal tele-connected water security challenges. *PLoS ONE,* 13(3), 0194311.

L´vovitch, M.I. (1979). World Water Resources and their Future. American Geographical Union, Washington

Makarieva A.M. (2025). Biotic Pump Miscellaneous: Jean-André Deluc, Heinrich Hertz, Meteorological Crosswinds, and the Drinking Bird. 13 July 2025, https://bioticregulation.substack.com/p/biotic-pump-miscellaneous-jean-andre

Makarieva, A.M. a Gorshkov, V.G. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. Hydrology and Earth System Sciences, 11(2), p. 1013–1033.

Makarieva, A.M. & Gorshkov, V., G. (2010). The Biotic Pump: Condensation, at-mospheric dynamics and climate. Int. J. Water, 5(4), 365 – 385.

Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D., Nobre, A.D. a Li, B.L. (2013). Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, s. 1039–1056.

Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Nefiodov, A., Chikunov, A.V., Sheil, D., Nobre, A. D. a Li, B.L. (2017). Fuel for cyclones: The water vapor budget of a hurricane as dependent on its movement, *Atmospheric Research* 193, s. 216-230.

Makarieva, A.M., Nobre, A., Nefiodov, A.V. Sheil, D., Nobre, P., Pokorny, J., Hesslerova, P. Li B.-L. (2022). Vegetation Impact on Atmospheric Moisture Transport in a Climate with Increasing Land-Ocean Temperature Contrasts. Heliyon , Volume 8, Issue 10, October 2022, e11173 https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11173

Marsh, G.P. (1864). Man and Nature, or Physical Geography as Modified by Human Action. Marsh to Spencer F. Baird, 21 May 1860, Baird Corr., Smithsonian Institution

Mc Alpine, C.A., Syktus, J., Ryan, J.G., Deo, R.C., McKeon, G.M., McGovan, H.A. a Phinn, S.R. (2009). A continent under stress: Interactions, feedbacks and risks associated with impact of modified land cover on Australia´s climate. *Global Change Biology*, 15(9), s. 2206 – 2223.

Mokhin, I.L. a Schlesinger, M.E. (1994). Analyses of global cloudiness 2. Comparison of ground–based and satellite based cloud climatologies. *Journal of Geophysical Research*, 99(D8), s. 17045–17065.

Pielke Sr., R.A. (2001). Influence of spatial distribution of vegetation and soils on the predictionof cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics*, 39(2), s. 151 – 177.

Pokorný, J., (2016). Management lesů a jeho význam pro vodu a klimatizaci krajiny. *Vodní hospodářství*, 2, s. 22–24.

Salati, E., Dall´Olio, A., Matsui, E. a Gat, J.R. (1979): Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resources Research* 15(5), s. 1250–1258.

Savenije, H.H. (1995). New definition for moisture recycling and the relationship with lan-use changes in the Sahel. *Journal of Hydrology*, 167, p. 57–78.

Seják, J., Machar, I., Pokorný, J., Seeley, K. a Elznicová, J. (2022). Restoring Natural Forests as the Most Efficient Way to Water Quality and Abundance: Case Study from Želivka River Basin. *Sustainability*, 14, 814.

Sheil, D. (2018). Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global cycle. *Forest Ecosystems* 5, 19.

Wees, D., Werf, G.R., Randerson, J.T., Andela, N., Chen, Y. a Morton, D.C. (2021). The role of fire in global forest loss dynamics. *Global Change in Biology,* 27, s. 2377–2391.

Wulf, A. (2016). Vynález přírody, dobrodružství zapomenutého objevitele Alexandera von Humboldta v Severní Americe. Knihy Omega, Dobrovský s. r. o.

Rio de Janero 1992: Deklarace Konference OSN o životním prostředí a rozvoji https://web.archive.org/web/20150923201658/http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFL5ZKH1/$FILE/Metod-MA21_06-priloha1-deklaraceUR_0503.pdf

# 9. Možnosti hodnocení úlohy vegetace v distribuci slunečního záření pomocí dálkového průzkumu Země

Úlohu vegetace v distribuci slunečního záření lze exaktně hodnotit, a to pomocí různých typů prostorových dat i dat získaných z pozemních měření. V kapitole představujeme možnosti využití dat dálkového průzkumu Země a jejich zpracování za účelem získání informací o fungování krajiny z hlediska distribuce slunečního záření. Uvádíme několik případových studií založených na kombinaci různých typů dat, včetně jejich interpretace.

Prostorová data umožňují popsat nejen kvalitativní či kvantitativní vlastnosti určitého prvku na zemském povrchu, ale přiřazují mu i přesnou polohu v podobě zeměpisných souřadnic. Pro jejich znázornění v digitální podobě lze využít dvou způsobů (modelů) – vektorového či rastrového. Vektorová data využívají pro reprezentaci prvků na zemském povrchu bodů, linií či polygonů. Rastrová data jsou pravidelnou či nepravidelnou sítí, která je složena z obrazových bodů (pixelů). Velikost pixelu definuje reprezentovanou část zemského povrchu a jeho hodnota je informací o určitém jevu či naměřené veličině. Data se používají pro znázornění kontinuálních jevů jako je nadmořská výška, srážky, atmosférické znečištění, teplota apod. Rastrová data jsou však i naskenované mapové podklady, letecké a družicové snímky, snímky pořizované bezpilotními nosiči (UAV – unmanned aerial vehicle). Pro více informací doporučujeme úvodní literaturu do geografických informačních systémů (např. Kolář 2003; Wise 2014) či učební texty na stránkách univerzit vyučujících geoinformatiku (např. Břehovský a Jedlička). Pro detailní nastudování problematiky DPZ doporučujeme Dobrovolný (1998), Halounová a Pavelka (2008), Horák (2014), Pavelka (1999) či Jones a Vaughan (2010), Jensen (2015), Lillesand et al. (2015).

Dálkový průzkum Země (DPZ) je způsob pořizování informací o zemském povrchu, objektech či jevech na dálku, bez přímého kontaktu. Tyto informace jsou získávány ze snímků pořízených senzory na různých platformách – letadlech, družicích či bezpilotních systémech; mohou být korigovány pomocí po-

zemních měření. Dějiny DPZ jsou spojeny se začátkem fotografie a vývojem v oblasti letectví, později kosmonautiky. První distanční snímky zemského povrchu byly pořízeny z balónu již v roce 1858. S nástupem letadel, především ve spojitosti se světovými válkami, začalo pořizování „klasických" leteckých snímků, nejprve černobílých. V Čechách byly první snímky pořizovány koncem třicátých let 20. století. Studená válka a vesmírné programy USA a Ruska přispěly v 60. letech 20. století k rozvoji satelitního snímkování a využívání i jiných částí spektra (infračerveného a mikrovlnného), než pouze viditelného. Dalším přelomem je rozvoj hyperspektrálního snímkování z přelomu 80. a 90. let, vyznačující se schopností poskytovat snímky v desítkách až stovkách částí spektra. V oblasti snímání ve viditelné a blízké infračervené části spektra jsou dostupné systémy (často komerční) s velmi vysokým prostorovým rozlišením (tj. jednotky metrů) i odborné veřejnosti. Rozšiřuje a vyvíjí se aktivní technologie laserového skenování (lidary). Po roce 2006 dochází k rozvoji využívání bezpilotních systémů (UAV), které již od počátku 20. století sloužily výhradně vojenským účelům. Nasazení UAV umožnil nejen geopolitický vývoj, ale i miniaturizace přístrojového vybavení.

## 9.1. Fyzikální podstata a základní principy DPZ

Hlavním principem DPZ je záznam elektromagnetického záření. Jeho přirozeným zdrojem je Slunce, v menší míře i každé těleso na Zemi, jehož teplota je vyšší než absolutní nula (-273,15 °C). Každý objekt na Zemi část tohoto záření pohlcuje, odráží, případně emituje, tzn. má specifickou spektrální odezvu. Záznam tohoto modifikovaného záření systémy DPZ je principem, z nějž lze následně odvodit různé typy informací a vlastností objektů.

Elektromagnetické záření (EM) se šíří prostorem v podobě harmonické sinusové vlny, která je složena ze dvou komponent – elektrické (E) a magnetické (M). Obě vlny se šíří rychlostí světla, jsou na sebe kolmé a ve směru šíření rovnoběžné. Základními charakteristikami EM je vlnová délka (λ, základní jednotka metr *m*), která udává vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími maximy a frekvence (υ, základní jednotka hertz *Hz*) udávající počet maxim, která projdou pevným bodem za jednotku času. Popis vztahů mezi těmito základními parametry je součástí vlnové a částicové teorie. EM se v prostředí vyskytuje ve spojitém spektru,

od vlnových délek $10^{-7}$µm (kosmické záření) po $10^{9}$ µm (radiové vlny, umělé zdroje záření). Jeho dělení je konvenční a liší se podle odvětví, ve kterých se využívá. V této kapitole uvádíme dělení typické pro využití v oblastech DPZ (obr. 9.1).

Oblast do 0,4 µm na zemský povrch dopadá minimálně. Jedná se o záření s velmi vysokou intenzitou (kosmické, UV), škodlivé pro lidský organizmus. Tato část je většinou pohlcena v atmosféře zejména ozonem. Minimálně, např. pro geologické aplikace, je v DPZ využívána ultrafialová část (0,3-0,38 µm).

Oblast 0,4 – 0,72 µm je jediná část spektra, kterou zachytí lidské oko. Jejím hlavním zdrojem je Slunce, je proto detekovatelná pouze v denních hodinách. Nazývá se viditelná (VIS) a byla jako první využita ve formě leteckých snímků. Dělí se na modrou (0,4-0,5 µm), zelenou (0,5-0,6 µm) a červenou část (0,6-0,7 µm). Záření proniká do vodního sloupce, je vhodné pro studium vodních těles a pro vegetační studie.

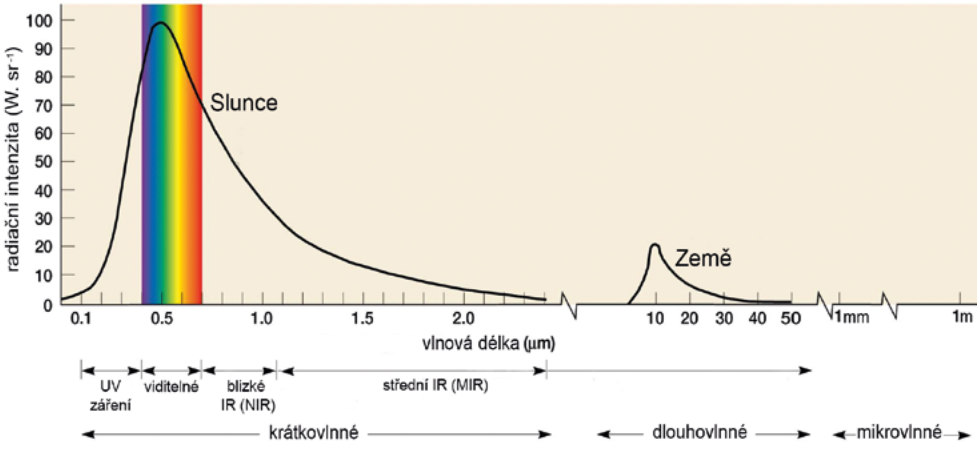
Oblast 0,72 – 1,3 µm (blízké infračervené NIR) a 1,3 – 3 µm (střední infračervené MIR) již lidské oko nevnímá. Využití má především v hodnocení vegetace (druh, zdravotní stav apod.), obsahu vody, v geologii, pro studium ledu, sněhu a dalších.

Ve všech výše zmíněných vlnových délkách převažuje odražené (krátkovlnné) záření.

V oblasti 3 – 1000 µm již převažuje infračervené záření vyzařované (emitované) tělesy na zemském povrchu (termální záření). Z této části v DPZ bývá využíván především interval 7,5 – 14 µm, méně 3 – 5 µm. Hlavním využitím je získání informace o teplotě povrchu krajiny, oceánů, uplatní se i v geologických aplikacích.

Oblast 1 mm – 1 m (mikrovlny) je využívána především aktivními radarovými systémy, které mají vlastní zdroj záření. Toto záření, na rozdíl od výše zmíněných vlnových délek, je schopno pronikat oblačností a částečně i pod zemský povrch. Použití těchto dat je velmi široké.

Oblast nad 1 m (rádiové a televizní vlny) je již mimo oblast zájmu DPZ.




**Obr. 9.1** Intervaly elektromagnetického spektra – dělení využívané v dálkovém průzkumu Země. (McKnight & Hess 2007, upraveno)

Z vlnové a částicové teorie vyplývá, že energie záření (částice) je nepřímo úměrná vlnové délce. Záření vyšších vlnových délek má nižší obsah energie a je systémy DPZ hůře detekovatelné. Množství energie vyzařované objekty je závislé na jejich termodynamické teplotě a definované pomocí Stefan-Boltzmanova zákona

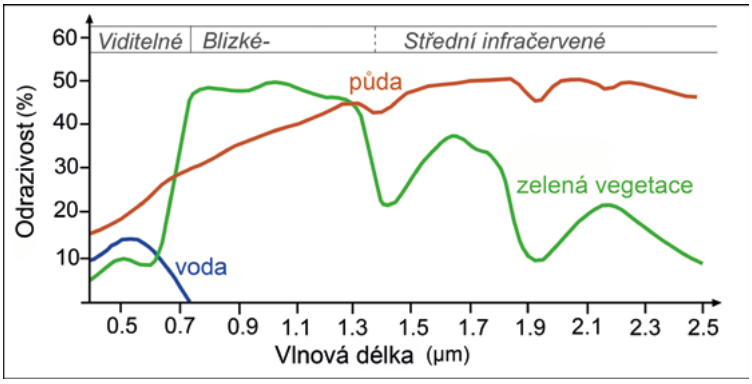
$$M = \sigma T^4$$

kde M je celková intenzita vyzařování tělesa ($W.m^{-2}$), σ Stefan-Boltzmanova konstanta ($\sigma = 5{,}6697 \cdot 10^{-8}$), T termodynamická (kinetická) teplota (K).

Celkové množství vyzářené energie se mění s vlnovou délkou a je popsáno Wienovým zákonem. Podle tohoto zákona vlnová délka, jíž přísluší maximální intenzita vyzařování, je nepřímo úměrná teplotě. To znamená, že těleso o vyšší termodynamické teplotě maximálně vyzařuje v kratších vlnových délkách. Tyto vztahy byly definovány pro tzv. černé těleso. V reálném světě však objekty vyzařují vždy méně, než ideální černé těleso, což je definováno pojmem emisivita a Kirkhofovým zákonem. Výše uvedené zákony nacházejí uplatnění především u DPZ v termální části spektra.

### 9.1.1. Spektrální chování objektů

Sluneční záření dopadající na horní hranici atmosféry je částečně odraženo, při průchodu atmosférou částečně pohlceno a rozptýleno. Na zemský povrch přímo dopadá přibližně 47 % záření. Na zemském povrchu následně dochází k interakci záření s různými povrchy a objekty. Každý povrch má specifické vlastnosti, které určují, jak bude dopadající záření transformováno co do intenzity i vlnové délky. Jinými slovy, každý objekt/povrch má své specifické spektrální chování, charakterizované spektrální křivkou odraženého či emitovaného záření. Tyto informace jsou obsaženy v tzv. spektrálních knihovnách, které poskytují různé instituce (např. NASA, USGS apod.). Tyto spektrální vlastnosti (obr. 9.2) jsou klíčové pro správnou analýzu a interpretaci pořízených dat, z nichž lze identifikovat nejen typy povrchů/objektů, ale i některé kvalitativní a kvantitativní vlastnosti.



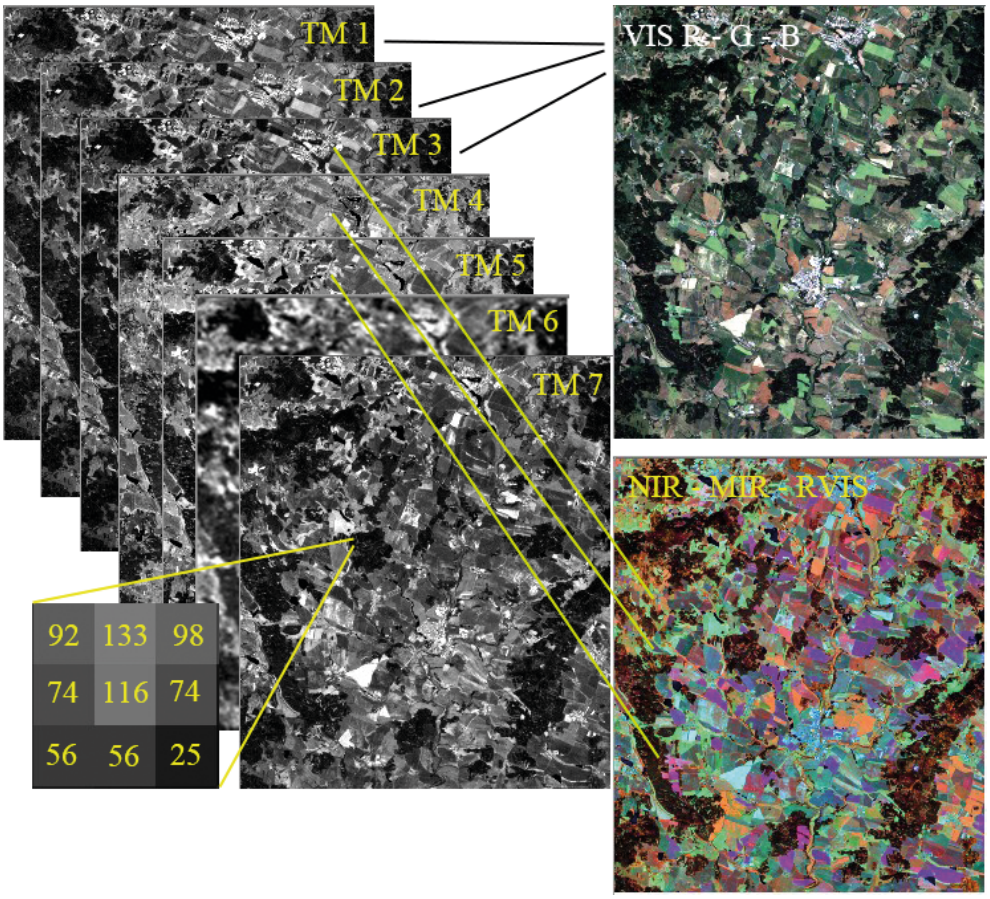

**Obr. 9.2** Spektrální křivky základních druhů povrchů

Spektrální vlastnosti vegetace ovlivňuje především obsah fotosynteticky aktivních pigmentů (chlorofyl, karoteny, xantofyly) ve viditelné části spektra. Vysoké hodnoty odrazivosti v oblasti NIR jsou ovlivněny buněčnou strukturou listu a strukturou vegetace, v oblasti MIR hraje roli obsah vody. Rozdíl odrazivosti v červené oblasti VIS a NIR se využívá při výpočtech tzv. vegetačních indexů, které umožňují hodnotit obsah biomasy i zdravotní stav vegetace. Čistá voda pohlcuje převážnou část dopadajícího záření, s maximem odrazivosti v modré VIS

části spektra. V IR části odrazivost výrazně klesá, a to v závislosti na fyzikálně-chemických vlastnostech vody. Změny odrazivosti jsou způsobeny rozpuštěnými sedimenty a látkami, fyto či zooplanktonem. Spektrální projevy půdy jsou ovlivněny především minerálním složením, vlhkostí, zrnitostí a obsahem organické hmoty. Umělé povrchy představují velmi heterogenní kategorii se značně variabilními spektrálními projevy.

### 9.1.2. Základní charakteristika digitálního obrazu

K pořizování digitálních obrazových záznamů se v současné době používá řada snímacích zařízení. Nejčastěji je měřena intenzita odraženého nebo emitovaného záření. Mezi první klasické (konvenční) snímací systémy náležely fotografické komory. S rozvojem techniky se především od 70. let přešlo na využití nekonvenčních snímacích metod, využívajících principu skenovacích (rozkladných) zařízení. Jejich základní součástí je radiometr. Radiometr měří radiaci ze základní/jednotkové plochy na zemském povrchu, a to vždy v určitém intervalu vlnové délky. Tento interval určuje spektrální rozlišení systému a nejmenší obrazová jednotka se nazývá pixel. Pixel je definován rozměrem snímaného zemského povrchu a definuje prostorovou rozlišovací schopnost záznamu. Hodnoty, které jednotlivé pixely nesou, jsou průměrnou hodnotou naměřeného odraženého/emitovaného záření na ploše pixelu. Pro obrazové znázornění hodnot je využíváno kódování do různých stupňů šedi (tzv. radiometrické rozlišení; např. v případě využití 8-bitových dat máme k dispozici 256 odstínů šedi, u 16-bitových dat již 65536 hodnot).




**Obr. 9.3** Družice Landsat 5 snímkovala v sedmi spektrálních pásmech s označením TM1 – TM7 (Thematic Mapper – multispektrální skenovací senzor; např. pásmo TM6 je termální). Přiblížením snímku vidíme matici pixelů, reprezentující plochu 30x30 metrů. Každý pixel nese informaci o odraženém/emitovaném záření, která je kódována (dle radiometrického rozlišení) do stupňů šedi. Pomocí specializovaných algoritmů lze z těchto hodnot získat např. informaci o povrchové teplotě či dalších kvalitativních či kvantitativních parametrech. Barevný model RGB umožňuje lepší vizualizaci prvků v obraze. První barevný snímek představuje syntézu pásem TM321, tzn. zobrazuje území ve viditelné části spektra. Druhý snímek již zobrazuje infračervená pásma TM453, tzn. v nepravých barvách. Tato pásma však umožňují lepší rozlišení typů vegetace či vodního obsahu.

Při využívání dat DPZ musíme brát v úvahu, že každý senzor je navržen pro specifický účel a každá úloha má specifické požadavky na prostorové, spektrální, radiometrické a časové rozlišení. Podle těchto hledisek rozlišujeme data DPZ následovně:

- Podle zdroje EM záření – aktivní senzory (mají vlastní zdroj záření - radary, lidary) x pasivní (snímají odražené či emitované záření)
- Konvenční (fotografické snímkování) x nekonvenční (skenovací systémy)
- Dle prostorového rozlišení, určující nejmenší rozlišitelný detail na snímku:
  – data s nízkým prostorovým rozlišením (v řádu stovek metrů – kilometrů) např. meteorologické družice (NOAA, Terra MODIS)
  – data se středním a vysokým prostorovým rozlišením (desítky – jednotky metrů); většina družic pro analýzu krajiny s volně dostupnými datovými archivy od 70. let (např. Landsat, SPOT, ASTER, Sentinel 2); většinou zachycují viditelnou až termální část spektra
  – data s velmi vysokým rozlišením (jednotky metrů – desítky centimetrů), většina komerčních družic, pracují ve viditelné, případně pouze NIR části spektra (např. IKONOS, WorldView, QuickBird, Pleiades, RapidEye)
- Dle spektrálního rozlišení udávajícího, kolik a jakou šířku spektrálních intervalů senzor snímá. Na této charakteristice závisí možnosti získávání tematických informací:
  – multispektrální – snímají v několika, maximálně 15 – 20 spektrálních pásmech, pokrývají většinou viditelnou a infračervenou část spektra
  – hyperspektrální – snímají v desítkách až stovkách spektrálních kanálů
- Dle časového rozlišení, které udává, za jako dobu se senzor vrátí snímkovat stejné místo (např. perioda snímkování družice Landsat je 16 dní, družice NOAA – každý den)

### 9.1.3. Zpracování digitálního obrazového záznamu

Celý systém pořizování a zpracování dat je založen na sedmi základních prvcích:

**1. Zdroj záření** – prvním požadavkem DPZ je zdroj záření, který vstupuje do interakce se zkoumaným objektem a lze jej zaznamenat snímací technikou.

**2. Radiace a atmosféra** – jak záření postupuje od zdroje k cílovému objektu a od cílového objektu k družici, prochází atmosférou – dochází zde k interakci a modifikaci záření.

**3. Interakce s objektem** – jakmile záření projdeatmosférou, dochází k interakci se zájmovým objektem, a to v závislosti na vlastnostech objektu i záření.

**4. Záznam odraženého záření senzorem** – po odrazu záření (nebo i objekt může sám vyzařovat), dochází k záznamu na senzoru.

**5. Přenos a předzpracování** – záznam je přenesen, většinou v elektronické podobě, na přijímací stanici, kde jsou data zpracována do obrazové podoby (digitální formát); často prochází předzpracováním, atmosférickými a geometrickými korekcemi s cílem odstranit různé šumy, vliv atmosféry a geometrické nepřesnosti vzniklé při snímkování.

**6. Analýza a interpretace** – zpracování a interpretace snímku (vizuální, digitální), extrakce informace pomocí různých metod

**7. Aplikace** – poslední článek DPZ, získání informace o cílovém objektu, vyřešení problému, odpověď na naše otázky

Samotné digitální zpracování a analýza obrazu (viz - bod 6) zahrnuje velmi širokou škálu technik. Neexistují všeobecná pravidla a postupy, jak obraz zpracovat tak, abychom dostali potřebnou informaci. Záleží na úloze, vybraném území, zkušenostech zpracovatele a dalších faktorech. Mezi základní techniky zpracování obrazu patří (Dobrovolný 1998):

**Zvýraznění obrazu**

Zvýrazňování obrazů zahrnuje celou řadu metod a technik, jimiž lze upravit snímek tak, aby byla buď usnadněna jeho vizuální interpretace, nebo získána informace zcela nová. Zahrnují např. techniky zvýraznění kontrastu, filtrace obrazu, spektrální zvýraznění pomocí barevné syntézy obrazu, obrazovou algebru apod.

**Získání tematické informace**

Jedná se o postupy, ve kterých je původní (radiometrická hodnota pixelu) nahrazena tematickým obsahem. Souhrnně je lze označit klasifikační metody. Použitím různých pravidel lze prvky obrazu zařadit do určité třídy. Využívají se rozhodovací pravidla, která jsou založena na základě spektrálních, prostorových i časových vlastnostech objektů.

**Modelování s obrazovými daty a aplikace**

Odvození kvantitativních i kvalitativních vztahů mezi daty získaných DPZ a dalšími pozemními daty (např. kvalita vody, meteorologická měření, výnosy plodin, atd.). Přímá aplikace v různých odvětvích např. v zemědělství, lesnictví, ochraně krajiny, monitoring kvality vod, znečištění prostředí, studie klimatu apod.

## 9.2. Úvod do případových studií

V následujících případových studiích si ukážeme, jak je možné pomocí dat DPZ hodnotit a interpretovat úlohu vegetace v distribuci slunečního záření v krajině tak, jak byla teoreticky představena v předchozích kapitolách. Základem hodnocení (v závislosti na případové studii) budou informace o:

– Teplotě povrchu
– Typu krajinného pokryvu (lesní porosty, orná půda, vodní plochy, nelesní vegetace apod.), případně o jeho kvalitativních vlastnostech (především vlhkost, množství biomasy)
– Slunečním zářením a dalších meteorologických prvcích (např. vlhkost a teplota vzduchu, srážky, rychlost větru)

### 9.2.1. Teplota krajiny a její měření pomocí dat DPZ

Teplotní projev povrchu lze chápat nejenom jako termodynamický stav daného tělesa, respektive jeho povrchu, ale též jako důsledek energetických přeměn, které na povrchu probíhají. V důsledku radiační výměny mezi povrchem a okolím a díky vedení tepla dochází ke změnám teploty povrchu. Teplotě krajiny (povrchu) odpovídá tzv. teplota radiační (jasová). Každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula (-273,15 °C) emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí jeho kinetické teploty (tato teplota je interním projevem energie molekul tvořících těleso) a materiálu, z něhož se těleso skládá. V tepelné části elektromagnetického záření převažuje vlastní vyzařování objektů nad odraženým slunečním zářením. Intenzita tohoto dlouhovlnného vyzařování je vnějším projevem teploty tělesa a řídí se základními zákony termodynamiky. Za teplotu krajiny je většinou považována termodynamická (kinetická) teplota vzduchu, měřená teploměrem ve stínu standardizované meteorologické budky ve 2 metrech nad zemí a následně interpolovaná na větší území. Jedná se o teplotu vzduchu, který „ohřívá teploměr“. Mezi kinetickou a radiační teplotou existuje pozitivní korelace. Proč se tedy zaměřit na teplotu povrchu a nikoli teplotu vzduchu? Teplota povrchu je indikátorem, který vypovídá o transformaci sluneční energie na zemském povrchu a lze z ní odvodit, která složka tepla bude převažovat – zda

zjevné (pocitové) teplo, které je zodpovědné za ohřívání prostředí (projevuje se vysokou teplotou na snímcích) či latentní teplo, které se spotřebovává na výpar vody, a tudíž prostředí ochlazuje (projevuje se nízkou teplotou). Teplota povrchu je výsledkem energetických přeměn, jež můžeme ovlivnit prostřednictvím krajinného pokryvu a vodním režimem. Ztráty funkční vegetace jsou provázeny změnami distribuce slunečního záření, což se projeví změnami teplot.

