Wie Pflanzen kühlen, die Rolle der Pflanzen im Klima

Für Interreg Plants4 Cooling

Jan Pokorný, Petra Hesslerová

(basierend auf dem ERASMUS+ Projekt Education for Plant Literacy, TACR ETA TL01000294)

Kontakt: pokorny@enki.cz

ENKI, o.p.s. Dukelská 145, 379 01 Třeboň, Tschechische Republik

Sonnenenergie

Die Sonne erwärmt die Erde um etwa 280°C, ohne Sonnenenergie würde die Atmosphäre gefrieren. Im Laufe eines Jahres fallen 1321-1412 W.m^{-2} Sonnenenergie auf die äußere Schicht der Atmosphäre, je nachdem, wie weit die Erde auf ihrer elliptischen Umlaufbahn von der Sonne entfernt ist. Bei klarem Himmel fallen bis zu 1000 W.m^{-2} auf die Erdoberfläche. Wolken reflektieren und absorbieren die Sonnenenergie, wobei bei bewölktem Himmel weniger als 100 W.m-2 die Erdoberfläche erreichen. In den gemäßigten Regionen wird im Sommer ein Vielfaches der Energie empfangen als im Winter.

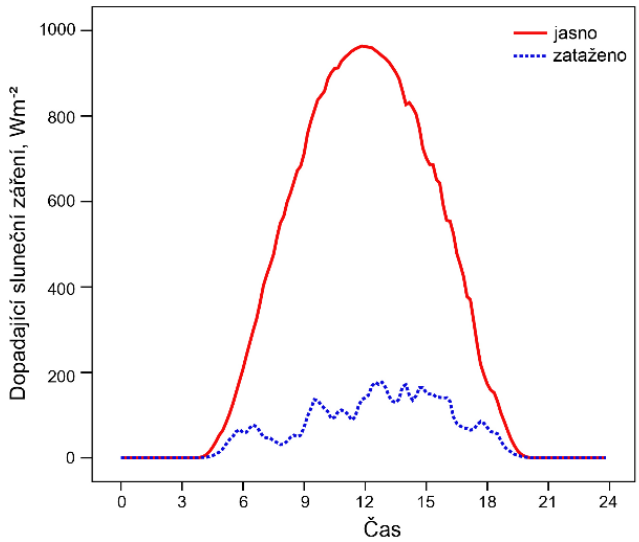


Abb. 1. *Solarenergie an einem klaren (rot) und einem bewölkten Tag (blau) (W.m^{-2}). Achse X – Zeit (Stunden), Achse Y - Einfallende Sonnenstrahlung (W.m^{-2}).*

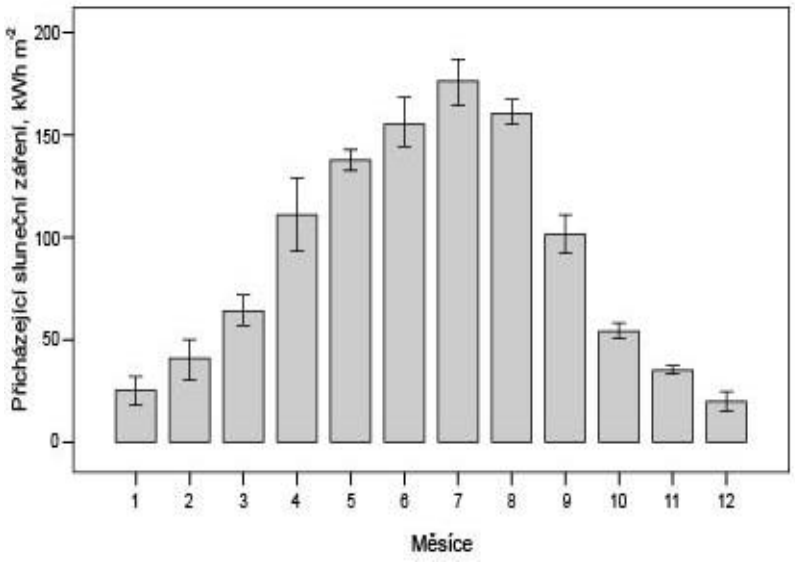


Abb. 2. *Monatliche Durchschnittswerte des solaren Energieeintrags kWh pro 1 m², Domanín bei Třeboň (2012-2022); Daten ENKI, o.p.s. Achse X – Monaten, Achse Y - Einfallende Sonnenstrahlung*

Die Sonne hat eine Oberflächentemperatur von 6000 K (5700 °C) und sendet kurzwellige Strahlung aus, vor allem Licht (Wellenlänge ca. 500 nm), UV-Strahlung und Nahinfrarotstrahlung. Die Sonnenstrahlung erwärmt die Erdoberfläche auf eine Temperatur von etwa 300 K, und die Erde sendet langwellige Strahlung (Wellenlänge etwa 10 000 nm) aus. Die Wellenlängen entsprechen der Oberflächentemperatur der emittierenden Körper, eine Beziehung, die durch das Wiensche Gesetz und das Plancksche Gesetz beschrieben wird. Die Sonnenreflexion ist am höchsten auf Schnee, relativ gering auf Wasser (10 %), lebende Pflanzen reflektieren etwa 20 % der einfallenden Sonnenenergie, während Sand und Beton 25-30 % reflektieren. Die Sonnenreflexion wird als Prozentsatz der reflektierten Strahlung im Verhältnis zur einfallenden Strahlung ausgedrückt und als Albedo (Weißgrad) bezeichnet.

