

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a biometeorologie



**Stanovení evapotranspirace metodou používanou FAO a
její využití v praxi**

Bakalářská práce

Autor práce: Kateřina Chvalová

Vedoucí práce: Dr. Ing. Jan Pivec

© 2015 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Stanovení evapotranspirace metodou používanou FAO a její využití v praxi" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 11.dubna 2015

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Dr. Ing. Janu Pivcovi za trpělivost, odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi v průběhu psaní bakalářské práce ochotně poskytoval.

Stanovení evapotranspirace metodou používanou FAO a její využití v praxi

FAO method for definition of evapotranspiration and its practical usage

Souhrn

Tato práce se zabývá rozborem FAO Penman - Montheit rovnice, která vypočítává referenční evapotranspiraci a analyzuje jednotlivé kroky výpočtu. V úvodu je vysvětlen pojem evapotranspirace a pojmy s ní spojené. Dále se práce věnuje faktorům, které evapotranspiraci ovlivňují a způsobům jejího stanovení. Největší prostor je zde věnován samotné FAO Penman – Montheit metodě a analýze jednotlivých kroků jejího výpočtu. Dále se práce zabývá problematikou rostlinné evapotranspirace, určení plodinových koeficientů a způsoby jejího stanovení. Poslední část práce se věnuje využití evapotranspirace v praxi.

Klíčová slova: referenční evapotranspirace, referenční povrch, porostní (crop) koeficient, Penman – Montheit algoritmus

Summary

This paper deals analysis of the FAO Penman - Montheit equation that calculates reference evapotranspiration and analyzes the different steps of the calculation. In the introduction is explained the notion of evapotranspiration and related notions. The thesis further concentrates to factors affecting it and methods of its determination. The largest latitude is devoted to itself FAO Penman - Montheit method and analysis of each step of the calculation. Furthermore deals this paper the problems of crop evapotranspiration, crop coefficients and determine its determination. The last part is devoted to the use of evapotranspiration in practice.

Keywords: reference evapotranspiration, reference surface, the vegetation (crop) factor, Penman - Montheit algorithm

Obsah

| | |
|--|----------|
| 1 Úvod | 7 |
| 2 Cíl práce | 8 |
| 3 Evapotranspirace | 9 |
| 3.1 Definice | 9 |
| 3.1.1 Proces evapotranspirace..... | 10 |
| 3.1.1.1 Jednotky | 11 |
| 3.1.1.2 Faktory ovlivňující evapotranspiraci | 11 |
| 3.1.2 Stanovení evapotranspirace | 12 |
| 3.1.3 ET měření | 12 |
| 3.2 Penman – Montheit rovnice | 13 |
| 3.2.1 Formulace rovnice | 13 |
| 3.2.2 Úprava celkového povrchového odporu | 14 |
| 3.2.2.1 Úprava aerodynamického odporu (r_a)..... | 14 |
| 3.2.2.2 Úprava povrchového odporu (r_s) | 14 |
| 3.2.3 Referenční plocha | 15 |
| 3.2.4 FAO Penman – Montheit rovnice | 16 |
| 3.3 Meteorologické údaje..... | 18 |
| 3.3.1 Meteorologické faktory určující evapotranspiraci | 18 |
| 3.3.1.1 Záření (R) | 18 |
| 3.3.1.2 Teplota vzduchu..... | 21 |
| 3.3.1.3 Vlhkost vzduchu | 21 |
| 3.3.1.4 Rychlost větru (u) | 22 |
| 3.3.2 Atmosférické parametry | 23 |
| 3.3.2.1 Atmosférický tlak (P)..... | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.2.2 | Latentní teplo výparu (λ) | 23 |
| 3.3.2.3 | Tok tepla do půdy (G)..... | 23 |
| 3.3.3 | Sběr klimatických dat | 24 |
| 3.3.4 | Minimální požadavky na údaje..... | 24 |
| 3.4 | Stanovení referenční evapotranspirace | 25 |
| 3.4.1 | Postup výpočtu..... | 25 |
| 3.4.2 | Metoda přímého měření výparu..... | 26 |
| 3.4.3 | Výpar měřený výparoměry | 27 |
| 3.5 | Úvod do rostlinné evapotranspirace..... | 28 |
| 3.5.1 | Výpočetní postupy | 28 |
| 3.5.2 | Faktory ovlivňující plodinový koeficient | 28 |
| 3.5.2.1 | Typy plodin | 28 |
| 3.5.2.2 | Podnebí | 29 |
| 3.5.2.3 | Výpar z půdy | 29 |
| 3.5.3 | Průběh růstu zemědělských plodin | 29 |
| 3.6 | Rostlinný plodinový koeficient | 30 |
| 3.6.1 | Jednoduchý koeficient (K_c)..... | 30 |
| 3.6.1.1 | Délka fází růstu..... | 30 |
| 3.6.1.2 | Konstrukce křivky plodinového koeficientu..... | 32 |
| 3.6.1.3 | Výpočet evapotranspirace plodin | 32 |
| 3.6.2 | Složený plodinový koeficient ($K_{cb}+K_e$) | 33 |
| 3.6.2.1 | Transpirační složka ($K_{cb}ET_o$)..... | 34 |
| 3.6.2.2 | Evaporační složka (K_eET_o)..... | 35 |
| 4 | Využití evapotranspirace v praxi..... | 36 |
| 5 | Závěr..... | 37 |
| 6 | Seznam literárních pramenů..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 7 Seznam použitých zkratek a symbolů | 41 |
| 8 Samostatné přílohy | 43 |

