

# 6 Energie v agroekosystémech

Podmínkou života na Zemi je příkon sluneční energie. Život na ní se vyvíjel po několik miliard let díky této sluneční energii, kterou bereme jako samozřejmost. Cílem této kapitoly je podat základní informace o množství **sluneční energie**, která přichází na Zemi, a jak se v agroekosystémech využívá. Člověk vkládá do agroekosystémů **dotatkovou energii** ve formě hnojiv, pesticidů, fosilních paliv i prostřednictvím mechanizace a lidské práce. Uvádíme proto i množství dodatkové energie vkládané hospodářem do agroekosystémů, aby bylo možné kvantitativní porovnání energetických vstupů. Člověk hospodáří v krajině na rozsáhlých plochách a ovlivňuje tak toky velkého množství sluneční energie. Tím ovlivňuje i oběh vody, toky látek a místní klima. V závěru kapitoly o energii v agroekosystémech se proto zabýváme úlohou hospodáře v energetické a látkové bilanci krajiny a kritérii udržitelného hospodaření.

## 6.1 Sluneční energie

Plochou  $1 \text{ m}^2$  prochází na hranici zemské atmosféry průměrně  $1\,367 \text{ W}$ . Tuto energii nazýváme **solární konstantou**, protože pro průměrnou vzdálenost Země od Slunce je stálá. Množství sluneční energie, které přichází na hranici zemské atmosféry, se ovšem v průběhu roku mění v rozsahu  $1\,412$  až  $1\,321 \text{ W}\cdot\text{m}^2$  podle vzdálenosti Země od Slunce na její eliptické dráze. Vynásobíme-li hodnotu solární konstanty průřezem Země, zjistíme, že nám Slunce dává  $180\,000 \text{ TW}$  energie ( $\text{TW} = \text{bilion wattů}$ ). Evidovaná spotřeba energie celé lidské populace na Zemi je pouze  $10 \text{ TW}$  – máme tím na mysli spotřebu registrovanou v ekonomice, tedy energii vyráběnou spalováním uhlí, nafty, zemního plynu, energii z jaderných elektráren, biomasy i energii obsaženou v potravě. Sluneční energie udržuje na Zemi teplotu příhodnou k životu. Bez příkonu sluneční energie by Země vychladla na několik Kelvinů, tedy na teplotu kolem  $-260 \text{ }^\circ\text{C}$ , její teplota by se blížila k absolutní nule. Slunce tedy stačí „vytápět“ povrch naší planety na přijatelnou teplotu (průměrně kolem  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), přestože okolo ve vesmíru je teplota o více než dvě stě stupňů nižší. Slunce ohřívá naši planetu asi o  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Na Slunci, v bezpečné vzdálenosti od naší Země ( $150$  milionů kilometrů), probíhá již několik miliard let fúze jader vodíku na jádra helia, ta jsou o něco lehčí nežli do reakce vstupující jádra vodíku. Rozdíl hmotností je podle známého Einsteinova vztahu ( $E = m\cdot c^2$ ) úměrný množství uvolněné energie. Tímto způsobem se z jednoho kilogramu těžkého vodíku uvolní jadernou fúzí  $333$  bilionů  $\text{Wh}$  ( $333$  miliard  $\text{kWh}$ ). Tato reakce bude probíhat ještě miliardy let. Slunce je tedy z hlediska délky lidského života i z hlediska délky lidských civilizací nevyčerpatelným zdrojem energie. Termojaderná reakce probíhá v horké plazmě uvnitř Slunce při teplotě několika milionů  $\text{K}$ . Slunce je bezpečný reaktor. Přehřátí vede ke zvýšenému uvolňování energie, což by mělo znamenat další zvýšení teploty až ke katastrofickému výbuchu. K tomu ovšem nedojde, protože zvýšení teploty je provázeno zvýšením tlaku, zvýšení tlaku vede ke zvětšení objemu, a tudíž ke snížení teploty – Slunce má prostor pro samoregulaci.

Zatímco uvnitř Slunce je teplota několik milionů  $\text{K}$ , povrch Slunce má teplotu přibližně  $6\,000 \text{ K}$ . Teplotou povrchu je určeno spektrální složení emitovaného záření: s rostoucí teplotou se maximum emitovaného záření posunuje ke kratším vlnovým délkám. Vlnová délka emitovaného záření tedy závisí na absolutní teplotě tělesa ( $T$ ), maximum vlnové délky se vypočítává podle Wienova zákona posuvu ( $\lambda_{\text{max}} = 2897/T$ ).

**Spektrální rozsah slunečního záření** je  $30$  až  $3\,000 \text{ nm}$ , většina sluneční energie přichází v oblasti viditelného záření, energetické maximum je okolo  $500 \text{ nm}$ . Vlnové délky nižší než  $400 \text{ nm}$  připadají UV záření, které lidské oko neregistruje. Vlnové délky přibližně  $400\text{--}700 \text{ nm}$  připadají na fotosynteticky aktivní světelné záření, vlnové délky nad  $800 \text{ nm}$  se již počítají k infračervenému záření, tedy k záření tepelnému.

UV (ultraviolet = ultrafialové) je záření o vlnových délkách nižších než  $400 \text{ nm}$ , tedy záření kratších vlnových délek, než vnímá lidské oko. UV záření se pohlcuje v horních vrstvách atmosféry, zejména díky ozónu. Je-li ozónová vrstva v atmosféře slabší, prochází na povrch zemský více UV záření s vlnovou délkou pod  $400 \text{ nm}$ . UV záření tvoří pouze několik procent sluneční energie přicházející na zemský povrch. Jeho

zvýšení je však velmi nebezpečné nejenom člověku a dalším živočichům, ale i rostlinám, zejména jehličnatým stromům.

Pro fotosyntézu rostlin má přímý význam jen část slunečního spektra: 400–700 nm (**fotosynteticky aktivní záření, FAR**), co do množství energie tvoří necelou polovinu (45 %) **záření globálního**.

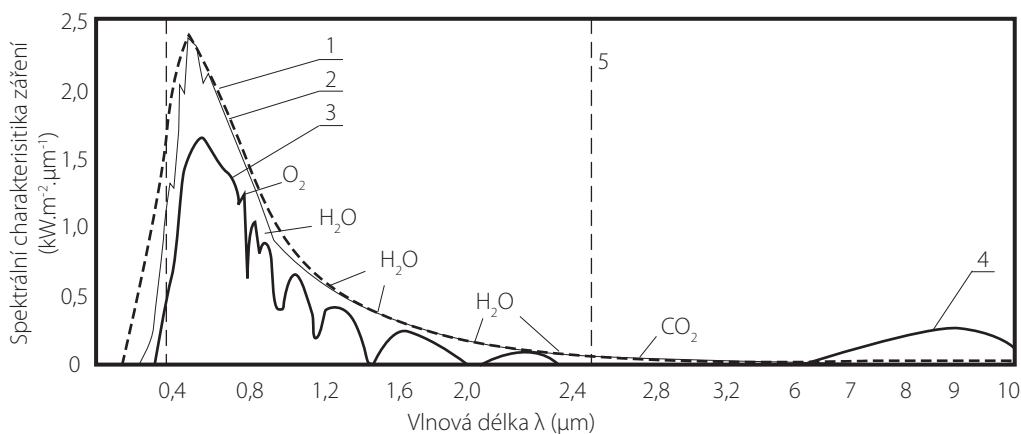
Obrázek č. 85 znázorňuje změny spektra slunečního záření po jeho průchodu atmosférou, pro srovnání je uvedeno emisní spektrum černého tělesa při teplotě 6 000 K (teplota povrchu Slunce) a spektrum záření zemského povrchu při teplotě 300 K. Na obrázku je též vymezena ta část spektra, která prochází sklem. Je patrné, že jím neprochází **záření UV** ani teplo (dlouhovlnné červené záření).

Po průchodu atmosférou je spektrum slunečního záření ochuzeno o některá pásma. Při jasné obloze se dostávají na povrch zemský v našich podmínkách až dvě třetiny hodnoty solární konstanty. V atmosféře se tedy pohlcuje nejméně jedna třetina záření. Při průchodu atmosférou se sluneční záření absorbuje zejména ve vodní páře, rozptyluje se a odráží na částicích a aerosolech.

Veškeré **sluneční záření** přicházející na zemský povrch se nazývá **globální**, zahrnuje přímé i rozptýlené záření všech vlnových délek. Při zatažené obloze postrádá sluneční světlo dopadající na zemský povrch složku záření přímého, je tvořeno pouze zářením rozptýleným. Hustá oblačnost pohlcuje velkou část slunečního záření. Zatímco při jasné obloze přichází na zemský povrch až 1 000 W.m<sup>-2</sup> slunečního záření, při husté oblačnosti prochází pouze několik desítek W.m<sup>-2</sup>. Lidské oko se dokonale přizpůsobuje intenzitě světla změnou velikosti zornic. Proto jsme schopni vidět jak při plném slunečním svitu, tak i v šeru měsíčního svitu, který dosahuje hodnot tisíců W.m<sup>-2</sup>. Naše oko nám tedy umožňuje vidění v rozsahu více než šesti řádů intenzity světla. Díky této akomodaci oka dokážeme ovšem jen těžko intenzitu světla kvantifikovat.