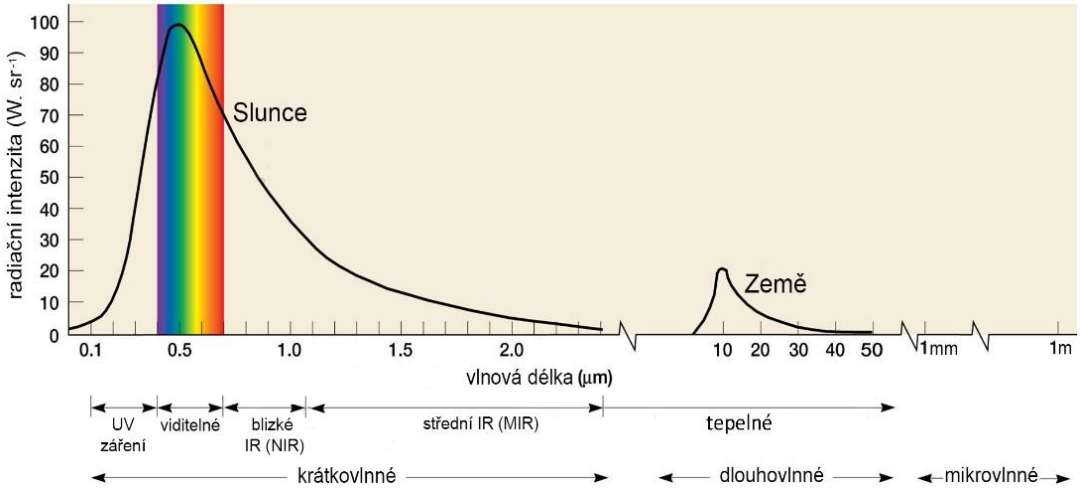


Abb. 3. *Das Spektrum der Sonnenstrahlung – Sonne und Erde. Achse X – Wellenlänge, Achse Y – Strahlungsintensität; (UV-Strahlung - sichtbare Strahlung – Infrarot Strahlung – Mittelinfrarot – Wärmestrahlung; Kurz-Lange-Mikrostrahlung)*

Verteilung der Sonnenenergie (Strahlungsbilanz)

Pflanzen und Sonneneinstrahlung sind hauptsächlich mit dem Prozess der Photosynthese verbunden. Vereinfacht gesagt, nehmen Pflanzen die Energie des Sonnenlichts auf und wandeln sie in chemische Energie um, die in Form von Glukose und anderen Zuckern und Bestandteilen des Pflanzenkörpers (Biomasse) vorliegt. Die durch die Photosynthese in der Pflanzenbiomasse gebundene Sonnenenergie wird dann in der Nahrungskette zu Wärme abgebaut. Allerdings wird weniger als 1 % der auf die Erdoberfläche auftreffenden Sonnenenergie für die Photosynthese genutzt. Was geschieht also mit der restlichen Energie, und welche Rolle spielen die Pflanzen bei ihrer weiteren Nutzung oder Umwandlung?

Die Verteilung der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche lässt sich durch die so genannten Strahlungs- und Energiebilanzen darstellen, deren einzelne Komponenten (ausgedrückt in $W.m^{-2}$) in Abb. 4 beschrieben sind.

Rs↓ ist die kurzwellige einfallende Sonnenstrahlung oder die gesamte auf die Erdoberfläche auftreffende Sonnenstrahlung, die nach Reflexion und Absorption in der Atmosphäre verbleibt. Sie umfasst sowohl direkte als auch gestreute Strahlung. Bei bewölktem Himmel fehlt dem Sonnenlicht, das die Erdoberfläche erreicht, die direkte Strahlungskomponente und es besteht nur aus Streustrahlung. Eine dichte Wolkendecke absorbiert einen Großteil der Sonnenstrahlung.

Rs↑: reflektierte kurzwellige Sonnenstrahlung von der Erdoberfläche. Der Begriff Albedo wird für den Reflexionsgrad verwendet, der das Verhältnis zwischen der reflektierten und der einfallenden Energie darstellt. Es handelt sich um eine dimensionslose Größe, die auch in % ausgedrückt werden kann. Die Eigenschaften der Oberfläche bestimmen, wie viel Strahlung reflektiert wird - trockene, helle Oberflächen (bis zu 30 % der Strahlung wird reflektiert) oder Schnee (80 %) haben einen hohen Reflexionsgrad. Dunkle Oberflächen wie Wasser (10 %) oder feuchte Vegetation (ca. 20 %) reflektieren dagegen wenig.