1 Úvod

Evapotranspirace patří k hlavním faktorům hydrologické bilance a je ovlivněna různými faktory. Správné stanovení evapotranspirace je jedním ze základních úkolů nejen při bilancování zásob vláh v půdě, a to jak pro potřeby přípravy návrhových podkladů pro závlahové stavby, tak případně i při přímém řízení závlahového režimu. Přesné odhady ET toku jsou životně důležité pro zemědělské plánování a hospodaření s vodními zdroji (Rahimi at al., 2014).

Vegetační kryt hraje významnou roli v energetické bilanci povrchu. Prostřednictvím výparu vody ze svého povrchu aktivně disipuje značnou část přicházející energie do formy latentního tepla výparu, která je dále distribuována na zemském povrchu (Procházka a Brom, 2006).

Pokud není v textu uvedeno jinak, vycházelo se z práce autorů Allen, R.G., Rereira, L.S., Raies, D., Smith, M..1998. Crop evaporation: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. United Nations, Rome 1. p. 15.

2 Cíl práce

Cílem práce je popsat a porozumět algoritmu stanovení referenční evapotranspirace porostů plodin, a příklady jeho použití po celém světě i s praktickým stanovením v podmínkách ČR.

3 Evapotranspirace

3.1 Definice

Výpar (evaporace, evapotranspirace) jako jeden ze tří základních prvků hydrologické bilance (srážky, odtok, výpar) patří vzhledem k vzájemně velmi složité interakci ve smyslu půda x rostlina x atmosféra k nejkomplicovanějším a nejobtížněji stanovitelným prvkům v přírodě.

Jde o složitý fyzikální proces, který probíhá na všech vlhkých površích v závislosti na množství dostupné energie k výparu (Knozová a kol., 2005). V současné době nejsou k dispozici uspokojivé metody verifikace celého evaporačního procesu, které by se mohly realizovat v operativním měřítku.

Na světě existuje celá řada vzorců od nejjednodušších až po ty nejsložitější, které jsou součástí různých matematických modelů řešících kromě vlastní evaporace (evapotranspirace) též vlhkostní poměry v půdě, problematiku vláhových deficitů v půdě pod různými plodinami (porosty), resp. otázky hydrologické bilance v krajině (Rožnovský a Litschmann, 2005). Dále se zabývají výpočty aktuální a potenciální evapotranspirace. Potenciální evapotranspirace se pak redukuje na skutečnou evapotranspiraci pomocí experimentálně ověřených vztahů mezi relativní evapotranspirací a obsahem vody v půdě (Novak a kol., 1997).

Referenční evapotranspirací (ET_o) se v tomto smyslu rozumí evapotranspirace z hypotetického povrchu velmi podobnému standardnímu travnímu porostu. Odhady referenční evapotranspirace jsou široce používány v problematice zavlažování. (Droogers and Allen, 2002).