### ■ Jednotky

Jednotkou intenzity záření (správně, ale poněkud těžkopádně „jednotkou intenzity zářivého toku“)



Legenda:

1. diagram intenzity záření černého tělesa o teplotě  $T = 5900$  K podle Planckova zákona
2. diagram intenzity slunečního záření na hranici zemské atmosféry
3. diagram intenzity slunečního záření na zemském povrchu
4. diagram intenzity záření zemského povrchu o teplotě  $T = 300$  K podle Planckova zákona
5. hranice spektrální propustnosti běžného skla (propouští krátkovlnné záření)

**Obr. 85** Změny spektra slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením emisního spektra černého tělesa při 5900 K (Podle Rosenberg 1974)

je **watt (W)**, tedy Joule za sekundu ( $J \cdot s^{-1}$ ). 1 watt je výkon, při němž se vykoná práce 1 joulu za 1 sekundu. Energie dopadajícího záření se potom vyjadřuje v sumách J na jednotku plochy nebo ve watt hodinách (Wh) Množství energie vyjádřené v Joulech se převádí na Wh vydělením 3 600 (počet sekund v jedné hodině). V našich podmínkách v růstové sezoně dopadá průměrně  $16 MJ \cdot m^{-2}$  ( $4,4 kWh$ ) za den. V letním dnu dosahuje sluneční záření hodnot **až  $1\,000 W \cdot m^{-2}$** . V mírném pásmu přichází za rok 1 100–1 200 kWh sluneční energie na metr čtvereční. Maximální množství sluneční energie přichází za rok v suchých oblastech subtropického a tropického pásma – až  $3\,000 kWh \cdot m^{-2}$ .

Kromě wattu se používají i další jednotky k vyjádření toku slunečního záření. Jednotka **Einstein (E)** vychází z kvantové povahy světla a vyjadřuje 1 mol světelných kvant. V našich podmínkách při plném slunečním svitu přichází asi  $1\,800 \text{ mikroE} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Je zřejmé, že určitý počet kvant například v modré oblasti spektra má vyšší energii nežli stejný počet kvant světla červeného.

Jinou, zejména dříve obvyklou jednotkou, je **lux**. Tato jednotka vychází z citlivosti lidského oka. Plný sluneční svit odpovídá asi 120 000 luxů. Jeden lux je odvozen od svítivosti povrchu černého tělesa rozžhaveného na teplotu tuhnutí platiny ( $1773\text{ }^\circ\text{C}$ ).

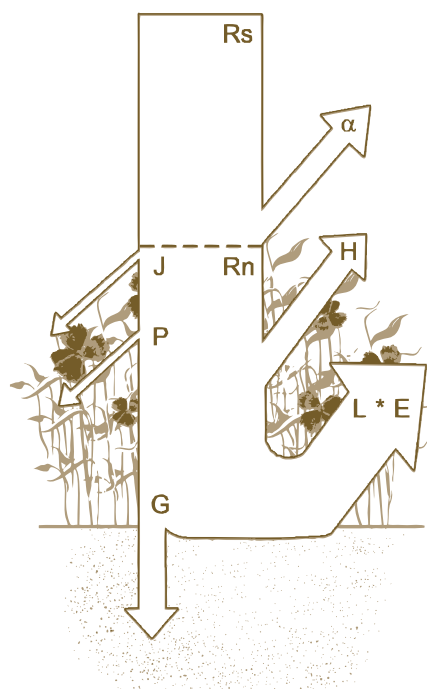
Soustavné měření slunečního záření v energetických jednotkách, případně v Einsteinech se postupně rozšiřuje s dostupností čidel a záznamových zařízení. V běžných meteorologických stanicích se délka slunečního svitu tradičně měří Stokesovým heliografem, obdivuhodným a spolehlivým zařízením: skleněná koule koncentruje sluneční záření a vypaluje úzký proužek do pásky ze silného papíru. Vypálená stopa určuje délku slunečního svitu, neurčuje však množství dopadlého záření.

Při kvantitativním hodnocení slunečního záření musíme vždy brát v úvahu spektrální citlivost používaných čidel. Jako standard se užívají čidla pro měření krátkovlnného záření v rozsahu 300–2 800 nm (například Kipp & Zohněn CM 11). Z těchto měření jsou sestaveny tabulky ročních příkonů slunečního záření pro celý svět. Rostlinná fyziologie často používá čidla o spektrálním rozsahu FAR (fotosynteticky účinné záření, 400–700 nm). Pro celkovou radiační

bilanci je nutno měřit i dlouhovlnné záření v rozsahu 5–50  $\mu\text{m}$ .

## 6.2 Distribuce slunečního záření na zemském povrchu

Sluneční záření, které přichází na zemský povrch, se částečně odráží, částečně ohřívá povrch Země a od kterého se ohřívá vzduch (obr. 86). Ten turbulentně proudí vzhůru (zjevné teplo), část energie se spotřebuje na výpar vody (latentní, skryté teplo evapotranspirace) a část přechází do země (tok tepla do půdy).



- $R_s$  globální radiace (global radiation)
- $R_n$  čistá radiace (net radiation)
- $J$  hromadění tepla v biomase (heat storage)
- $P$  fotosyntéza (photosynthesis)
- $G$  tok tepla do půdy (ground heat flux)
- $\alpha$  albedo
- $H$  zjevné teplo (sensible heat flux)
- $L \cdot E$  latentní teplo výparu\* evapotranspirace (latent heat of vaporation x evapotranspiration)

**Obr. 86** Schéma toků sluneční energie (Pokorný et al. 2007)

Sluneční záření přicházející k Zemi obsahuje tedy následující složky:

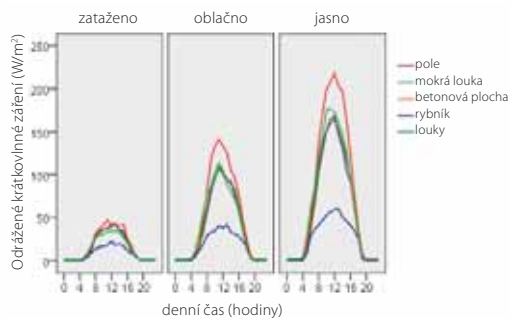
**Odražené záření:** Distribuce sluneční energie závisí na povaze zemského povrchu, část záření se odráží hned po dopadu. Poměr mezi zářením odraženým a dopadajícím se nazývá albedo (bělost). Vysoké albedo (vysoký odraz) má světlý, suchý povrch. Naopak nízké albedo má tmavý povrch a zejména voda, a tedy i vlhká vegetace. Na obrázku 87a jsou znázorněny průměrné denní průběhy odraženého krátkovlnného slunečního záření pro vodní hladinu rybníka, mokrou louku, louku, pole a betonovou plochu. Průměrné denní chody albeda jsou vyneseny v obrázku č. 87b. Je zřejmé, že nejvyšší odraz má betonová plocha (25–30%), nejnižší albedo má vodní hladina (okolo 10%), vegetace odráží okolo 20% přicházejícího slunečního záření. Vysoké hodnoty albeda ráno a večer jsou způsobeny jednak nízkým úhlem slunce, jednak nízkými hodnotami jak přicházejícího, tak odraženého záření.

**Čistý tok záření** (krátkovlnného a dlouhovlnného) mezi zemským povrchem a atmosférou přes jednotku plochy se nazývá čistá radiace (čisté záření,  $R_N$ ). Je to suma veškeré přicházející energie minus suma veškeré energie odcházející (vyzařované, emitované). V létě je čisté záření pozitivní, v zimě je negativní.

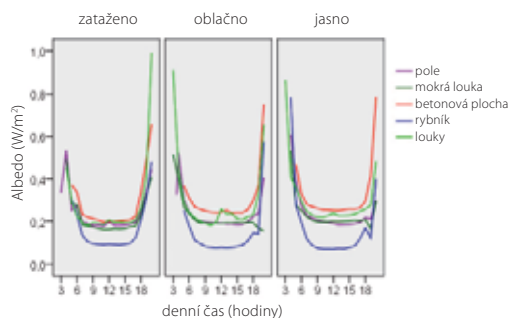
**Bilance dlouhovlnného záření** se řídí Stefan-Boltzmannovým zákonem, podle kterého množství energie vyzařované absolutně černým tělesem roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa ( $E = \delta (T_c)^4$ ). Z tohoto vztahu vyplývá, že rozdíl jednoho stupně (°C, K) mezi dvěma objekty vyvolá tok přibližně  $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**Zjevné teplo:** Sluneční energie ohřívá povrch a od něho se ohřívá vzduch, který turbulentním prouděním stoupá vzhůru. Vzrůstající teplotu povrchu i vzduchu vnímáme a můžeme ji měřit teploměrem, proto se nazývá teplem zjevným (citelné, pocitové, anglicky sensible heat).

**Skupenské teplo** (latentní, skryté) je energie nutná k přeměně skupenství, například kapalného na skupenství plynné. Výpar vody není provázen vzrůstající teplotou, protože energie se spotřebovává na změnu skupenství, tedy na zrychlený kinetický pohyb molekul, následkem kterého se kapalina přemě-



**Obr. 87a** Odražené krátkovlnné sluneční záření za zataženého, oblačného a zataženého dne z vodní hladiny, vegetace dobře zásobené vodou a z betonové plochy (Huryna, Pokorný 2010)



**Obr. 87b** Albedo (poměr odraženého a přicházejícího slunečního záření) vodní hladiny, mokré louky, louky, pole a betonové plochy při zatažené obloze, oblačném dnu a jasném dnu (Huryna, Pokorný 2010)

ňuje na vodní páru. Při kondenzaci vodní páry zpět na kapalinu se skupenské teplo uvolňuje.