RnL: der Fluss der langwelligen Strahlung zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre. Dieser Fluss wird durch die Wolkenbedeckung in der Atmosphäre und die Temperatur der Oberfläche selbst gesteuert. Die Erdoberfläche ist wärmer als die Atmosphäre. Daher gibt es Strahlung von der Erdoberfläche und der Wert von RnL ist negativ. Die Erdoberfläche verliert Energie. Bei wolkenlosem Himmel ist die Strahlung der Erdoberfläche höher als bei bewölktem Himmel.

Rn: Die Nettosonnenstrahlung ist der Fluss der kurzwelligen und langwelligen Strahlung zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre pro Flächeneinheit. Sie ist die Differenz zwischen der Summe aller eingehenden Energie und der Summe aller ausgehenden (abgestrahlten) Energie und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$Rn = Rs↓ - Rs↑ - RnL$$

Die Netto-Sonnenstrahlung kann durch folgende Prozesse genutzt und in Energiekomponenten umgewandelt werden:

$$Rn = LE + H + G + J + P$$

LE: Energie, die an der Erdoberfläche für die Wasserverdunstung oder Gruppenwärme (latente oder versteckte Verdunstungswärme) verwendet wird. Diese Energie wird zur Verdunstung von Wasser verwendet, d. h. zur Umwandlung des flüssigen Zustands in den gasförmigen Zustand. Wenn der Wasserdampf wieder zu einer Flüssigkeit kondensiert, wird die Gruppenwärme wieder freigesetzt.

H: Sensible Wärme (warme Luft): Die Sonnenenergie erwärmt die Oberfläche und die Luft steigt durch turbulente Strömung von ihr nach oben. Die steigende Temperatur der Oberfläche und der Luft wird wahrgenommen und kann mit einem Thermometer gemessen werden, daher wird sie als fühlbare Wärme bezeichnet.

G: Wärmestrom zum Boden. Im Sommer erwärmt sich der Boden allmählich (der Wärmestrom ist positiv); im Winter oder während einer kalten Sommernacht kühlt der Boden ab (der Wärmestrom ist negativ). Der Wärmestrom in den Boden nimmt mit dem Austrocknen des Bodens ab und ist auch in betroffenen Beständen gering.

Die beiden anderen Ströme sind vernachlässigbar und können daher in der Energiebilanz oft weggelassen werden:

P: Photosynthese. Der Fluss von Sonnenenergie durch Photosynthese in pflanzliche Biomasse ist ein sehr kleiner Teil der Gesamtenergiebilanz (max. 1 %). Er wird als die in der entstehenden pflanzlichen Biomasse gebundene Menge an Sonnenenergie berechnet.

J: Erwärmung der Vegetation. Die Energiemenge, die zur Erwärmung der Vegetation verwendet wird, hängt von der Menge der Biomasse und dem Wassergehalt dieser Biomasse ab.

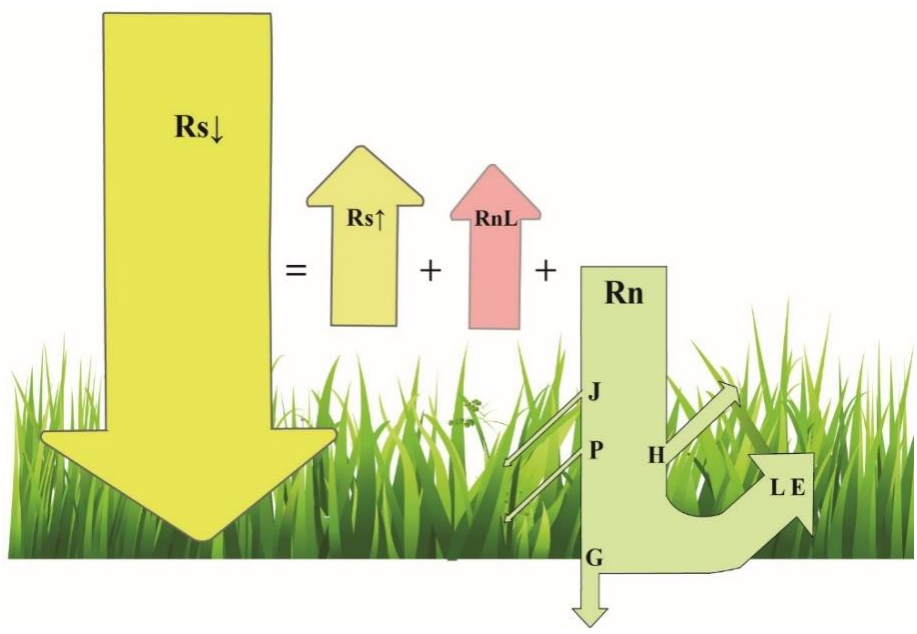


***Abb. 4**. Schematische Darstellung der Strahlungs- und Energiebilanz eines Bestandes. Mit einem Nettoradiometer können die wichtigsten Flüsse gemessen werden: die kurzwellige einfallende Sonnenstrahlung (Rs↓ = Kurzwellenstrahlung), die reflektierte kurzwellige Sonnenstrahlung (Rs↑)*