Na rozdíl od kinetické teploty, kterou měříme kontaktním způsobem (teploměrem), radiační teplotu měříme bezkontaktně. Pro bodová (pozemní) měření jsou užívány pyrometry (infračervené teploměry), pro zachycení prostorové informace jsou využívány systémy infračerveného zobrazování v termální části spektra dvojího typu:

a) Maticové zobrazovací systémy (termovizní kamery)

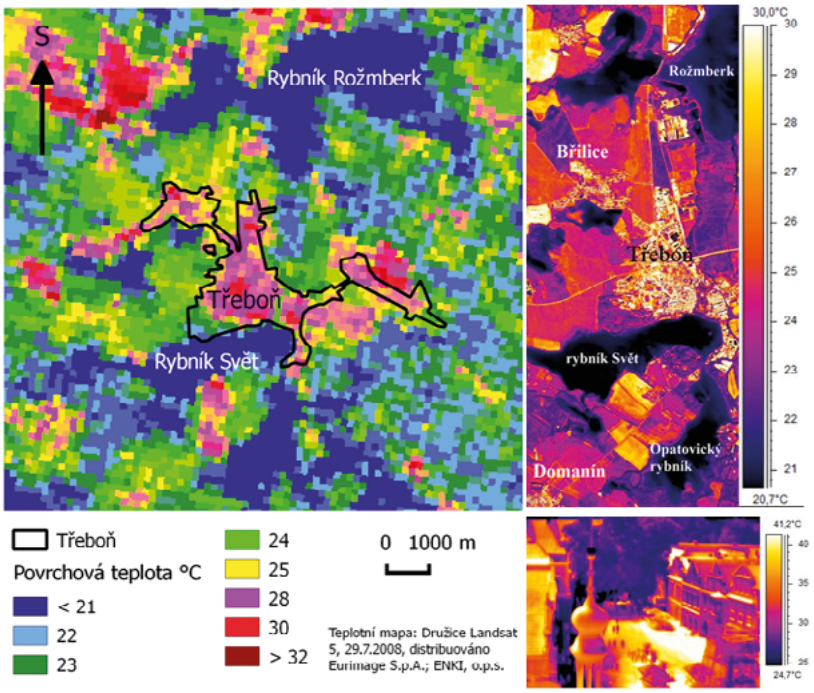
b) Skenovací systémy (na leteckých i družicových nosičích)

Informace o teplotě povrchu je založena na snímání elektromagnetického záření objektu ve vlnových délkách 3–5 μm, nejčastěji však 7,5–14 μm. V prvním jmenovaném intervalu je zaznamenána jak složka emitovaná zemským povrchem, tak i část odraženého slunečního záření. Z tohoto důvodu jsou data zpravidla získávána v nočních hodinách, kdy je vliv odraženého slunečního záření minimalizován. Druhý interval je vhodnější pro získávání distančních teplotních dat s ohledem na to, že maximum emitované energie zemským povrchem je situováno do této části elektromagnetického spektra. Snímek získaný v tepelné části elektromagnetického spektra je v případě družicových dat a dat pořízených širokospektrální termovizní kamerou představován maticí hodnot, ve které každý bod (pixel) zaznamenává pouze jednu hodnotu intenzity toku tepelné radiace v daném místě. Tuto informaci lze převést pomocí různých algoritmů na absolutní hodnotu teploty povrchu. Je-li provedena korekce dat, mohou být termální data využita pro vytvoření teplotní mapy povrchu. Oproti konvenčním pozemním měřením, která poskytují zpravidla bodovou teplotní informaci, jsou data pořízená metodami DPZ prostorově spojitá. Teplotní informace může být kvalitativního (pro porovnání, standardizovaná data) i kvantitativního charakteru (získání absolutních hodnot). Důležitou charakteristikou termálních snímků je i jejich prostorové rozlišení, tzn., jak velké území reprezentuje jeden pixel nesoucí informaci o průměrné hodnotě teploty na daném snímku.

Termální družicová data jsou založena na základě snímání intenzity elektromagnetického záření ve vlnových délkách nejčastěji 7,5 – 14 μm, případně 3 – 5 μm, a to pomocí různých skenovacích zařízení. Termální snímky jsou pořizovány v jednom či více širokospektrálních kanálech, z nichž jde po radiometrických a atmosférických korekcích odvodit absolutní hodnotu povrchové teploty.

Termální snímky poskytuje většina meteorologických družic (např. NOAA AVHRR, Meteosat, Terra MODIS, Sentinel 3). Jejich prostorové rozlišení v řádu stovek metrů až kilometrů je vhodné pro monitoring velkých územních celků, bez možnosti detailnějšího hodnocení. Pro hodnocení krajiny na úrovni regionálních celků (např. povodí, katastr, apod.) jsou vhodná data v prostorovém rozlišení řádu desítek metrů. Kromě informace o povrchové teplotě snímají tyto družicové systémy území i ve viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra. Z těchto dat je možné získat další informace, které jsou nezbytné pro hodnocení lokálního a regionálního klimatu, jako je např. krajinný pokryv, množství biomasy, vlhkost povrchu. Takto komplexně vybavených družicových systémů není mnoho, např. Landsat či Terra Aster. Termální data s vysokým prostorovým rozlišením lze pořídit pomocí systémů umístěných na leteckých nosičích, či bezpilotních leteckých prostředcích (UAS, UAV, tzn. drony, vzducholodě, bezpilotní kluzáky). Na těchto nosičích většinou bývají umístěny termální širokopásmové kamery. Tyto termokamery snímají zájmovou oblast v jeden časový okamžik na maticový detektor pouze v jediném spektrálním kanálu (cca ve vlnových délkách 7,5– 14 μm). V závislosti na výšce letu a použité optice se prostorové rozlišení termálních snímků pohybuje v řádu metrů až centimetrů. Výhodou těchto dat je možnost operativního a opakovaného snímání zájmového území. Nevýhodu představuje vyšší finanční náročnost, nároky na technické vybavení i komplikovanější předzpracování dat. U systémů UAS/UAV jejich využití omezuje i legislativa. Současné pořízení dat v jiných částech elektromagnetického spektra (především v oblasti NIR a MIR), které by umožnilo hodnocení typu krajinného pokryvu, biomasy i vlhkosti, je zatím omezeno dostupným přístrojovým vybavením. Nosiče mohou být vybaveny měřickou kamerou, která snímá viditelnou, blízkou i střední infračervenou část spektra. Jejich kompatibilita s termovizními systémy, která by umožňovala jednoduchou fúzi a zpracování odlišných typů dat ve vztahu k hodnocení klimatu, je mírně omezená, ale lze očekávat výrazný posun v rozvoji těchto technologií.

Relativně nové možnosti hodnocení poskytují data pořízená hyperspektrálními termálními skenery, umístěnými na leteckých nosičích (Brom et al. 2014). Tyto systémy pořizují data v několika desítkách – stovkách spektrálních kanálů, s vysokým prostorovým rozlišením řádu metrů - centimetrů. Jedná se o technologie, jejichž pořízení je zatím finančně náročné, stejně tak techniky jejich zpracování. Doplnění informacemi o typu krajinného pokryvu, jednotlivých druzích vegetace, hodnocení biomasy, vlhkosti by bylo možné za současného použití dalších hyperspektrálních senzorů umístěných na stejném nosiči. Pro regionální hodnocení krajiny představuje do budoucna kombinace těchto typů dat vysoký potenciál. Jak však bylo uvedeno, jejich použití brání nejen vysoké finanční náklady na jejich pořízení, ale i poměrně složité techniky zpracování a kalibrace termálních hyperspektrálních dat.



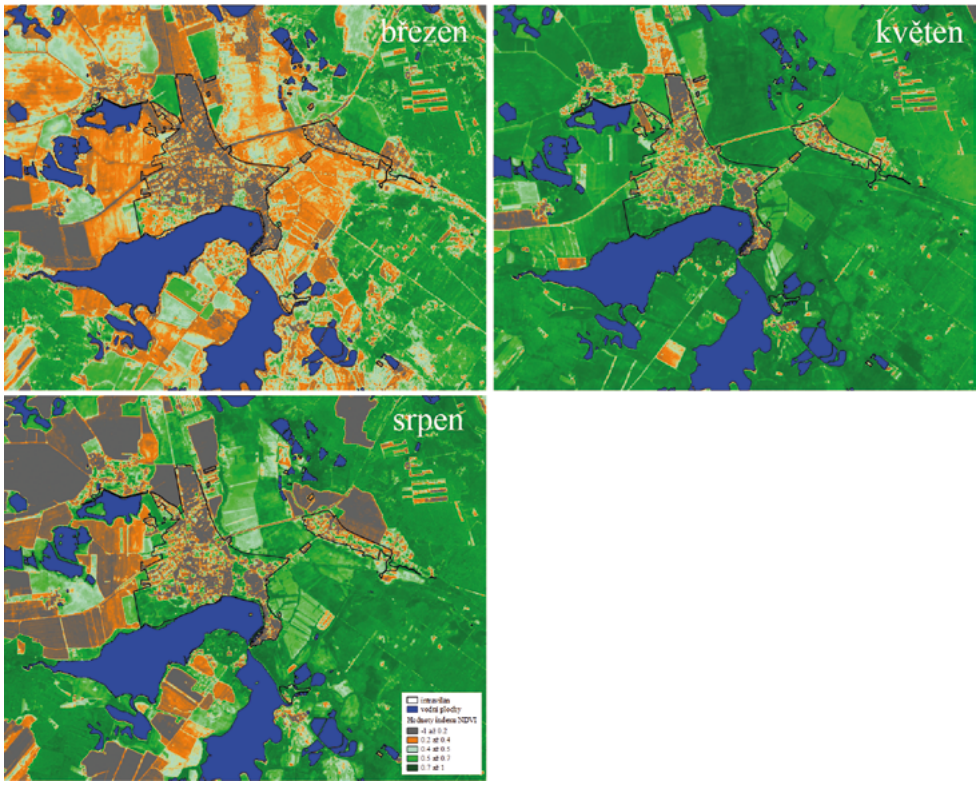

**Obr. 9.4** Příklad termovizních snímků Třeboně s různým rozlišením, pořízených 29. 7. 2008. Družicový snímek z Landsatu 5 s rozlišením 120 metrů umožňuje hodnocení větších krajinných celků. Doba snímkování je 9:40 UTC. Letecký snímek zachycuje území v detailu 2 metrového rozlišení (pořízen 14:00). Díky tomu lze detailněji analyzovat teplotu různých typů povrchů městského prostředí, tj. jednotlivých budov i solitérních stromů, stromořadí, zatravněných ploch i umělých povrchů. Snímek z třeboňské radniční věže zobrazuje rozdíl mezi teplotou náměstí (35 °C) a stromy v areálu

zámku (24 °C). Pozemní snímkování poskytuje detailní a doplňující data o teplotě povrchu. Lze ho využít v případech, kdy je pořízení kolmých snímků (z leteckých či UAV nosičů) z hlediska technických či finančních podmínek nemožné. Na rozdíl od metod DPZ umožňuje pozemní měření rychlé a operativní pořízení datových podkladů. Nevýhodou tohoto snímkování je šikmé snímání, kdy do objektivu kamery dopadá pouze část tepelného záření, v porovnání s kolmým snímáním. Informace o teplotě snímaných objektů může být mírně podhodnocena. (upraveno dle Pokorný et al. 2018)

### 9.2.2. Krajinný pokryv

Vegetace, její typ a kvalita, představuje klíčovou strukturu v procesu disipace sluneční energie a distribuce energetických toků v krajině. Fungování rostliny v rámci ekosystému je závislé na jejím fyziologickém stavu, jehož indikátory jsou složení fotosyntetických pigmentů a obsah vody. Pro hodnocení množství zelené biomasy jsou využívány tzv. vegetační spektrální indexy. Jejich konstrukce, založená buď na jednoduchých aritmetických operacích s pásmy multispektrálního obrazu či na jejich lineární kombinaci, využívá především odlišného chování vegetace v červené a blízké části infračervené části elektromagnetického spektra. Hodnota indexu je relativním ukazatelem, který koreluje s hodnoceným parametrem. V dnešní době existují desítky různých indexů, většina z nich však poskytuje podobné informace, a tak jich pro praktické využití stačí pouze několik. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) je jedním z nejrozšířenějších indexů pro monitoring vegetace na regionální až globální úrovni. Index koreluje s obsahem zelené biomasy v pixelu, je indikátorem fotosyntetické aktivity vegetace a lze jím hodnotit změny vegetace v různých fenologických fázích. Hodnota indexu se pohybuje v intervalu (-1,1) a je bezrozměrná. Uvádí se, že uvedené hodnoty indexu NDVI indikují:

-1 až 0,2 holé povrchy;
0,2 až 0,4 řídká vegetace;
0,4 až 0,5 středně hustá vegetace;
0,5 až 0,7 hustá vegetace;
0,7 až 1 velmi hustá vegetace




**Obr. 9.5** Časová řada indexu NDVI (rok 2018) v okolí Třeboně vypočtená z dat Sentinel 2, s rozlišením 10 metrů. V případě, že tato data kombinujeme se znalostmi růstových křivek, můžeme z daného snímku odhadnout množství zelené biomasy. V tabulce1 je uveden odhad pro 31. květen 2018.

**Tabulka 9. 1** Výpočet hmotnosti suché i zelené biomasy na základě indexu NDVI z dat Sentinel 2 pro jednotlivé kategorie indexu NDVI (31. 5. 2018). Výpočet je založen na základě růstových křivek. (Cooper 1975, Hakrová et al. 2015)

| 31. 5. 2018 | Plocha ($m^2$) na snímku | Biomasa ($g/m^2$) | Odhad suché biomasy celkem (t) | Odhad zelené biomasy při 32 % sušině celkem (t) |
|---|---|---|---|---|
| **Holé povrchy** | 525 400 | 0 | 0,00 | 0,0 |
| **Řídká vegetace** | 746 300 | 15 | 11,19 | 35,0 |
| **Středně hustá vegetace** | 432 400 | 100 | 43,24 | 135,1 |
| **Hustá vegetace** | 727 200 | 400 | 290,88 | 909,0 |
| **Velmi hustá vegetace** | 825 500 | 800 | 660,40 | 2 063,8 |
| **Celkem** | 3 256 800 | | **1 005,71** | **3 142,9** |

Informace o typu krajinného pokryvu lze získat klasifikačními metodami. Původním naměřeným radiometrickým hodnotám podle zvoleného klasifikačního schématu přiřazujeme tematický obsah. Získání informace o krajinném pokryvu je jednou ze základních úloh DPZ. Podle prostorového a spektrálního rozlišení dat lze rozlišit nejen základní typy krajinného pokryvu (např. vodní plochy, nelesní vegetace, lesní porosty, holá půda, zástavba), ale v případě dat vysokého spektrálního rozlišení lze získat informace o jednotlivých druzích plodin, vývojových stádiích lesa, druhovém složení apod. Klasifikační metody jsou poměrně zpracovatelsky náročné. Proto alternativou k získání dat o krajinném pokryvu může být evropská databáze krajinného pokryvu CORINE. Ta vychází z vizuální interpretace družicových dat. Vzniká pro celou Evropu od roku 1990 a je každých šest let aktualizována. Evropská komise zahájila program CORINE (COoRdination of INformation on the Environment) s cílem zajistit přístup k informacím o životním prostředí v rámci Evropského společenství. V průběhu let byly využity různé typy družicových (SPOT, Landsat, IRS-6, Resourcesat-2, a další) i doplňkových dat (v České republice jsou to letecké ortofotomapy, topografické mapy i zemědělská databáze LPIS). Primární mapovací jednotka je v měřítku 1:100 000, s nejmenší mapovatelnou jednotkou 25 ha a minimální šířkou 100 m. Časová řada je doplněna identifikací změn větších než 5 ha. Z celkového počtu 44 evropských tříd krajinného pokryvu je v České republice zastoupeno 29. K základnímu datovému podkladu byla v roce 2012 pro sídla nad 50 tis. obyvatel vytvořena podrobnější vrstva (Urban Atlas) v měřítku 1: 10 000. Obě dvě datové sady jsou k dispozici ve vektorové podobě. Od roku 2015 jsou vytvářena rastrová data High Resolution Layers. Obsahují data o čtyřech základních typech povrchu – nepropustném povrchu, lesních porostech, vodních plochách a zamokření, trvalých travních porostech. Zdrojem dat jsou družicové snímky z různých senzorů v prostorovém rozlišení 20 m. Všechna data jsou volně k dispozici v rámci Služby pro monitorování území z programu Copernicus. Poskytovatelem dat je Národní geoportál INSPIRE, případně Evropská agentura pro životní prostředí (EEA). https://geoportal.gov.cz/web/guest/eshop/gallery https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers

### 9.2.3. Ostatní datové zdroje

Existuje řada přístupů hodnocení radiační a energetické bilance porostů z dat dálkového průzkumu Země (Kalma et al. 2008; Li et al. 2009). Jsou založeny na kombinaci termálních a optických dat s daty pozemního měření. V závislosti na použitých metodách je nezbytné měření nejen meteorologických veličin (např. teploty vzduchu, vlhkosti, rychlosti větru, slunečního záření atd.) v době přeletu družice, ale i parametry porostu (jeho výška, index listové plochy apod.). Výpočet energetických toků je však ovlivněn kvalitou a dostupností těchto dat, dále pak přesností empirických koeficientů použitých ve výpočtech, ale i velikostí hodnoceného území. Data DPZ nám na rozdíl od bodových měření na meteorologických stanicích umožňují plošnou kvantifikaci. Jako příklad hodnocení uvádíme případovou studii 2 (kapitola 9.3.2.).

### 9.2.4. Z jakých dat DPZ lze tyto informace získat?

Hlavními parametry pro hodnocení vztahu vegetace – sluneční záření jsou povrchová teplota a informace o vegetaci (typ, případně zdravotní stav, množství biomasy apod.). Jediným družicovým systémem, který poskytuje data o povrchové teplotě (v prostorovém rozlišení cca 100 m) a zároveň o vlastnostech vegetace, umožňuje retrospektivní hodnocení a je poskytován zdarma, je systém družic Landsat. První družice Landsat byla vypuštěna již v roce 1972 a následovalo několik dalších generací. V roce 2022 jsou funkční družice Landsat 7, 8 a 9.. Jsou vybaveny termálním skenerem, poskytujícím teplotní informace v prostorovém rozlišení 120 metrů, resp. 100 metrů. Kromě informace o teplotě lze z těchto dat standardně získat i hodnocení vybraných vlastností vegetace a vlhkosti v rozlišení 30 metrů. Velkou nevýhodou dat je perioda snímkování 16 dní a častá přítomnost oblačnosti ve dnech přeletu družice (nad naším územím cca 9:45 SEČ). Unikátností celého projektu, který je řízen americkými institucemi NASA a USGS, je volná dostupnost celého datového archivu, včetně širokého spektra odvozených produktů, které může využívat i koncový uživatel. https://earthexplorer.usgs.gov/

Teprve od roku 2015 jsou v rámci evropského kosmického programu Copernicus k dispozici data s porovnatelnými spektrálními a prostorovými vlastnostmi

jako u družice Landsat. Tandem družic Sentinel 2A,B snímá území střední Evropy cca každé 3 dny (pokud není oblačnost). Tyto družicové systémy však nejsou vybaveny termálním pásmem. Toto je i přes široké aplikační možnosti diskvalifikuje od hodnocení vztahu vegetace – distribuce slunečního záření. Družice Sentinel 3 (vypuštěna 2016) sice termálním pásmem disponuje, avšak jeho prostorové rozlišení 1 km je nevyhovující.

## 9.3. Případové studie

První dvě případové studie byly zaměřeny na zhodnocení vlivu změny krajinného pokryvu (odlesnění) na povrchovou teplotu. Teplota krajiny představuje jednu z klíčových charakteristik, určujících vztahy mezi oběhem vody a energetickou bilancí krajiny. Přímo i nepřímo ovlivňuje vodní cyklus i klima. Změny teploty v krajině jsou projevem změn radiačních toků a energetické bilance. Poměr a vlastnosti dopadajícího a odraženého slunečního záření jsou výsledkem jeho interakce s aktivním povrchem, tudíž závisí na krajinném pokryvu. Ztráty funkční vegetace jsou provázeny změnami distribuce slunečního záření a energetických toků, což se projeví změnami teplot. Vysoké hodnoty povrchové teploty indikují místa, kde převažuje tok zjevného tepla, naopak nižší hodnoty povrchové teploty ukazují na vyšší výpar vody.

### 9.3.1. Případová studie 1 – Hodnocení povrchové teploty v souvislosti se změnou krajinného pokryvu v části NP Šumava

Cílem studie bylo zhodnocení vývoje povrchové teploty v části NP Šumava v letech 1991, 1998, 2004, 2005, 2009 a 2016 (Hesslerová et al. 2018). Území NP Šumava je střídavě postihováno gradacemi lýkožrouta smrkového a ničivými větry, z nichž významným byl orkán Kyrill v roce 2007. Tyto faktory vedou v kombinaci s bezzásahovým režimem ke ztrátě lesních porostů na velkých plochách. Na odlesněných plochách dochází k významnému nárůstu povrchové teploty.

Ve studii byly použity družicové snímky Landsat 5 a Landsat 8. Z termálního pásma družice byly vypočteny hodnoty povrchové teploty dle Sobrino et al. (2005)

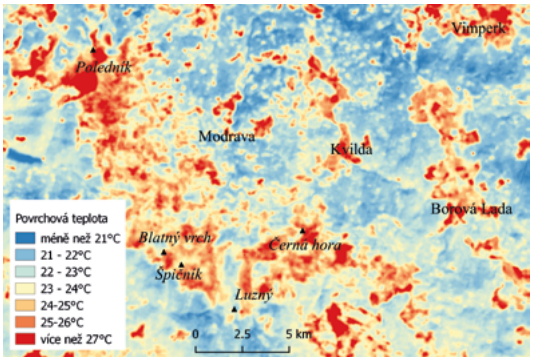
a Jiménez-Muñoz et al. (2014). Vzhledem ke skutečnosti, že družicová data jsou pořizována za různých meteorologických podmínek, je nezbytné pro účely mezitermínového hodnocení data standardizovat. Standardizace dat převádí hodnoty různých datových souborů na stejné měřítko za účelem porovnání dat mezi sebou. Pro tento účel byla zvolena metoda standardizace směrodatnou odchylkou

$$T_s = \frac{\overline{T_i - T}}{SD},$$

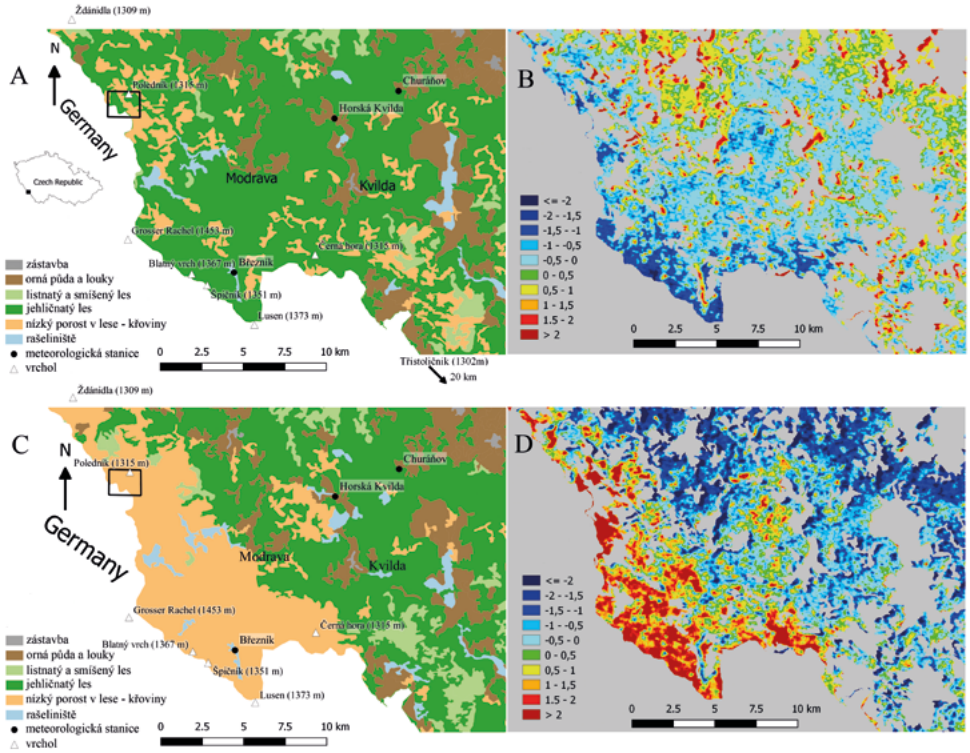
kde $T_i$ je povrchová teplota pixelu i, $\overline{T}$ průměrná teplota v zájmovém území, SD směrodatná odchylka.

Průměr sledované veličiny pro celé hodnocené území je roven nule, rozptyl jedné. Hodnoty nového datového souboru se pohybují nejčastěji v intervalu -3 až +3. Výsledná veličina je bezrozměrná. Kladné hodnoty ukazují, že hodnocená veličina je nad průměrem daného území, záporné opak. Informace o krajinném pokryvu byla převzata z databáze CORINE, a to z let 1990, 2000, 2006 a 2012.

Zdravé lesní porosty a mokřadní vegetace jsou povrchy, které díky evapotranspiraci ochlazují krajinu, což se na snímcích projevuje nízkými hodnotami povrchové teploty (obr. 9.6). Naopak zástavba, či suchá vegetace (odumřelé lesní porosty, posečená louka apod.) nejsou vzhledem k nedostatku vody schopny snižovat teplotu povrchu. Rozdíly mezi oběma typy povrchů dosahují i 10 stupňů. Ze snímků (obr. 9.7) vyplývá, že se změnou krajinného pokryvu dochází ke změně povrchové teploty. Při rozpadu smrčin dochází k výraznému růstu povrchové teploty. Tato skutečnost je evidentní v celém příhraničním pásu. V případě, že původní porost smrčiny je po jejím rozpadu nahrazen travinnou vegetací, nelze předpokládat významné snížení povrchové teploty na úroveň před rozpadem porostu.

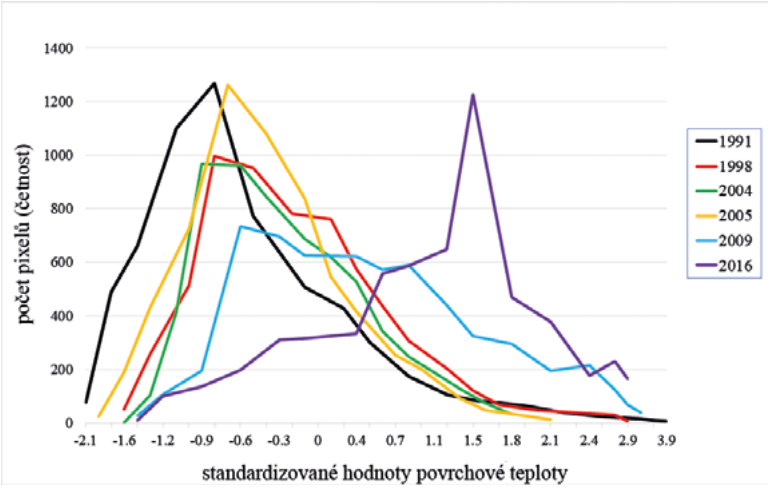



**Obr. 9.6** Absolutní hodnoty povrchové teploty 27. 8. 2016 (9:45 SEČ) vypočtené z termálního pásma družice Landsat 8. Teplota na místech rozpadlých smrčin (nízký porost v lese) je o více než 6 °C vyšší, než u lesního porostu. Neliší se od zastavěných území, luk a orné půdy. Krajinný pokryv je na obr. 9.7c.