**Tok tepla do půdy** (vedení tepla): V létě se půda postupně ohřívá (tok tepla je kladný), v zimě nebo během chladné noci v létě půda chladne (tok tepla je záporný).

**Fotosyntéza:** Tok sluneční energie fotosyntézou do biomasy tvoří velmi malou část celkové energetické bilance. Počítá se jako množství sluneční energie vázané ve vznikající biomase. Opačným procesem je dýchání, při kterém se energie uvolňuje rozkladem organických látek.

**Ohřev porostu:** Množství energie spotřebované na ohřev porostu závisí na množství biomasy a obsahu vody v této biomase.

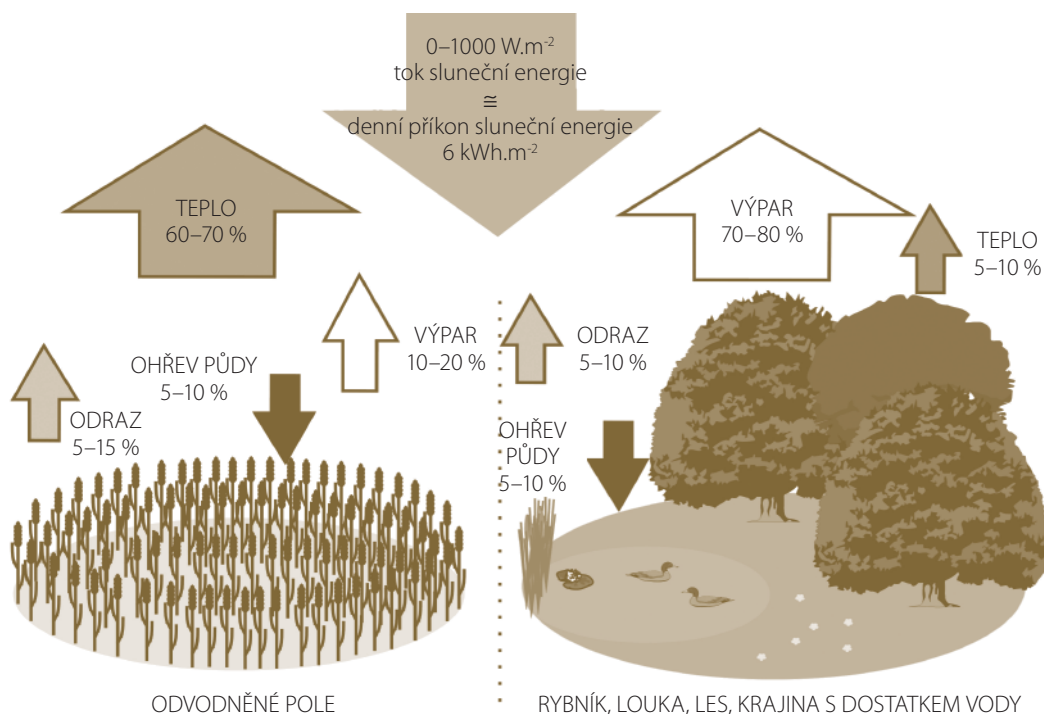
### 6.3 Distribuce sluneční energie na suchém povrchu a v porostu

Pokud sluneční energie přichází na suchý povrch, ohřívá jej a od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch, který stoupá vzhůru. Sluneční energie se v tomto případě přeměňuje převážně na zjevné teplo. Na obrázku č. 88 je znázorněn rozdíl v distribuci sluneční energie na suchém povrchu a v porostech dobře zásobených vodou.

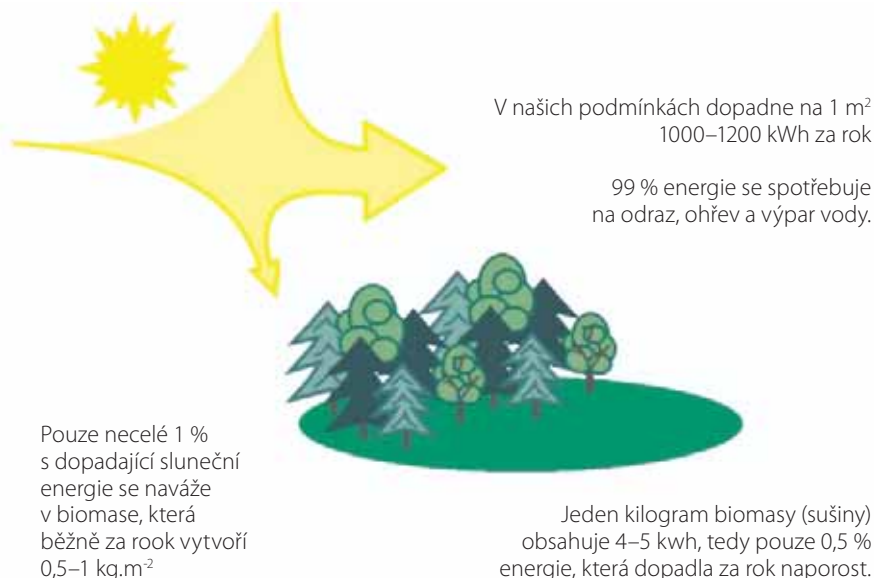
V krajině zásobené vodou a pokryté vegetací se podstatná část slunečního záření spotřebovává na výpar vody. Rostliny totiž vypařují vodu přes průduchy (**transpirace**) a voda se vypařuje též přímo z orosených povrchů rostlin a z půdy (**evaporace**). Výpar vody porostem se nazývá proto **evapotranspirace**. Rostlinami a půdou se z metru čtverečního za den odpaří několik litrů vody. Na výpar jednoho litru vody o teplotě 20 °C se spotřebuje 2,45 MJ  $\approx$  0,68 kWh sluneční energie, při odpaře-

ní 5 litrů se tedy do vodní páry váže 3,4 kWh, více než polovina dopadající sluneční energie. Sluneční energie vázaná ve vodní páře ve formě skupenského tepla se potom opět uvolní při kondenzaci vodní páry zpět na vodu, uvolní se tedy na chladných místech, na kterých se vodní pára sráží. Vázání sluneční energie výparem vody (chlazení) na místech s nadbytkem energie a uvolňování sluneční energie na místech chladných při kondenzaci vody je podstatou dokonalé přirozené klimatizace pomocí vody a rostlin. Na pouhém jednom metru čtverečním může činit v létě rozdíl mezi energií vázanou ve vodní páře a energií uvolněnou jako teplo i několik kWh za den. Toky sluneční energie vázané při evapotranspiraci dosahují tedy až několika set wattů na m<sup>2</sup>.

Představa sluneční energie a rostlin je spojena s fotosyntézou a s primární produkcí – tedy s tvorbou biomasy a růstem rostlin. Fotosyntéza však váže jen asi 1 % sluneční energie dopadající na rostlinu. Využíváme-li fosilní paliva, užíváme v nich nahromadě-



**Obr. 88** Rozdíl v distribuci sluneční energie na suchém povrchu a v porostech dobře zásobených vodou (Pokorný, Květ 2004)



**Obr. 89** Schéma znázorňující množství sluneční energie přicházející na zemský povrch v mírném pásmu za rok a množství energie vázané do biomasy

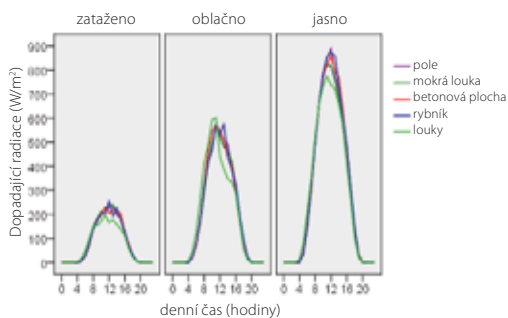
nou sluneční energii, která se fotosyntézou vázala účinností asi 1 %. Započítáme-li energetické náklady spojené s těžbou, s dopravou a účinností, se kterou spalujeme a teplo případně převádíme, uvědomíme si, že při spalování fosilních paliv využíváme sluneční energii s účinností nanejvýš několika promile. Schéma znázorňující množství sluneční energie přicházející na zemský povrch v mírném pásmu za rok a množství vázané do biomasy je na obrázku č. 89.

V našich zeměpisných šířkách dopadne na zem za rok průměrně **1,1–1,2 MWh** sluneční energie. 1,2 MWh (tedy 1200 kWh) odpovídá přibližně energii obsažené ve 240 kg biomasy. Na 20 m<sup>2</sup> nezastíněné plochy dopadne tedy za rok tolik energie, kolik odpovídá spotřebě náročnější domácnosti včetně otopu (průměrná spotřeba energie v české domácnosti je 20 MWh). V létě dosahují maximální toky sluneční energie až 1 000 W.m<sup>-2</sup>, to odpovídá výkonu běžného vařiče. V průměrném červnovém dnu dopadne na 1 m<sup>2</sup> za den 18–22 MJ sluneční energie, což odpovídá 5–6 kWh.