und die von der Erdoberfläche in die Atmosphäre emittierte langwellige Strahlung (RnL = Nettolangwellenstrahlung)." Der „Rest“ besteht aus der sogenannten Nettostrahlung (Rn = net radiation), die in der Vegetation hauptsächlich in der Verdunstung von Wasser als latente Verdunstungswärme (LE = evapotranspiration) gebunden ist, die Oberfläche erwärmt und von der erwärmten Oberfläche die Luft (H = sensible heat) und den Boden (G = ground heat flux) erwärmt. Ein sehr kleiner Teil der Sonnenenergie (maximal 1 %) wird durch Photosynthese in Biomasse (P) gebunden und erwärmt die Biomasse der Vegetation (J).

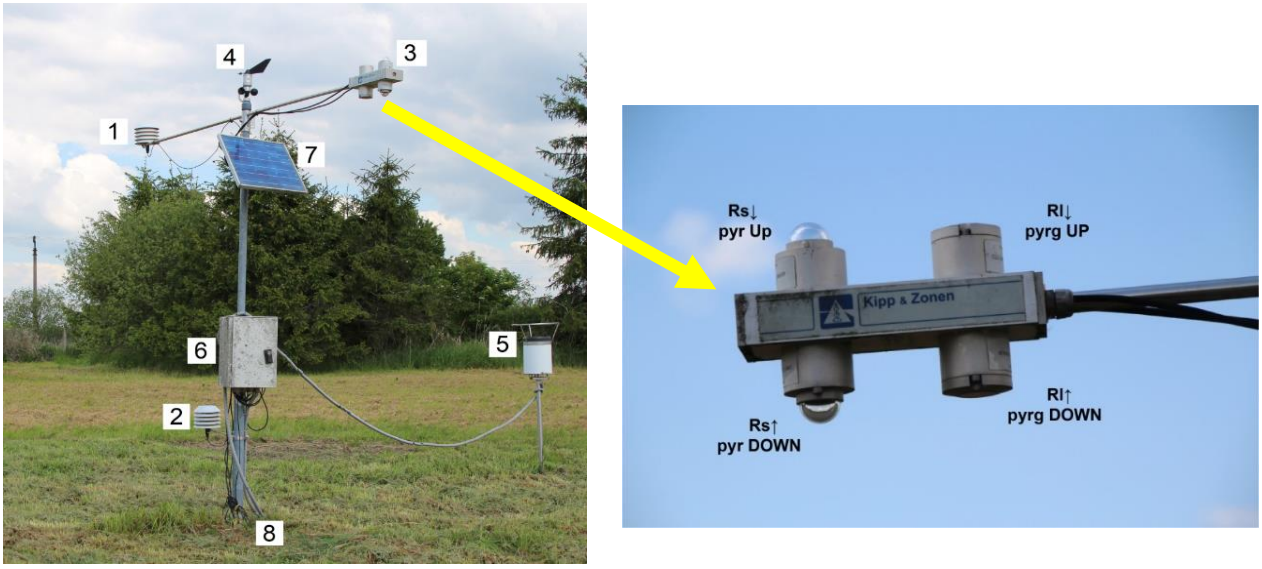


Abb. 5. *Meteorologische Station in Domanin.*

A) 1 - Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor in 2 m Höhe; 2 - Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor in 30 cm Höhe; 3 - Netzradiometer; 4 - Anemometer; 5 - Bootsregenmesser; 6 - Station mit Datenübertragung; 7 - Fotovoltaikanlage; 8- Bodenthermometer

B) Detail des Netzradiometers mit beschrifteten Sensoren pyrUP (Rs↓), pyrDOWN (Rs↑) zur Messung der einfallenden und reflektierten Sonnenstrahlung (Kurzwelle) und Sensoren pyrUP (Rl↓) und pyrDOWN (Rl↑) zur Messung der langwelligen Strahlung (Wärme)

Evapotranspiration und Sonneneinstrahlung

Die Evapotranspiration einer Vegetation ist die Gesamtmenge an Wasser, die an einem bestimmten Ort von der Boden- und Pflanzenoberfläche verdunstet (Verdunstung) und durch die Pflanzenöffnungen abgegeben wird (Transpiration). Die Evapotranspiration wird in Litern Wasser pro Quadratmeter oder mm ausgedrückt, ähnlich wie der Niederschlag. Die Menge des verdunsteten Wassers wird durch die Eigenschaften und den Zustand des Bestandes oder die Bedingungen in der Umgebung beeinflusst. Mais beispielsweise verbraucht 4 mm (Liter) pro m2/Tag, Feuchtgebietspflanzen (Weide, Schilf, Segge) oder ausgewachsene Eichen sogar mehr als 10 mm pro m2/Tag, wenn sie einer hohen Sonneneinstrahlung und Advektion trockener Luft aus der Umgebung ausgesetzt sind. Die Evapotranspiration und der latente Wärmestrom der

Evapotranspiration hängen mit der Verteilung der Sonneneinstrahlung in der Landschaft zusammen.