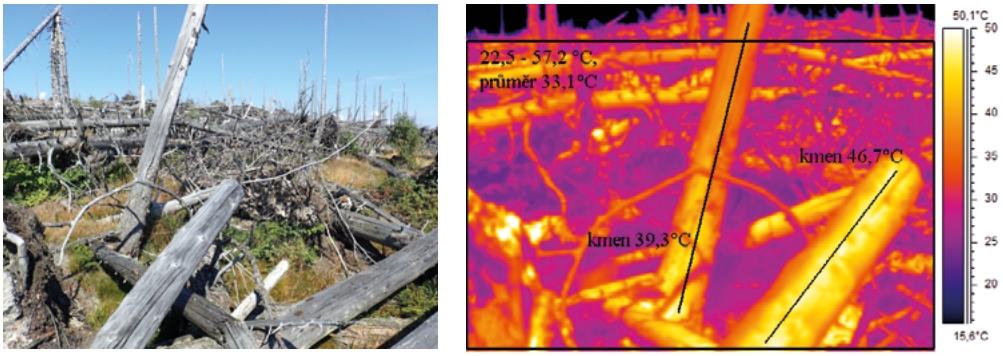



**Obr. 9.7** Krajinný pokryv v zájmovém území Šumavy (A) a relativní teplota jehličnatých porostů v roce 1991 (B). Porosty v hraniční oblasti náleží k nejchladnějším. V roce 2012 již došlo k výrazné změně krajinného pokryvu (C). Jehličnaté lesy hraničního hřebenu byly nahrazeny kategorií nízký porost, která reprezentuje rozpadlé smrčiny, případně lokality s pionýrskými dřevinami a bylinami. Změně krajinného pokryvu odpovídá i změna povrchové teploty (D), a to o více než 2 °C. (Upraveno dle Hesslerová et al. 2018)

Detailní vývoj teploty ve spojitosti se změnou krajinného pokryvu v lokalitě Poledník, která byla v roce 2007 silně postižena orkánem Kyrill, je na obr. 9.8. Vývoj teploty je znázorněn pomocí histogramu standardizované teploty. V letech 1991 – 2005 není v této lokalitě patrná změna teploty. Většina lesních porostů má teplotu o 1 – 2 °C nižší, než je průměr sledovaného území. V roce 2009 dochází v souvislosti s rozsáhlými polomy k jejímu růstu. Pokračující růst je patrný i v roce 2016. Mezi lety 1991 – 2016 se teplota na sledované lokalitě zvýšila o 2– 3 °C.




**Obr. 9.8** Histogram standardizovaných hodnot teploty ukazuje zvýšení teplot po orkánu Kyrill a odlesnění na lokalitě Poledník (lokalita je vyznačena na obr. 9.7). (Upraveno dle Hesslerová et al. 2018)




**Obr. 9.9** Pozemní termovizní snímek ukazuje velké rozdíly teplot (36 °C) na odlesněných lokalitách. Teplota uschlých kmenů je až 58 °C. (Upraveno dle Hesslerová et al. 2018)

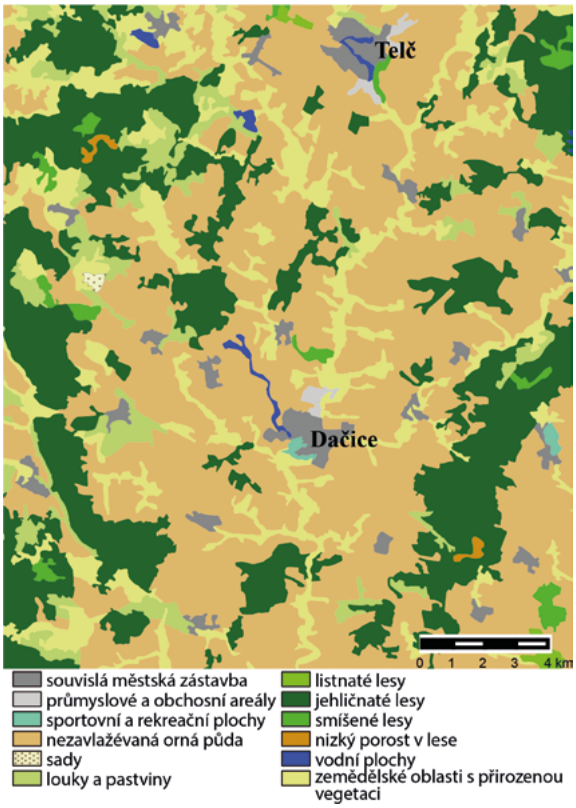
Odlesněním dochází ke změnám v hodnotách evapotranspirace, jejichž důsledkem je změna disipace sluneční energie. Toky tepla jsou místo do latentního tepla výparu směřovány do zjevného tepla, což má za následek růst povrchové teploty a ztráty vody. Z tisíce ha uschlého lesa se za jasného letního dne uvolňuje do atmosféry 5 000 MW energie ve formě zjevného tepla, což má za následek změny proudění vzduchu a postupné vysušování. Lze očekávat, že růst povrchové teploty na rozsáhlém území způsobí změnu lokálního klimatu i hydrologického režimu.

### 9.3.2. Případová studie 2 – Změny klimatizační funkce lesních porostů jako následek jejich plošného odumření po gradaci lýkožrouta smrkového na Dačicku

Cílem studie bylo zhodnotit změnu klimatizační funkce lesních porostů a zemědělské krajiny v širším okolí města Dačice (328 $km^2$) v letech 1990, 2007, 2013, 2017 a 2019. Klimatizační funkce se projevuje hodnotami povrchové teploty za slunných dnů ve vegetační sezóně, kdy přichází vysoké množství sluneční energie (až 900 $W.m^{-2}$). Povrchová teplota krajinného pokryvu je dána zejména poměrem mezi evapotranspirací (tok latentního tepla výparu) a ohřevem (tok zjevného tepla). Chladící schopnost lesních porostů hodnotíme nejen podle latentního a zjevného tepla, ale i pomocí rozdílu povrchové teploty a teploty vzduchu nad porostem. Tento rozdíl může být použit jako indikátor stavu vegetace. V případě, že je vegetace dobře zásobena vodou a v dobrém zdravotním stavu, díky procesu evapotranspirace funguje její klimatizační funkce. Povrchová teplota je buď stejná, či o několik stupňů nižší. V případě nedostatku vody či špatného zdravotního stavu vegetace je povrchová teplota vyšší, než je teplota vzduchu. Tato skutečnost byla dokumentována řadou pozemních i distančních měření termovizní kamerou (Hesslerová et al. 2013; Pokorný et al. 2018). Lesní porosty, vrbina, mokrá louka za horkého letního dne vykazovaly povrchovou teplotu o 1–3 °C nižší, než je teplota vzduchu (v poledních hodinách), v odpoledních hodinách tento rozdíl může nabývat i 6 °C. V případě holých povrchů či suché vegetace (posečená louka), je povrchová teplota v době maximálního příkonu slunečního záření o 10–20 °C vyšší, než teplota vzduchu.

Na modelové studii ověřujeme tezi, jak postupná ztráta vody a vegetačního pokryvu v pahorkatině Českomoravské vrchoviny vede k nárůstu povrchových teplot, zvyšujícímu se rozdílu mezi teplotou povrchovou a teplotou vzduchu, vyššímu uvolňování zjevného tepla na úkor evapotranspirace (latentního tepla výparu). Od roku 2015 čelí Česká republika rozsáhlé kalamitě, která zasáhla ve velké míře i lesy v okolí města Dačice (obr. 9.10), s eskalací v letech 2018 až do současnosti. Zvláštní pozornost potom věnujeme efektu rozsáhlého úhynu smrkových porostů po gradaci lýkožrouta smrkového (po roce 2015) na distribuci sluneční energie a teploty. Pro hodnocení byly využity družicové snímky Landsat, v kombinaci s meteorologickými daty. Energetické toky byly prostorově kvantifikovány

pomocí gradientového přístupu s využitím softwaru QGis a modulu SEBCS (Module for spatial computing of energy balance, intensity of evapotranspiration and crop water stress using satellite data; Brom 2014). Diskutujeme význam suchých přehřátých ploch ve vysychání krajiny, kdy je vlhkost odnášena vzestupným proudem ohřátého vzduchu.




**Obr. 9.10** Krajinný pokryv v modelovém území v roce 2017. (Upraveno dle Hesslerová et al. 2022)

### 9.3.2.1. Data a metody

Pro prostorové hodnocení energetické bilance modelového území a povrchové teploty byla využita data z družic Landsat 5 a 8. Pro hodnocení byly primárně vybírány scény z letních měsíců. Zdrojem informací o krajinném pokryvu byla klasifikace družicových dat ve sledovaném roce, kombinovaná s daty Corine Land Cover. Pro výpočet a správnou interpretaci energetické bilance území z družico-

vých dat, jsou nezbytná další doplňková data – meteorologická a digitální model terénu. Meteorologická data byla zakoupena ze stanice ČHMÚ Kostelní Myslová. Data o přicházejícím slunečním záření byla získána z meteorologické stanice ENKI, o.p.s. v Třeboni, neboť stanice ČHMÚ tato data neměří. Digitální model terénu modelu SRTM1_V3 (Shuttle Radar Topography Mission) je volně dostupný např. z portálu Earth Explorer.

Existuje řada přístupů pro výpočet energetických toků v krajině na základě kombinace meteorologických data a dat dálkového průzkumu Země (DPZ). Přehled podávají např. Kalma et al. (2008), Li et al. (2009). Výpočet jednotlivých složek energetické bilance vychází ze vztahu

$$R_n = G + H + \lambda E$$

kde $R_n$ je celková čistá radiace, G je tok tepla do půdy, H tok zjevného tepla a $\lambda$E tok latentního tepla výparu (vše $W.m^{-2}$).

Pro samotný výpočet energetických toků byl využit modul pro prostorový výpočet energetické bilance a vodního stresu vegetace SEBCS (Brom 2014). Vstupní data do modulu zahrnují a) digitální model povrchu b) rastrovou hodnotu teploty vzduchu c) optická data – optické spektrální kanály družic Landsat v červené a blízké infračervené oblasti spektra d) termální data e) meteorologická data – teplota vzduchu (ve 2 m), relativní vlhkost vzduchu, přicházející sluneční záření f) data pro výpočet geometrie záření (zeměpisná délka a šířka, čas pořízení snímku v GMT, datum pořízení snímku).

Družicové snímky jsou pořizovány za různých meteorologických podmínek a použití absolutních hodnot (ve °C, či $W.m^{-2}$ ) **v časové řadě by nebylo objektivní. Proto je nezbytné pro účely mezitermínového hodnocení data o povrchové teplotě, latentním toku i toku zjevného tepla standardizovat** (viz Případová studie 1 – kapitola 9.3.1.). Krajinný pokryv v modelovém území byl rozčleněn na 5 základních tříd: vodní plochy – holé povrchy – orná půda – nelesní vegetace – les. Informace o krajinném pokryvu pro každý hodnocený termín vychází ze dvou datových zdrojů. Prvním zdrojem je databáze Corine Land Cover a druhým zdrojem řízená klasifikace družicových snímků, která sloužila pro aktualizaci vybraných tříd CORINE. Pro všechny pixely každé kategorie krajinného pokryvu (bez vodních ploch) byly vypočteny hodnoty latentního tepla výparu, zjevného tepla, toku tepla do půdy a povrchové teploty. Tyto hodnoty byly následně standardizovány.

Pro hodnocení chladící schopnosti lesních porostů byl jako další indikátor využit vztah

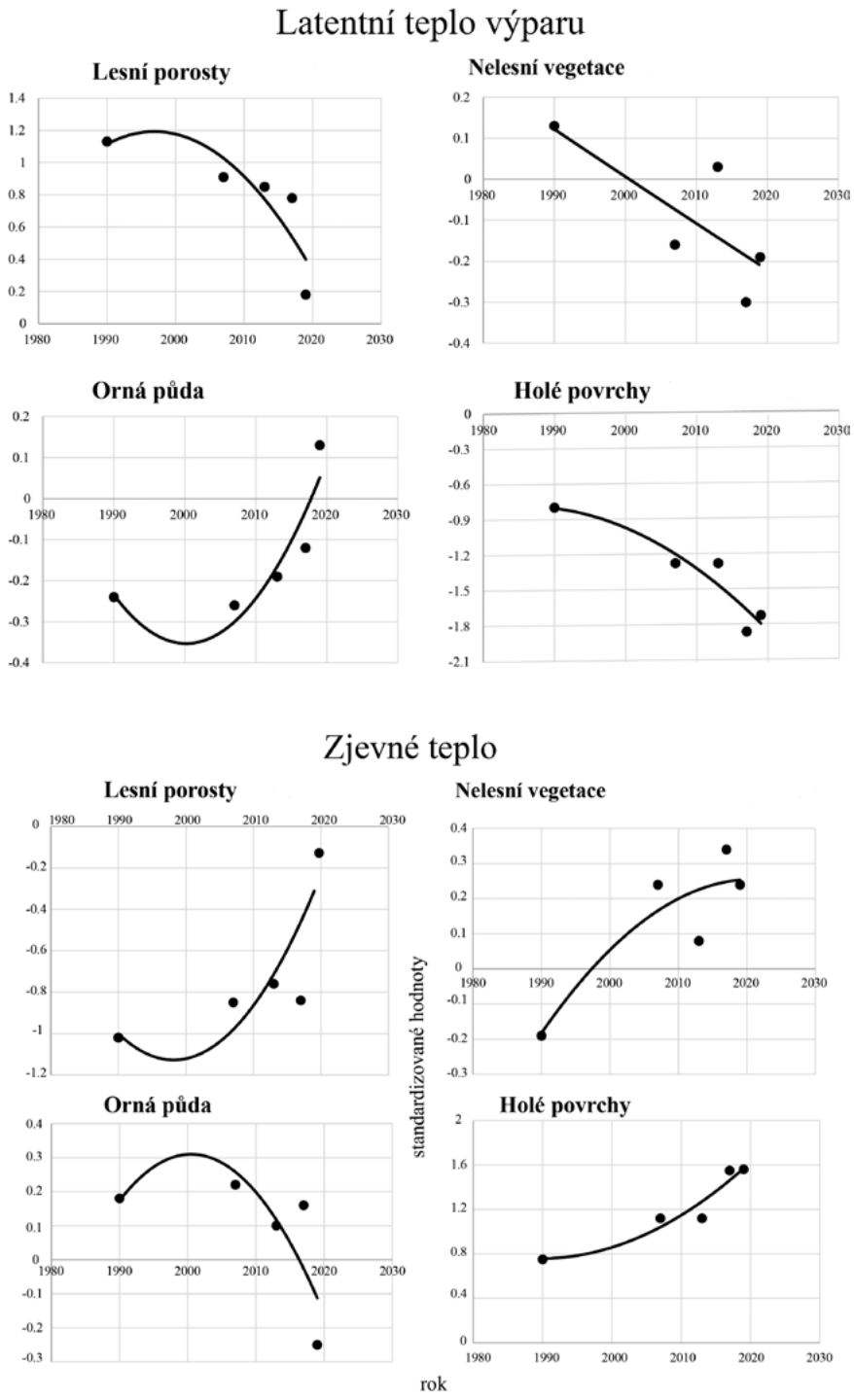
$$dT = T_s - T_{ar}$$

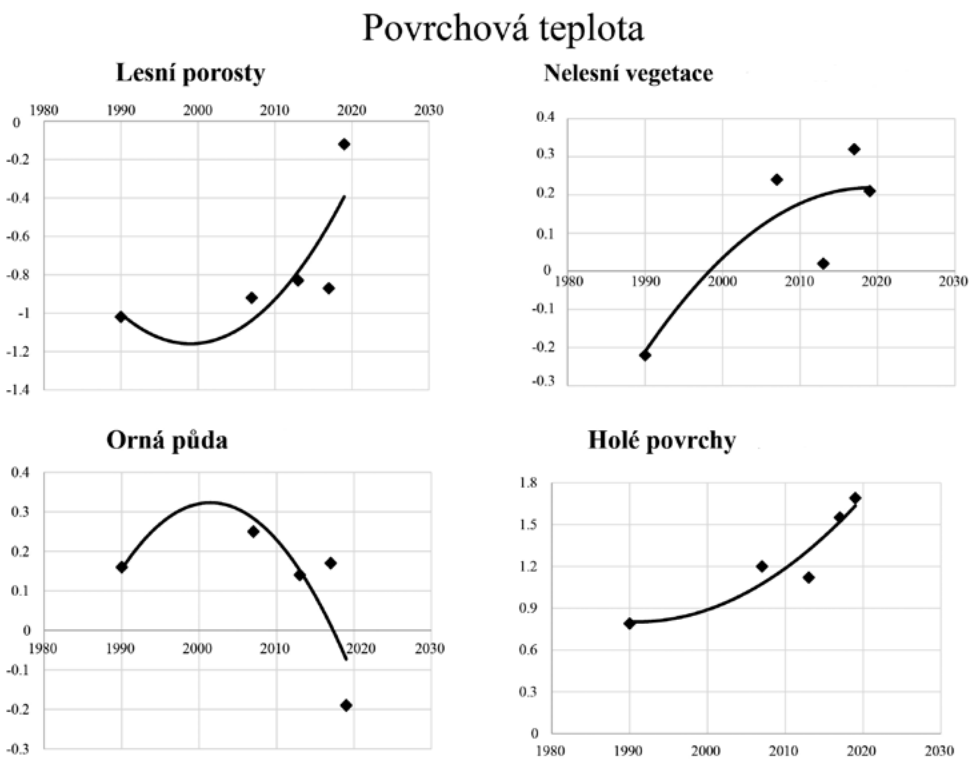
kde $T_s$ je povrchová teplota vypočtená z termálních dat Landsat a $T_{ar}$ rastrová (modelová) hodnota teploty vzduchu vypočtená na základě předpokladu adiabatické změny teploty vzduchu pro nadmořskou výšku stanice Kostelní Myslová 569 m.n.m. (viz vstupní data do modulu SEBCS). Negativní (pozitivní) hodnoty dT znamenají dobrou (zhoršenou) chladící schopnost lesních porostů.

### 9.3.2.2. Výsledky a diskuse

Studie je zaměřena na změnu poměru mezi uvolňovaným zjevným teplem a sluneční energií vázanou do vodní páry (latentní teplo výparu). Snížená evapotranspirace porostů se projeví zvýšenou teplotou porostů ve srovnání s ostatním krajinným pokryvem ve studované oblasti. Náhlý nárůst teploty lesních porostů vůči okolní krajině odpovídá ve vybraných termínech téměř třicetileté řady rychlému úhynu smrkových porostů, způsobeném gradací lýkožrouta, která proběhla v letech 2017, dosud trvá a byla pravděpodobně podpořena srážkovým deficitem od roku 2015. Na základě leteckých snímků (2020) lze odhadnout, že v modelovém území bylo v letech 2017 - 2020 vytěženo až 50 % lesních, převážně smrkových porostů, tj. více než 4 000 ha (z cca 8 800 ha v roce 1990). Zhoršování stavu lesních porostů se projevilo kontinuálním snižování latentního tepla výparu, růstem zjevného tepla i povrchové teploty, zejména v roce 2019. Takové výrazné změny ve sledovaných parametrech nebyly zaznamenány u žádného ze sledovaných typů krajinného pokryvu (obr. 9. 11 a, b, c).

Poměrně jednoduché, avšak dostatečně vypovídající hodnocení chladící schopnosti lesních porostů je založeno na rozdílu povrchové teploty porostu a teploty vzduchu (obr. 9.12). Tento indikátor vypovídá o schopnosti porostu transpirovat a tím se ochlazovat. V případě dostatku vody v porostu a jeho dobrého ekofyziologického stavu je povrchová teplota o 1 – 2 °C nižší, než je teplota vzduchu (rok 1990), v případě nedostatku vody se tento rozdíl zvyšuje (povrchová teplota je vyšší, než teplota vzduchu), jako např. ve velmi suchém roce 2017 (4 °C). Zhoršování chladící schopnosti porostů se v roce 2019 projevilo především ve východní, jižní a střední části zájmového území, kde zároveň došlo k rozsáhlé těžbě. V extrémních případech rozdíl teplot na holinách dosahuje více než 10 °C.

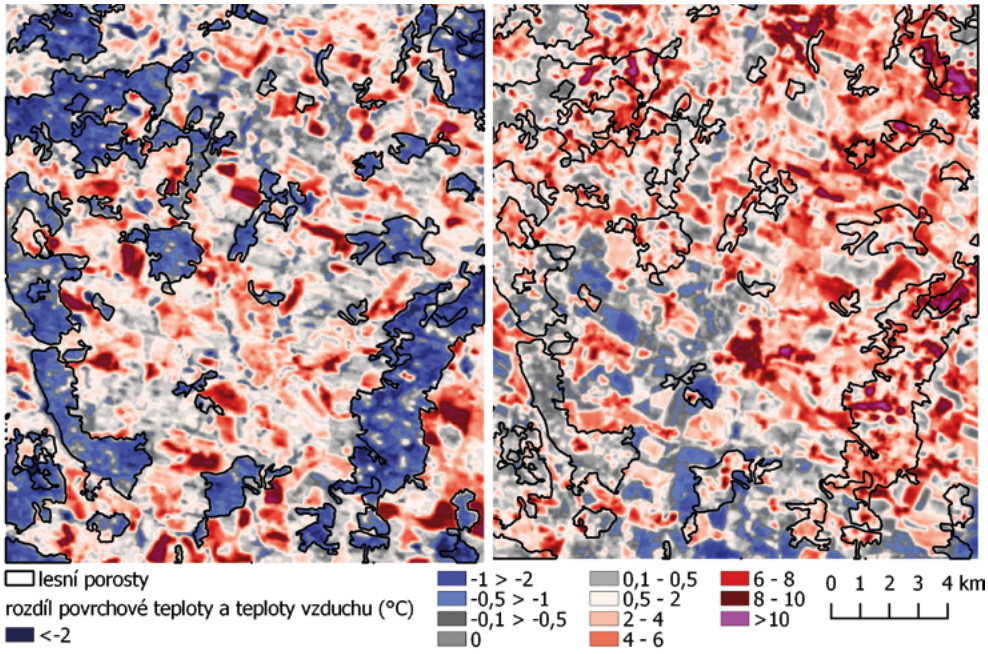

Latentní teplo výparu
Lesní porosty
Nelesní vegetace
Orná půda
Holé povrchy
Zjevné teplo
Lesní porosty
Nelesní vegetace
Orná půda
Holé povrchy
standardizované hodnoty
rok




**Obr. 9.11** Průměrné standardizované hodnoty a) latentního tepla výparu, b) zjevného tepla a c) povrchové teploty u čtyř hodnocených typů krajinného pokryvu.
(Upraveno dle Hesslerová et al. 2022)

Předpokládáme, že zhoršení chladící schopnosti lesů a zhoršení jejich zdravotního stavu může být následkem přehřívání okolní zemědělské krajiny. Okolní krajina se postupně ohřívá, klesá výpar luk a pastvin a stoupá jejich teplota a roste zjevné teplo. Stejný trend kontinuálního růstu zjevného tepla a povrchové tepoty se projevuje u holých povrchů, což je nejen zástavba, ale i zemědělská půda bez plodin. U orné půdy nebyl výraznější trend změny teploty zjevného tepla a latentního tepla prokázán, neboť tyto toky jsou ovlivněny typem plodin, které jsou v daný termín na sledovaném území pěstovány. V případě, že plodiny mají dostatek vody, dokáží se krátkodobě transpirací ochlazovat. Tato skutečnost je patrná z termínu 2019 (obr. 9. 12). Kromě zadržení vody v krajině je doplňkovým řešením pro její ochlazování kontinuální vegetační pokryv, např. pěstování meziplodin. Po sklizni je zemědělská půda holá, což přispívá k přehřívání kraji-

ny v období červenec – srpen. Zelená vegetace by dokázala ochladit okolní krajinu alespoň o 2–4 °C. Princip kontinuálního pokryvu půdy by měl být aplikován i v rámci lesních porostů, u kterých by měl být eliminován systém holosečného hospodaření. Teplota na pasekách bez vegetačního pokryvu dosahuje v horkých letních dnech 40–50 °C (obr. 9. 9). Na těchto plochách jsou vysoké denní teplotní amplitudy. V případě nové výsadby jsou semenáčky vystaveny teplotám, kterým nejsou schopny čelit a usychají. Pionýrská vegetace na odlesněných plochách dokáže vytvořit příznivější klima pro novou výsadbu, udržet nižší povrchovou teplotu i vlhkost. Vzrostlý les o několika patrech vegetace komunikuje s atmosférou hlavně korunami stromů. V takovém porostu je inverzní teplota, tzn. nižší teplota v podrostu než v korunách stromů. Vzduch, a tedy i vlhkost, se udržují v porostu, protože chladnější vzduch je těžší a nestoupá vzhůru (Makarieva & Gorshkov 2007). Přestože je teplota na pasekách s travním porostem v porovnání s teplotou holin nižší o několik stupňů, tato vegetace svojí funkcí nedokáže nahradit klimatizační funkci vzrostlého lesa.




**Obr. 9.12** Příklad rozdílu teploty povrchu a teploty vzduchu v modelovém území v roce 1990 a 2019. Výrazná změna chladící schopnosti lesních porostů je patrná především ve východní části území. (Upraveno dle Hesslerová et al. 2022)

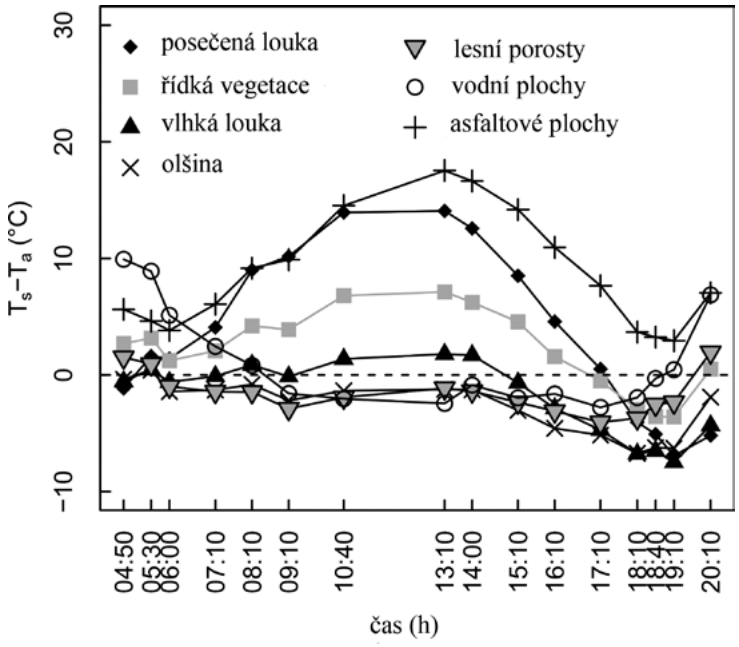
Drobné lesní celky s rozlohou desítek hektarů nemohou udržet vlastní klima ve vysychající krajině. Jsou náchylné na působení abiotických i biotických činitelů, jejichž následkem se, v porovnání s nelesní vegetací či plodinami, výrazně mění jejich energetická bilance a tím i klimatizační funkce. Lesy vysychají následkem přehřáté a vysušené okolní zemědělské krajiny. Náprava je možná kombinací opatření zahrnující a) novou strategii hospodaření ovlivňující především druhovou, věkovou a prostorovou strukturu porostů a b) systémová opatření na zadržení vody v zemědělské krajině mimo les s cílem postupného snižování její povrchové teploty (Vyskot et al. 2018).