Rostlinná evapotranspirace za standardních podmínek (ET_c) je evapotranspirace, která vzniká na dobře hnojených plodinách pěstovaných ve velkých oblastech za optimálních podmínek půdní vody. Cílem je dosažení plné produkce v rámci daných klimatických podmínek.

Rostlinná evapotranspirace dle nestandardních podmínek (ET_{cadj}) je evapotranspirace z plodin pěstovaných v rámci řízení a environmentálních podmínek, které se liší od standardních podmínek.

Obrázek 1 uvádí formy evapotranspirace

3.1.1 Proces evapotranspirace

Evapotranspirace je proces, kdy se voda z kapalného nebo tuhého stavu mění na vodní páru. Tento termín vznikl spojením dvou pojmů – evaporace (což je pasivní výpar z vodního nebo z půdního povrchu, který není zakryt vegetací) a transpirace (což je výdej vody z vegetace).

Evaporace a transpirace mohou probíhat současně a proto není snadné tyto dva procesy rozlišit. Kromě dostupnosti vody v ornici je odpařování z půdy určeno hlavně podílem slunečního záření, které dopadá na povrch půdy.

Měření evaporace a transpirace porostu má význam pro tok vody a energie v přirozených rostlinných společenstvech a na zemědělských plochách (Možný, 2005).

Když je plodina malá, voda se odpařuje převážně z půdy, ale v okamžiku, kdy je rostlina plně vyvinuta a zcela pokryje půdu, stává se transpirace hlavním procesem. Při setí téměř 100% evapotranspirace pochází z evaporace, zatímco při plném pokrytí půdy rostlinami pochází téměř 90% z transpirace.

Evaporace je proces, ve kterém je voda v kapalném stavu přeměněna na vodní páru a odpařováním odstraněna z povrchu (Bierkens at al., 2008). Voda se vypařuje z různých povrchů (jezera, řeky, chodníky, půda a povrch vegetace – tzv. intercepční výpar). Hybnou silou pro odstranění vody z páry odpařující se z povrchu je rozdíl mezi tlakem vodní páry odpařující se z povrchu a z okolní atmosféry, tzv. sytostní doplněk popř. vodní jímavost vzduchu. V průběhu odpařování se okolní vzduch postupně nasytí. Pokud se vlhký vzduch nerozptýlí do ovzduší, může se proces zpomalit nebo úplně zastavit.

Transpirace je složená z odpařování kapalné vody obsažené v rostlinných tkáních a odstraňování par do ovzduší. Plodiny převážně ztrácejí vodu průduchy. Průduchy jsou malé otvory na listu, kterými odchází/jsou přijímány plyny a vodní pára. Voda je společně s živinami transportována z kořenů rostlinou do atmosféry. Transpirace probíhá v listech a to zejména v mezibuněčných prostorech. Výměna par je řízena svíráním otvorů průduchů. Transpirace je ovlivněna vlastnostmi plodin, environmentálními aspekty a pěstitelskými postupy. Při hodnocení transpirace by měl brán v potaz nejen typ plodiny, ale i rozvoj plodiny nebo biotop. Problematika využívání vody rostlinami je velmi složitá. Zahrnuje pozorování a měření mnoha biologických proměnných (Pereira at al., 2006).

Přesné odhady povrchových toků a zejména evapotranspirace jsou důležité pro práci vodohospodářů a zavlažovacích inženýrů (Courault at al., 2005).

3.1.1.1 Jednotky

Rychlost evapotranspirace je obvykle určována v milimetrech (mm) za jednotku času. Hodnota vyjadřuje množství vody ztracené z osetého povrchu v jednotkách výšky vodního sloupce. Časovou jednotkou rozumíme hodinu, den, měsíc, celé vegetační období nebo dokonce i deset let. Jeden hektar plochy (10000 m^2 a 1 mm je rovna 0,001 m. Ztráta 1 mm vody odpovídá ztrátě 10 m^3 na hektar). Můžeme tedy říci, že 1 mm den^{-1} odpovídá do $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ den}^{-1}$. Výšku vodního sloupce můžeme vyjádřit z hlediska energie přijaté na jednotku plochy. Tato energie se vztahuje na energii a teplo potřebné k výparu. Tuto energii označujeme jako latentní teplo výparu (λ) a je funkcí teploty vody. Při teplotě $20 \text{ }^\circ \text{C}$, je λ asi $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$. To tedy znamená, že příkon $2,45 \text{ MJ m}^{-2}$ je schopen odpařovat 0,001 m vody. Míru evapotranspirace, vyjádřenou v jednotkách $\text{MJ m}^{-2} \text{ den}^{-1}$, označujeme jako λET a nazýváme tok latentního tepla.