Die Evapotranspiration wird durch die grundlegenden physikalischen Prinzipien der Zustandsänderung von Wasser von flüssig zu gasförmig und umgekehrt bestimmt. Um 1 Liter Wasser bei einer Anfangstemperatur von 20 °C zu verdunsten, werden 2,45 MJ.l-1 Energie benötigt, was ungefähr 0,68 kWh Sonnenenergie entspricht (1 kWh = 3600 kJ, 2 450: 3600 = 0,68 kWh). Wenn die Temperatur sinkt, kondensiert der Wasserdampf wieder zu Wasser. Die im Wasserdampf gebundene Energie wird wieder freigesetzt und erwärmt die Oberflächen, auf denen sich der Wasserdampf niederschlägt. Nach dem Avogadroschen Gesetz hat ein molares Volumen eines Gases (18 Gramm Wasser) ein Volumen von 22,4 Litern. Aus einem Liter Wasser entstehen etwa 1244 Liter Wasserdampf (Zustandsgleichung für ideale Gase bei 0 °C).

Erinnern wir uns: ....

Um 1 Liter Wasser zu verdampfen, werden 2,45 MJ.l-1 Energie benötigt, was ungefähr 0,68 kWh

Sonnenenergie entspricht (1 kWh = 3600 kJ, 2 450: 3600 = 0,68 kWh).

Ein Liter Wasser erzeugt bei Normaldruck etwa 1244 Liter Wasserdampf.

Oberflächentemperatur der Landschaft

Die Verteilung der Sonnenstrahlung in der Landschaft hängt mit der Temperatur der Landschaft zusammen. Die Oberflächentemperatur der Landschaft ist ein Merkmal, das uns sagt, wie die Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche umgewandelt wird. Sie lässt Rückschlüsse darauf zu, welche Wärmekomponente überwiegt - die fühlbare Wärme, die die Umgebung erwärmt (was sich in einer hohen Temperatur äußert), oder die latente Wärme, die zur Verdunstung von Wasser verwendet wird und daher die Umgebung abkühlt (was sich in einer niedrigen Temperatur äußert). Physikalisch gesehen ist sie die Strahlungstemperatur, die sich aus der Strahlung jedes Körpers/jeder Oberfläche ergibt und sich aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ableiten lässt. Thermische elektromagnetische Strahlungsdetektionssysteme können zur Messung der Oberflächentemperatur eingesetzt werden. Dabei handelt es sich entweder um herkömmliche Wärmebildkameras (bodengestützte Messungen, luftgestützte oder unbemannte Fahrzeuge) oder um Abtastsysteme auf Satellitenträgern.

Die Oberflächentemperaturen an einem sonnigen Tag werden hauptsächlich durch die Verfügbarkeit von Wasser, d. h. die Verdunstung, bestimmt. Die niedrigste Oberflächentemperatur ist die der Wasseroberfläche, des Waldes und der mit Wasser versorgten Vegetation, da sie durch die Verdunstung des Wassers abgekühlt wird. Sand, undurchlässige Oberflächen und helle Farben haben eine viel höhere Oberflächentemperatur als die mit Wasser versorgte Vegetation. Die Oberflächentemperaturen von Kulturlandschaften an einem sonnigen Sommertag, gemessen mit einer Wärmebildkamera, sind in Abbildung 6 dargestellt. Die asphaltierte Straßenoberfläche und die gemähte Wiese haben die höchste Oberflächentemperatur, während die Wald- und Feuchtgebietsvegetation die niedrigste Oberflächentemperatur aufweist - sie werden durch die Wasserverdunstung abgekühlt.

Die Evapotranspirationsrate wird hauptsächlich durch den solaren Energieeintrag bestimmt, wenn Wasser im Überfluss vorhanden ist, und steigt ab dem Morgen allmählich bis zu einem

Maximum nach der Mittagszeit an. Meistens kommt es jedoch zu einem mittäglichen Rückgang sowohl der Photosynthese als auch der Evapotranspiration als Folge von Wasserknappheit. Darüber hinaus kommt es in Kulturlandschaften zur so genannten Advektion, d. h. erwärmte Luft strömt aus angrenzenden entwässerten, überhitzten Gebieten nach und nimmt mehr Wasserdampf auf, was die potenzielle Evapotranspiration erhöht.