### 9.3.3. Případová studie 3 – Denní dynamika různých typů krajinného pokryvu

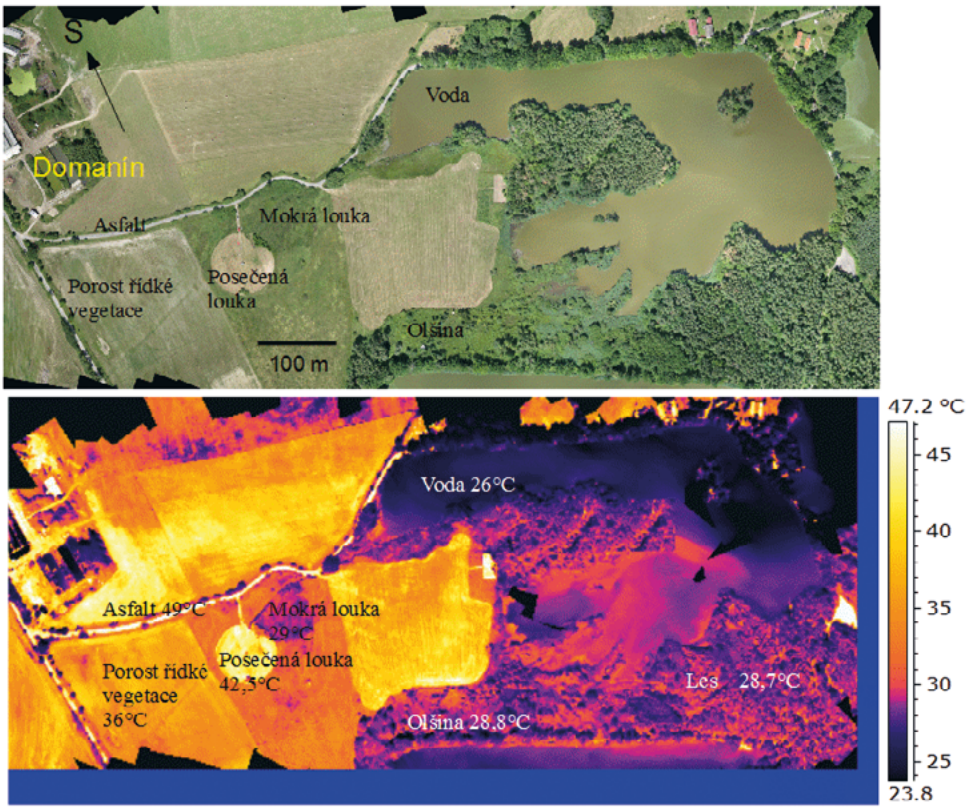
Poslední případová studie je založena na zpracování termálních dat pořízených pomocí řiditelné vzducholodi (Hesslerová et al. 2013). Jejím cílem bylo sledování denní dynamiky povrchové teploty různých typů krajinného pokryvu a denního chodu teploty vzduchu na meteorologických stanicích umístěných na sledovaných lokalitách. Zatímco družicová data snímkují v pevně daném časovém módu, systémy UAV, mezi něž vzducholoď náleží, umožňují operativní snímkování i několikrát denně.

Bylo vybráno sedm typů krajinného pokryvu (asfalt, voda, mokrá louka, posečená louka, olšina, pole s řídkou vegetací, les) v modelové lokalitě Domanín u Třeboně (9. 7. 2009). V šestnácti termínech (od 4:30 do 20:10) byla pomocí řiditelné vzducholodi zaznamenávána povrchová teplota ($T_s$) podél neměnné trajektorie. Na sledovaných lokalitách byly současně umístěny meteorologické stanice pro měření teploty vzduchu ($T_a$). Jednotlivé lokality se výrazně lišily hodnotami $T_s$, její amplitudou i rozdíly $T_s - T_a$. V odpoledních hodinách dosáhl rozdíl povrchových teplot mezi různými typy pokryvu téměř 20 °C (obr. 9.13). Plochy s nefunkční nebo žádnou vegetací do značné míry připomínaly asfaltový povrch, zatímco lokality pokryté hustou, nebo stromovou vegetací vykazovaly relativně vyrovnanou denní teplotní dynamiku s nízkými teplotními extrémy a pomalým nárůstem teploty ráno nebo odpoledne. Lesní porosty, vrbina, mokrá louka za horkého letního dne vykazovaly povrchovou teplotu o 1–3 °C nižší, než je teplota vzduchu (v poledních hodinách), v odpoledních hodinách tento rozdíl může

nabývat i 6 °C. V případě holých povrchů či suché vegetace (posečená louka), je povrchová teplota v době maximálního příkonu slunečního záření o 10–20 °C vyšší, než teplota vzduchu. Ukázali jsme, že obsah vody ve vegetaci je důležitým faktorem vyrovnávání teplot a zdůrazňujeme důležitost $T_s$ jako měřitelného indikátoru fungování ekosystémů a krajiny.




**Obr. 9.13** Rozdíl teploty povrchu Ts měřené termovizní kamerou na řiditelné vzducholodi a teploty vzduchu Ta měřené meteorologickými stanicemi v okolí Domanína u Třeboně (9. 7. 2010). (Upraveno dle Hesslerová et al. 2013)




**Obr. 9.14** Termovizní snímek pořízený ze vzducholodě v okolí obce Domanín u Třeboně (9. července 2009 ve 14:00) 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. (upraveno dle Hesslerová et al. 2013, Ellison et al. 2017, 2024)

## Literatura

Brom, J., Pivovarník, M. Hesslerová, P., Nedbal, V., Jirka, V. Vinciková, H., Procházka, J., Lechner, P. (2014). Termální data. In: Zemek, F. a kol (Eds.). Letecký dálkový průzkum země teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i, 155 s.

Brom, J. (2014). Module for spatial computing of surface energy balance and crop water stress "SEBCS 0.1". University of South Bohemia in České Budějovice. + manuál. dostupné z http://www.jbrom.smoothcollie.eu/?page_id=147

Břehovský, M., Jedlička, K.: *Úvod do geografických informačních systémů – přednáškové texty* [online]. [cit. 16. 9. 2021]. Dostupné z: http://gis.zcu.cz/studium/ugi/e-skripta/ugi.pdf

Cooper J.A. (1975). Photosynthesis and Productivity in Different Environments. Cambridge University Press, 715 s.

Dobrovolný, P. (1998). Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzita v Brně, 210 s.

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

Ellison, D., Pokorný, J., Wild, M. (2024). Even cooler insights: On the power of forests to (water the Earth and) cool the planet Glob Change Biol. 2024;30:e17195.https://doi.org/10.1111/gcb.17195

Halounová, L., Pavelka, K. (2008): Dálkový průzkum Země. ČVUT Praha.

Hakrová, P., Křováková, K., Novotná, K., Vinciková, H., Procházka, J. (2015). Biomass production of selected grassland, wetland and cropland vegetation communities. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(4), s. 1015-1033.

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, s. 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, s. 145– 154.

Hesslerová, P., Huryna, H., Pokorný, J., Procházka, J. (2018). The effect of forest disturbance on landscape temperature. *Ecological Engineering,* 120, s. 345 - 354.

Horák, J. (2014). Dálkový průzkum Země. VŠB-TU Ostrava.

Jensen, J.R. (2015). Introductory Digital Image Processing. Pearson Education, 544 s.

Jiménez-Muñoz, J.C, Sobrino, J.A., Skokovi´c, D., Mattar, C., Cristóbal J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840 – 1843.

Jones, H.G., Vaughan, R.A. (2010). Remote Sensing of Vegetation. Oxford University Press. 353 s.

Kalma J.D., McVicar T.R., McCabe M.F. (2008). Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29, s. 421-469.

Kolář, J. (2003). Geografické informační systémy 10. Vydavatelství ČVUT Praha, 150 s.

Li, Z.L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., Zhang, X. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9, s. 3801-3853.

Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman J. (2014). Remote sensing and image interpretation. Wiley, 756 s.

Makarieva, A.M., Gorshkov, V. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, s. 1013–1033.

McKnight, W.S., Hess, D. (2007). Physical geography: a landscape appreciation. 9th ed., Upper Saddle River, New Jersey, 720 s.

Pavelka, K. (1999). Zpracování obrazových záznamů DPZ. Skripta ČVUT Praha, 138 s.

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, s. 26 – 37.

Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90, s. 434–440.

Vyskot., I., Pokorný, J., Kozumplíková, A., Hesslerová, P., Huryna, H. (2018). Posouzení stavu a funkcí lesů na vybraném lesním majetku v měnících se ekosystémových podmínkách. Výzkumná zpráva pro MŽP. ÚEPZ FRRMS MENDELU a ENKI,o.p.s., 249 s.

Wise, S. (2014). GIS fundamentals. 2nd edition. Boca Raton : CRC Press, 322 s.

# 10. Slunce, voda, rostliny, klima – a vzdělávání

## 10.1. Proč učit o úloze vegetace ve škole

Z předchozích kapitol pozorný čtenář jistě pochopil, že vegetace hraje pro udržení dostatečného zásobení krajiny vodou důležitou roli. Její význam pro snižování lokálních teplot a teplotních extrémů i zásobení krajiny vodou díky krátkému cyklu vody je zcela zásadní.

I přesto je však všeobecné povědomí veřejnosti o významu vegetace pro člověka v souvislosti s těmito procesy v krajině velmi slabé. Souvisí to s všeobecně a mezinárodně rozšířeným fenoménem přehlížení rostlin a jejich významu v životním prostředí člověka, nazývaného v angličtině termínem „plant blindness" (tedy v doslovném překladu „slepota vůči rostlinám"). Fenomén „plant blindness" charakterizuje ignoranci člověka vůči rostlinám, které si zvykl přehlížet a vnímá je jen jako jakousi přirozenou kulisu a součást svého okolí. Termín zavedli již na konci devadesátých let minulého století Wandersee a Schussler (Wandersee & Schussler 1999), od té doby se však v mezinárodní botanické i pedagogické literatuře objevuje neustále (Allen 2003, Uno 2009, review viz Amprazis & Papadopoulou 2020). Přirozeným následkem lidské ignorance vůči rostlinám je podle Uno (2009) jistá „rostlinná negramotnost" (doslovný překlad anglického termínu „plant illiteracy", vyjadřující všeobecnou neznalost jak rostlinných druhů, tak i fyziologických procesů v rostlinném těle), která ovšem může mít pro lidstvo dalekosáhlé důsledky i do budoucna. Pokud člověk o rostliny a jejich životní projevy nejeví zájem, nesnaží se ani pochopit principy a zákonitosti, na jejichž základě rostliny v našem životním prostředí působí a významně je ovlivňují. Neznalost botanických principů, fyziologických procesů a především rostlinných interakcí s okolím, pak vede k nekompetentním zásahům do vegetačního krytu v krajině, jako je např. rozsáhlé odlesňování. Jejich důsledkem je nárůst lokálních teplot, postupné vysychání krajiny, střídající se periody sucha a přívalových dešťů apod. Amprazis & Papadopoulou (2020) proto označují problém lidské ignorance rostlin za zásadní překážku pro trvale udržitelný rozvoj společnosti.

S problémem přehlížení rostlin a nezájmu o jejich roli v životním prostředí člověka a s tím související nízkou úrovní znalostí bojují ekologové, botanici i pedagogové napříč kontinenty (Amprazis & Papadopoulou 2020, Çil &Yanmaz 2017).

Nižší zájem o rostliny lze pozorovat už na základních školách. Botanická témata jsou podle mezinárodních výzkumů pro žáky méně atraktivní než zoologická, živočichové jsou pro ně atraktivnější než rostliny (Ryplová 2017, Fančovičová & Kubiatko 2015, Balas & Momsen 2014, Patrick & Tunnicliffe 2011). Botanika bývá označována za obtížnou a nudnou (Behar & Polat 2007, Prokop et al. 2007). Výsledky mezinárodních studií uvádějí příčin hned několik. Například Hemingway et al. (2011), spatřují důvody negativního postoje žáků k botanickým tématům v přístupu samotných učitelů, kteří mají často bližší vztah k živočichům než k rostlinám. Podle Lombarda (2015) samotní pedagogové mají často také hlubší znalosti o živočišných organismech než o rostlinných a využívají je proto ve výuce častěji. Žáci se tak ve vyučování častěji setkávají s tématikou zoologickou než botanickou. Zoologická témata oproti botanickým upřednostňují také vysokoškolští studenti učitelství (Çil &Yanmaz 2017). V botanické výuce často převažuje náročná terminologie a memorování, vedoucí k nepochopení, miskoncepcím, a často i frustraci z náročnosti tématu (Behar & Polat, 2007). Botanická témata pak bývají žáky vnímána jako nezajímavá a odtržená od života (da Silva et al. 2016).

V českém prostředí se přístupem žáků základních škol a víceletých gymnázií ve věku 13–16 let k rostlinám a botanickým tématům ve výuce zabývala studie Ryplové (2017). Výzkum provedený mezi 426 respondenty prokázal, že žáci vnímají rostliny v životním prostředí člověka jako středně významné, při hodnocení na pětistupňové škále (stupeň 1 = zcela nevýznamné, stupeň 5 = vysoce významné), bylo dosaženo průměrného skóru 3,7. Zároveň v této studii ohodnotili žáci botaniku jako pro ně průměrně atraktivní, průměrný skór 2,8 (stupeň 1 = zcela neatraktivní, stupeň 5 = vysoce atraktivní). Význam rostlin pro člověka žáci spatřovali téměř výlučně v produkci kyslíku při fotosyntéze.

Rámcový vzdělávací program předepisuje pro základní vzdělávání žákům z botanických témat znalost především anatomie a morfologie rostlin a v oblasti systematiky znalost jednotlivých základních druhů. Tato témata jsou ale spíše popisná, vyžadující pamětní učení a pochopení mnoha odborných termínů.

Rostliny jsou pak vnímány žáky jako statické, těžko pochopitelné organismy, bez zřetelných životních projevů. Naopak témata fyziologická, vysvětlující vlastní životní děje a vliv rostlin na životní prostředí člověka chybí. Jediným fyziologickým tématem botaniky je podle RVP – ZV fotosyntéza. Pedagogové napříč kontinenty se však shodují na tom, že právě fotosyntéza je jedním z nejnáročnějších témat ve výuce přírodopisu. Téma tranpirace bohužel součástí RVP – ZV není, a to i přesto, že její pochopení je klíčové pro porozumění koloběhu vody na Zemi, což je jedním z očekávaných výstupů RVP. Navíc s transpirací spojeným klimatizačním efektem vegetace se žáci běžně setkávají ve svém bezprostředním okolí.

## 10.2. Současná úroveň znalostí

S klimatizační rolí vegetace, založené na transpiraci, se žáci setkávají ve svém každodenním životě. Je proto důležité, aby těmto zákonitostem rozuměli. Každý ví, že v horkém letním dnu je ve stínu stromů vzrostlého lesa či městského parku chladněji než na rozpálené dlažbě náměstí či betonovém parkovišti supermarketu. Rozumíme však skutečně fyziologickým principům těchto procesů a jejich významu pro zachování vody v krajině? Jak ukázaly výsledky našich průzkumů provedených na základních školách i mezi začínajícími studenty učitelství přírodopisu v prvním ročníku pedagogické fakulty, úroveň znalostí a celkové porozumění tomuto tématu jsou poměrně nízké.

V rámci přípravy vzdělávacích metodik k tématu role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu vody v krajině proběhl rozsáhlý výzkum zjišťující současnou úroveň znalostí žáků devátých ročníků základních škol a odpovídajících ročníků víceletých gymnázií. Výzkumu se zúčastnilo celkem 641 respondentů. Další sonda znalostí byla provedena mezi začínajícími studenty učitelství přírodopisu na Pedagogické fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, a to ihned po jejich nástupu do prvního ročníku (Ryplová & Pokorný 2019). Sonda tedy do jisté míry mapuje znalosti na konci jejich středoškolského studia. Tento výzkum byl proveden mezi sto respondenty.

Obě sondy probíhaly formou dotazníkových šetření znalostí. Respondenti odpovídali na otázky zaměřené na několik oblastí: a) distribuci sluneční energie v krajině, b) vodní režim rostlin, c) přeměny energií v souvislosti s výparem a kondenzací.

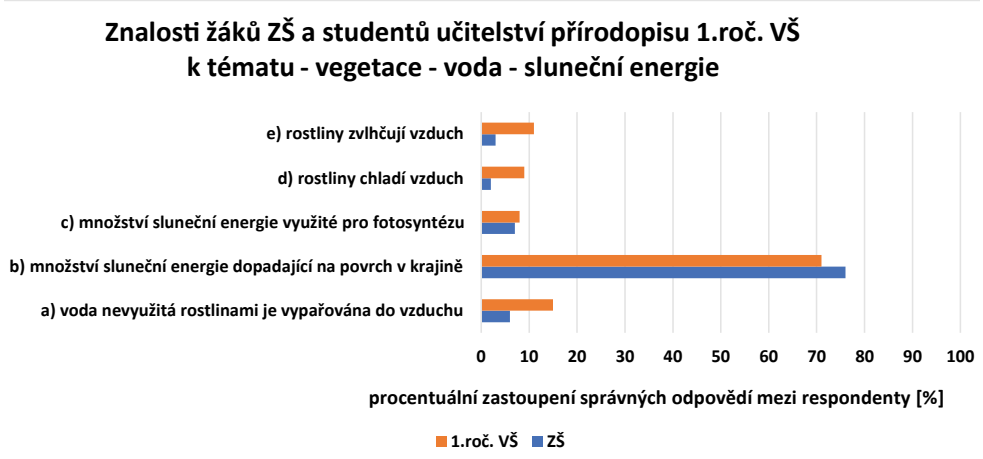
Z výsledků obou šetření vyplývá, že znalosti žáků devátých ročníků ZŠ i začínajících studentů učitelství přírodopisu o roli vegetace v koloběhu vody a distribuci sluneční energie v krajině jsou velmi limitované. Respondenti obou skupin si např. uvědomovali, že na dlážděném náměstí je v horkém letním dnu mnohem tepleji než ve stínu stromů v parku. Tento jev však neuměli správně vysvětlit. Jako hlavní důvod příjemnější teploty ve stínu stromu v parku uváděli spotřebu sluneční energie fotosyntézou nebo pohlcení sluneční energie korunou stromu. Správný důvod, spotřebu sluneční energie pro výpar a s tím souvisejí ochlazení okolního vzduchu uvedlo pouze 9 % začínajících studentů učitelství. V případě žáků základních škol bylo množství správných odpovědí ještě nižší, jednalo se o necelá tři procenta.

Nízké znalosti byly prokázány u obou skupin respondentů také v oblasti vodního režimu rostlin. Vysokoškoláci vodu považují za důležitou pro růst rostlin, fotosyntézu, rozvod živin a rozmnožování. Termoregulační funkce vody v rostlinném těla byla však známa pouhým 3 % respondentů. Srovnatelných výsledků dosahovali i žáci základních škol, z nichž termoregulační funkci vody znala také jen 3 % respondentů. Řada začínajících vysokoškolských studentů navíc zaměňovala transpiraci s respirací. Velmi zarážející je také zjištění, že nejen většina žáků devátých ročníků ZŠ, ale také i většina začínajících studentů učitelství přírodopisu se domnívala, že z rostlinného těla žádná voda neodchází, nýbrž je buď beze zbytku spotřebována nebo uložena ve vakuole. Výpar (transpiraci) tedy respondenti vůbec neuvažovali. Nedostatečné znalosti transpirace byly zjištěny již i předcházející studií Ryplové a Bezpalcové (2015) mezi žáky druhých ročníků středních škol. Nejedná se však pouze o znalosti českých žáků a studentů, na podobné problémy poukazují také zahraniční studie (Vitharana 2015, Barker 1998).

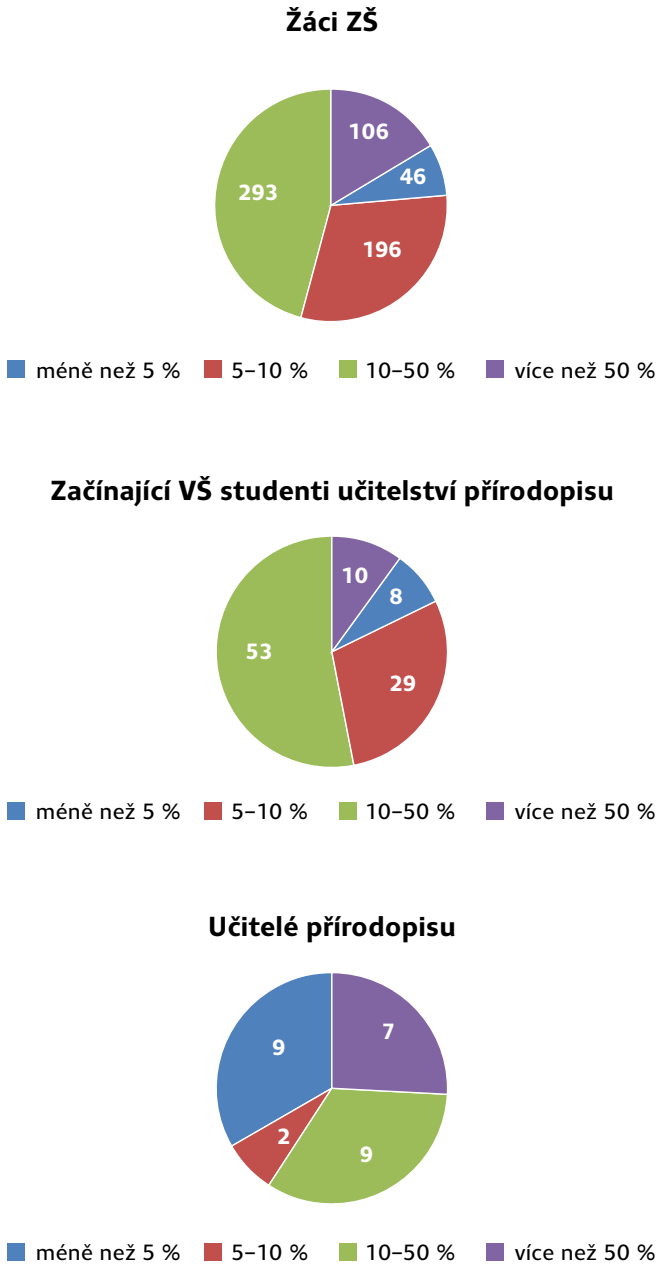
Studenti učitelství i žáci ZŠ mají správnou představu o množství slunečního záření dopadajícího na povrch krajiny (obr. 10.1). Naopak velmi mylné představy mají o následné distribuci této energie v krajině. Zcela převládá názor, že většina sluneční energie dopadající na povrch vegetace je spotřebována pro fotosyntézu. Na otázku „Odhadněte, jaké procento z dopadající sluneční energie využijí rostliny pro fotosyntézu“, dokázalo správně odpovědět pouze 8 % začínajících studentů učitelství přírodopisu a 7 % žáků devátých ročníků ZŠ. Jednalo se o otázku, kde respondenti měli možnost výběru z několika možných variant, správná odpověď byla „méně než 5 %“. Naprostá většina respondentů z obou skupin se však do-

mnívala, že rostliny pro fotosyntézu využívají 10–50 % dopadající sluneční energie. Pro zajímavost byla stejná otázka předložena také 27 učitelům přírodopisu pro ZŠ. Ukázalo se, že ani učitelé z praxe nemají mnohdy správnou představu o relativním množství sluneční energie využitém rostlinami pro fotosyntézu. Správně dokázala odpovědět pouhá třetina z nich, další třetina se shodně jako jejich žáci domnívala, že rostliny pro fotosyntézu spotřebují 10–50 % sluneční energie (obr.10.2).

Respondenti v obou studiích si také neuvědomovali mnohostranný význam vegetace pro naši atmosféru. V souladu s naší předchozí studií (Ryplová 2017) většina respondentů spatřovala význam vegetace pouze v produkci kyslíku. Klimatizační role vegetace, jejíž význam je obzvláště v době globální změny klimatu velký, však bohužel nebyla většině respondentů známa vůbec. Pouze 9 % respondentů z řad vysokoškoláků a 3 % respondentů z řad žáků ZŠ uvedlo, že rostliny chladí, význam vegetace pro zvlhčování vzduchu zmínilo 11 % VŠ studentů a 2 % žáků ZŠ (obr.10.1).




**Obr. 10.1** Závěry výzkumných studií zaměřených na znalosti role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu vody v krajině. Porovnání znalostí začínajících studentů učitelství přírodopisu na PF JU v Českých Budějovicích (N=100) a žáků devátých ročníků ZŠ a odpovídajících ročníků víceletých gymnázií (N= 641).




**Obr. 10.2** Znalost množství energie spotřebované pro fotosyntézu. Analýza odpovědí na otázku: „Odhadněte, jaké procento z dopadající sluneční energie využijí rostliny pro fotosyntézu" (výběr z odpovědí). Porovnání odpovědí mezi žáky základních škol, začínajícími studenty učitelství přírodopisu a učiteli přírodopisu z praxe.

Závěry výzkumu znalostí k tématu role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu vody v krajině tedy naznačují všeobecnou neznalost těchto principů. Pro zachování dostatečného množství vody v krajině do budoucna je však důležité, aby výše zmíněné procesy vstoupily do povědomí široké veřejnosti, především však mladé generace. Společnost do budoucna potřebuje mladé zemědělce, lesníky, krajinné architekty, urbanisty ale i ekonomy a energetiky, kteří mají základní povědomí o fyziologické funkci vegetace v koloběhu vody a distribuci sluneční energie v krajině, a dokáží proto v krajině správně hospodařit tak, aby se z ní neztrácela voda a nedocházelo k dalšímu nárůstu lokálních teplot.

K tomu je potřeba zvýšit zájem mladé generace o botanická témata ve výuce a výuku inovovat za využití moderních didaktických přístupů. Předpokladem zvýšení všeobecného povědomí o klimatizační roli vegetace související s krátkým koloběhem vody, a tudíž udržením dostatečné zásoby vody v krajině, je implementace tohoto tématu do výuky již na základních a středních školách, společně s efektivní přípravou budoucích pedagogů, která zajistí dostatečnou informovanost nastupující generace učitelů přírodovědných disciplín.

Problematika vztahů mezi vegetací, solární energií a vodou v krajině v Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia (RVP – G) i v Rámcovém vzdělávacím programu pro základní vzdělávání (RVP – ZV) svým obsahem náleží do průřezového tématu Environmentální výchova. K pochopení jsou potřeba znalosti rostlinné fyziologie (vodní režim rostlin, transpirace), termodynamiky (energie, skupenské teplo, vypařování a kapalnění), k hlubšímu pochopení na gymnáziu i chemie (Avogadrův zákon) a biogeografie a klimatologie (Slunce, Země, atmosféra). V RVP – G v rámci průřezového tématu Environmentální výchova spadá tato problematika jak do tematického okruhu Člověk a životní prostředí, tak i do tematického okruhu Problematika vztahů organismů a prostředí (tok energie a látek v biosféře a v ekosystému). (RVP pro gymnázia, MŠMT, 2007)

Také v RVP – ZV naplňuje zmiňované téma podstatu průřezového tématu Environ-mentální výchova a to zejména ve vzdělávacích oblastech Člověk a příroda, *„…pochopení objektivní platnosti základních přírodních zákonitostí, dynamických souvislostí od nejméně složitých ekosystémů až po biosféru jako celek, …“*, Člověk a svět práce *„…Učí pozorovat, citlivě vnímat a hodnotit důsledky jednání lidí…“* a Člověk a společnost *“… souvislosti mezi ekologickými, technickoekonomickými a sociálními jevy s důrazem na význam preventivní obezřetnosti v jednání a další principy udržitelnosti rozvoje“* (RVP pro základní vzdělávání, MŠMT,

2017, s.135–136). V rámci průřezového tématu Environmentální výchova spadá dané téma do tematických okruhů Ekosystémy, Základní podmínky života (voda, energie) (Ryplová & Pokorný, 2019).

## Literatura


Allen W. (2003). Plant Blindness, *BioScience*, 53(10). [online]. [cit. 3. 2. 2020]. Dostupné z: https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0926:PB]2.0.CO;2

Amprazis, A. & Papadopoulou, P. (2020). Plant blindness: a faddish research interest or a substantive impediment to achieve sustainable development goals? *Environmental Education Research,* DOI: 10.1080/13504622.2020.1768225

Balas, B., Momsen, J. (2014). Attention "Blinks" Differently for Plants and Animals. *CBE-Life Science Education*, 13, 437 – 443.

Barker, M. (1998). Understanding transpiration – more than meets the eye. *Journal of Biological Education* 1, 17 – 20. [online]. [cit. 17. 1. 2020]. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/00219266.1998.9655631

Behar, M & Polat, P. (2007). The science topics perceived difficult by pupils of pri-mary 6-8 classes. Diagnosing the problems and remedy solutions. *Educational Sciences: Theory and Practice*. 7(3), 1113-1130.

Çil, E., Yanmaz, D. (2017). Determination of pre-service teachres' awareness of plants. *International Electronic Journal of Environmental Education*, 7(2), 84 – 93.

da Silva, J.R.S., Guimarães, F., Sano, P. T. (2016). Teaching of Botany in higher education: representations and discussions of undergraduate students. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* 15(3), 380 – 393.

Fančovičová, J. & Kubiatko, M. (2015). Záujem žiakov nižšieho sekundárneho vzdelávania o biologické vedy. *Scientia in educatione* 6(1), 2–13. https://ojs.cuni.cz/scied/article/view/151/144

Hemingway C., Dahl W., Haufler C., Stuessy C. (2011). Bulding Botanical Literacy. *Science* (6024) s. 1535-1536, DOI: 10.1126/science.1196979

Lombard D. (2015). Natural Science teacher attitudes and pedagogical content knowledge for teaching botany. Ph.D. thesis, University of Pretoria, 134 s.