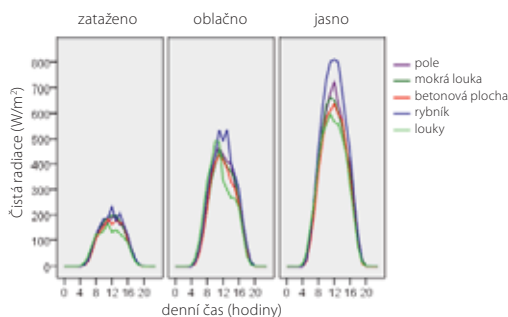
Dopadá-li sluneční záření na rostlinný porost dostatečně zásobený vodou (les, rákosina, louka, rostoucí plodiny), pak se 15–20 % záření odrazí a převážná část sluneční energie se spotřebuje na výpar vody, menší podíl sluneční energie se uvolní jako zjevné

teplo a tok tepla do půdy (5–10%). Na obrázku č. 90 jsou znázorněny sezonní průměry přicházejícího krátkovlnného záření, čisté krátkovlnné radiace a teplot vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu pro rybník, mokrou louku, louku, pole a betonovou plochu ve dnech se zataženou oblohou (denní energie slunečního záření do 3 kWh.m<sup>-2</sup>), oblačnou oblohu (do 6 kWh.m<sup>-2</sup>) a za jasného dne (nad 6 kWh.m<sup>-2</sup>).

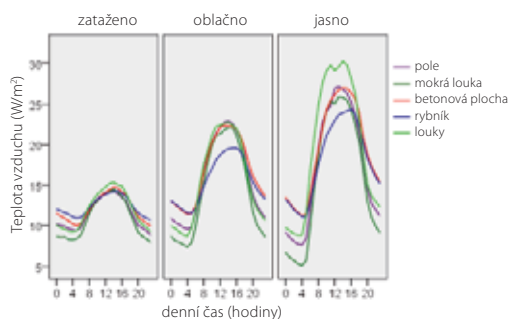
Hodnoty odrazu slunečního záření a čisté radiace se značně liší ve slunných jasných dnech, kdy se uplatňuje vysoký tok tepla do vody a chladicí efekt evapotranspirace.



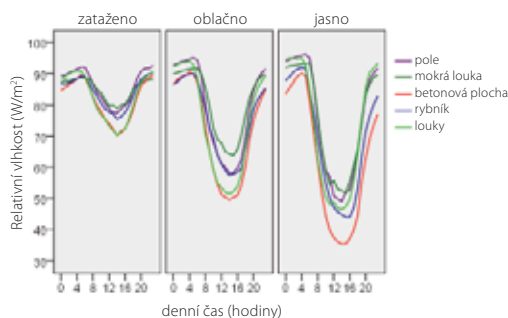
**Obr. 90a** Průměrné denní průběhy přicházejícího slunečního záření



**Obr. 90b** Průměrné denní chody čistého krátkovlnného záření



**Obr. 90c** Průměrné průběhy teploty na úrovni porostu (0,3 m nad zemí)

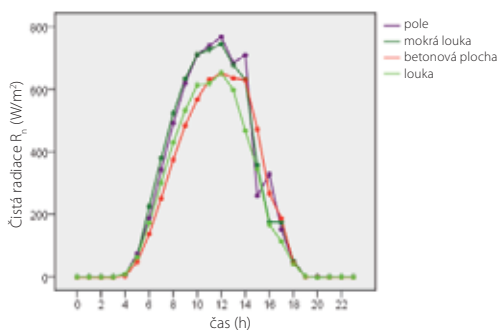


**Obr. 90d** Průměrné průběhy relativní vlhkosti vzduchu na úrovni porostu (0,3 m nad zemí)

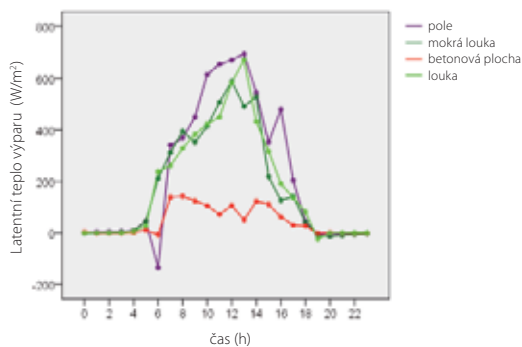
**Obr. 90** Sezonní průměry přicházejícího krátkovlnného záření, odraženého záření, albeda, čistě krátkovlnné radiace a teplot pro rybník, mokrou louku, louku, pole a betonovou plochu ve dnech se zataženou oblohou (denní energie slunečního záření do  $3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ), oblačnou oblohou (do  $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a za jasného dne (nad  $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Huryna, Pokorný 2010)

Časový průběh čistého záření, toku zjevného tepla a evapotranspirace ve slunný den pro různé typy porostů jsou znázorněny v obrázcích 91–93. Čisté záření dosahuje hodnot až  $700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Vyšší odraz betonového povrchu a částečně mulčované louky se projevuje nižším čistým zářením. Na obrázku č. 92 jsou vyneseny denní hodnoty latentního tepla výparu, jde tedy o průběh evapotranspirace. Na poli, louce i mokré louce dosahuje latentní teplo výparu hodnot až přes  $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Na betonové ploše jsou tyto hodnoty mnohonásobně nižší. Hodnoty evapotranspirace v porostech jsou podobné, protože byly měřeny v období dostatku vody, po deštových srážkách. Po dozrání obilí a po sklizni se hodnoty evapotranspirace výrazně sníží u pole i odvodněné louky.

Vegetace a ekosystémy obecně reagují zpětno-uzavebně na množství přicházející sluneční energie tak, že tlumí vytváření teplotních rozdílů. S nástupem jara, tedy s růstem příkonu sluneční energie začíná

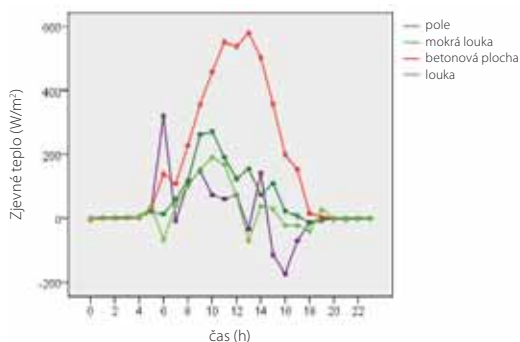


**Obr. 91** Denní průběh hodnot čistě radiace v letním dnu (17. 7. 2009): pole, louka, mokré louky, betonový povrch



**Obr. 92** Denní průběh hodnot latentního tepla výparu (evapotranspirace) v letním dnu (17. 7. 2009): pole, louka, mokré louky, betonový povrch



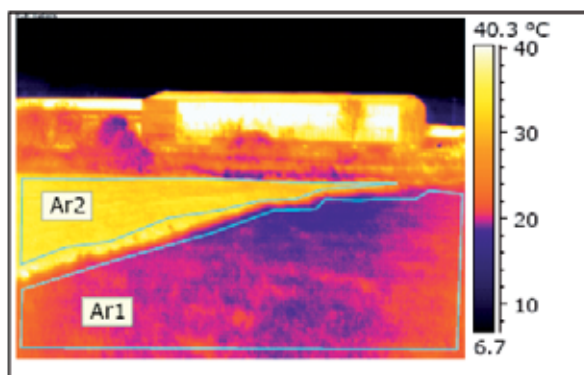


**Obr. 93** Denní průběh hodnot toku zjevného tepla v letním dnu (17. 7. 2009): pole, louka, mokré louky, betonový povrch

v mírném pásmu vegetační sezona a rostliny využívají sluneční energii k tvorbě biomasy a současně převádějí řádově vyšší množství energie evapotranspirací. Z obrázku 92 je zřejmé, jak se evapotranspirace během dne bezprostředně zvyšuje se zvýšeným příkonem sluneční energie. Na rozvoj porostů je vázán život mnoha dalších forem života včetně bakterií. Rozklad (mineralizace) organických látek může

probíhat několikanásobně vyšší rychlostí nežli jejich tvorba fotosyntézou. Rozklad organických látek je provázen uvolňováním energie. Biosféra udržuje v dynamické rovnováze složení atmosféry a podílí se na utváření klimatu – tlumí vytváření teplotních extrémů. Funkci biosféry při utváření klimatu si uvědomíme při srovnání teplotních výkyvů na poušti a v tropickém deštném lese, ležícím v podobném zeměpisném pásmu. Nemusíme chodit až do tropů, stačí porovnat teploty a vlhkosti vzduchu v mírném pásmu na odvodněných plochách (městská zástavba, sklizené pole) s podmínkami v nedalekém lese. Uvědomíme si, že vegetace upravuje klima pro teplokrevné živočichy, aby mohli svoji tělesnou teplotu „doladit“ vlastní termoregulací.