Tabulka 1 uvádí konverzní faktory pro evapotranspiraci.

3.1.1.2 Faktory ovlivňující evapotranspiraci

Mezi faktory ovlivňující evapotranspiraci patří především počasí, charakteristika plodiny a environmentální aspekty. Základními meteorologickými parametry ovlivňující evapotranspiraci jsou záření, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlost větru. Vodní jímavost atmosféry je vyjádřena jako referenční evapotranspirace specifického standardizovaného travního povrchu (ET_0).

Při posuzování evapotranspirace u plodin pěstovaných na velkých, dobře obhospodařovaných polích musíme vzít v úvahu také typ plodiny, rozmanitost a fáze vývoje.

Faktory, jako je půdní salinita, omezené používání hnojiv, přítomnost pro vodu nepropustných půdních horizontů může při nedostatečné kontrole nebo absenci kontroly chorob a škůdců nebo kvality půdy omezit vývoj plodin a snížit evapotranspiraci. Další faktory, které je třeba vzít v úvahu při posuzování ET jsou půdopokryvné faktory (hustota porostu a obsah půdní vody).

Při posuzování míry ET je důležité zvážit rozsah pěstebních postupů, které působí na vlastnosti plodin a zároveň ovlivňují proces ET. Pěstitelské postupy a typ zavlažování mohou změnit mikroklima, vlastnosti nebo ovlivňovat zvlhčení půdy a půdního povrchu. Větrolamy můžeme snižovat rychlost větru a tím i míru ET z pole. Účinnost větrolamů závisí na jejich šířce, druhové skladbě dřevin a především na jejich propustnosti pro vzdušné proudění (Dufková, 2007). Právě struktura větrolamy, která je do značné míry závislá na skladbě

dřevin a jejich rozmístění uvnitř větrolamu, určuje jeho účinky na modifikaci proudění vzduchu a následné ovlivnění dalších mikroklimatických parametrů (Litschmann a Rožnovský, 2005).

Obrázek 2 uvádí faktory ovlivňující evapotranspiraci

3.1.2 Stanovení evapotranspirace

Správné stanovení potenciální evapotranspirace je jedním ze základních úkolů nejen při bilancování zásob vláh v půdě, a to jak pro potřeby přípravy návrhových podkladů pro závlahové stavby, tak případně i při přímém řízení závlahového režimu. Potenciální evapotranspirace charakterizuje hodnotu výparu za předpokladu nelimitujících podmínek přísunu vody k aktivnímu povrchu (Punčochář, 2011). Údaje o časovém a prostorovém rozložení potenciální evapotranspirace jsou důležitými vstupními údaji pro celou řadu projektových studií v lesním a vod-ním hospodářství, zemědělství, energetice a v ochraně životního a přírodního prostředí (Rožnovský a Litschmann, 2005).

3.1.3 ET měření

Evapotranspiraci není snadné měřit. Existuje mnoho metod měření a výpočtů. Tyto metody jsou často nákladné, náročné z hlediska přesnosti měření a pro odhad denní evapotranspirace využívají omezené sady vstupů (Donatelli at al., 2006).

Stanovit evapotranspiraci můžeme přímým měřením pomocí měřících přístrojů tzv. lyzimetrů. V rámci EU existuje cca 180 lyzimetrických stanic s 3 000 lyzimetry, nejvíce se jich nachází v SRN (Možný, 2005).