Patrick P., Tunnicliffe S.D. (2011). What plants and animals do early childhood and primary students' name? Where do they see them? *Journal of Science Education Technology* **20**, 630 –642.

Prokop, P., Prokop, M., Tunnicliffe, S.D. (2007). Is biology boring? Student atti-tudes towards biology. *Journal of biological education* 42 (1), 36–39.

RVP pro gymnázia. MŠMT (2007). [online]. [cit. 20. 12. 2019]. Dostupné z: http://www.nuv.cz/file/159

RVP pro základní vzdělávání. MŠMT (2017). [online]. [cit. 20. 12. 2019]. Dostupné z: http://www.msmt.cz/file/43792/

Ryplová, R. & Bezpalcová, E. (2016). An impact of guided inquiry on students un-derstanding of plant water metabolism – a case study. 9th annual International Conference of Education, Research and Innovation, (ICERI), 14-16 November, 2016, Seville, Spain, 7533 – 7538, doi: 10.21125/iceri.2016.0717

Ryplová, R. (2017). Inquiry education in botany – a way to cope with plant blindness? In M. Rusek, Vojíř K. (Eds.). Project-based Education in Science Education: Empirical texts XV, Charles University in Prague, Faculty of Education, 120–128. [online]. [cit. 14. 2. 2019]. Dostupné z: http://pages.pedf.cuni.cz/pvch/fi-les/2018/05/PBE_2018_final.pdf

Ryplová, R. & Pokorný, J. (2019). Opomíjená úloha vegetace v distribuci sluneční energie a utváření klimatu – sonda znalostí začínajících studentů učitelství přírodopisu. *Envigogika,* 14(1). https://doi.org/10.14712/18023061.586

Uno, G.E.(2009). Botanical literacy: What and how should students learn about plants? *American Journal of Botany* **96** (2009), 1753–1759.

Vitharana, P.R.K.A. (2015). Student misconceptions about plant transport – a Sri Lankan Example. European Journal of Science and Mathematics Education 3(3), 275 – 288.

Wandersee, J.H., Schussler E. E. (1999). Preventing plant blindness. *American Biology Teacher* 61, 84–86

# 11. Doporučené formy a metody výuky

Pro implementaci problematiky role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu vody v krajině do vzdělávání byla vytvořena autory této knihy vzdělávací metodika ve třech variantách, a to: Metodika výuky pro VŠ studenty učitelství přírodopisu pro ZŠ a učitele z praxe, Metodika výuky pro žáky 9. ročníků ZŠ a víceletých gymnázií a Nová metodika vzdělávání pracovníků MěÚ na téma Sluneční energie – voda v krajině – vegetace k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima. Všechny metodiky, tato kniha i další doprovodné materiály jsou k dispozici ke stažení zdarma zde: https://projekty.pf.jcu.cz/svv/. Pro tvorbu metodik byly použity moderní didaktické přístupy, které v následující kapitole stručně popisujeme spolu s důvody, které nás k jejich využití vedly. Zároveň jsou v této kapitole prezentovány i ověřené výukové aktivity, které jsou ve výše uvedených metodikách detailně rozpracovány včetně pracovních listů pro žáky a studenty.

Problematika klimatizační role vegetace spojené s distribucí sluneční energie a koloběhem vody v krajině je interdisciplinární téma, odrážející reálné životní situace. O jejím efektu se mohou žáci snadno přesvědčit v těsném okolí školy v rámci terénního měření za pomoci moderních, digitálních a uživatelsky přívětivých měřících přístrojů. Implementací tohoto tématu do vzdělávání dojde proto k přiblížení botanické výuky reálnému světu. Tato výuka má také potenciál naplnit charakteristiky moderních didaktických metod, které se ve výuce přírodovědných disciplín aktuálně celosvětově využívají.

Jednou z cest ke zvýšení atraktivity botanických témat ve výuce je aplikace moderních výukových metod a přístupů, které se v posledních desetiletích ve světě využívají ke zvýšení atraktivity přírodovědného vzdělávání všeobecně. Žáci jsou aktivizování prostřednictvím metod aktivního učení (Sitná 2009, Freeman et al. 2014). Jedná se vesměs o metody a přístupy, v nichž je kladen velký důraz na aktivní zapojení žáků do vyučování (tzv. metody orientované na žáka, „student centered education“).

## 11.1. Badatelsky orientované vyučování

Vlajkovou lodí moderních výukových přístupů orientovaných tzv. „na žáka“ je v probíhajícím desetiletí badatelsky orientované vyučování, BOV (v anglickém originále Inquiry Based Education - IBE; v případě přírodních věd pak Inquiry Based Science Education - IBSE) (Papáček 2013, Dostál 2015).

### Historie BOV

Výuku s badatelskými prvky prosazovali již ve starověku věhlasní filozofové Sokrates a Konfucius (Spronken-Smith 2012). V 17. století proklamovali myšlenku aktivního učení potlačujícího prosté memorování faktů Komenský či Spinoza (Janík & Stuchlíková 2010). Prvky bádání můžeme nalézt ve spisech Deweyho, Vigotského či Piageta (Stuchlíková 2010), kteří kritizovali především neexistenci vědeckých postupů ve vyučování. Ve 20. letech minulého století tak můžeme spatřovat kořeny, ze kterých se postupně vyvinul edukační styl, který vykazuje prvky BOV. Do výuky bylo postupně s větší frekvencí implikováno pozorování, pokusnictví a verifikace žákovských domněnek (Škoda & Doulík 2009). Od poloviny 20. století tlak na aktivní přístup a badatelské prvky ve vyučování sílil především ve Spojených státech amerických (USA), kde postupně došlo k pevnému zakotvení aktivit založených na bádání do kurikulárních dokumentů (National Research Council 1996). Samotný pojem Inquiry Based Education (badatelsky orientované vyučování) vznikl v 90. letech minulého století na americkém kontinentu a šířil se dále především do států s vyspělým edukačním systémem, ve kterých je považován za jeden z moderních nosných trendů ve vyučování (Greene & Griffith 2003, Held 2011, Dostál 2015).

### Principy BOV

Aktivizační výuková metoda označovaná jako BOV obsahuje prvky konstruktivismu a vychází ze sokratovské metody, která je považována za prototyp objevné činnosti (Janík & Stuchlíková 2010). Hlavní výhodou BOV je především aktivní zapojení všech participujících (Rissing & Cogan 2009). V případě využití badatelské výuky si žáci osvojují nové poznatky či fixují již známé skutečnosti na základě činného zapojení do řešení vhodně zvoleného výzkumného problému, kdy se učitel přesouvá do role „pouhého“ facilitátora výuky (Nezvalová, 2010). Proces

metodologicky správně vedeného BOV se skládá z dílčích kroků, které zahrnují formulování výzkumného problému a hypotézy (domněnky), navržení designu výzkumných postupů, samotné bádání, diskuzi a konstrukci závěrů (Linn, Davis & Bell 2004, Bogner & Sitiriou 2014, Dostál 2015). Představuje tak ucelenou strategii výuky s aktivizačními prvky, která podporuje rozvoj kritického myšlení (Bybee 2004). V průběhu bádání žáci přejímají iniciativu při postupech typických pro skutečné vědce (Crommelin 2014). Badatelské činnosti mohou v případě vhodně zvolené problémové situace kladně ovlivňovat zvědavost a motivaci žáků (Warner & Myers 2008). V případě úspěšné aktivace vnitřního rozpoložení dětí pak vzrůstá i zájem žáků o samotné vyučování (Geier et al. 2008), což má pozitivní vliv na jejich výkonnost (Vácha & Ditrich 2015).

Mezi hlavní přínosy BOV řadíme rozvoj žákovských schopností objevovat, příležitost propojovat výuku se situacemi v běžném životě, pokles abstrakce ve výuce přírodovědných předmětů, osvojení vědecké práce, zvýšenou zábavnost výuky a pozitivní vliv na utváření nových vědomostí a postojů (Vácha & Petr 2013, Uito & Kärnä 2014). Za limity pro zavádění BOV do vyučování považujeme často slabou motivaci žáků v edukačním procesu, nízkou odbornou způsobilost pedagogů v oblasti vědeckých postupů, neochotu učitelů měnit zaběhnuté strategie či realizační možnosti výuky (čas, prostor, materiální zabezpečení, učební plány ...) (Blanchard, Southerland & Granger 2009, Stuchlíková 2010).

### Kategorie BOV

Proces BOV ve své práci dělí Eastwell (2009) do čtyř kategorií dle intenzity zapojení pedagoga do vyučování a z hlediska cílového elementu výuky (při výběru vhodné formy musí být zohledněn věk a schopnosti žáků). Nejnižší úroveň BOV představuje potvrzující bádání (confirmation inquiry), kdy je žákům dopředu známa výzkumná otázka, hypotéza, badatelský postup i výsledková část. Tento postup je využíván pro fixování již osvojených žákovských dovedností. V rámci strukturovaného bádání (structured inquiry) pedagog formuluje výzkumnou otázku a vysvětlí experimentální postupy. Na základě získaných dat studenti vyslovují závěry. Při nasměrovaném bádání učitel poskytuje žákům informace, které by je měly dovést k formulaci výzkumné otázky. Studenti navrhují design výzkumu a realizují jej. Nejvyšší kategorií BOV je otevřené bádání (open inquiry), které nabízí možnost skutečné vědecké práce. Studenti formulují výzkumné

otázky, promýšlejí pracovní postup experimentu, provádějí výzkum a závěrem odvozují výsledky. Tato situace je charakteristická pro vysokoškolské prostředí při řešení diplomových či disertačních prací.

Z hlediska limitních faktorů ve výuce je BOV dělena na jednoduché badatelské úlohy (simple inquiry tasks) a na autentické vědecké bádání (authentic scientific inquiry), které vyžaduje dostatek času, vhodné materiální a přístrojové vybavení, odbornou způsobilost pedagoga a znalost specializovaných postupů při vyhodnocování dat. Z tohoto důvodu je v prostředí základních a středních škol mnohem častěji využíváno bádání spadající do kategorie jednoduchých badatelských úloh (Chinn & Malhotra 2002).

## BOV v praxi

Výzkumné otázky ověřované prostřednictvím BOV mohou vhodně propojovat výuku přírodovědných předmětů s praktickým životem (Trumper, 2006). Právě přílišná abstrakce interdisciplinarity biologických disciplín s běžnými situacemi je často uváděna jako důvod pro stagnující zájem žáků o přírodovědné vzdělávání v prostředí základních (Prokop, Tuncer & Chudá 2007), ale i středních škol (Prokop, Prokop & Tunnicliffe 2007). Příkladem otázek propojujících badatelské výukové postupy s praxí, mohou být dotazy týkající se role rostlin v koloběhu sluneční energie a vody v krajině. Například: Proč je stín stromu chladnější než stín slunečníku? Proč je v horkém letním dnu v lese chladněji než na dlážděném náměstí? Jak to, že stromy výparem „nekradou" vodu z krajiny?). Zmíněné problémové otázky jsou zároveň velice aktuální, protože zmírnění dopadů klimatických změn a vysoušení krajiny je v současné době jedním z nejskloňovanějších témat na celé planetě.

Pro výuku uvedené problematiky je přínosné propojení BOV a prostředí školních zahrad či analogických venkovních výukových prostorů (Willams & Brown 2011, Vácha & Ditrich 2016). Školní zahrady jsou vnímány jako plochy, které podporují využití moderních výukových metod s ohledem na aktivní zapojení žáků (Cutter-Mackenzie 2008), umožňují implikovat mezipředmětové přesahy (Vácha 2015) a poskytují možnost zahrnovat do vyučování nejrůznější praktické dovednostní aktivity (Haferbeck 2009) (např. nácvik práce s přístroji – s měřičem příkonu slunečního záření, infračerveným teploměrem, termovizní kamerou ...). Prostory školních zahrad představují přírodní laboratoře (Williams

& Brown, 2011), které disponují obrovským množstvím experimentálního materiálu (Vácha & Petr, 2013). Výuka v zahradních areálech tak může vhodně propojovat např. znalosti fyzikálních jevů s biologií rostlin a klimatologickými aspekty, ale i mnohé další odborné oblasti.

**Struktura badatelské výukové jednotky**

Průběh badatelské výuky sleduje jednotlivé kroky. Carin, Bass, & Contant (2005) vytvořili tzv. 5 E model badatelské výuky, v němž písmena E značí anglické termíny jednotlivých kroků BOV: 1. Engagement (Motivace), 2. Exploration (Objevování, bádání), 3. Explanation (Vysvětlení, vyvozování závěrů), 4.Elaboration (Rozpracování) a 5. Evaluation (Vyhodnocení):

1. Motivace: V první, **motivační fázi** badatelské výuky je potřeba vzbudit zájem žáků o studovanou problematiku. K tomu lze využít problémových situací žákům známých z běžného života, situační výuku, videonahrávku, obrazové materiály apod. Z motivace vychází **problémová otázka**, na níž budou žáci v dalších částech výuky hledat odpověď.
2. Objevování, bádání: Během této fáze žáci samostatně **bádají, vyhledávají informace**, učitel poskytuje rámec, dodává zdroje informací (např. texty, internetové odkazy, obrázky, schémata apod.), navádí pomocí otázek. Díky studiu těchto pramenů žáci pod vedením učitele dospívají k **formulaci hypotézy,** kterou pak v dalším průběhu badatelské výuky **ověřují**. K ověření hypotézy využívají např. terénní či laboratorní experimenty, jejichž postupy konstruují a konzultují s učitelem.
3. Vysvětlení, vyvozování závěrů: V další fázi žáci ze zjištěných dat a výsledků vlastního bádání pak vyvozují závěry a diskutují je se svými spolužáky a s učitelem.
4. Rozpracování: V této fázi by žáci měli být schopni poznatky získané předchozím bádáním propojit se svou zkušeností z okolního světa a transformovat je do běžného života. Zde by se měl projevit tzv. „AHA – efekt“.
5. Vyhodnocení: Poslední fáze badatelské výuky umožňuje učiteli ověřit žákovské porozumění výukovému tématu.

## 11.2. Příklad badatelské výukové aktivity

Strukturu badatelské výukové jednotky lze demonstrovat na příkladu výukové aktivity na téma "Proč je stín stromu chladnější než stín slunečníku", která byla ověřena během tvorby výše uvedených vzdělávacích metodik (viz úloha č.1, Vzdělávací metodika pro ZŠ, Ryplová et al. 2021).

K **motivaci** v první fázi badatelské výuky byl využit termovizní snímek osoby ve stínu slunečníku v porovnání s termovizním snímkem osoby ve stínu stromu v parku během jasného letního dne. Motivace byla provázána se žákovskou zkušeností z běžného života. V horkém letním dnu se rádi ochladíme ve stínu stromů. Proč je ale tento stín chladný?

Ve fázi **bádání, objevování** žáci nejprve vycházeli z informací poskytnutých učitelem formou schémat, obrázků apod. dokumentujících klimatizační roli vegetace v krajině (veškeré tyto materiály jsou součástí výše zmiňované vzdělávací metodiky pro ZŠ a jsou pedagogům k dispozici ke stažení zde: https://projekty.pf.jcu.cz/svv/ ). Na základě těchto informací navrhovali hypotézu, která pak byla korigována vyučujícím do správného znění. Tuto hypotézu pak samostatně ověřovali během terénní výuky, při níž si ověřili klimatizační efekt výparu vody za pomoci látky nasáklé vodou a exponované na slunci. Experiment k tomuto ověření žáci samostatně navrhovali. K měření byly využívány moderní měřicí přístroje (infračervené bezdotykové teploměry, malé termovizní kamery, měřiče slunečního záření. Seznam doporučených měřících přístrojů pro výuku je součástí kapitoly 13).

Ve fázi **Vysvětlení** potom žáci na základě naměřených dat vyvozovali závěry a diskutovali je se spolužáky a s vyučujícím.

Fáze **Rozpracování** probíhala opět v terénu. Žáci porovnávali zjištěný klimatizační efekt výparu z mokré látky s projevy vegetace v terénu, porovnávali klimatizační efekt různých typů vegetace (strom, sečený a nesečený trávník). Změřením intenzity slunečního záření a povrchové teploty ve stínu stromu a ve stínu slunečníku si ověřili klimatizační efekt transpirace.

Ve fázi **Vyhodnocení** vyučující získal informaci o úrovni žákovského porozumění problematice za pomoci schémat toků sluneční energie v krajině, která žáci doplňovali ve svých pracovních listech.

Vliv této badatelské výukové aktivity na úroveň žákovských znalostí role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběh vody v krajině byl zjišťován

didaktickým šetřením na vzorku 404 žáků devátých ročníků základních škol/ odpovídajících ročníků víceletých gymnázií formou pre-testu/post-testu před a po výuce.

Testovaná badatelská aktivita měla pozitivní vliv na úroveň žákovských znalostí o této problematice, rozdíl průměrného skóru použitého didaktického testu před a po výuce byl statisticky významný ve všech sledovaných oblastech (klimatizační role vegetace, distribuce sluneční energie, přeměny tepelné energie, vodní režim rostlin. (Tab.11.1).

**Tab.11.1** Vliv badatelské výuky v úloze „Proč je stín stromu chladnější než stín slunečníku" na úroveň žákovských znalostí ve sledovaných oblastech. Výsledky studie typu pre-test/ post-test, N=404, (Ryplová & Pokorný 2020).

| Sledované znalosti | Max. počet bodů | Průměrný počet bodů pre-test | Průměrný počet bodů post-test | t | p |
|---|---|---|---|---|---|
| **klimatizační role vegetace** | 3 | 1,07 | 2,36 | -8,03 | $p <$ |
| **distribuce sluneční energie v krajině** | 2 | 0,99 | 1,78 | -5,51 | $p < 7.9*10^{-7}$ |
| **přeměny tepelné energie** | 2 | 0,34 | 0,81 | -1,43 | $p = 0,11$ |
| **vodní režim rostlin** | 2 | 0,42 | 1,31 | -12,02 | $p < 10^{-17}$ |

Kromě úrovně znalostí byly také zjišťovány názory žáků na tento typ výuky. Naprostá většina žáků hodnotila výuku velmi kladně. Oceňovali zejména možnost práce venku, možnost měření s přístroji, především s termovizní kamerou. Výuka se jim zdála užitečná. Za výmluvné a potěšující považujeme slovní hodnocení jednoho z žáků kvarty českobudějovického gymnázia: „*Vlastně jsme se vůbec neučili, ale hrozně moc jsme se dozvěděli!*"

## 11.3. Projektová výuka

Vhodnou metodou pro výuku problematiky Slunce–voda–vegetace– klima je také projektové vyučování. Pojetí projektové výuky má již velmi dlouhou historii začí-

nající v myšlenkách amerického pedagoga, psychologa a filozofa Johna Deweyho (1859 – 1952), významnou roli hraje však i v současné moderní didaktice přírodních věd. Je považována za jednu z aktivizujících metod zvyšujících atraktivitu výukových témat pro žáky.

Projektová výuka propojuje poznatky a dovednosti, které žáci získají ve školní výuce s jejich zkušenostmi z každodenního života. Jedná se o další z výukových metod tzv. „orientovaných na žáka“, (Kaya, 2008). V projektové výuce učitel předkládá žákům reálný problém známý jim z jejich každodenního života a poskytuje teoretický základ k jeho řešení. Během výuky pak nepředává poznatky jako fakta, nýbrž vede žáky cestou postupných kroků, samostatného nabývání vědomostí a dovedností k vyřešení původního problému a formulaci návrhu tohoto řešení. Z této charakteristiky již vyplývá, že projektovou výuku lze s výhodou kombinovat také s badatelskými aktivitami, popsanými výše (Bílek &Machková 2014). Dalším rysem projektové výuky je její interdisciplinarita. V případě výuky tématu Slunce – voda – vegetace se jedná o propojení znalostí přírodopisu, fyziky, chemie, zeměpisu a často i matematiky. Reálné problémy vyžadují komplexní řešení založené na mezipředmětových vztazích.

Správně provedená projektová výuka musí tyto charakteristiky naplňovat. Bohužel, v praxi se velmi často setkáváme s nepochopením vymezení projektové výuky samotnými pedagogy. Za projektovou výuku není možno považovat např. výtvarnou práci (namaluj obrázek, vytvoř poster), ačkoliv toto výtvarné dílo může součástí jednoho z kroků projektové výuky být a sloužit např. k prezentaci závěrů řešení projektu žákem, či skupinou žáků. V takovém případě ale žáci touto formou prezentují vlastní poznatky, k nimž samostatně během projektové výuky dospěli, což je v pořádku. Problémem projektové výuky je především velká časová náročnost přípravy projektu ze strany učitele.

Typologie výukových projektů je velmi rozsáhlá, liší se např. délkou trvání (od krátkodobých projektů v rámci výukové jednotky či jednoho dne až po projekty dlouhodobé např. celoroční) či počtem zapojených žáků (od individuálních, přes skupinové až po celotřídní či celoškolní). (Frey 1992, Valenta 1993, Skalková 1999, Kratochvílová 2006)

Stejně jako u BOV i v případě projektové výuky jsou žáci jejími aktivními spolutvůrci a podílejí se na získání vlastních poznatků. Vzhledem k tomu, že žáci ve školním prostředí řeší problémy reálného světa a dospívají k jejich smysluplnému

a v praxi využitelnému řešení, zvyšuje se jejich motivace pro výuku a zájem o danou problematiku. Výuka jim proto připadá užitečná. Pro téma klimatizační role vegetace se problémů k řešení v rámci projektové výuky nabízí celá řada. Namátkou lze uvést např. kácení lesů, rozšiřování dlážděných ploch ve městech namísto původních trávníků, rozšiřování asfaltových parkovišť před obchodními centry na místech původních luk a parků, revitalizace sadů formou kácení vzrostlých stromů a výsadby nových (často zakrslých globulárních forem v železných obručích), nejrůznější developerské projekty snižující podíl zeleně ve městech apod.

Projektová výuka bývá členěna na jednotlivé etapy. Podle Kratochvílové (2006) správně pojatá projektová výuka zahrnuje etapu 1. Plánování, 2. Realizace, 3. Prezentace výstupů a 4. Hodnocení. Jednotlivé etapy projektové výuky představíme na příkladu výukové aktivity ověřené ve výuce v devátém ročníku ZŠ.

## 11.4. Příklad projektové výuky

Nejnáročnější pro učitele je **první fáze plánování**. Vlastní téma projektu stanoví učitel buď sám, nebo může vzejít i z podnětu studentů po diskuzi s pedagogem (Tomková et al. 2009, Kratochvílová 2006). Učitel vytýčí cíle, jichž chce dosáhnout, stanoví časový plán projektu. Při jeho tvorbě je potřeba zohlednit např. fakt, že pracujeme s vegetací, klimatizační efekt je měřitelný pouze ve vegetační sezóně, ideálně za teplého slunečného dne. Ve fázi plánování je potřeba dobře promyslet i motivaci studentů, vybrat vhodné druhy rostlin, lokalitu, ve které bude probíhat případná terénní část projektové výuky apod.

Pro téma klimatizační role vegetace byla ve výuce ověřována výuková aktivita **„Proč nechladí všechny rostliny stejně?“** (viz úloha č. 4, vzdělávací metodika pro ZŠ, Ryplová et al. 2021a). Tuto výuku je vhodné zařadit již poté, co se žáci v terénu s klimatizační rolí vegetace seznámí a naučí se ji měřit (např. za využití výše uvedené badatelské výukové aktivity). Nyní se přesvědčí, že rostliny odpařují vodu a že množství odpařené vody se u různých druhů rostlin liší. ***Žáci by si měli také uvědomit, že neadekvátní hospodářské zásahy v krajině, které podporují vznik rozsáh***lých ploch bez vegetace či ovlivňující odvodňování území, mají za následek oteplování místního klimatu a rozšiřování sucha. Výuka je realizována jako týdenní celotřídní projekt s úvodní a závěrečnou hodinou, během týdne žáci

pracují ve skupinách samostatně. Učitel musí předem vytipovat vhodné druhy rostlin a vybrat vhodné stanoviště, na němž se budou rostliny v průběhu žákovských experimentů pěstovat. V našem případě byla vybrána vrba, jako příklad rostliny s velmi rychlou transpirací, *Weigelia*, jako příklad rostliny se středně rychlou transpirací, a netřesk, jako příklad rostliny s velmi nízkou transpirací.

**Realizace:** V počáteční fázi projektové výuky je představen problém, k jehož řešení je potřeba dospět. V případě této projektové výuky je problém uveden následující situací: *Obec chystá výstavbu nové rezidentní čtvrti. Developer navrhuje odstranění rybníka na okraji obce včetně vykácení dřevin na jeho břehu, osázení nízkou bezúdržbovou vegetací (kaktusovité* rostliny v kamenech), *mezi domy pravidelně sekaný trávník a domy opatřit rozsáhlými klimatizačními jednotkami o určitém výkonu. Úkolem žáků bude navrhnout konkurenční projekt, který za pomoci vegetace sníží pocitové teplo v nově vznikající rezidentní čtvrti. Při vlastní realizaci žáci pracují samostatně, učitel pouze usměrňuje jejich činnost. V projektové výuce je velmi vhodné rozdělit žáky do skupin, které spolu při řešení problému komunikují. Tento přístup* podporuje komunikační dovednosti, logické uvažování, schopnosti analýzy informací a vyvozování závěrů.

Z předcházející výuky již mají žáci poznatky o klimatizační schopnosti vegetace, se kterou se předtím seznámili a díky terénní výuce jsou i schopni ji měřit za pomoci infračervených teploměrů nebo termovizních kamer. Nyní se přesvědčí o tom, že různé typy rostlin mají rozdílnou klimatizační schopnost a získají názornou představu o množství vody vypařené evapotranspirací. V závěrečné části první hodiny je naplánována a zahájena experimentální aktivita, na které budou následně pracovat jednotlivé skupiny během týdne samostatně. Každá skupina bude v průběhu týdne sledovat evapotranspiraci jednoho typu rostliny. Učitel žáky rozdělí do stejně početných skupin (osvědčily se skupiny po max. 4–5 jedincích). Zároveň každé skupině zadá úvodní motivační otázku propojující tematiku učiva a situace z běžného života s typem rostliny. V rámci dalšího kroku se děti ve skupinách pokusí designovat samotný experiment k zodpovězení výzkumné otázky: Chladí všechny rostliny stejně? Všechny návrhy jsou prodiskutovány mezi jednotlivými skupinami a s učitelem. Z diskuze pak vzejde správný návrh pokusu, který pak jednotlivé skupiny v průběhu týdne realizují. Evapotranspirace jednotlivých druhů rostlin je během tohoto pokusu hodnocena pomocí vážení úbytku vody, zároveň je měřena také povrchová teplota rostlin, teplota okolního

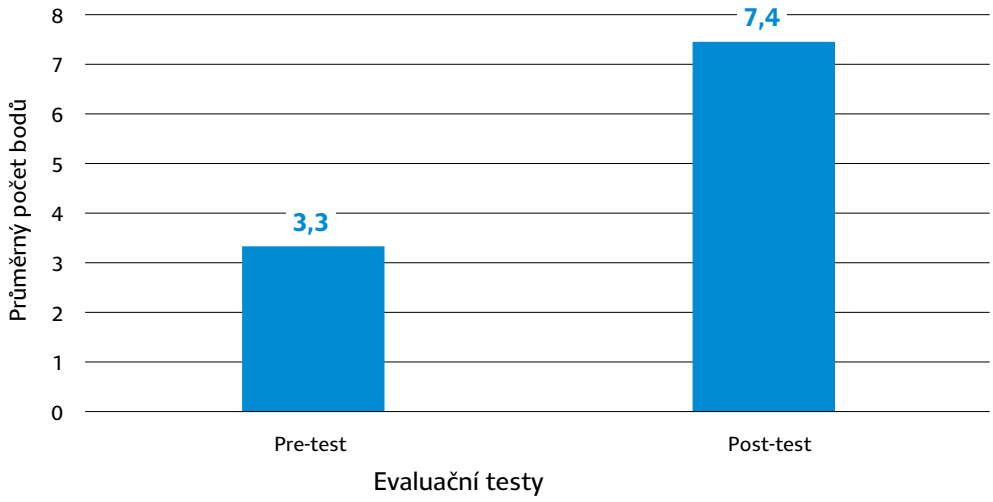
vzduchu, intenzita slunečního *záření. Žáci samostatně měří, zapisují do tabulek a zjišťují klimatizační schopnost jednotlivých druhů rostlin. Na konci fáze realizace stojí výsledek jednotlivých skupin – zhodnocení klimatizačního efektu jejich pokusné rostliny.*

**Prezentace výstupů** může probíhat různými způsoby, např. formou posterů, slovního projevu, počítačové prezentace, článku ve školním časopisu apod. V našem případě zástupci jednotlivých skupin formou ústního projevu podporovaného ppt prezentací představí výsledky svých týdenních aktivit. Následně v diskusi s ostatními skupinami žáci porovnají své výsledky a společně pak vypracují konkurenční návrh oproti developerskému projektu.