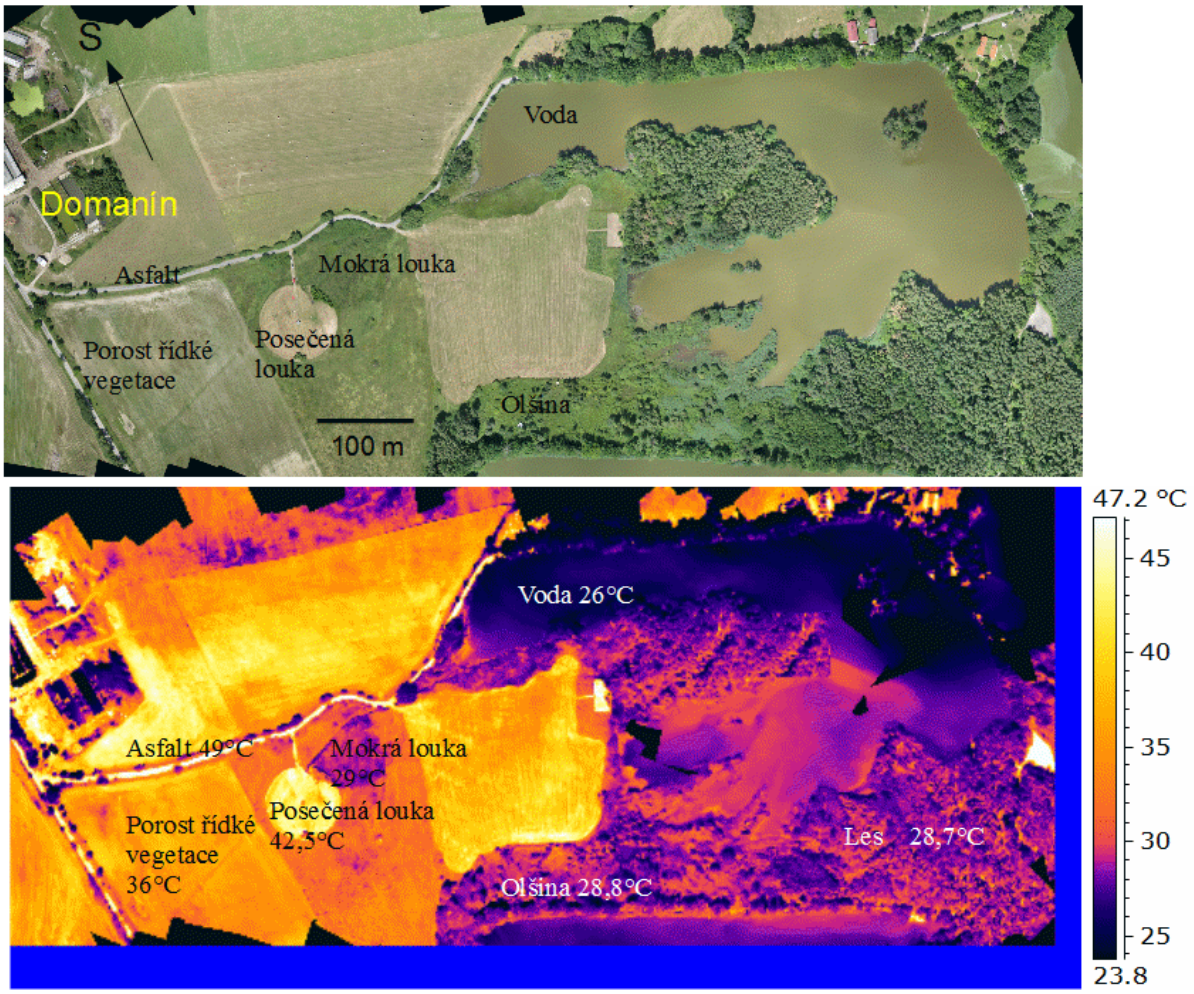


Abb. 6. *Oberflächentemperaturen der Kulturlandschaft an einem sonnigen Sommernachmittag in der Nähe des Dorfes Domanín in der Region Třeboň. Das Bild wurde von einem lenkbaren Luftschiff aufgenommen (9 Juli 2009; Lufttemperatur 30°C). (Voda = Wasser; Les = Wald; Mokrá louka = Feuchte Wiese; Posečená louka = Gemähte Wiese; Olšina = Erlenstand; Porost řídké vegetace = Spärliche Vegetationsbedeckung; Asfalt = Asphalt*