3.2 Penman – Monteith rovnice

3.2.1 Formulace rovnice

V roce 1948 H. L. Penman zkombinoval energetickou bilanci s metodou přenosu hmoty a odvodil rovnici pro výpočet odpařování z otevřené vodní plochy za standardních klimatologických záznamů slunečního svitu, teploty, vlhkosti a rychlosti větru. Tato tzv. kombinační metoda byla dále rozvíjena mnoha vědci a rozšířena na oříznuté povrchy zavedením faktoru odporu. Terminologie odporu rozlišuje mezi aerodynamickým odporem a faktorem povrchového odporu. Parametry povrchového odporu se často kombinují do jednoho parametru celkového povrchového parametru odporu, který pracuje společně s aerodynamickým odporem. Dobré výsledky lze získat z naměřených a vypočtených hodnot evapotranspirace, zejména pro tzv. referenční povrch homogenního travního porostu. Penman-Monteith formu kombinační rovnice lze vyjádřit:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

kde:

| | |
|---------------|--|
| λET | je tok latentního tepla [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| R_n | je radiační bilance na povrch plodiny [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| G | je tok tepla do půdy [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| $(e_s - e_a)$ | je sytostní doplněk |
| ρ_a | je hustota vzduchu při konstantním tlaku [kg m^{-3}] |
| c_p | je měrné teplo vzduchu [$\text{kJ kg}^{-1} \text{den}^{-1} \text{C}^{-1}$] |
| Δ | představuje sklon křivky tlaku nasycené vodní páry v závislosti na teplotě vzduchu [kPa C^{-1}] |
| γ | je psychrometrická konstanta [kPa C^{-1}] |
| r_s a r_a | jsou povrchový a aerodynamický odpor [s m^{-1}] |

Penman-Monteith rovnice jak byla formulována, obsahuje všechny parametry, které řídí výměnu energie odpovídající latentnímu toku tepla (evapotranspirace) z celkové rozlohy vegetace. Většina parametrů se měří nebo lze snadno vypočítat z údajů o počasí. Rovnice

může být použita pro přímý výpočet evapotranspirace všech plodin se známými hodnotami povrchového a aerodynamického odporu.

3.2.2 Úprava celkového povrchového odporu

Pro odvození vztahu pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu z původní Penman-Monteithovy kombinační rovnice jsou nutné následující úpravy (Rožnovský a Litschmann, 2005).

3.2.2.1 Úprava aerodynamického odporu (r_a)

Aerodynamický odpor popisuje odpor porostu vůči vertikálnímu přenosu tepla a vodní páry a zahrnuje tření z proudění vzduchu přes vegetativní povrchy při neutrálních podmínkách stability bezprostředně přiléhající vrstvy atmosféry. Přenos tepla a vodní páry z vypařujícího se povrchu do vrstvy bezprostředně přiléhající k povrchu plodiny je určen aerodynamickou rezistencí podle vztahu:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z} \quad (2)$$

kde:

r_a je aerodynamický odpor [$s\ m^{-1}$]

z_m je výška měření rychlosti větru [m], $z_m = 2$

z_h je výška měření vlhkosti vzduchu [m], $d = 2$ efektivní výška porostu, $d = 2/3 * h$

z_{om} je součinitel dynamické drsnosti povrchu [m], $z_{om} = 0,123 * h$

z_{oh} je součinitel dynamické drsnosti pro přenos tepla a vodní páry [m], $z_{oh} = 0,1 * z_{om}$

k je Karmanova konstanta [-], $k = 0,41$

u_z je rychlost větru ve výšce měření z [$m\ s^{-1}$]

3.2.2.2 Úprava povrchového odporu (r_s)

Povrchový odpor (r_s) popisuje odpor odpařování skrze průduchové otvory, celkové listové plochy a povrchu půdy. Může být odhadnut použitím meteorologických dat a korelačních měření. (Sumner and Jacobs, 2005).

Pro jeho výpočet používáme jednoduchý vzorec:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (3)$$

kde:

- r_s je (celkový) povrchový odpor [$s\ m^{-1}$]
 r_l je stomatální odpor dobře osvětleného listu [$s\ m^{-1}$], $r_l=100\ s$
 LAI_{active} je aktivní (osvětlené listy) index listové plochy [m^2 (listová plocha) m^{-2} povrch půdy)]

Leaf Area Index (LAI) – index listové plochy je poměr listové plochy (horní strana) na jednotku plochy půdy pod ní. LAI závisí na hustotě rostlin a odrůdě plodiny. Hodnota odporu průduchů r_l je stavena jako průměrný odpor průduchů jednotlivých listů. Tento odpor se u konkrétních plodin liší jak u daných odrůd tak i vlivem způsobu pěstování.