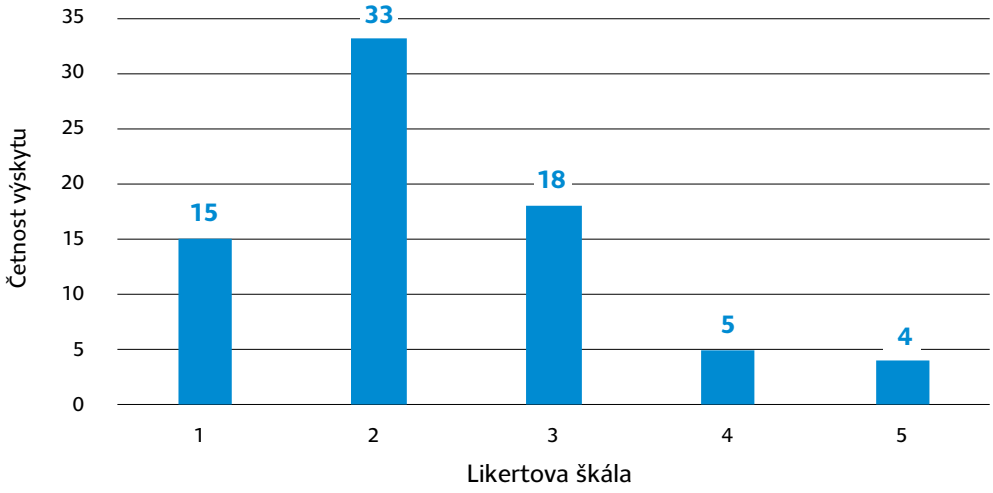
**Hodnocení, reflexe** Poslední fáze projektové výuky musí být dobře provázána s prezentací. Fáze hodnocení nezahrnuje pouze hodnocení učitelem, ale také sebehodnocení žáků samotných. Nejčastěji probíhá formou diskuse mezi žáky samotnými a mezi žáky a učitelem.

V rámci ověřování této výukové aktivity proběhlo dotazníkové šetření formou pre-test/post-test ke zjištění impaktu této výuky na úroveň žákovských znalostí (Vácha et al. 2019). Průměrný bodový zisk žáků v rámci pre-testu, tedy testu znalostí před výukou, činil pouhých 3, 3 bodu. Průměrná hodnota bodového zisku z post-testu (tedy testu absolvovaného týden po vyučování) dosahovala 7, 4 bodu. Bodový nárůst mezi průměrně dosaženým počtem bodů v pre-testu a v post-testu tak byl 4, 1 bodu. Bodový zisk v testu výstupních znalostí byl statisticky významně vyšší než v testu před započetím výuky. Statistická významnost byla potvrzena na základě párového t – testu ($t = -21{,}38$; $df = 77$; $p < 10^{-17}$). Stejný výsledek vykazuje i užití neparametrického párového Wilcoxonova testu ($Z = 7{,}67$; $p < 10^{-13}$), ( obr.11.1).

Dosažení efektivních cílů bylo diagnostikováno na základě vyhodnocení položek Likertova typu. Byl zjišťován žákův subjektivní názor na skutečnost, zdali ho absolvovaná výuka s botanickou tematikou bavila. Z obr. 11.2 vyplývá, že žákům připadala výuka ve většině případů zábavná. Celkem 48 ze 75 žáků odpovědělo, že je výuka určitě bavila či spíše bavila.




**Obr. 11.1** Průměrný bodový zisk žáků v testu vstupních (pre-test) a výstupních (pos-ttest) znalostí (Vácha et al. 2019).



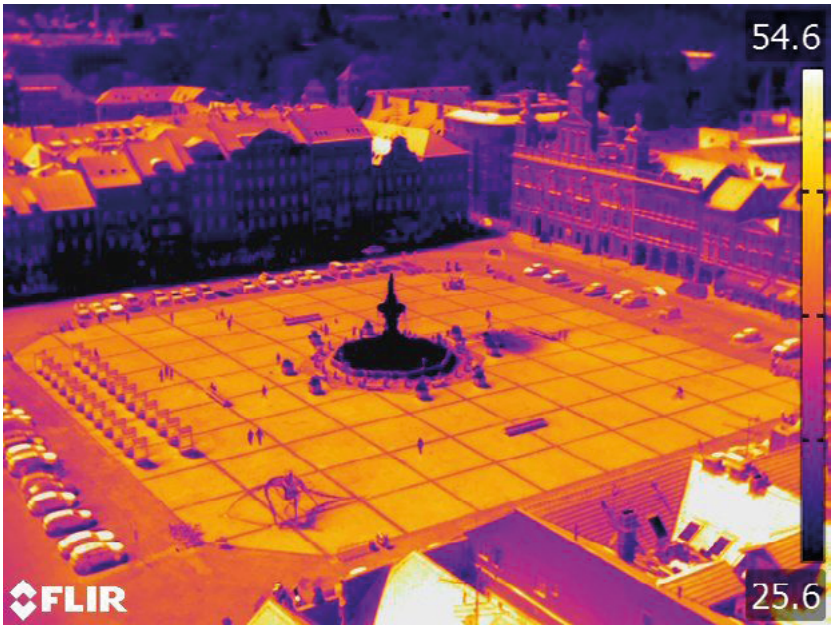

**Obr. 11.2.** Subjektivně hodnocená míra zábavnosti výuky získaná jako odpověď na položku „výuka mě bavila“ (1 = určitě ano, 5 = Určitě ne), N = 75 (Vácha et al. 2019).

Z výsledků tedy vyplývá, že tato projektová výuka měla u žáků 9. tříd ZŠ statisticky významně prokazatelný efekt na rozvoj znalostí o ekologickém významu transpirace, naprosté většině žáků se výuka líbila.

## 11.5. Místně zakotvená výuka

Projektovou i badatelsky orientovanou výuku lze s výhodou spojovat s tzv. místně zakotveným učením (place based education) (Clark & Glazer 2004). Místně zakotvená výuka probíhá v bezprostředním okolí žáků, které dobře znají. Jsou tedy více vtažení do řešení problémových situací, které se jich bezprostředně dotýkají. Již tento fakt sám o sobě zvyšuje angažovanost žáků ve výuce (Clark 2008). Projektová, místně zakotvená výuka umožňuje využití teoretických poznatků získaných ve škole pro řešení místních problémů v bezprostředním žákově okolí (Akkaya & Karakus 2018). Výuka má také celospolečenský dopad. Díky místně zakotvenému vyučování se tak škola propojuje s reálným životem.

V případě výuky tématu klimatizační role vegetace se možností nabízí celá řada. V okolí snad každé školy se najde strom, park, stromořadí, kde lze během velmi krátké doby realizovat terénní měření dokumentující klimatizační schopnost stromů, vzrostlého trávníku apod. v porovnání s betonovými plochami, parkovišti, silnicí. Tyto poznatky lze pak v rámci projektů využít pro řešení problémů typu: „Před školou je málo parkovacích míst. Město chce vykácet stromy a na jejich místě vyasfaltovat parkovací místa pro auta. Připravte argumentaci proti tomuto návrhu a navrhněte alternativní řešení“ nebo „Navrhněte plán osázení náměstí v našem městě vegetací (stromy, trávník), tak, aby se v létě snížila pocitová teplota. Svůj návrh odůvodněte a doložte konkrétními hodnotami“. Tento typ místně zakotvené projektové výuky byl testován v rámci tvorby vzdělávací metodiky pro studenty učitelství přírodopisu Pedagogické fakulty JU v Českých Budějovicích (viz vzdělávací metodika pro VŠ, Ryplová et al. 2021b). Studenti byli motivováni termovizním snímkem českobudějovického náměstí (obr.11.3).




**Obr. 11.3** Termovizní snímek náměstí Přemysla Otakara II pořízený z přilehlé Černé věže v jasném letním dnu a využívaný v rámci místně zakotvené projektové výuky.

## Literatura

Akkaya, Y., Karakus, U. (2018). The Impact of Place Based Education Approach on Student Achievement in Social Studies. RIGEO - Review of International Geographical Education Online [online]. (8)3, 500–516 [cit. 2.2.2021].

Bílek, M. & Machková, V. (2014). Inquiry on Project Oriented Science Education or Project Orientation of IBSE? In M. Rusek, D. Starkova & I. Metelkova (Eds.): Pro-ject Based Education in Science Education XII, Charles University Prague, 10-20.

Blanchard, M. R., Southerland, S. A. & Granger, D. E. (2009). No silver bullet for inquiry: Making sense of teacher change following an inquiry-based research experience for teachers. Science Education, 93, 322- 360.

Bogner, F. X. & Sotiriou, S. (2014). PATHWAY towards a Standard-Based Approach to Teaching Science by Inquiry. In 10th Conference of the European Science Education Research Association, Proceedings (Roč. 10). Cyprus. Dostupné z http://www.esera.org/media/esera2013/FranzX._Bogner_12Feb2014.pdf

Bybee, R. V. (2004). Scientific inquiry and science teaching. In L. B. Flick & N. G. Ledermann (Eds.), Science inquiry and nature of science: Implications for teaching, learning, and teacher education. (1-14). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher.

Carin, A. A., Bass, J. E. & Contant, T. L. (2005). Methods for teaching science as inquiry. 9th ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

Clark, D. (2008). Learning to Make Choices for the Future. Connecting Public Lands, Schools, and Communities through Place-based Learning and Civic Engagement. The Center for Place-based Learning and Community Engagement a A Forest For Every Classroom. 160 s.

Clark, D. & Glazer, S. (2004). Questing: A Guide to Creating Community Treasure Hunts. Lebanon: University Press of New England. 276 s.

Crommelin, A. (2014). Forschendes Lernen – Genese des Konzepts und aktuelle Ansätze. Univerzita Siegen.

Cutter-Mackenzie, A. (2008). Research Report 2: Multicultural school gardens. Melbourne: Monash University and Gould Group press.

Dostál, J. (2015). Badatelsky orientovaná výuka: pojetí, podstata, význam a přínosy. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.

Eastwell, P. (2009). Inquiry learning: Elements of confusion and frustration. The American biology teacher, 5(1), 263–264.

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H. & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(23), 8410–8415. http://doi.org/10.1073/pnas.1319030111

Frey, K. (1992). Die Projektmethode. Basel: Beltz Verlag, s. 49.

Geier, R., Blumenfeld, P. C., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Fishman, B., Soloway, E. & Clay-Chambers, J. (2008). Standardized test outcomes for students engaged in inquiry-based science curricula in the context of urban reform. Journal of Research in Science Teaching, 45(8), 922–939. http://doi.org/10.1002/tea.20248

Greene, M. & Griffith, M. (2003). Feminism, philosophy, and education: Imagining public spaces. In N. Blake, P. Smeyers, R. Smith & P. Standish (Eds.), The Blackwell guide to the philosophy of education (73–92). Oxford: Blackwell.

Haferbeck, S. (2009). Ein Garten macht Schule – Buddeln für den Burger. Schieder- Schwalenberg: Biologische Station Lippe e. V. Dostupné z: http://www.biologischestationlippe.de/fileadmin/user_upload/Sammlung/Download/Schulgartenhandbuch_Internetversion__1_.pdf

Held, L. (2011): Konfrontácia kencepcií prírodovědného vzdelavanie v Európe. Scientia in Educatione, 2(1), 69-80.

Chinn, C. A. & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically Authentic Inquiry in Schools: A Theoretical Framework for Evaluating Inquiry Tasks. Science Education (86), 175-218.

Janík, T. & Stuchlíková, I. (2010) Oborové didaktiky na vzestupu: přehled aktuálních vývojových tendencí. Scientia in Educatione (1), 5-32.

Kaya, O. N. (2008). A Student-centred Approach: Assessing the Changes in Prospective Science Teachers' Conceptual Understanding by Concept Mapping in a General Chemistry Laboratory. Research in Science Education, 38(1), 91-110, https://doi.org/10.1007/s11165-007-9048-7.

Kratochvílová, J. (2006). Teorie a praxe projektové výuky. 1. vydání. Brno: Masarykova univerzita,160 s.

Linn, M. C., Davis, E. A. & Bell, P. (2004). Internet environments for science education. Mahwah, USA: Lawrence Erlbaum.

National Research Council. (1996). National Science Education Standards. Washington, DC: The National Academy Press.

Nezvalová, D. (2010). Inovace v přírodovědném vzdělávání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.

Papáček, M. (2013). Badatelsky orientované přírodovědné vyučování cesta pro biologické vzdělávání generací Y, Z a alfa?. Scientia in Educatione, 1(1). p. 33 – 49.

Prokop, P., Tuncer, G. & Chudá, J. (2007). Slovakian students' attitudes toward biology. Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education, 3(4), 287–295.

Prokop, P., Prokop, M. & Tunnicliffe, S. D. (2007). Is biology boring? Student attitudes toward biology. Journal of Biological Education, 42(1), 36–39.

Rissing, S. W., & Cogan, J. G. (2009). Can an ınquiry approach ımprove college student learning in a teaching laboratory? CBE Life Sci Educ, 8, 55–61.

Ryplova, R., Pokorny, J., (2020). Saving Water for the Future Via Increasing Plant Literacy of Pupils. European Journal of Sustainable Development (2020), 9, 3, 313-323 Doi: 10.14207/ejsd.2020.v9n3p313

Ryplová, R., Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2021a). Metodika výuky k tématu Sluneční energie - voda v krajině - vegetace pro žáky 9. ročníků ZŠ a víceletých gymnázií. ENKI, o.p.s.,Třeboň, 2021, ISBN 978-80-908090-0-0

Ryplová, R., Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2021b). Metodika výuky k tématu Sluneční energie - voda v krajině - vegetace pro VŠ studenty učitelství přírodopisu pro ZŠ a učitele z praxe. ENKI, o.p.s.,Třeboň, 2021,ISBN 978-80-905483-8-1

Sitná, D. (2009). Metody aktivního vyučování: spolupráce žáků ve skupinách. Praha: Portál, 152 s.

Skalková, J. (1999) Obecná didaktika. Praha: ISV nakladatelstvi, 217 s.

Spronken-Smith, R. (2012). "Experiencing the Process of Knowledge Creation: The Nature and Use of Inquiry-Based Learning in Higher Education." Paper prepared for International Colloquium on Practices for Academic Inquiry. University of Otago.

Stuchlíková, I. (2010). O badatelsky orientovaném vyučování. In M. Papáček (Eds.). Didaktika biologie v České republice 2010 a badatelsky orientované vyučování (129–135). České Budějovice: Jihočeská univerzita.

Škoda, J. & Doulik, P. (2009). Vývoj paradigmat přírodovědného vzdělávání. Pedagogická orientace, 19(3), 24–44.

Tomková, A., Kašová J., Dvořáková M. (2009) Učíme v projektech. Praha: Portal, 2009.

Trumper, R. (2006). Factors affecting junior high school students' interest in biology. Science Education International, 17(1), 31–48.

Uitto, A. & Kärnä, P. (2014). Teaching Methods Enhancing Grade Nine Studnets' Performance and Attitudes towards Biology. In 10th Conference of the European Science Education Research Association, Proceedings (Roč. 10, s. 67–73). Cyprus. Dostupné z http://www.esera.org/media/eBook_2013/strand%202/Anna_Uitto_16Nov2013.pdf

Vácha, Z. (2015). Didaktické využití školních zahrad v České republice na prvním stupni základních škol. Scientia in educatione. 11 s.

Vácha Z. & Ditrich, T. (2016). Účinnost badatelsky orientovaného vyučování v prostředí školních zahrad na primárním stupni základních škol v České republice. Scientia in educatione. 7(1).

Vácha, Z. & Petr, J. (2013). Inquiry based education at primary school throught school gardens. Journal of International Scientific Publications: Education Alternatives, 4, 219–230.

Vácha, Z., Pokorný J. & Ryplová R. (2019). Vliv projektové výuky na pochopení ekologického významu transpirace, In: K. Vojíř M. Rusek (Eds.) Book of Abstracts from International conference PROJECT-BASED EDUCATION AND OTHER ACTIVATING STRATEGIES IN SCIENCE EDUCATION XVII, 218 -225.

Valenta, J. (1993). Pohledy. Projektová metoda ve škole a za školou. Praha: Ipos Arama

Warner, A. & Myers, B. (2008). What is inquiry- based instruction? Florida, USA: University of Florida.

Williams, D. R. & Brown, J. D. (2011). Living soil and sustainability education: linking pedagogy with pedology. Journal of Sustainability Education, vol. 2. Dostupne z http://www.jsedimensions.org/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/ WilliamsBrown2011.pdf

# 12. Soubor ověřených otázek pro výuku

Následující soubor otázek přinášíme pedagogům jako inspiraci pro výuku či ověření úrovně získaných poznatků, i všem ostatním čtenářům pro otestování vlastního porozumění problematiky role vegetace v distribuci sluneční energie a koloběhu vody v krajině. Otázky v obou úrovních, tj. pro základní i vysokoškolské vzdělávání, byly ověřeny v praxi na v rámci tvorby metodik výuky k tématu sluneční energie – voda v krajině – vegetace pro žáky 9. ročníků ZŠ a víceletých gymnázií i VŠ studenty učitelství přírodopisu pro ZŠ a učitele z praxe.

**Otázky pro základní školy:**

1. Lidské tělo se v létě chrání před přehřátím pocením prostřednictvím potních žláz v kůži. Jakým procesem se mohou v létě ochlazovat rostliny? Jak se nazývají útvary na povrchu rostlin, které mají obdobnou funkci jako potní žlázy člověka?
- *Odpověď: Rostliny se chladí pomocí výparu (transpirace) z listů. Tepelnou energii vážou do vodní páry. Průduchy, útvary na povrchu listů, mají obdobnou funkci jako potní žlázy, odvádějí skryté (latentní) teplo ve vodní páře.*

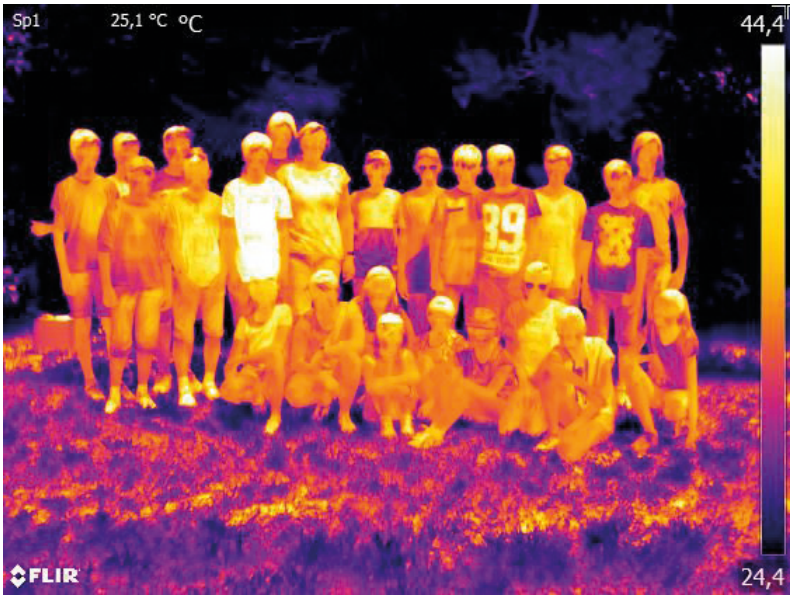
2. Ranní rosa ohřívá nebo ochlazuje povrchy, na kterých se sráží?
- *Odpověď: Ohřívá. Ranní rosa vzniká kondenzací vodních par ve vzduchu na chladnějších předmětech. Při kondenzaci se uvolňuje latentní (skryté) teplo ve vodní páře a uvolněná energie ohřívá povrchy, na nichž se vodní* pára *sráží.*

3. Je horký letní den, teplota okolního vzduchu na rozpáleném dlážděném náměstí dosahuje téměř 40 °C a vy se chcete schovat před horkem do stínu. Na výběr je stín vzrostlé lípy nebo slunečník na zahrádce před cukrárnou. Kde se lépe ochladíte a proč?
- *Odpověď: Ve stínu stromu. Strom, na rozdíl od slunečníku, v sobě obsahuje vodu. Většina sluneční energie dopadající na korunu stromu je využita na výpar. Strom tak ochlazuje sebe i své okolí. Vzrostlý strom odpaří v letním dnu cca 100 litrů vody a ochladí tak své okolí o 68 kWh.*

4. V rovníkových oblastech (tedy přibližně ve stejných zeměpisných šířkách) se na Zemi vyskytují tropické deštné lesy i pouště. Jak známo, na poušti je v noci velmi chladno a ve dne jsou teploty naopak velmi vysoké. Naproti tomu v tropickém deštném lese jsou mezi denní a noční teplotou velmi malé rozdíly. Proč tomu tak je?

- *Odpověď: V tropickém deštném lese je mnoho rostlin a velmi vlhká půda. Rostliny přes den vypařují z listů velké množství vodní páry, která v chladnější atmosféře kondenzuje, vytváří mraky a mlhu. Mlha a mraky nad lesem tlumí příkon sluneční energie ve dne a vyzařování tepla do oblohy v noci. (Mraky v noci působí jako „přikrývka“, zabraňující odvodu tepla z povrchu krajiny do chladnější oblohy.) Výpar z vegetace a z půdy snižuje teplotní rozdíly mezi dnem a nocí. Oproti tomu na poušti nejsou rostliny, které by přes den vypařovaly vodu, voda se nevypařuje ani z půdy. Mraky se proto netvoří, přes den nezabraňují příkonu sluneční energie a v noci odvodu tepla.*

5. Třída se fotila na školní zahradě. Na termovizním snímku je vidět, že tráva poblíž postav má vyšší teplotu než nesešlapaná tráva v popředí. Vysvětlete.



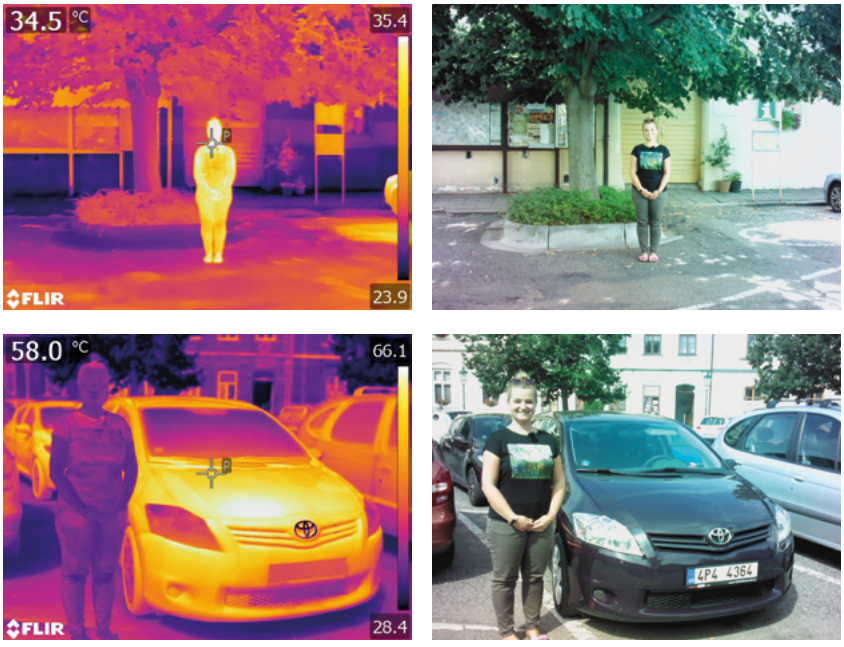

**Obr.12.1** Termovizní snímek třídy na školní zahradě. Povrchová teplota trávníku na sešlapaných místech dosahuje teplot kolem přes 35 °C, nesešlapaná tráva v popředí má teplotu výrazně nižší.

- *Odpověď: Sešlapaná tráva je teplejší, protože díky poškození rostlinného těla sešlapáním poblíž postav žáků došlo ke ztrátě vody, rostliny reagují na poškození zavřením průduchů a omezením výparu z listů. Chlazení díky výparu se tedy snížilo.*

6. V horkém létě se doporučuje počkat se sekáním trávníku nebo nesekat u země, ponechat například 10 cm vysoký trávník, proč?

- *Odpověď: Je velký rozdíl v teplotě krátce posekaného trávníku a živém rostoucím porostu o výšce 10 cm a vyšší. Takový porost si výparem vody (evapotranspirace) utváří své mikroklima, krátce posekaný porost se nemůže výparem vody chladit a za horkých slunných dnů ani nedorůstá.*

7. Na termovizním snímku má lidská postava ve stínu stromu vyšší teplotu než okolí, na osluněném prostranství je lidská postava chladnější. Kde se člověk chladí vůči okolí a kde se naopak ohřívá a ochlazuje okolí?




**Obr. 12.2** Na horním termovizním snímku postavy ve stínu stromu je vidět, že její povrchová teplota dosahující cca 35 °C je vyšší než teplota okolního prostředí. Naopak na dolním termovizním snímku je lidské tělo výrazně chladnější než automobil. Na přehřátém parkovišti se proto člověk ohřívá od okolí.

- *Odpověď: Teploty mají tendenci se vyrovnávat. Člověk se v létě může ochladit v prostředí, které má nižší teplotu, než je teplota lidského těla. Chladný vzduch ve stínu stromů v parku odebírá teplo z povrchu lidského těla, proto se lidé v parku chladí. Naopak na rozpálených plochách bez vegetace je lidské tělo chladnější než okolí, lidské tělo se proto v těchto místech ohřívá.*

8. Jaký je rozdíl mezi teplotou měřenou v meteorologické budce a teplotou měřenou pomocí termovizní kamery?

- *Odpověď: V meteorologické budce měříme teplotu okolního vzduchu ve výšce 2 m, termovizní kamera měří teplotu vyzařovanou povrchem tělesa.*
  *(Vysvětlení: Ve stínu standardizované meteorologické budky měříme teploměrem termodynamickou (kinetickou) teplotu vzduchu. Tato teplota je interním projevem pohybové energie molekul tvořících těleso, tedy vzduchu. Jedná se o teplotu vzduchu, který „ohřívá teploměr". Měření teploty probíhá ve výšce 2 m nad povrchem proto, aby byl eliminován vliv povrchu na teplotu. Měření je bodové. Toto měření příliš nevypovídá o distribuci slunečního záření na zemském povrchu.*
  *Termovizní kamera zaznamenává intenzitu vyzařování zemského povrchu v tepelné části spektra. Intenzita tohoto dlouhovlnného vyzařování je vnějším projevem teploty tělesa a řídí se základními zákony termodynamiky. Každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula (-273,15°C) emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí jeho kinetické teploty a materiálu, z něhož se těleso skládá. Termovizní kamera tuto intenzitu vyzařování „převádí" na tzv. teplotu radiační (jasovou). Získáváme plošnou informaci o rozložení teplot v krajině. Teplota povrchu je výsledkem energetických přeměn, jež můžeme ovlivnit prostřednictvím krajinného pokryvu a vodním režimem. Ztráty funkční vegetace jsou provázeny změnami distribuce slunečního záření, což se projeví změnami teplot).*

9. Jaké může mít následky jasná noční obloha v březnu či dubnu?

- *Odpověď: Při jasné jarní obloze není vyzařování zemského povrchu vůči velmi chladné obloze tlumeno oblačností. Zemský povrch se intenzivně ochlazuje a může se vyskytnout přízemní mráz.*

10. Povrch trávníku má teplotu 10 °C a obloha -15 °C. Vyzařuje energii trávník do oblohy, nebo obloha do trávníku? Dokážete odhadnout, o kolik wattů se jedná?

- *Odpověď: Dle zákonů termodynamiky vždy teplejší těleso vyzařuje energii směrem k chladnějšímu prostředí. Tedy trávník vyzařuje do oblohy. Podle Stefan-Boltzmannova zákona můžeme uvažovat, že na 1 °C připadá cca 5 W. Při rozdílu 35 °C toto vyzařování odpovídá 175 W.*

11. Povrch vegetace je v porovnání s bíle natřenou betonovou plochou tmavší, absorbuje vyšší množství slunečního záření. Podle této teorie by tedy měla být vegetace teplejší. Proč je tomu naopak?