Z termodynamického hlediska jsou živé systémy (např. vegetace, ekosystémy) otevřené a pod příkonem sluneční energie. Díky sluneční energii jsou živé systémy trvale v nerovnovážném stavu a probíhá v nich bezpočet procesů, které směřují ke zdokonalování jejich organizace. Tato organizace je podle Prigoginova teorému charakterizována produkcí



**Zemědělská půda na jaře: už v dubnu je patrný rozdíl (12,7 °C) mezi teplejší ornou půdou (32,5 °C) a díky transpiraci chladnější louce (19,8 °C)**

**Budova 45 °C**

Label	Value
IR: Date Of Creation	27. 7. 2008
IR: Time Of Creation	13:43:08
IR: Max	45,5 °C
IR: Min	-16,1 °C
Ar1: Average	19,8 °C
Ar2: Average	32,5 °C

Ar1 – louka  
Ar2 – orná půda



**Obr. 94** Termovizní snímek louky, zoraného pole a budovy pořízený za slunného dne na konci dubna. Louka má teplotu okolo 20 °C, ornice 32 °C a stěna budovy více než 40 °C. (Projekt ENKI, NPV MSMT 2B06023)

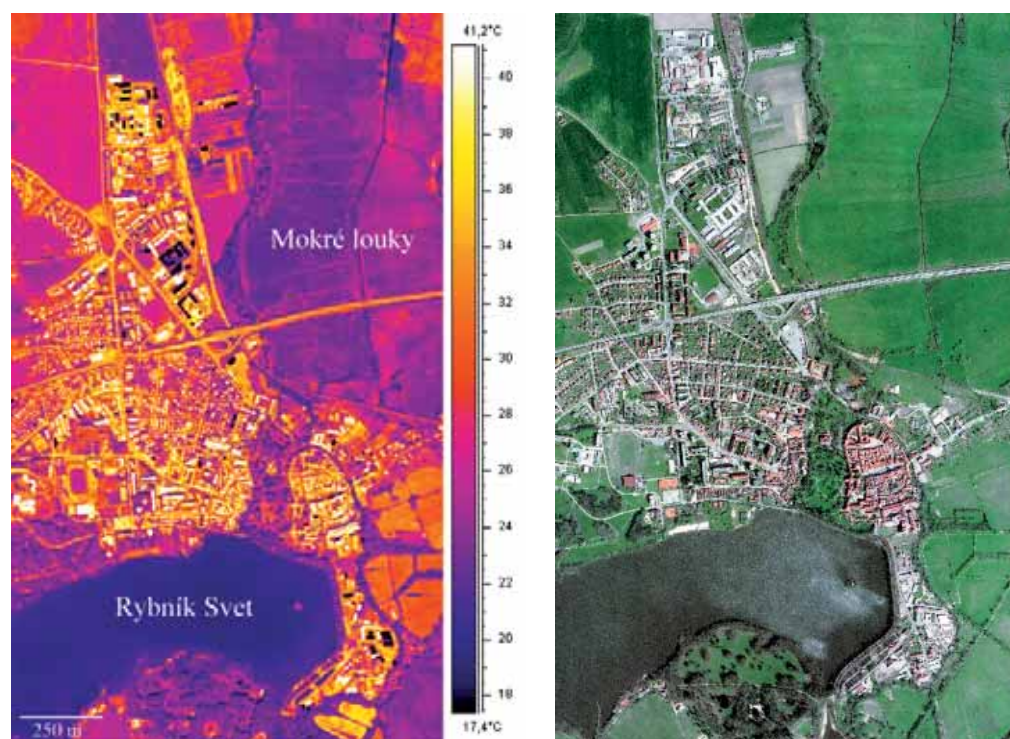
entropie (míra neuspořádanosti systému), která je ze všech možností nejnižší. Klasická termodynamika popisuje uzavřené systémy, které spějí k rovnováze, jež je naopak charakterizována nejvyšší mírou neuspořádanosti (entropie). Živé systémy tlumí teplotní rozdíly, obecně snižují gradienty okolního prostředí a získanou energii využívají ke zdokonalování své organizace. Tuto vlastnost živých systému bychom měli mít na paměti při úvahách o klimatické změně a brát v úvahu zásadní úlohu biosféry v přeměnách sluneční energie.

Effekt vegetace na teplotu lze snadno demonstrovat pomocí termovizních snímků. Na obrázku 94 je termovizní snímek louky, zoraného pole a budovy opodál pořízený za slunného dne na konci dubna. Louka má teplotu okolo 20 °C, ornice 32 °C a střecha budovy více než 40 °C.

Termovizní snímek Třeboňska pořízený z letadla (obr. 95) v poledne letního dne ukazuje výrazné roz-

díly teplot mezi nejchladnějšími vodními plochami, chladnými mokřými loukami, zahřátými sklizenými poli a střechami budov.

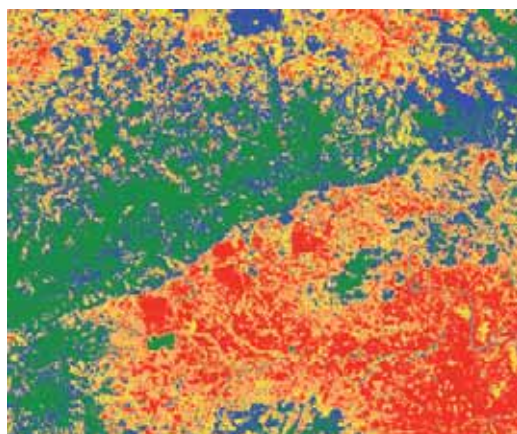
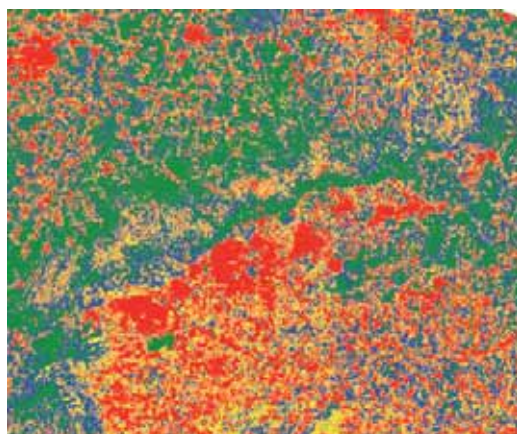
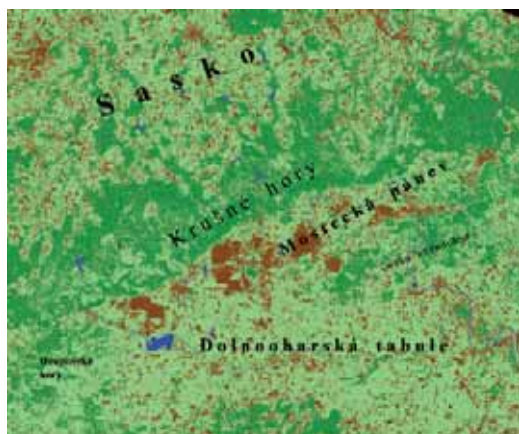
**Termovizní snímky zřetelně ukazují úlohu vegetace při tvorbě místního klimatu.** Zdůrazňujeme, že nízké teploty vodních ploch a vegetace dobře zásobené vodou jsou působeny výparem vody nikoli vysokým albedem. Vodní plochy a vlhká vegetace absorbují sluneční záření více nežli odvodněné plochy, a přesto mají teploty nižší. Teploty v krajině na velkých plochách lze mapovat pomocí družic, které jsou vybaveny nákladným zařízením na snímání teplot. Družice Landsat snímá teploty jednou za 16 dnů přibližně v 9.30 hod. s rozlišením 120 x 120 m. Na obrázku 96 je krajina severních Čech s přehřátými povrchovými doly, výsypkami a sklizenými poli a poměrně chladnými lesy v Krušných horách i chladným Českým středohořím. Tento snímek ukazuje jasně, jak vegetace snižuje teplotu krajiny. S využitím satelitních dat o distribuci teplot



**Obr. 95** Termovizní snímek Třeboňska pořízený z letadla v poledne letního dne ukazuje výrazné rozdíly teplot mezi nejchladnějšími vodními plochami, chladnými mokřými loukami, zahřátými sklizenými poli a střechami budov. (Pokorný et al. v tisku)

v krajině ve vztahu k množství vegetace (NDVI) a vlhkosti (wetness) lze hodnotit a klasifikovat různé typy krajinného pokryvu podle jejich schopnosti disipovat sluneční energii. Tento přístup zavedl Rippl, který na přelomu tohoto století definoval kritéria udržitelného hospodaření v krajině na základě toků sluneční energie a schopnosti povodí zadržovat (recyklovat) látky. Z této koncepce vychází srovnávací studie

tří malých povodí (odvodněná pastvina, zamokřená lada, druhotný les), kterou soustavně od devadesátých let provádí Laboratoř aplikované ekologie Zemědělské fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích. Odvodněná pastvina vykazuje významně vyšší teploty při slunných dnech, vyšší teplotní amplitudy, rychlý odtok vody a nejvyšší ztráty rozpuštěných látek odnášených vodou.



Krajinný pokryv odvozený z multispektrálních dat družice Landsat

a) 1. července 1995

b) 10. srpna 2004

- Neklasifikováno
- Holé povrchy
- Nelesní vegetace
- Les
- Voda
- Oblačnost

Relativní teplota krajinného

pokryvu odvozená z teplotního kanálu družice Landsat

a) 1. července 1995

b) 10. srpna 2004.

Prostorové rozlišení snímku je 120 metrů.

- Nejchladnější
- Chladné povrchy
- Středně teplé povrchy
- Teplé povrchy
- Nejteplejší povrchy

**Obr. 96** Krajina severních Čech s přehřátými povrchovými doly, výsypkami a sklizenými poli a poměrně chladnými lesy v Krušných horách i chladném Českém středohoří (Hesslerová 2008, Seják a kol. 2010)

## 6.4 Energetická účinnost tvorby biomasy

Energetická účinnost fotosyntézy se liší podle stupně, na kterém ji hodnotíme. Tato účinnost je přitom poměr množství energie vázané v biomase k celkovému množství dopadající sluneční energie. Z energetického obsahu biomasy, která přirostla za dané období, můžeme přibližně určit efektivitu využití sluneční energie při tvorbě biomasy v procesech fotosyntézy. Obsah energie v biomase se určuje v kalorimetru rutině jako spalné teplo.