Die photosynthetische Aufnahme eines Moleküls Kohlendioxid und die Freisetzung eines Moleküls Sauerstoff wird von der Verdunstung von Hunderten von Wassermolekülen begleitet. Während die Photosynthese Einheiten von Watt Sonnenenergie pro 1m^2 Vegetation in Biomasse bindet, bindet die Evapotranspiration Hunderte von Watt pro 1m^2. Weniger als 1 % der einfallenden Sonnenenergie wird pro Jahr durch die Photosynthese in pflanzliche Biomasse gebunden, während die Evapotranspiration Dutzende von % der einfallenden Sonnenenergie verbraucht. Dieses Verhältnis wird auch durch den so genannten Transpirationskoeffizienten

ausgedrückt, der die Wassermenge in kg angibt, die zur Erzeugung von 1 kg Pflanzenbiomasse (ausgedrückt in Trockengewicht) verbraucht wird. Der Transpirationskoeffizient beträgt mehrere hundert kg Wasser pro kg produzierter Trockenmasse. Für einen sonnigen Tag in der Wachstumsperiode kann die Evapotranspirationsrate eines mit Wasser versorgten Waldes von 100 $mg.m^{-2}.s^{-1}$, was 240 $W.m^{-2}$ entspricht, als Richtwert dienen. Nach der Abholzung oder nach dem Austrocknen des Waldes steigt die Oberflächentemperatur an, weil die Sonnenenergie nicht in Wasserdampf gebunden wird, sondern die Oberfläche erwärmt, von der aus der Luft erwärmt wird (die latente Wärme des Dampfes nimmt ab und die fühlbare Wärme nimmt zu).

Zur Wiederholung. Latente Verdampfungswärme von Wasser: Um einen Liter Wasser bei 20 °C zu verdampfen, werden 0,68 kWh (2,4 MJ) Energie benötigt, und es werden 1244 Liter Dampf erzeugt. Diese Energie wird freigesetzt, wenn der Wasserdampf nach Erreichen des Taupunkts wieder zu flüssigem Wasser kondensiert, d. h. an kalten Orten. In der Natur verdunstet und kondensiert Wasser ständig; bei sonnigem Wetter sind bis zu Hunderten von Watt pro $1m^2$ in der latenten Verdunstungswärme gebunden.

An einem sonnigen Tag verdunsten 2-3 Liter Wasser von einer Wiese oder einem Wald, in dem landwirtschaftliche Nutzpflanzen angebaut werden, und bis zu 2 kWh Sonnenenergie sind im Wasserdampf gebunden, der nachts und morgens bei der Bildung von Nebel und Tau oder in der Atmosphäre bei der Bildung von Wolken (Kondensation von Wasserdampf zu flüssigem Wasser) freigesetzt wird. Diese im Wasserdampf gebundene Energie äußert sich nicht als Wärme. Pflanzen kühlen sich selbst und ihre Umgebung durch Verdunstung von Wasser.

An einem sonnigen Tag suchen wir den Schatten eines Baumes. Mit einem Infrarot-Thermometer können wir leicht den Unterschied in der Oberflächentemperatur zwischen dem sonnenbeschienenen Bürgersteig und dem Schatten eines nahen Baumes messen. Gleichzeitig können wir die Menge an Sonnenenergie messen, die auf den sonnenbeschienenen Bürgersteig fällt, und die Menge, die in den Schatten der Baumkronen geht.



Abb. 7. *Ein großer Baum verdunstet bei sonnigem Wetter bis zu 20 Liter Wasser pro Stunde und kühlt mit 14 kW.*

Unter einem Baum ist die Intensität des Sonnenlichts 10-mal geringer und die Temperatur 24 °C niedriger als auf einem sonnenbeschienenen Bürgersteig. Wie lässt sich dies erklären? Der Baum wird durch die Verdunstung von Wasser gekühlt. Für jedes Molekül CO2 werden mehrere hundert Wassermoleküle verdunstet. Eine Verdunstungsrate von 100 mg Wasser aus 1 $m^2.s^{-1}$ entspricht einem Sonnenenergieverbrauch für die Verdunstung (latente Verdunstungstemperatur) von 240 W.

Erinnern wir uns: ....

Für jedes Molekül CO_2 werden mehrere hundert Wassermoleküle ausgestoßen.

Eine Verdampfungsrate von 100 mg (0,1 ml) Wasser aus 1 $m^2.s^{-1}$ entspricht

einem Sonnenenergieverbrauch für die Verdampfung (latente Verdampfungstemperatur) von 240 W.



Abb. 8. *Die Oberflächentemperaturen auf der sonnenbeschienenen Fahrbahn des Platzes liegen bei über 40 °C und die Temperatur des Sonnenschirms bei über 60 °C.*