- *Odpověď: V porovnání s bílou betonovou plochou vegetace sice absorbuje cca o 5 % více sluneční energie, ale na rozdíl od fyzikálního povrchu se dokáže aktivně ochlazovat a snižovat teplotu evapotranspirací.*

12. Před školou byl strom. V letním dnu vypařil 100 litrů vody a ochladil tak své okolí o 68 kWh, jinak by se sluneční energie přeměnila v teplo. Strom byl poražen, ustoupil parkovišti, aby rodiče mohli své děti přivézt blíže ke škole. Škola pořídila do přehřívajících se tříd 3 klimatizační zařízení, každé o výkonu 3 kW, které během výuky spotřebují přibližně 60 kWh energie (240 Kč). Klimatizační zařízení ochlazují třídu a ohřívají okolí, podobně jako lednička chladí uvnitř a ohřívá okolí. Kam předává výparné teplo strom?

- *Odpověď: Strom vypařuje vodu a sluneční energie je „uložena" ve vodní páře ve formě latentního výparného tepla. Tato energie se opět uvolní, když se vodní pára sráží (kondenzuje) na vodu kapalnou ráno při tvorbě rosy nebo v atmosféře při tvorbě mraků, ze kterých případně prší. Technologické klimatizační zařízení v konečném efektu své okolí ohřívá. Strom, který vypařuje vodu, vyrovnává rozdíly teplot, protože při výparu se strom a jeho okolí ochlazuje a vodní pára kondenzuje v místech chladných.*

**Otázky pro vysokoškolskou přípravu učitelů:**

1. Pro stanovení relativní vlhkosti vzduchu se používá tzv. psychrometr. Princip měření je založen na porovnávání teplot dvou rtuťových teploměrů, z nichž jeden je suchý a druhý vlhčený vodou. Který teploměr ukazuje nižší teplotu a proč? Na čem závisí rozdíl teplot, kdy budou teploty shodné?

- *Odpověď: Vlhký teploměr bude mít teplotu nižší než suchý. Díky odpařování vody se vlhký teploměr ochlazuje. Toto ochlazování závisí především na vlhkosti, ale i teplotě, tlaku a rychlosti proudění okolního vzduchu. Čím je okolní vzduch sušší, tím rychleji se ochlazuje vlhký teploměr (suchý vzduch rychleji odnímá vodní páru z vlhkého teploměru). Teploty budou shodné v okamžiku, kdy relativní vlhkost okolního vzduchu bude 100 %. Tehdy už nebude moci docházet k odvodu vodní páry z vlhkého teploměru, nebude tedy chlazen výparem.*

2. V létě se města přehřívají, hovoříme o městských tepelných ostrovech. Stromy a trávníky ochlazují města výparem vody. Ve stínu domu je ovšem také teplota zřetelně nižší nežli na osluněné ploše/dlažbě. Je nějaký rozdíl mezi stínem domu a stínem stromu pro vznik/tvorbu městského tepelného ostrova?

- Samozřejmě: dům má nahoře rozpálenou střechu, strom se aktivně chladí výparem vody. Přesvědčit se o tom můžeme pomocí termovizních snímků:




**Obr. 12.3** Porovnání povrchových teplot střech a vegetace

3. Jak lze vysvětlit, že se voda dostane z kořenů až do několik desítek metrů vysoké koruny stromu oproti síle zemské přitažlivosti? Jaký proces tomu napomáhá?

- *Odpověď: Voda se pohybuje vzhůru rostlinou na základě rozdílů ve vodním potenciálu. Zásadní význam má výpar vody listy (transpirace). Vodní pára se vypařuje přes průduchy, ve vodivém pletivu vzniká podtlak a z kořenů kmenem (stonkem) stoupá voda vzhůru od kořenů. Určitou roli má též vzlínání vody po stěnách kapilárních vodivých pletiv, což je proces obdobný vzlínání vody ve zdivu, savém papíru, popsaný fyzikálně v pojmech kapilarity a povrchového napětí.*

4. Z hlediska tvorby a přísunu srážek – je pro pevninu výhodnější mít na pobřeží lesní porosty, pole a pastviny, či na typu krajinného pokryvu nezáleží?

- *Odpověď: Rozsáhlé lesní porosty na pobřeží mají schopnost „natahovat" srážky směrem do vnitrozemí podle principu biotické pumpy.*

5. Které povodí bude mít vyrovnanější odtok vody s nižším množství rozpuštěných látek – to s mozaikou lesních porostů, luk a minimem zemědělské půdy či povodí intenzivně zemědělsky využívané? Vysvětlete, proč.

- *Odpověď: Povodí s mozaikou lesních porostů, luk a minimem zemědělské půdy je schopno udržovat nižší teplotu krajiny a vyrovnávat odtok vody. Nižší teplota krajiny zajišťuje nižší intenzitu rozkladných (mineralizačních) procesů v půdě, nevyplavují se živiny. U zemědělské půdy je tomu naopak.*

6. Označte všechny správné výroky:

Rozsáhlé odlesnění krajiny:

a) nemá na distribuci sluneční energie žádný vliv

**b) způsobí pokles latentního toku tepla, růst zjevného tepla a povrchové teploty**

c) způsobí růst výparu a latentního toku tepla, pokles zjevného tepla a povrchové teploty

**d) může způsobit změnu lokálního klimatu**

e) díky poklesu evapotranspirace se zamezí „plýtvání vodou v krajině"

7. Je horký letní den, s teplotou vzduchu okolo 30 °C. Které typy porostů se dokáží účinně ochlazovat, tj. mají povrchovou teplotu nižší, než je teplota vzduchu?

- *Odpověď: Obecně se jedná o porosty s dobře vyvinutou patrovou strukturou, dobře zásobené vodou – např. zdravý lesní porost, mokřady, mokřadní křoviny (olšiny, vrbiny apod.), mokré louky.*

8. Na poli s kukuřicí, s herbicidy vyhubeným podrostem, je teplota povrchu 40 °C, listy kukuřice mají dostatek vody, vypařují a ochlazují se na 30 °C. V nedalekém lese má podrost teplotu 22 °C a povrch korun 28 °C. Má toto vertikální rozložení teploty v porostech význam? Jaký?

- *Odpověď: Ano má. Porosty s vyvinutou patrovitou strukturou se liší vertikálním rozložením teplot od jednoduchých monokultur, zejména od plodin. V lese se v průběhu slunného dne vytváří inverzní teplotní gradient: teplota v dolním bylinném a keřovém patře je nižší nežli teplota v korunách stromů. Relativně těžší chladný vzduch se udržuje při zemi, nestoupá vzhůru. V dolních patrech porostu se tak udržuje vysoká vlhkost, často i ve formě rosy. V plodinách je vertikální profil teplot opačný. Při zemi, na povrchu půdy, je za slunného počasí teplota výrazně vyšší než na povrchu porostu. Půda mezi plodinami je holá, veškerá vegetace (plevele) se záměrně hubí herbicidy. Od ohřátého povrchu půdy se ohřívá vzduch a stoupá porostem vzhůru, teplý vzduch pojme vysoké množství vody, povrch půdy se rychle vysušuje a plodiny ztrácejí vodu, zatímco v patrovitém lesním porostu se díky inverzi teplot voda udržuje.*

9. V horkých dnech se někdy kropí ulice vodou. Přispívá to ke snížení teploty? Lze na základě znalostí fyziky kvantitativně vyjádřit chladící efekt 1 $m^3$ vody rozstříkané na povrch silnice v případě, že se všechna vypaří?

- *Odpověď: Ano, kropení silnic přispívá ke snížení teploty díky výparu vody. 1000 kg vody má výparně skupenské teplo 680 kWh, při ceně elektrické energie 4 Kč za kWh to odpovídá 2720 Kč, které bychom zaplatili za chladící zařízení vyžadující spotřebu elektrické energie. Nutno však započítat cenu vody a využití tohoto způsobu chlazení v oblastech s nedostatkem vody.*

# 13. Přístroje, pojmy a jednotky nezbytné pro měření

V této kapitole si vysvětlíme základní pojmy a možnosti měření slunečního záření, teploty, vlhkosti vzduchu a srážek.

## 13.1. Sluneční záření

Slunce je již cca 4,5 miliard let od vzniku naší planety Země prakticky jediným zdrojem energie. Je to hvězda o povrchové teplotě cca 5770 K, okolo které Země obíhá po mírně eliptické dráze ve vzdálenosti cca 150 mil. km. Teplota Slunce určuje spektrum slunečního záření (viz kapitola 3 Slunce a Země). Největší část energie, kterou se budeme zabývat, připadá na vlnové délky 0,3 – 13 μm (světelné a infračervené záření) a nazýváme ji dopadající sluneční záření. Podle geometrické povahy dopadající záření dělíme na přímé a rozptýlené (difuzní – část, která netvoří stín). Jejich součtem označujeme záření celkové (globální), které lze měřit. Na vnější povrch zemské atmosféry dopadá na jednotku plochy kolmou ke směru šíření záření energetický tok cca 1400 $W.m^{-2}$. Po průchodu záření atmosférou, na zemském povrchu, měříme hodnoty v rozmezí 0 – 1100 $W.m^{-2}$.

Aby byly hodnoty přesně definované a vzájemně porovnatelné (reprodukovatelné), měříme jak globální, tak difuzní záření dopadající na vodorovnou plochu. Globální záření měříme plně ozářeným radiometrem, zatímco difuzní záření měříme radiometrem, zastíněným přesně definovaným stínícím kruhem nebo terčíkem.

Pro výukové účely se jeví nejvhodnějším cenově dostupný, kompaktní ruční měřič příkonu slunečního záření založený na polovodičovém efektu. Přístroj měří sluneční záření ve spektrální oblasti 400–1100 nm v rozsahu 0–3990 $W.m^{-2}$. Intenzitu slunečního záření odečítáme přímo na displeji v energetických jednotkách ($W.m^{-2}$).

Dokonalejší jsou termočlánkové radiometry, používané v meteorologických stanicích, ale jejich cena je řádově vyšší. Navíc potřebují na vyhodnocení přesný mikrovoltmetr nebo převodník. Radiometry jsou založeny na principu

měření změny teploty mezi dvěma plochami s různou pohltivostí. Při ozáření se každá plocha jinak ohřeje a z rozdílu jejich teplot lze určit radiační tok. Spektrální propustnost vstupního okna (krytu) určuje spektrální rozsah radiometru. V meteorologii se dělí radiometry podle spektrální oblasti na tři základní skupiny: UV radiometry (280–400 nm), krátkovlnné (pyranometry) v rozsahu od 300 nm do 4 000 nm a dlouhovlnné (pyrgeometry) od 4 500 nm (4.5 μm) do více než 40 000 nm (40 μm). Krátkovlnné záření obsahuje ultrafialové, viditelné a blízké infračervené záření. Na obr 13.1 je sestava UV radiometru, pyranometru a pyrgeometru Kipp & Zonen.



**Obr. 13.1** UV radiometr (vzadu), pyranometr a pyrgeometr (ve předu) na meteostanici ENKI v Třeboni

V praxi se často používají albedometry – dva vodorovně, proti sobě umístěné pyranometry, kdy jeden míří do nadhlavníku a druhý kolmo k zemi (obr. 13.2). Přístroj slouží pro přímé měření dopadajícího a odraženého globálního záření. Poměr odraženého záření ku záření dopadajícímu nazýváme albedem a udává se v procentech.



**Obr.13.2** Albedometr




**Obr. 13.3** Netradiometr

Dalším měřicím přístrojem pro určení energetické bilance na rozhraní Země – atmosféra, je netradiometr (obr. 13.3). Jedná se o soustavu 5 čidel, umístěných na jednom bloku: dva pyranometry, dva pyrgeometry a teploměr, měřící vztažnou teplotu bloku. Pomocí netradiometru dokážeme zjistit nejen energetické toky, ale také vyhodnotit oblačnost a efekt vodní páry na tok tepla do atmosféry. Podle Stephan-Boltzmanova zákona lze vypočítat radiační teplotu porostu pod radiometrem a efektivní teplotu oblohy (viz kapitola 5).

Existuje také přesnější měřidlo přímé radiace – pyrheliometr, které měří přímou radiaci (paprsky, dopadající kolmo na spojnici Země a Slunce) v rozsahu 5°(aperturní úhel čidla). Čidlo musí neustále sledovat trajektorii Slunce na obloze, proto je umístěno na precisně naváděné konstrukci. Jako snímače se používají termočlánky, zapojené do série. Vzhledem k jejich náročné instalaci a údržbě se tato čidla používají pouze ve vybraných meteorologických stanicích.

## 13.2. Teplota a teplo

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy, tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisejí na čase. Podle J. Kleczka (2002) je teplota přesným (tj. číselným) vyjádřením našeho nepřesného pocitu tepla. Teplota je jednou z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy vždy nepřímé. Fyzikální veličina teplota nesmí být nikdy zaměňována za fyzikální

veličinu teplo. Teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles a není stavovou veličinou, neboť nezávisí pouze na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti jejího vývoje. (Kreidl 2005)

Abychom mohli měřit teplotu tělesa, musíme jej přivést do stavu termodynamické rovnováhy s jiným tělesem, které je představováno teploměrem. Jedná se o měření kontaktní. Kromě USA a přidružených zemí je běžně používanou jednotkou pro měření teploty °C (stupeň Celsia), odvozený od teploty bodu mrazu a teploty bodu varu vody. Ve fyzice se používá termodynamická teplotní stupnice, která je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu, kde základní jednotkou je kelvin (K). Kelvin byl definován zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody, tj. rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, kapaliny a syté páry) jako referenčního a dobře reprodukovatelného teplotního bodu termodynamické stupnice. Termodynamická teplota trojného bodu byla pevně stanovena na hodnotu T=273,16 K. 0 K je teplota absolutní nuly, což je naprosto nejnižší teplota, která je fyzikálně definována jako stav tělesa s nejnižší možnou vnitřní energií.

Každá teplota je charakterizována vlnovou délkou vyzařování, proto je možné měřit ji i bezkontaktně. Bezdotykové měření teploty je založeno na detekci vysílaného elektromagnetického záření těles o vlnových délkách od 1 μm do 14 μm. Uvedený rozsah pokrývá měření teplot v rozsahu od -40 do 3 000 °C. Na tomto principu vznikly bodové (pyrometry) a také maticové měřicí systémy (termokamery), které v poslední době dosáhly velkého rozvoje a stávají se běžně dostupnými. Pro posouzení celkového teplotního obrazu, tedy rozložení teplot, jsou vhodné termografické kamery (termokamery), které vzhledem ke stále širší nabídce rozlišení a citlivostí umožňují rychlé zobrazení a měření. Špičkové nechlazené termokamery v současnosti dosahují rozlišení 1024 x 768 bodů a citlivosti 0,02 °C, ale i cenově dostupné termovizní kamery pro výuku poskytují rozlišení 160 x 120 bodů a citlivost pod 0,1 °C. Tyto přístroje mají velký potenciál nejen pro environmentální výuku, ale i pro výuku fyziky.

## 13.2.1 Měření teploty

### 13.2.1.1. Bodová měření teploty – teploměry

Teploměr je funkční měřicí řetězec, který je v přímém styku s měřeným prostředím a který zahrnuje měřicí čidlo a také zařízení, sloužící k interpretaci výsledku měření. To může být např. stupnice u rtuťového či jiného dilatačního teploměru nebo měřič elektrických veličin u odporových či termočlánkových teploměrů.

Podle fyzikálního principu se senzory teploty dělí na dilatační, odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, optické, radiační, chemické, akustické, magnetické a na další jako jsou např. kapacitní nebo aerodynamické.

Dle styku s prostředím se dělí na dotykové a bezdotykové. S dotykovými teploměry se potkáváme prakticky ve všech spotřebičích, neboť mají vestavěné ochrany proti přehřátí, tradičně pak ve zdravotnictví pro měření tělesné teploty. Pro přesné technické aplikace se používají především odporová platinová čidla nebo termočlánky.

Daleko širší uplatnění dnes díky dostupnosti a zvyšující se kvalitě, získává infračervený teploměr (pyrometr, obr.13.4). Setkáváme se s ním například u lékaře. Je to nejpohodlnější a velmi přesný přístroj na měření povrchové teploty. Infračervený teploměr (IČ = IR/infrared) měří radiační teplotu, tedy intenzitu a vlnovou délku záření vydávaného tělesem.



**Obr. 13.4** Infračervený teploměr

Tyto teploměry mají oproti dotykovým teploměrům řadu výhod:
• V podstatě nezáleží na makroskopické struktuře povrchu.
• Zanedbatelný vliv teploměru na měřený objekt
• Možnost měření velmi rychlých změn teploty
• Měření teploty z bezpečné vzdálenosti
• Možnost měření rotujících nebo pohybujících se objektů

Nevýhodu měření představuje závislost naměřené hodnoty na fyzikálních vlastnostech povrchu – na jeho emisivitě (ε), což je poměr vyzařování měřeného předmětu (tepelného zářiče) k vyzařování černého tělesa při téže teplotě. Pro většinu povrchů v přírodě je hodnota emisivity okolo 0,95, ale pro lesklé kovové povrchy dosahuje hodnot okolo 0,1– 0,2. Kvalitní pyrometry mají nastavitelnou hodnotu emisivity a přibližné hodnoty bývají uvedeny v tabulce, která je součástí návodu na obsluhu přístroje.

### 13.2.1.2. Prostorová měření teploty – termovize

Infračervený teploměr může najednou měřit teplotu pouze v jednom bodě, jehož velikost závisí na optice teploměru a vzdálenosti od objektu. Naproti tomu termokamery mohou měřit rozloženi teploty na celém povrchu objektu. Kupříkladu termokamera FLIR C5 má rozlišení obrazu 160 x 120 pixelů. To znamená, že tato termokamera dokáže současně měřit teplotu v tolika bodech, jako 19 200 infračervených teploměrů. Termokamera FLIR T660 má rozlišení obrazu 640 x 480 pixelů, tj. 307 200 bodů, k jejichž změření by bylo potřeba mít současně k dispozici 307 200 infračervených teploměrů. Infračervená energie pocházející z objektu je soustředěna optikou ze speciálního materiálu do infračerveného snímače, který předává informaci do elektroniky pro zpracování obrazu. Elektronika zpracuje data z detektoru do obrazu, který je viditelný v hledáčku, na standardním video monitoru či LCD obrazovce. Infračervená termografie je diagnostická nedestruktivní metoda, která využívá transformaci infračerveného (teplotního) obrazu na obraz radiometrický, což umožňuje odečtení teplotních hodnot jednotlivých bodů. Každý pixel radiometrického snímku tedy představuje konkrétní hodnotu teploty. Pro tento účel jsou termokamery vybaveny složitými výpočetními algoritmy. Pro přesné určení teploty je potřeba zadat vstupní podmínky: emisivitu povrchu, teplotu okolí (tzv. zdánlivou odráženou teplotou od okolních objektů), vzdálenost objektu, relativní vlhkost a atmosférickou teplotu.

Termokamery dnes pracují s bolometrickými snímači, které snímají oteplení detektoru teplotně závislým odporovým materiálem. Používají se tenkovrstvé mikroelektrické technologie na bázi odporových materiálů z oxidů MgO, MnO, NiO, $TiO_2$ aj. Plošné mikrobolometrické snímače se používají v termokamerách v maticovém uspořádání FPA (Focal Plane Array). Matice se vyrábějí s hustotou od 80x60 do 1024x768 pixelů. Termokamera je cenově dostupná edukační pomůcka, důležitá z několika důvodů:

- Zobrazuje 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).
- Informace zprostředkovaná přes displej je mladým lidem daleko bližší a jsou zvyklí jí zpracovávat.
- U současných i jednoduchých a cenově dostupných termokamer lze informace (termogramy) předávat přes wi-fi rozhraní do tabletů, které se stávají základní učební pomůckou.



**Obr.13.5** Termokamera FLIR T660

## 13.3. Vlhkost, teplota vzduchu a rosný bod

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. 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 rosný bod, vodní pára kondenzuje na vodu kapalnou. Hlavním omezujícím faktorem množství vodní páry ve vzduchu je teplota vzduchu, neboť pro danou teplotu je vzduch schopen pojmout jen omezené množství vodních par. Platí zde úměra, čím vyšší je teplota, tím více je vzduch schopen pojmout vodních par. Naopak pokud je ve vzduchu vodní páry jen velmi málo, může být vzduch chladnější, aniž pára zkondenzuje.

Na měření absolutní i relativní vlhkosti bylo v minulosti vypracováno mnoho měřicích a výpočetních postupů. Například vážením vody, nasáté hygroskopickou látkou při průchodu známého objemu vzduchu. Při metodě měření rosného bodu v lesklé nádobce s éterem vháníme vzduch do nádobky tak dlouho, dokud její teplota neklesne pod rosný bod a následně vypočítáme relativní vlhkost vzduchu. Nejznámější je metoda psychrometrická, kdy měříme teplotu suchého a vlhkého teploměru. Vlhký teploměr je obalený mušelínem a spojený knotem s nádobkou s vodou. Běžné byly vlasové vlhkoměry, využívající vratnou roztažnost vlasu podle relativní vlhkosti vzduchu.

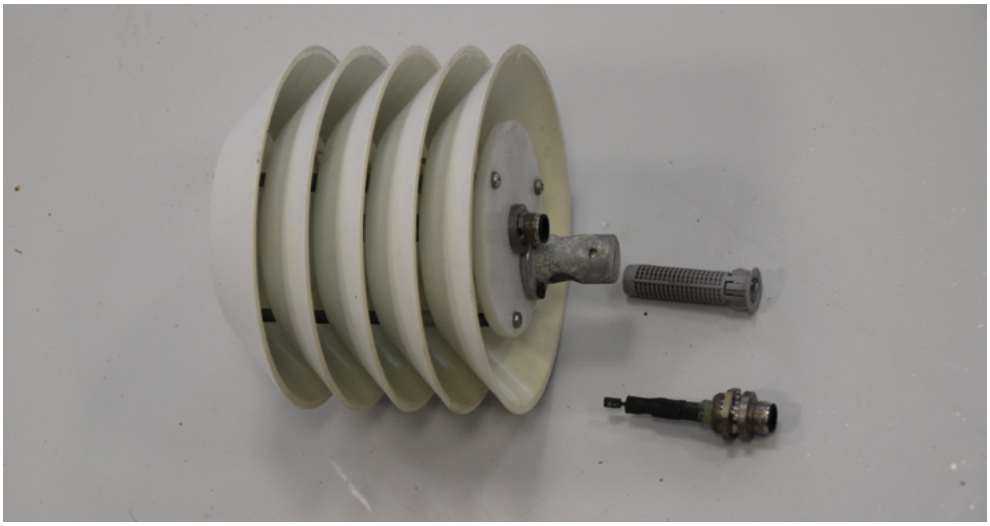
Pro měření vlhkosti vzduchu většinou používáme kombinovaný měřič relativní vlhkosti a teploty vzduchu se záznamem dat. Detektor je tvořen látkou, která mění elektrickou kapacitu v závislosti na vlhkosti, která je měřena přímo pomocí elektrických veličin. Přístroj bývá doplněn odporovým teploměrem.

Měrná hmotnost vodní páry ve vzduchu (absolutní vlhkost vzduchu při 100% vlhkosti, rosném bodu) se vyjadřuje v gramech na 1kg vzduchu nebo v gramech v $1m^3$ vzduchu. V Tabulce 13.1 jsou hodnoty maximální hmotnosti vodní páry v $1m^3$ pro různé teploty při normálním tlaku vzduchu. Je zřejmé, že vzduch o teplotě 30°C pojme 6x více vody nežli vzduch o teplotě 0°C. Obsah plynů ve vzduchu se udává též v objemových jednotkách. Téměř výhradně tomu tak je v případě oxi-

du uhličitého, jehož koncentrace v atmosféře se v současné době pohybuje okolo 430 ppm (pars per milion), tedy 430 ml v 1m$^3$ (krychlový metr = 1 milion ml). Převod jednotek hmotnostních na jednotky objemové je u plynů snadný. Podle Avogadrova zákona zaujímá mol látky v plynném stavu za normálního tlaku a teplotě 0°C objem 22,414 litru. Z 18 gramů (ml) vody tekuté tedy vznikne cca 22 400 ml vodní páry. Je zřejmé, že množství vody ve vzduchu a objem vodní páry ve vzduchu se dynamicky mění a objem vodní páry násobně až řádově převyšuje objem oxidu uhličitého.

**Tab. 13. 1** Maximální hodnoty měrné hmotnosti vodní páry v 1m$^3$ vzduchu při teplotách od 0°C do 40°C za normálního tlaku vzduchu, vyjádřené v gramech na m$^3$ a v objemových jednotkách ppm (ml.m$^{-3}$) $H_2O$.

| **Teplota vzduchu** [°C] | **Max. absolutní vlhkost** [g.m$^{-3}$] | **ppm vodní páry** [ml.m$^{-3}$] |
|---|---|---|
| -20 | 0,9 | 1 112 |
| -10 | 2,3 | 2 841 |
| -5 | 3,4 | 4 200 |
| 0 | 4,8 | 5 970 |
| 5 | 6,8 | 8 400 |
| 10 | 9,4 | 11 600 |
| 15 | 12,8 | 15 900 |
| 20 | 17,3 | 21 500 |
| 25 | 23,0 | 28 600 |
| 30 | 30,4 | 37 800 |
| 35 | 39,6 | 49 200 |
| 40 | 51,1 | 63 500 |



**Obr. 13.6** Čidla vlhkosti a teploty, která se vkládají do meteorologického krytu

## 13.4. Rychlost větru

Další veličinou, se kterou se setkáváme v meteorologickém zpravodajství, je rychlost a směr větru. Běžně se používají pro měření rychlosti větru vrtulové anemometry. Vítr roztáčí vrtulku a podle počtu otáček se stanovuje rychlost větru. Směr větru je detekován směrovým křidélkem, které vítr natáčí do směru svého pohybu. U jednodušších, méně přesných a levnějších přístrojů jsou oba senzory integrovány v jednom těle, preciznější přístroje jsou oddělené, aby se vzájemně neovlivňovaly (obr. 13.7). Dnes se na meteorologických stanicích prosazují ultrazvukové anemometry, které mají celou řadu výhod: jsou přesnější především v zimním období, neboť nemají žádné pohyblivé součásti, které vlivem roztažnosti a změny vlastností maziv mění valivý odpor rotačních součásti. Je u nich možnost 3D provedení, tj. lze s nimi stanovit vektor rychlosti nejen v rovině rovnoběžné se zemským povrchem, ale v celém prostoru.

Pro výuku doporučujeme jednoduchý ruční měřicí přístroj, který v sobě zahrnuje vrtulový anemometr na měření rychlosti větru a také teploměr a vlhkoměr. Na displeji lze současně odečíst rychlost větru a teplotu, dále hodnotu relativní vlhkosti vzduchu, rosného bodu. Je to vhodný doplněk pro ucelený pohled na aktuální meteorologickou situaci (obr. 13.12).

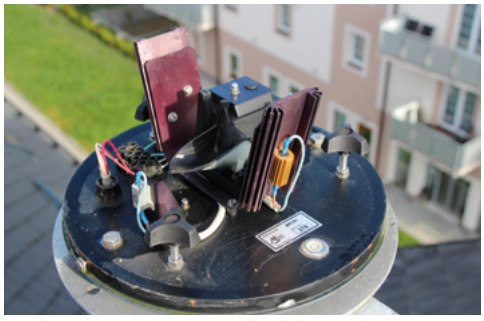


**Obr. 13.7** Vrtulový anemometr instalovaný na meteostanici

## 13.5. Srážky

Velmi důležitým měřicím přístrojem, který by neměl chybět na žádné stanici, je člunkový srážkoměr. Jeho konstrukce je tvořena nádobou kuželového tvaru o známé ploše s výustkou nad kolébkou se dvěma člunky. Srážky, dopadající na definovanou plochu stékají výustkou do člunku. Když se člunek naplní, kolébka se překlopí, člunek se vyleje, zaznamená se pulz a začne se plnit druhý člunek, a to po celou dobu srážek. Pro zimní použití existují srážkoměry s elektrickým odporovým vyhříváním (obr. 13.8).