**Účinnost využití světla** se významně liší v závislosti na jeho vlnové délce. Pro **primární procesy fotosyntézy** je nejvýhodnější červené světlo. Celková účinnost fotosyntézy se snižuje s každým krokem procesu fotosyntézy. Například na úrovni elektrontransportního membránového řetězce je účinnost fotosyntetických procesů až několik desítek procent. Na finální úrovni akumulace slunečního záření v biomase je účinnost maximálně v jednotkách procent. Detailněji se účinnost přeměny sluneční energie studuje na všech úrovních od jednotlivých listů (pomocí gazometrických metod) přes pletiva, jednotlivé orgány (chloroplast) až po přímé studium účinnosti primárních fotosyntetických dějů (přenos fotonů ve světlosběrných anténách, zachycení energie fotonu excitací elektronu ve fotosystémech, přenos energie elektrontransportním řetězcem na membráně thylakoidu atd.). Srovnávání účinnosti přeměny sluneční energie na jednotlivých úrovních fotosyntézy je velmi problematické, protože primární procesy se studují krátkodobě, a to v laboratorních podmínkách při expozici zářením úzkého spektra, zatímco tvorba biomasy se vztahuje k celkovému slunečnímu záření. Pokud se účinnost tvorby biomasy vztahuje k fotosynteticky účinnému záření (400–700 nm), je potom 2x vyšší, nežli pokud se vztahuje k celkovému slunečnímu záření, protože FAR tvoří cca 45 % energie celkového slunečního záření. Pro detailní studium fotosyntézy doporučujeme například monografii Blankenship (2002).

Zatím nejhodnotnější a nejrozsáhlejší soubory dat o primární produkci kulturních i přirozených porostů v hlavních vegetačních zónách byly získány v průbě-

hu Mezinárodního biologického programu (IBP, International Biological Programme). IBP se řešil v šedesátých a sedmdesátých letech 20. století. Přehlednou syntézu výsledků IBP uvádí Cooper (1975). Českoslovenští vědci se podíleli významně právě na řešení otázek produkce mokřadů, luk a lesů.

Z praktického hlediska využití zemědělských plodin má největší význam množství sklizené biomasy a její energetický obsah (tab. 19). Pro běžné úvahy lze počítat s produkcí sušiny až 1 kg.m<sup>-2</sup> za rok, tedy až 10 tun sušiny na hektar. Pokud převažuje v biomase celulóza a škrob, je její energetický obsah roven 16–18 MJ.kg<sup>-1</sup>, u olejnatých semen dosahuje průměrně 26 MJ.kg<sup>-1</sup>. Sušinou se rozumí hmotnost dosažená vysoušením vzorku do konstantní váhy při cca 90 °C.

**Tab. 19** Výhřevnost fosilních paliv a biopaliv (Pastorek et al. 2004)

Palivo	Výhřevnost MJ.kg <sup>-1</sup>
obilní sláma	15–17,6
obiloviny	15–18
dřevo	17–19
hnědé uhlí	14–23
černé uhlí	27–32
řepkový olej	35
etanol	27

Při úvahách o energetické bilanci porostů si můžeme též uvědomit omezenost biomasy jako zdroje energie. Uvažuje se o využívání energetických plodin, pěstovaných jako alternativní zdroj energie. Kolik energie se naváže fotosyntézou do biomasy – dřeva, slámy, oleje? **Na jednom metru čtverečním naroste za rok až 1 kg biomasy (sušiny), která obsahuje zhruba 14–18 MJ (4–5 kWh).** Od tohoto množství je nutné odečíst ještě energii dodatkovou, potřebnou na kultivaci, sklizeň, transport a úpravu před spálením. Nutno je též uvažovat účinnost spalování. Nesporně, biomasa je zásadním obnovitelným zdrojem energie. Při jejím využívání je ovšem nezbytné uvažovat její energetický obsah (množství vázané sluneční energie) a **množství dodatkové energie**, to jest energie, kterou je nutno vložit na pěstování, sklizeň a zpracování biomasy. Celková energetická bilance by měla být pozitivní, to jest – energetický

**Tab. 20** Energetické vstupy při pěstování kukuřice v USA v MJ.ha<sup>-1</sup>  
(Podle Pimentel, Dazhong 1990, upravil Šarapatka)

Vstup	r. 1945	r. 1954	r. 1964	r. 1975	r. 1983
Práce	130	96	63	42	25
Stroje	1 704	2 713	3 798	3 873	4 262
PHM	5 979	7 712	8 336	6 331	5 255
Hnojiva	842	2 303	4 731	8 868	16 911
Osivo	674	1 763	2 177	2 177	2 177
Pesticidy	0	113	477	2 512	2 512
Závlaha	523	1 047	2 617	8 374	9 421
Sušení, el. energie	71	163	858	2 294	3 182
Transport	182	281	373	343	373
Celkem vstupy	10 105	16 191	23 430	34 814	44 118
Výnos	35 707	43 076	71 430	86 148	108 862
Poměr výnos/vstupy	3,53	2,66	3,05	2,47	2,47

obsah biomasy by měl být vyšší nežli množství energie dodatkové, vkládané člověkem.

V mírném pásmu je celoroční bilance využití sluneční energie do biomasy přibližně 0,5 %: na povrch Země v mírném pásmu přichází za rok 950–1 100 kWh.m<sup>-2</sup> (tj. 3,4–3,9 GJ.m<sup>-2</sup> za rok). Počítáme-li celoroční produkci sušiny 1 kg.m<sup>-2</sup> (energetický obsah 1 kg suché biomasy je okolo 5 kWh = 18 MJ).

O spotřebě energie ve formě vstupů se v posledních desetiletích intenzivně diskutuje i v zemědělství. Je to dáno vysokou energetickou náročností, kdy v 80. letech 20. století tvořila spotřeba energie v zemědělství 17 % z celkově spotřebované (6 % na vlastní produkci, zbytek na zpracování a distribuci). To představovalo asi 1 500 litrů nafty na obyvatele a rok pouze pro zajištění potravin. Proto se různé dlouhodobě udržitelné systémy snaží tuto spotřebu snížit a zároveň zvýšit účinnost vstupů a energie z dopadajícího slunečního záření.

Jaká je energetická bilance pěstování plodin v současné době? Mohou nám ji nastínit např. data související s pěstováním kukuřice v USA publikovaná Pimentelem. Od roku 1700 do roku 1983 se 15x zvýšily vstupy energie, zatímco výnosy pouze 3,5 x. Nejlépe nám trend vyjádří tabulka 20 z poválečného období.

Odhaduje se, že v roce 1700 byl uvedený poměr podstatně vyšší a pohyboval se kolem 10 a v začátku 20. století kolem 6. Porovnáme-li roky 1945 a 1983,

zjistíme, že v uvedeném příkladu se vstupy při pěstování kukuřice zvýšily cca 4,4x a výnos cca 3x. Je možné říci, že se účinnost vložené energie během těchto 40 hodnocených let snížila. Pokud se podíváme na jednotlivé energetické vstupy, pak tyto ukazují na omezení vstupu energie ve formě práce a naopak zvýšené vstupy související s neobnovitelnými zdroji energie (např. hnojiva a pesticidy).

Podívejme se na vztahy sluneční a dodatkové energie na produkci této plodiny. Vezmeme-li z energie dopadající ročně na hektar pole (58,6 x 10<sup>9</sup> kJ) pouze podíl pro vegetační sezonu (29,3 x 10<sup>9</sup> kJ) a budeme-li počítat s výnosem 6,5 t na hektar + 6,5 tuny vedlejšího produktu, pak energie v kukuřici reprezentuje 0,4 % z energie dopadající ve formě slunečního záření. Pro hlavní produkt je to jen 0,2 %. Stejným způsobem bychom mohli počítat bilance využití sluneční energie pro další plodiny nebo systémy hospodaření. Pokud bychom vzali předpokládaný výnos kukuřice v roce 1700 a vstup dodatkové energie (hlavně ve formě práce), pak by nám vyšla pro hlavní produkt účinnost sluneční energie kolem 0,1 %.

V našich podmínkách provedli studii energetické bilance pěti zemědělských farem na Novohradsku Plch a kol. (2008) a Seják a kol. (2010). Farmy se lišily intenzitou zemědělské výroby. Autoři kvantifikovali jednotlivé vstupy a výstupy energetických a látkových toků. Pro jednotlivé druhy pěstovaných plo-

din zjistili způsob a počet provedených pracovních operací, výsevek, spotřebu minerálních hnojiv, spotřebované množství chemických přípravků, výnosy hlavního a vedlejšího produktu. Náklady energetické bilance rostlinné výroby zahrnují energii lidské práce, fosilní energii, elektrickou energii, energii ve strojích a nářadí, energii výrobků chemického průmyslu (hnojiva, chemické postřiky, energii v osivech). Energie ve strojích se počítala z energetických nákladů k produkci surovin, na vlastní výrobu, transport na farmu a údržbu. Počítal se energetický náklad na jeden rok a doba životnosti stroje byla stanovena na 10 let. Autoři zpracovali bilanci rostlinné i živočišné výroby. Nejvýznamnějšími energetickými náklady byly „energie ve strojích“ (např. 65 % z celkových energetických nákladů) a ve spotřebovaných fosilních palivech (např. 33 %). Pokud se používají hnojiva a pesticidy, dosahuje jejich energetický náklad hodnot několika desítek procent. V rostlinné výrobě dosahoval poměr energetický výnos (produkce)/energetický náklad hodnot od 1,7 do 27. **Čistý energetický výnos**, tj. obsah energie ve sklizené biomase minus vložené energetické náklady, byl v rozmezí 26 GJ.ha<sup>-1</sup> až 49 GJ.ha<sup>-1</sup>. V rostlinné výrobě se tedy za rok z jednoho metru čtverečního získává 2,6 MJ až 4,9 MJ (0,7 kWh až 1,36 kWh). Čistý zisk využití sluneční energie v rostlinné výrobě se tedy pohybuje okolo jedné promile.