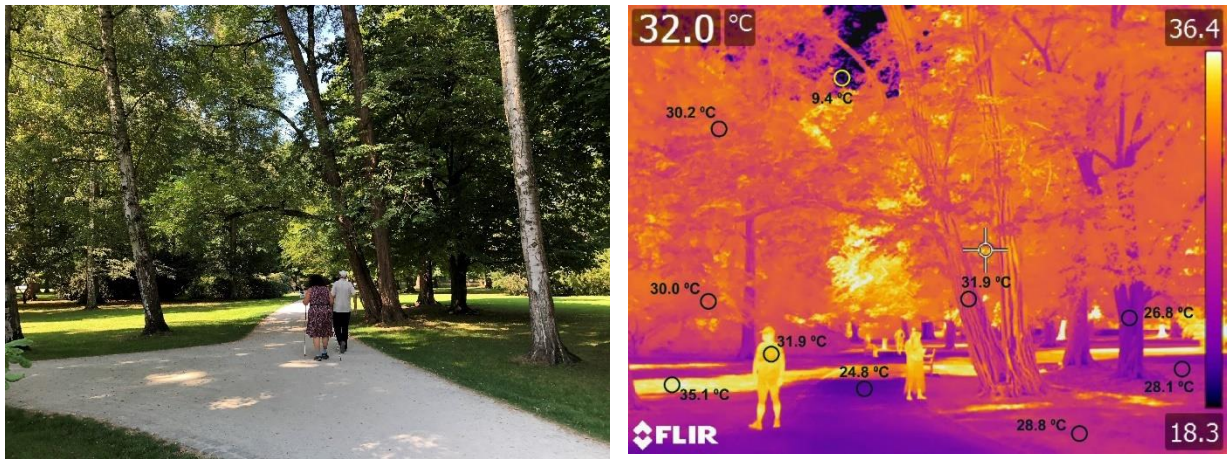


Abb. 9. *In einem nahe gelegenen Park im Schatten großer Bäume liegt die Oberflächentemperatur unter 30 °C, und die menschlichen Figuren haben eine höhere Oberflächentemperatur, so dass die Umgebung sie abkühlt.*

Literatur

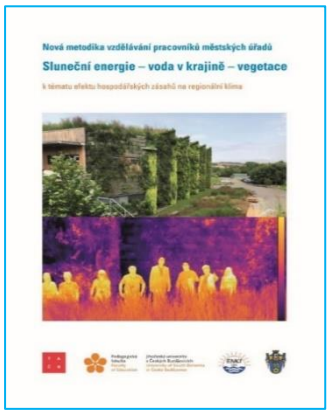
Materialien aus dem abgeschlossenen Projekt TL01000294 (Solarenergie, Wasser in der Landschaft, Vegetation: Eine neue Methodik zur Ausbildung kommunaler Mitarbeiter und Innovation im Schulunterricht zum Thema Wirkung ökonomischer Interventionen auf das regionale Klima) auf der Website https://projekty.pf.jcu.cz/svv/ oder https://www.enki.cz/download/

Pokorný, J., Ryplová, R., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z. (2021): **Slunce-voda-rostliny-klima. Podklady k poznání a výuce.** ENKI, o.p.s. Třeboň, 197 s.

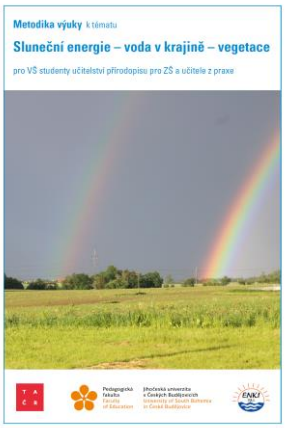
Ryplová R., Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2021). **Metodika výuky k tématu Sluneční energie – voda v krajině – vegetace pro vysokoškolské studenty učitelství přírodopisu pro ZŠ a učitele z praxe.** ENKI, o.p.s.,Třeboň

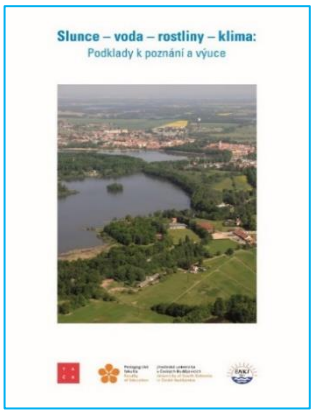
Ryplová R., Pokorný, J., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., (2021a). **Metodika výuky k tématu Sluneční energie – voda v krajině - vegetace pro žáky 9. ročníků ZŠ a víceletých gymnázií.** ENKI, o.p.s.,Třeboň

Pokorný, J., Ryplová R., Hesslerová, P., Jirka, V., Vácha, Z., Procházka, M., (2021). **Nová metodika vzdělávání pracovníků městských úřadů k tématu efektu hospodářských zásahů na regionální klima.** ENKI, o.p.s. Třeboň









Projektergebnisse TL05000150 Biomasse in einer nachhaltigen Landschaft: eine digitale Plattform zum Unterrichten der Photosynthese im Wasser und an Land, um mehr über die Rolle von Pflanzen in der Landschaft zu erfahren. Interaktive Lehrbücher für Grund- und weiterführende Schulen, einschließlich Lehrmethoden, sind erhältlich bei https://fotosyntezavkrajine.cz/



ERASMUS+, Education for Plant Literacy

Vier Lehrbücher verschiedener Bildungsstufen in fünf Sprachen – Tschechisch, Englisch, Deutsch, Finnisch, Niederländisch.

https://planteducation.eu/#results