**Obr. 13.8** vyhřívaný člunkový srážkoměr METEOSERVIS instalovaný na meteostanici ENKI v Třeboni

Od roku 2006 se společnost ENKI, o.p.s. zabývá terénními měřeními meteorologických veličin. Z naměřených dat hodnotíme radiační a energetickou bilanci, tj. toky sluneční energie, evapotranspiraci, toky zjevného, latentního tepla, tok tepla do půdy, atp. Využíváme instrumentaci a přenos dat od firmy Fiedler AMS, včetně datahostingu (obr. 13.9). Postupně vybrána a optimalizována následující sestava měřicích čidel a konfigurace ústředny:

## 13.6. Meteorologické přístroje používané ENKI, o.p.s.

Čidla jsou obsluhována automatickou záznamovou a řídící jednotkou FIEDLER M4016G, která v sobě zahrnuje univerzální datalogger, telemetrickou stanici s vestavným GSM/GPRS modulem, programovatelný řídící automat a energetický zdroj nezávislý na síti, využívající sluneční záření. Součástí stanice jsou stavebnicové moduly a převodníky pro obsluhu jednotlivých čidel. Jednotka umožňuje kontinuální celoroční záznam a přenos dat z 32 měřicích kanálů ústředny na server, odkud je dostupný všem uživatelům. Stanice má příjemné uživatelské prostředí a lze na dálku měnit její parametry. Řídicí jednotka M 4016 se již nevyrábí, ale má svého nástupce, jednotku H7, která má totožné obslužné periferie. Velkou výhodou těchto stanic je bezobslužný provoz v trvání několika roků (naše zkušenosti od r. 2006).



**Obr.13.9** Meteorologická stanice ENKI.o.p.s. od FIEDLER AMS: netradiometr, anemometr, měření teploty a vlhkosti vzduchu ve výšce 0,3 a 2m, člunkový srážkoměr. Dále měření teploty a vlhkosti půdy

Čidla

• Slunečni záření (solární radiace)
Většina stanic je vybavena čidly na měření krátkovlnné radiace, tzv. albedometry. Albedometr měří dopadající a odraženou globální radiaci ve spektrální oblasti 300–2800 nm. Tvoří ho dva pyranometry Kipp&Zonen CM 3 proti sobě, orientované do nadhlavníku (zenit) a do země.

Na dvou stanicích jsou umístěny netradiometry Kipp&Zonen CNR1, které obsahují dvojici pyranometrů Kipp&Zonen CM 3, dvojici pyrgeometrů Kipp&Zonen CG 3 a odporové platinové teplotní čidlo Pt100.

• Teploty a vlhkosti vzduchu
Stanice v základním vybavení obsahuje 3 odporová platinová čidla Pt 100 ve válcovém nerezovém pouzdře ø 5 mm ve 4 vodičovém zapojení s kabelem délky 2 m. Některé stanice mají ještě přídavný modul s 8 kusy. Tato čidla jsou využívána především pro měření v půdním profilu. Další 2 teplotní čidla slouží k měření teploty vzduchu ve výškách 0,3 a 2 m. Čidla Pt100 jsou součástí integrálního čidla Fiedler RVT 09 - RVT13 na měření relativní vlhkosti a teploty, která jsou umístěna ve stínícím krytu, aby hodnoty nebyly ovlivněny dopadajícím zářením (obr. 13.6). Teplotní čidlo je též v tělese netradiometru.

• Směr a rychlost větru
Stanice jsou vybaveny nevyhřívaným anemometrem Tlusťák W2, kde jsou v jednom těle integrovány jak vrtulový měřič rychlosti, tak měřič směru větru.

• Srážky
Využíván je mechanicky odolný člunkový srážkoměr SR02 se sběrnou plochou 200 $cm^2$ a rozlišením 0,2 mm srážek / puls. Kryt a sběrná plocha srážkoměru jsou kovové, plastová je pouze základna nesoucí překlápěcí člunek. Srážkoměry jsou vybaveny korunkou, která zabraňuje ptákům usedat na hranu srážkoměru a zanášet trusem odtokový otvor srážkoměru. Upevnění korunky na horní okraj srážkoměru se provádí pomocí stahovacího nerezového šroubového spojení.

• Snímače vlhkosti půdy

Snímač objemové půdní vlhkosti VIRRIB pracuje v rozsahu od 5 do 50 %, proudový výstup 0–5 mA. Pro správnou funkci snímače je potřeba provozovat měřící systém v úsporném přerušovaném režimu provozu (standardní provoz všech telemetrických stanic FIEDLER).

## 13. 7. Doporučené měřicí přístroje pro výuku

Během dvacetileté praxe měření meteorologických veličin jsme získali značné zkušenosti s měřicí technikou. Na základě těchto zkušeností jsme v rámci tvorby vzdělávacích metodik k tématu sluneční energie – voda v krajině – vegetace ve všech třech variantách, (tj. vysokoškolskou výuku, výuku na ZŠ i vzdělávání pracovníků městských úřadů) navrhli a v praxi ověřili sadu přístrojů pro výuku jednotlivých cílových skupin vzdělávacích metodik. Jednotlivé soubory ověřených měřicích přístrojů včetně přibližných cen aktuálních v roce 2021 jsou součástí vytvořených vzdělávacích metodik (https://www.pf.jcu.cz/projekty/svv/).

Během ověřování přístrojů ve vzdělávání jsme kladli důraz nejen na jejich funkčnost, spolehlivost, a uživatelský komfort, ale také na cenu a náchylnost na poškození při provozu ve výuce. Níže uvedené přístroje uvádíme včetně konkrétních značek právě z toho důvodu, že prošly dlouhodobým ověřením v praxi a ukázaly se být vhodné. V žádném případě však navržený set přístrojů pro výuku nelze chápat jako doporučení či propagaci konkrétních značek. Autoři této publikace nejsou vázáni žádnými smluvními závazky s jednotlivými výrobci či prodejci uvedených značek. Výběr na trhu je velký a neustále se vyvíjí.

Přehled je platný pro podzim 2021.

• měřič výkonu slunečního záření

Kompaktní polovodičový měřič výkonu slunečního záření EXTECH SP505 s podsvětleným LCD displejem, který měří v rozsahu 0-3999 $W.m^{-2}$ a zobrazuje radiaci, dopadající kolmo na vstupní okno v energetických jednotkách ($W.m^{-2}$). Má rychlou odezvu, je nenáročný na obsluhu (jednou rukou) a dává přímou okamžitou informaci o energetickém toku (obr. 13.10).




**Obr. 13.10** Měřič výkonu slunečního záření EXTECH SP 505, kalibrovaný ve W.m$^{-2}$.

Infračervený mini teploměr EXTECH IR 267 je pyrometr s termočlánkovou dotykovou sondou typu K (přechod NiCr-Ni). Bezdotykový infračervený (IR) teploměr měří až do teploty 600 °C (1 112 °F). S vestavěným laserovým ukazovátkem pro lepší identifikaci cíle. Vstup typu K umožňuje měření vysokých teplot až do 1 000 °C. Vestavěné teplotní čidlo měří také teplotu vzduchu. Nastavitelná emisivita umožňuje vyšší přesnost při měření teploty na různých površích. Teploměr má podsvícený displej, hodnoty jsou čitelné i za přímého slunečního svitu.

• záznamník vlhkosti a teplot

Záznamník teploty a vlhkosti (například EL–USB–2–LCD+, obr. 13.11). Velice užitečný měřicí přístroj, který v sobě zahrnuje čidla teploty a relativní vlhkosti a záznamník dat s nastavitelným intervalem ukládání. Přístroj je vybaven displejem na odečet aktuálních hodnot a také USB konektorem pro stažení naměřených hodnot. Software, který je součástí dodávky, zobrazuje na časové ose teplotu, relativní vlhkost a rosný bod. Je velice odolný a vykazuje reprodukovatelnost výsledků po dobu několika let. Přesnost měření teploty ±0,5°C, přesnost měření vlhkosti vzduchu ±2,05 %, rozsah měření teploty -35 až 80 °C.




**Obr. 13.11** Záznamník teploty a vlhkosti

• kapesní termoanemometr

Měřící zařízení EXTECH 45158 - kapesní termo-anemometr pro terénní využití, které dává informaci o aktuálním teplotním a vlhkostním stavu ovzduší. Užitečné pro studenty středních a vysokých škol. Přesnost měření teploty ±1 °C, rozlišení měření teploty 0,1 °C, měření rosného bodu od 0 do 50 °C, rozsah měření relativní vlhkosti vzduchu od 10 do 95 %, přesnost měření vlhkosti vzduchu ±4 %, rozsah měření rychlosti větru mezi 0,5 až 28 $m.s^{-1}$ (obr. 13.12).




**Obr. 13.12** Kapesní termo-anemometr EXTECH 45168

• termokamera FLIR C5

Kapesní termokamera FLIR C5 se běžně využívá pro rychlou kontrolu elektrických i mechanických zařízení a stavebních objektů na kratší vzdálenosti (obr. 13.13). Díky kompaktním rozměrům o velikosti mobilu a stativovému závitu je velmi vhodná právě k edukačním účelům. Speciální obrazová funkce MSX umožňuje prolnutí kontur z vestavěného fotoaparátu do termovizního obrazu, což zvyšuje kontrast objektu a je využitelná zejména ve výuce při pokusech s ohřevem a ochlazováním objektů atd.

Základní vlastnosti kapesní termokamery FLIR C5:

• rozlišení snímače: 160 x 120 bodů frekvence 9 Hz
• citlivost snímače: < 0,07 °C, přesnost +/- 2 % nebo +/- 2 °C
• úhel záběru: 54° x 42°
• rozsah měřených teplot: -20 °C až 400 °C
• vestavěná digitální kamera pro ukládání foto snímků
• ukládání IR termogramů v rozšířeném formátu JPEG (vyhodnotitelný), ukládání IR videa
• wifi komunikace s tabletem, SmartPhone




**Obr. 13.13** termovizní kamera TELEDYNE FLIR C5

## Literatura

Brož, J. (1983). Základy fyzikálních měření, Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 673 s.
Kamarád, J. a kol. (1974). Základní kvalifikační učebnice přesná mechanika a optika. Práce, 720 s.
Kleczek, J. (2002). Velká encyklopedie vesmíru. Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, 582 s.
Kreidl, M. (2005). Měření teploty – senzory a měřicí obvody. BEN technická literatura, Praha, 240 s.
Lysenko, V. (2005). Detektory pro bezdotykové měření teplot. BEN technická literatura, Praha, 160 s.
Matuška, T. (2009). Solární tepelné soustavy. Společnost pro techniku prostředí, Praha, 194 s.
Firemní literatura Kipp & Zonen, Delft, Nizozemsko
Firemní literatura Spektravision, s.r.o. – zástupce TELEDYNE FLIR v České a Slovenské republice
Firemní literatura FIEDLER AMS, s.r.o.

# Summary

The effect of human activity on local and global climate is one of the most debated issues of our time. Adaptation to climate change and mitigation of the effects these changes are bringing have begun to impact the lives of individuals and society as a whole. Radiative forcing from increasing concentrations of greenhouse gases is recognized as the major driver of climate change. However, vegetation cover also plays a key role in structuring local climates via its impacts on surface energy balance and the hydrologic cycle. Therefore, management of vegetation and the associated hydrologic cycle can be leveraged as an effective tool to lessen the impacts of climate change. Harmful interventions in the management of vegetation cover and hydrologic cycle in the landscape, caused by the lack of understanding of the principles that govern the impacts of vegetation cover and hydrologic cycle on the partitioning and dissipation of solar radiation, increase the impact of climate change, including substantial increase variability of temperature including temperature extremes, long periods of drought punctuated by extreme precipitation events, and persistent increase in aridity of the landscape.

This lack of understanding is evident in the general population, among decision makers, and even among experts. It can be traced to the absence of this topic in school curricula. Recent research into the level of understanding of these processes by students from primary schools, high schools, and universities has found a systematic lack of knowledge regarding the partitioning of solar energy at the levels of individual plants, landscape vegetation cover, and the key role of changes in the phases of water in energy partitioning. State and local officials, who are entrusted with making decisions about the development and growth of cities, care for green spaces in the cities and countryside and landscape-level vegetation changes in agriculture and forestry, lack access to guiding documents that would clearly explain the role of plants and vegetation cover in creating and structuring local climate and the environment in general.

The book is a well-organized source of information directly useful for creation of climate adaptation strategies for towns and cities, useful for creation and

management of climatically self-regulating landscapes, and for instruction in schools. International pedagogical literature identifies fragmentation and isolation of instruction in individual disciplines such as physics, chemistry, biology, and foundations of meteorology as one of the underlying causes of deficiency of knowledge and poor instruction in interdisciplinary fields. What is missing is a holistic, system-level perception and understanding of the physical reality that surrounds us. Modern didactic approaches in pedagogy place an emphasis on interdisciplinary connections in the instruction of environmental sciences. The role and importance of vegetation as a driver of climate and a driver of the hydrologic cycle were known already in ancient Greece and the process of evapotranspiration has come to the forefront of scientific investigation in the middle of the 20$^{th}$ century. However, currently a concept of "plant blindness" had to be coined, which brings to the forefront our collective amnesia about the role of plants in the distribution and partitioning of solar energy and their key impact on the hydrologic cycle via evapotranspiration, rather than photosynthesis, our amnesia of the fact that through evapotranspiration plants actively cool themselves and the environment around them, through changes in the cloud formation they draw in water vapor over large distances, and collectively they are a key driver of climate on local, regional, and continental scales. Yet the function of vegetation in driving climate is often reduced to its ability to sequester and emit greenhouse gases via photosynthesis and respiration. The lack of knowledge of the basic physiological principles of physiological functioning of vegetation leads to misinterpretation of the results of empirical and modelling studies that focus on biophysical impacts of vegetation on climate.

The goal of this book is to overcome the barriers among individual academic disciplines. The book aims to present, in an approachable manner, the scientific basis of understanding how human activities impact flows of energy in the landscape.

The book opens with a chapter on the evolution of historical civilizations that archaeologists now uncover under layers of sand in the arid deserts of the present time. The following chapters deal with solar energy, climate across spatial scales and the role of vegetation in partitioning of solar radiation using disequilibrium thermodynamics of open systems. The book uses examples of daily measurements of incoming solar radiation, reflected solar radiation, and the exchange

of heat between the surface of the Earth and the atmosphere to show the key role of water vapor and clouds in governing the total amount of incoming energy and energy radiated into space and the atmosphere. The following chapters explain the function of plants in the partitioning of solar radiation via transpiration (evaporation of water from the plants controlled by stomata) and photosynthesis, both at the level of a single plant and at the level of a plant stand. In the remote sensing chapter, we introduce empirical data that enumerates the cooling power of vegetation. We utilize state-of-the-art methodology for instrumentation, measurements and data analysis in their spatial context, including environmental spatial thermography ground-truthed with point measurements using meteorological instrumentation. We show how deforestation and enhanced water drainage across the landscape cause an increase in surface temperature, an increase in air temperature, eventually driving the landscape to become more arid.

Compared to the first edition, in the second edition we have included in Chapter 5 an example of radiation balance measurements during night frost in spring and an example of 'cloud dissolution' over a superheated drainage area in late summer. We have added recent work in the emerging field of 'the function of vegetation in shaping regional to global climate' to the reference list of some chapters.

A special chapter is dedicated to the description of instrumentation used for scientific studies and instrumentation recommended for educational purposes. The Pedagogical Section of the book explains the results of scientific investigations of the role of vegetation in the water cycle and partitioning and distribution of solar energy in the landscape. It brings to attention common misconceptions that students have about the material, so that these misconceptions can be addressed in the classroom. The Section also reviews current didactic methods that we found especially useful in teaching the subject. It also includes concrete suggestions for instruction. The book offers an in-depth expert analysis of newly created pedagogical methods that specifically focus on the topics of Solar Energy – Water in the Landscape – Vegetation at three different levels (1) Methods of instructions for university students in Education Departments training to be biology teachers in primary schools, (2) Methods of instruction for students in 9$^{th}$ grade of primary school and multi-year Gymnazium high schools, (3) Methods of continued professional education for employees and decision makers of city

and local governments with the emphasis on how management decisions can impact local climate via changes od partitioning of solar energy and changes in the hydrologic cycle. All of the methodologies introduced by the book, the book itself, and additional materials are available free of charge at the following address: https://projekty.pf.jcu.cz/svv/.

The first edition of the book and the related methodologies were also very well received abroad. Foreign universities and other institutions focused on teacher education have also been interested in including these topics in their curricula. The book has thus become the basis for further educational materials on the role of plant climatology, which have been co-authored by the authors of this book and are freely available online. For example, in the framework of the international ERASMUS+ project Education for Plant Literacy https://planteducation.eu/ the consortium of partners of which the authors of this publication were part has produced a series of learning activities and videos in five languages, including English.

The book has also become the theoretical basis for the creation of the digital interactive textbook 'Biomass in Sustainable Landscapes for Secondary and Primary Schools', which innovatively presents the topic of photosynthesis in an ecological context, considering the role of photosynthetically produced biomass in the overall landscape context https://fotosyntezavkrajine.cz/. These materials are the basis for the ongoing project NPŽP-NPO 2/2023 "Climate. It won't work without water and vegetation." The project focuses on explaining the principles of the importance of landscape cover for local climate and water regimes that should be taken into account in mitigating and preventing the impacts of climate change and is aimed primarily at government staff.

The authors of the book draw upon their extensive research expertise and practical experience. It is partially grounded in research conducted by scientists at ENKI, o.p.s., in Třeboň, focusing on the landscape-level flow of solar energy and the ecophysiology of plants. Additionally, experts from the Faculty of Education at the University of Southern Bohemia in České Budějovice present findings from their didactic studies, emphasizing the gaps in knowledge and misconceptions that students often hold regarding the subject matter. The authors propose strategies to address these knowledge deficiencies and misconceptions by utilizing modern didactic techniques and appropriate scientific instruments.

# Odborná charakteristika autorů

**Doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc.**
Absolvoval Přírodovědeckou fakultu UK Praha (biologie, chemie, obor fyziologie rostlin). V Botanickém ústavu ČSAV se věnoval vývoji metod měření fotosyntézy a evapotranspirace rostlin, obnově mokřadů a později úloze vegetace v tocích sluneční energie, oběhu vody a utváření klimatu. Na pozvání CSIRO Australia působil jako visiting scientist, ve spolupráci s Rakouskou akademií věd, IHE Delft a Universität für Bodenkultur Wien vedl mezinárodní limnologické kurzy. Přednášel 26 let ekofyziologii rostlin na Přírodovědecké fakultě UK v Praze, dále Water Quality Management v rámci programu ERASMUS v Turku/Finsko atd. Člen STRP Ramsarské konvence, 8 let člen Výzkumné rady TAČR. Řešitel národních a EU výzkumných projektů, včetně opakovaného působení ve východní Africe. Zakladatel a dlouholetý ředitel ENKI, o.p.s.

**RNDr. Renata Ryplová, Ph.D.**
Odborná asistentka katedry biologie Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích. Absolvovala Přírodovědeckou fakultu UK Praha v oboru učitelství biologie matematika a následně Ph.D. studium v oboru anatomie a fyziologie rostlin na téže fakultě s disertační prací zaměřenou na rostlinné emise terpenoidních látek do atmosféry. V rámci Ph.D. studia absolvovala dlouhodobou stáž na Technické univerzitě v Mnichově a Frauenhoferově institutu pro výzkum atmosféry a životního prostředí v Garmich-Partenkirchenu. Zabývá se ekofyziologií rostlin a v posledních letech zejména didaktikou botaniky se zřetelem na moderní aktivizační způsoby výuky jako je badatelská či projektová výuka. Ve své výzkumné činnosti se zaměřuje na problematiku lhostejnosti vůči rostlinám (tzv. „plant blindness“) a učení v přírodě s využitím moderních technologií. Své zkušenosti v této oblasti prezentuje na četných mezinárodních konferencích a během zahraničních stáží přednáší také na univerzitách v Evropě i USA. V oboru didaktiky botaniky je řešitelkou několika národních a mezinárodních projektů.

**Ing. Vladimír Jirka, CSc.,**
V roce 1980 absolvoval ČVUT v Praze, Fakultu strojní, obor jemná mechanika a optika. V letech 1983-1987 absolvoval postgraduální studium na Turkmenské akademii věd, specializace využití solární energie. Zabývá se vývojem zařízení na využití sluneční energie, jejich měření a interpretací v technických a přírodních systémech. Multidisciplinárně propojuje technické a biologické obory. Věnuje se termografii, mechanické a optické konstrukci detektorů slunečního záření, IR spektrofotometrii, Fresnelovým čočkám a jiným lineárním optickým rastrům. Autor několika patentů, užitných vzorů, odborných článků. Působil ve Fyzikálním ústavu ČSAV, později v Botanickém ústavu AVČR, od roku 1998 v ENKI, o.p.s. a od r 2013 v UCEEB ČVUT, kde se zabývá vývojem hybridních fotovoltaických a fototermálních systémů a jejich měřením.

**RNDr. Petra Hesslerová, PhD.,**
Vystudovala fyzickou geografii a geoekologii na Univerzitě Karlově v Praze. V letech 2005 – 2006 zastávala pozici ve Výzkumném ústavu meliorací a ochrany půdy v Praze jako technik vědy a výzkumu. Od roku 2006 pracuje v ENKI, o.p.s. Pět let působila jako odborná asistentka na Fakultě životního prostředí ČZU Praha, od roku 2021 částečně i na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích. Věnuje se metodám dálkového průzkum Země, GIS a termovize pro hodnocení toků energie, vody a látek v krajině ve vztahu ke krajinnému pokryvu, tepelným ostrovům měst a setrvalému hospodaření v krajině. Metody DPZ rozvíjela při řešení EU projektů ve východní Africe a má terénní zkušenosti z Asie, Jižní Ameriky. Své profesní aktivity uplatňuje v národních či mezinárodních projektech, publikacích i přednáškách.

**Mgr. Zbyněk Vácha, Ph.D.**
Vystudoval Pedagogickou fakultu Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích v oboru učitelství přírodopisu a zeměpisu pro druhý stupeň základních škol. Pedagogické vzdělání si pak doplnil prostřednictvím doktorského studia v programu Vzdělávání v biologii organizovaného Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích a UK v Praze. V rámci Ph.D. studia absolvoval dlouhodobé zahraniční stáže na vzdělávacích institucích v Litvě, Španělsku, Švýcarsku a Velké Británii. Aktuálně působí jako odborný asistent katedry biologie Pedagogické fakulty

Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích. Zabývá se didaktikou přírodovědy, přírodopisu a biologie, s důrazem na inovativní vyučovací metody. Ve výzkumných pracích se zaměřuje na efektivitu výuku v terénu, především v prostředí školních zahrad a s tím spojenou pěstitelskou gramotnost. V rámci zahraničních cest posbíral mnoho zkušeností se školstvím v nejrůznějších částech Afriky a Asie.

# Poděkování

Tato kniha 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, realizovaného v letech 2018–2021. 2. vydání bylo podpořeno z projektu Klima? Bez vody a vegetace to nepůjde! č. 5230200040, Program NPŽP-NPO 2/2023. Autorský kolektiv tak mohl reagovat na velký zájem veřejnosti,

Autoři děkují RNDr. Janě Dobrorukové za kritické připomínky k celému textu, návrhy stylistických úprav a doporučení odborných termínů srozumitelných pro didaktické pojetí s ohledem na středoškolskou úroveň vzdělávání. Ing. B. Šourkovi, PhD., patří díky především za připomínky k měření sluneční energie a interpretaci naměřených dat. Poděkování patří také řadě učitelů a ředitelů základních škola i víceletých gymnázií, kteří umožnili na svých školách výzkumná šetření, jež byla podkladem pro didaktickou část této knihy a svými komentáři a připomínkami přispěli ke zdárnému dokončení podkladů pro výuku. Při psaní textů autoři těžili ze zkušeností získaných zejména ve výuce na školách v Českých Budějovicích a v Dačicích a konzultací se spoluřešiteli projektu, pracovníky Městských úřadů v Dačicích (Ing. J. Müller, Ing. L. Skořepa) a v Třeboni (Ing. V. Fliegelová, Ing. J. Fliegel). K hodnocení naměřených dat a zpracování výsledků do grafů přispěla Mgr. Anna Huryna, Ph.D. z ENKI, o.p.s. Úvod do angličtiny kreativně přeložil Assoc. Prof. M. Kummel z Colorado College, USA.

Díky patří také spoluautorům vědeckých publikací, ze kterých autoři při psaní textu vycházeli a které zahrnují období několika desítek let výzkumné práce i stovek aktivních účastí na národních a mezinárodních konferencích o efektu vody a vegetace na distribuci sluneční energie a klima. Z řady vynikajících osobností rozvíjeli holistický přístup zejména astronom doc. Josip Kleczek a profesor Wilhelm Ripl z Technické Univerzity Berlín.

Za neúnavnou a trpělivou práci při zpracování děkují autoři grafičce, paní B. Solperové.

## Doporučená citace:

Pokorný, J., Ryplová, R., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2025). Slunce – voda – rostliny – klima: Podklady k poznání a výuce. ENKI, o.p.s. (2025) Třeboň, 239 stran, ISBN 978-80-908090-3-1

Kniha i vytvořené vzdělávací metodiky (včetně souvisejících pracovních listů a výukových videonahrávek) jsou dostupné široké veřejnosti zdarma zde: https://projekty.pf.jcu.cz/svv/.

## Vzdělávací metodiky:

Ryplová, R., Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2021a). Metodika výuky k tématu Sluneční energie – voda v krajině – vegetace pro žáky 9. ročníků ZŠ a víceletých gymnázií. ENKI, o.p.s.,Třeboň, 2021, ISBN 978-80-908090-0-0

Ryplová R., Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2021b). Metodika výuky k tématu Sluneční energie – voda v krajině – vegetace pro VŠ studenty učitelství přírodopisu pro ZŠ a učitele z praxe. ENKI, o.p.s.,Třeboň, 2021,ISBN 978-80-905483-8-1

Pokorný, J., Ryplová R., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., Procházka, M., (2021). Nová metodika vzdělávání pracovníků městských úřadů na téma Sluneční energie – voda v krajině – vegetace k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima

## Další doporučené navazující vzdělávací materiály:

https://fotosyntezavkrajine.cz/
https://planteducation.eu/

Vydání 2., rozšířené. 2025 ENKI, o.p.s., Třeboň.
ISBN 978-80-908090-3-1






Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

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



Kniha vychází již v druhém, rozšířeném vydání. Je informačním zdrojem pro všechny, kteří chtějí porozumět klimatizační roli vegetace ve funkční krajině schopné udržet dostatečnou zásobu vody jako základní podmínky rozvoje života. Autorský kolektiv složený z vědeckých pracovníků ENKI, o.p.s. Třeboň, dlouhodobě se zabývajících ekofyziologií rostlin a toky sluneční energie v krajině a odborníků z Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích v oboru didaktiky biologie přináší na základě svých dlouholetých výzkumů srozumitelnou, komplexní a pro vzdělávací proces využitelnou informaci o roli rostlin v distribuci sluneční energie, koloběhu vody v krajině a utváření místního klimatu. Svým výkladem kniha doplňuje soubor vzdělávacích metodik k tématu „sluneční energie – voda v krajině – vegetace“ vytvořených v rámci projektu TAČR TL 01000294 ( https://projekty.pf.jcu.cz/svv/). Ačkoliv je kniha určena především uživatelům těchto metodik, tedy učitelům, studentům, či pracovníkům městských úřadů, může zaujmout i běžného čtenáře s hlubším zájmem o pochopení příčin rozšiřujícího se kontinentálního sucha, rostoucích teplot či extrémních přívalových srážek.

V úvodní kapitole autoři poukazují na osud historických civilizací, jejichž zbytky se nacházejí pod vrstvami písku. Následují kapitoly o podnebí a sluneční energii včetně příkladů měření jejích denních chodů a toků tepla mezi povrchem Země a atmosférou. Vysvětlen je vztah mezi vázáním sluneční energie do biomasy rostlin fotosyntézou, současně probíhajícím výparem vody z listů, a jeho chladícím efektem jak na úrovni rostliny, tak i na úrovni porostů. Uvedeny jsou také příklady využití metod dálkového průzkumu Země pro hodnocení efektu odlesnění a odvodnění na vzestup povrchových teplot. Nechybí ani popis přístrojové techniky pro vědecké práce. Pro oblast výuky autoři přinášejí konkrétní ověřené náměty společně s popisem didaktických metod a doporučenými vhodnými měřicími přístroji pro žákovské badatelské experimenty. Druhé vydání přináší nové výsledky měření radiační bilance, odkazy na nejnovější literaturu a vzdělávací materiály vytvořené v návaznosti na vydání první.