Energetickými bilancemi bývají hodnoceny i různé zemědělské systémy, např. konvenční versus ekologické zemědělství. U ekologického zemědělství bývají většinou nižší výnosy (cca o 20 %), ale bývají i nižší energetické vstupy. Je to zejména proto, že jsou předpisy zakázána např. lehce rozpustná minerální hnojiva a pesticidy, jež mohou v konvenčním zemědělství tvořit kolem 40 % vstupů. Bývají sice nahrazeny jinými vstupy (práce, organická hnojiva atd.), ale výsledný vstup energie do systému

**Tab. 21** Energetická bilance výstupů/vstupů konvenčně a ekologicky pěstovaného ječmene/bilanci za celý 4letý osevní postup v % (Šarapatka 2002)

	Konvenční zemědělství	Ekologické zemědělství
výstupy	100/100	80,1/70,8
vstupy	100/100	49,5/73,4

bývá nižší. Řada studií pak ve výsledku prokazuje vyšší hodnoty poměru výstupů/vstupů pro ekologické zemědělství. Stav si můžeme dokumentovat např. tabulkou 21.

Za celý osevní postup byla energetická bilance obou systému obdobná, ve prospěch ekologického zemědělství se lišila u poslední pěstované plodiny (ječmene). Obdobné výsledky u obou zemědělských systémů za celou dobu sledování ovlivnila zejména aplikace organických hnojiv 2x za 4 roky u ekologického systému (což není běžná praxe), kdy tento zásah zvýšil vstupy energie.

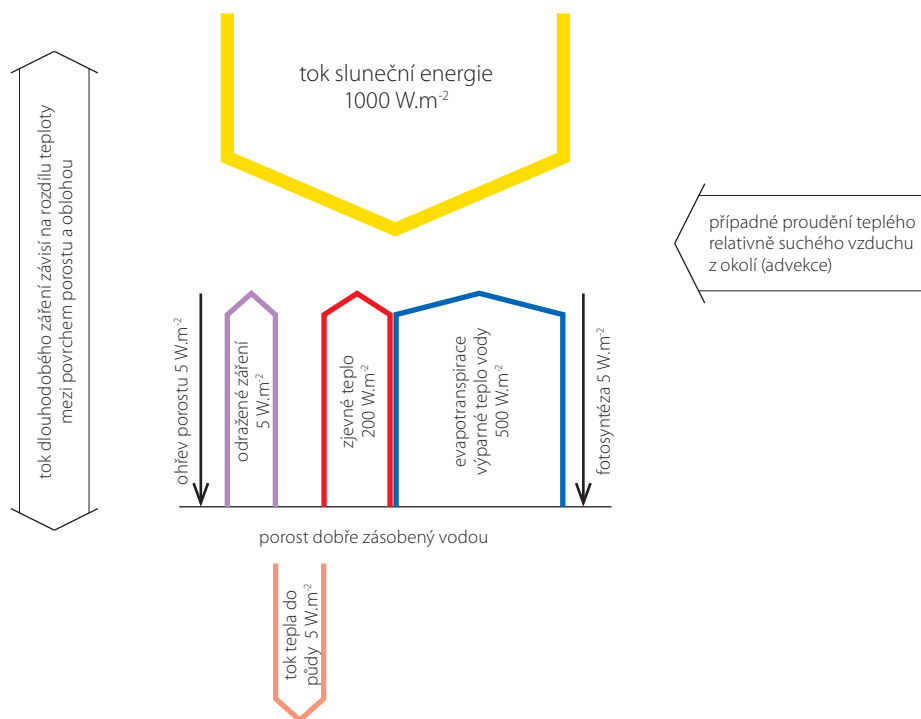
Zemědělci ovšem ovlivňují svým hospodařením v krajině o mnoho řádů vyšší energetické toky. Určí, zda se sluneční energie přemění ve zjevné teplo, nebo zda se bude vázat do skupenského tepla vody při evapotranspiraci.

## 6.5 Evapotranspirace

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

- vlastnosti a stav porostu (stáří porostu, pokryvnost listoví, schopnost vodivých pletiv převádět vodu od kořenů do listů, vodivost a otevřenost průduchů),
- 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 více než 75 % dopadající sluneční energie. Je zřejmé, že hospodařením s vegetací a s vodou člověk účinně mění způsob



**Obr. 97** Příklad distribuce sluneční energie v porostu dobře zásobeném vodou. při jasném slunečním dnu. Přicházející sluneční záření dosahuje hodnoty  $1000 \text{ W.m}^{-2}$ . Odražené  $150 \text{ W.m}^{-2}$ , zjevné teplo  $200 \text{ W.m}^{-2}$ , na evapotranspiraci se spotřebuje  $500 \text{ W.m}^{-2}$ , tok tepla do půdy je  $100 \text{ W.m}^{-2}$ . Na fotosyntézu se spotřebuje  $5 \text{ W.m}^{-2}$  podobně jako na ohřev porostu. Na energetické bilanci se též podílí tok dlouhovlnného záření (IR) mezi porostem a oblohou, jehož hodnota může dosahovat  $100 \text{ W.m}^{-2}$  i více a řídí se rozdílem teplot mezi porostem a oblohou. V kulturní krajině bývá častým zdrojem energie též přísun (advekce) ohřátého vzduchu z odvodněného okolí. Uvedené toky energie se navzájem ovlivňují a jejich hodnoty se mění doslova každým okamžikem.

přeměny sluneční energie. Pokud se totiž sluneční energie nespotřebuje na přeměnu skupenství vody v páru, mění se v teplo.

Stanovení rychlosti evapotranspirace je náročné, snažíme se totiž zachytit děje v dynamickém nelineárním systému.

### ■ 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-Monteitha. PE se vztahuje ke krátkému 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  $70 \text{ s/m}$  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 klima-

tickém stavu ovzduší a hydrologickém 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 v odvodněných polích byla naměřena evapotranspirace mokřadních rostlin i přes 20 litrů za den z metru čtverečního. 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).

### ■ 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 vázková 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.

Rychlost transpirace v přirozených podmínkách je možné měřit gasometricky přímým měřením vý-

deje vodní páry z části listu (např. přístroj LI-COR 6400). Spektroskopicky se stanovuje změna koncentrace vodní páry ve vzduchu po průchodu měřící komůrkou, ve které je uzavřena definovaná plocha listu za pokud možno konstantních definovaných podmínek osvětlení, vlhkosti vzduchu, teploty, rychlosti proudění vzduchu atd. Další metodou, jak odhadnout rychlost výparu, je měření vodivosti (odporu) listu pro difuzi vodní páry (a obdobně CO<sub>2</sub>). Tyto hodnoty můžeme získat například porometrickým měřením. Přehled klasických metod pro měření výdeje vody a vodní bilance u rostlin uvádí např. Bannister (1986). Další z metod měření transpirace je metoda „sap flow“. Používá se u stromů a výdej vody se měří na základě šíření teplotních pulsů kmenem.

### ■ 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 a metody dálkového průzkumu Země. Z metod meteorologických se nejčastěji používají:

- energetická bilance stanoviště (tzv. metoda Bowenova poměru),
- metoda Penman-Monteithova (Monteith 1975, Monteith *et Unsworth* 1990, Přibáň *et al.* 1992, Novák 1995),
- metoda vířivé (eddy) kovariance (Kaimal *et Finnigan* 1994, Lee *et al.* 2004).

Metody dálkového průzkumu Země se intenzivně rozvíjejí od osmdesátých let 20. století s využíváním meteorologických družic. Z hlediska energetických toků se uplatňuje zejména sledování a záznam termálních charakteristik zemského povrchu v kombinaci s dalšími datovými vstupy, jako je pozemní měření některých charakteristik prostředí a snímání povrchu v dalších spektrálních pásech. Pro hodnocení charakteristik povrchu spojených s výparem se používá řada multispektrálních družicových systémů (např. družice Landsat, TERRA Aster, NOAA AVHRR). S jistým úspěchem, zejména s ohledem na potřebu



závlah různých plodin, jsou užívány termální kame-  
rové systémy. Podrobnosti lze nalézt v publikacích  
Jensen (2000), Lillesand et al. (2004), Quattrochi et  
Luval (2000).

## 6.6 Kritéria udržitelného hospodaření v krajině

Udržitelné hospodaření v krajině vyžaduje, aby voda  
a látky (živiny a bazické kationy) byly účinně recyklo-  
vány v ekosystémech, tak aby se minimalizovaly ztrá-  
ty z povrchové vrstvy půdy. Je zřejmé, že ztráty látek  
z krajiny jsou spojeny s odtokem vody. Rozdělení toků  
vody mezi evapotranspiraci (není spojena se ztráta-  
mi látek), průsak do podzemních vod a do povrchov-  
ých vod rozhoduje o rozsahu ztrát rozpuštěných  
látek z daného povodí. Průzkum intenzity ztrát látek  
z krajiny potvrdil aktivní úlohu vegetačního pokry-  
vu v tomto procesu. Monitoring plošných ztrát lá-  
tek v zemědělských oblastech Německa prokázal  
průměrný rozsah ztrát 1–1,5 tuny rozpuštěných lá-  
tek z hektaru za rok, což je hodnota 50–100x vyšší  
ve srovnání s klimaxovými lesy. Vysoké ztráty látek  
soustavně snižují úrodnost půd a jen obtížně je lze  
kompenzovat dodávkou hnojiv. Hlavním kritériem  
udržitelnosti hospodaření v krajině jsou nízké ztráty  
rozpuštěných látek z povodí. Toho lze dosáhnout re-  
cyklací vody v povodí. Recyklace vody je podmíně-  
na obnovou krátkého oběhu vody, tedy podporou  
evapotranspirace. Plodiny jsou schopny vypařovat  
vodu intenzivně, ale vodní pára odchází zpravidla  
z povodí, nevrací se v krátkém oběhu. Výzkum by  
se měl zaměřit na řešení otázky, jak uzavírat oběh  
vody v zemědělské krajině, a obnovit tak disipativ-  
ní procesy sluneční energie v krajině. Zásadní úlohu  
lesa a strukturované vegetace v oběhu vody popisují  
Makarievá, Gorshkov (2007).

Ripl (1995, 2003) navrhl dvě kritéria pro posuzování  
funkčnosti krajiny a udržitelného hospodaření:

- **kritérium energetické**, tj. schopnost tlumit vý-  
kyvy teplot a udržovat relativně nízké teploty i při  
vysokém příkonu sluneční energie,
- **kritérium chemické**, tj. schopnost tlumit ztráty  
(odtoky) rozpuštěných látek odtékajících s vo-

dou z povodí. Funkční krajina má vysokou hru-  
bou produkci a nízké ztráty látek – tedy vysoký  
stupeň recyklace.

### ■ Hodnoty hlavních toků sluneční energie v agroekosystémech

Hlavní toky přeměn sluneční energie v porostech  
a ekosystémech lze měřit přímo. Reálné rozsahy  
hodnot těchto toků lze odvodit z denních nebo se-  
zonních množství vypařené vody evapotranspirací,  
množství vytvořené biomasy (primární produkce)  
a množství rozložené biomasy v půdě.

V přirozených porostech za optimálních podmí-  
nek v mírném pásmu lze pro přibližná stanovení po-  
čítat s roční produkcí sušiny do  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  a průměr-  
nou denní primární produkcí do  $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . **Rychlost  
fotosyntézy** za optimálních podmínek vyjádřená  
v energetických jednotkách může dosahovat hod-  
not několika  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Produkci  $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  za den odpo-  
ovídá průměrný energetický tok  $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**Rozklad organických látek** v půdě (mine-  
ralizace) vyjádřený v energetických jednotkách  
může nabývat hodnot až několikrát vyšších, než  
je rychlost tvorby a akumulace organických lá-  
tek v procesu primární produkce: několik  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$   
až desítky  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Na evapotranspiraci se spotřebovává  $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$   
i více, zatímco na suché ploše se veškerá sluneční  
energie uvolňuje jako zjevné teplo. Rozdíl v distri-  
buci sluneční energie na odvodněné ploše a ve ve-  
getaci dobře zásobené vodou je ve slunném dnu  
v rozsahu několika set  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . **Evapotranspirace** má  
dvojnásobný klimatizační efekt – ochlazuje výparem  
a ohřívá kondenzací. Ochlazují se místa s nadbytkem  
energie a ohřívají jen místa chladná, kde dochází  
ke kondenzaci.

**Tok tepla do půdy** může dosahovat hodnot  
několika  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  až desítek  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Tok tepla do půdy  
se snižuje s vysycháním půdy. Ve slunných dnech  
odráží betonová plocha až  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , zatímco hladi-  
na rybníka odráží nanejvýš  $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Odraz různých  
typů vegetace se příliš neliší a dosahuje hodnot oko-  
lo  $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , relativně méně odráží po většinu roku  
vegetace dobře zásobená vodou.



**Obr. 98** Rozdíly mezi pestrou kulturní a odpřírodněnou krajinou jsou zjevné na první pohled. Z odborného hlediska si musíme uvědomit, že vhodně strukturovaná krajina hospodaří lépe s vodou a energií, kterou uplatňuje v životních procesech, a vede k menšímu uvolňování zjevného tepla. Energie je lépe využita na produkci a koloběh vody. (Foto a úpravy: B. Šarapatka a P. Netopil)

### ■ Závěr

Držitelé pozemků předurčují svou činností hlavní funkce krajiny, na kterých závisí další činnost a existence naší společnosti. Hospodaření v krajině totiž mění vegetační pokryv, rozmanitost druhů, množství a kvalitu odtékající vody a ovlivňuje lokální klima (obr. 98). Současné metody hospodaření s půdou jsou většinou podmíněny pouze socioekonomicky a dostávají se tak do konfliktu se zachováním životanostných systémů (life supporting systems), jako jsou půda, voda, vegetace. Socioekonomická kritéria jsou často antitezí kritérií ekologicky vhodných metod využívání přírodních zdrojů, stimuluje například vysoušení mokřadů pro zemědělské účely, nahrazování přirozených porostů travními nebo obilními monokulturami, stimuluje rozvoj výstavby bytů, komerčních objektů a silnic na místech s funkční vegetací. Socioekonomická kritéria vedou k řadě dalších zásahů, které mívají okamžitý krátkodobý ekonomický přínos, působí však trvalé ztráty (poškození) zdrojů. Navíc je velice obtížné nalézt hospodáře, který půdu využívá s takovou rezervou, aby zachoval její kapacitu a kdykoli mohl produkci zvýšit. Ekonomické investice se vkládají za očekávání určitého růstu produkce a majitel pozemku nemá jinou možnost, nežli se pokusit získat co nejvyšší zisk z vložených investic, bez ohledu na vyčerpávání hlavního zdroje (půdy), jehož cena není v ekonomice zahrnuta, a bez ohledu na následky (změny kvality a množství vody, změny místního klimatu, snížení biodiverzity).

Celý svět se ocitl v absurdní situaci, kdy sociálně nejméně stabilní sektor (zemědělství) poskytuje základní potřeby pro život a udržuje základní životanostné funkce (life supporting system), na kterých závisí život a fungování celé společnosti a dalších složek biosféry. Navíc dogma, že ekonomický tlak povede k vyšší efektivitě, je absolutně neaplikovatelné na tuto situaci – životanostné funkce nejsou totiž v ekonomice zahrnuty (tyto externality nejsou internalizovány). Například přirozená variabilita dešťových srážek je zcela mimo vliv ekonomických mechanismů a vede k nadměrné exploataci přírodních zdrojů v období, kdy k takovému stresu v prostředí (sucho) dochází – což vede k dalšímu poškození prostředí a snižuje ekonomickou stabilitu držitele půdy.

Ještě nikdy nebylo na naší planetě tolik obyvatel a ještě nikdy neměl člověk takové technické možnosti krajinu měnit. Nanejvýš aktuální jsou proto otázky, jaké způsoby hospodaření v krajině jsou správné (udržitelné) a které ničí základní ekologické funkce krajiny.

V této kapitole jsme ukázali, že **člověk svým hospodařením může zásadně měnit distribuci sluneční energie a oběh vody v krajině, a tím tedy i místní klima a kvalitu odtékající vody**. Současně člověk svými hospodářskými zásahy a rozložením činnosti v krajině určuje množství látek, které z krajiny odtékají.

Toky energie a látek v krajině lze monitorovat, a je tak možné hodnotit, do jaké míry je hospoda-

ření v krajině udržitelné. Kritériem udržitelnosti jsou vyrovnané teploty, vyrovnaný odtok vody a nízký obsah rozpuštěných látek v odtékající vodě. Při této příležitosti můžeme hovořit o **kritériu**:

- **energetickém**, tj. schopnosti tlumit výkyvy teplot a udržovat relativně nízké teploty i při vysokém příkonu sluneční energie,
- **chemickém**, tj. ztrátě (odtoku) rozpuštěných látek odtékajících s vodou z povodí. Funkční krajina má vysokou hrubou produkci a nízké ztráty látek – tedy vysoký stupeň recyklace.

Zemědělci obhospodařují rozsáhlé plochy v krajině a určují tím distribuci sluneční energie a s ní těsně svázaný oběh vody a místní klima. Současně ovlivňují kvalitu a množství vody odtékající z povodí, ve kterém hospodaří. Zatímco člověk sběrač a lovec působil na Zemi stovky tisíc let, je historie zemědělských civilizací velice krátká. Za tuto krátkou dobu se lid-

ská populace na Zemi znásobila tisíckrát (z odhadovaných 5 milionů před 7 000 roky na současných téměř 6 miliard). Historie zná četné příklady kolapsů společnosti následkem degradace půd způsobené jejich špatným obhospodařováním. V dnešní globální ekonomice se používají celosvětově podobné metody hospodaření. Díky fosilním palivům a mechanizaci dokáže člověk zemědělsky obdělávat rozsáhlé plochy kontinentů. S tím je ovšem spojeno nebezpečí degradace půd v krátkém čase a velkém měřítku. Kritériem udržitelného hospodaření v krajině proto musí být zachování a obnova kvality půd a recyklace látek, kterých se dá mj. dosáhnout recyklací vody. Tím se zajistí distribuce sluneční energie přes vodní cyklus, vyrovnávání tepelných rozdílů v krajině i vysoká primární produkce. Jde o to, aby kulturní krajina fungovala jako vyvinuté ekosystémy, které nemají odpad a s využitím sluneční energie recyklují látky i vodu.