Veličina r_l je ovlivněna klimatem a dostupností vody. Odpor se zvyšuje, když se plodině snižuje dostupnost vody, čímž se omezuje u plodiny i evapotranspirace (Rožnovský a Litschmann, 2005).

$$LAI_{active} = 0.5 LAI \quad (4)$$

$$LAI = 24 h$$

kde:

h je výška standardizovaného povrchu zastříženého trávníku [m]

Obrázek 3 znázorňuje jednotlivé odpory

3.2.3 Referenční plocha

V květnu 1990 byla uskutečněna konzultace odborníků a výzkumných pracovníků FAO ve spolupráci s Mezinárodní komisí pro závlahy a odvodnění a Světovou meteorologickou organizací. Odborná porota doporučila přijetí Penman-Monteithovi kombinační metody jako nový standard pro referenční evapotranspiraci a informovala o postupech pro výpočet různých variací parametrů. Referenční evapotranspirace je rychlost, při které se voda, je-li k dispozici, odpařuje z půdy a rostlinného povrchu specifické plodiny (Grismer at al., 2002).

Tráva společně s vojtěškou jsou dobře prozkoumané plodiny a s ohledem na jejich aerodynamické a povrchové vlastnosti jsou přijímány po celém světě jako referenční plocha.

Experti FAO při konzultaci o revizi metodik FAO pro požadavky plodin na vodu přijali následující jednoznačnou definici referenční plochy: "Hypotetická referenční plodina s předpokládanou výškou 0,12 m, pevným povrchovým odporem 70 m^{-1} a albedem 0,23." Referenční plocha se podobá rozsáhlé ploše zelené trávy jednotné výšky, s plnou pokryvností a s adekvátním množstvím disponibilní vody.

3.2.4 FAO Penman – Monteith rovnice

Tato metoda výpočtu překonává nedostatky předchozí metody FAO Penman-Monteithe poskytuje hodnoty více v souladu se skutečnými daty při užívání vody pro plodiny po celém světě. Z původní Penman-Monteithovy rovnice, rovnice aerodynamického a povrchového odporu lze odvodit rovnici pro stanovení referenční evapotranspirace:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

kde:

ET_o je referenční evapotranspirace hypotetického povrchu [mm den^{-1}]

R_n je radiační bilance na povrchu rostliny [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]

G je tok tepla do půdy [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]

T je průměrná denní teplota vzduchu ve 2 m výšce [$^{\circ}\text{C}$]

u_2 je rychlost větru ve 2 m výšce [m s^{-1}]

e_s je tlak nasycené vodní páry [kPa]

e_a je aktuální tlak vodní páry [kPa]

$e_s - e_a$ je sytostní doplněk [kPa]

Δ je sklon křivky tlaku nasycené vodní páry v závislosti na teplotě [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

γ je psychrometrická konstanta [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Referenční evapotranspirace poskytuje standard, dle kterého může být evapotranspirace porovnávána v různých oblastech a v různém období roku. Rovnice používá standardní klimatologické záznamy slunečního záření (svitu), teploty vzduchu, vlhkosti a rychlosti větru. Aby byla zajištěna integrita výpočtů, mělo by být měření provedeno ve výšce

2 m (nebo výpočty převedeny na tuto výšku) nad rozsáhlými plochami plně zapojeného trávniho porostu s dostatkem vody. Na základě evapotranspirační rovnice lze očekávat, že lze stanovit evapotranspiraci pro každou klimatickou situaci díky zjednodušením při sestavování a eliminaci chyb v měření dat.

Je pravděpodobné, že přesné nástroje v rámci vynikajících ekologických a biologických podmínek v řízení ukáží, že FAO Penman-Monteithova rovnice se odchýlí od skutečných měření. Nicméně odborná veřejnost souhlasí s používáním hypotetické referenční definice FAO Penman-Monteith rovnice jako definice ET_o při odvozování a vyjadřování koeficientů plodin. Je důležité, aby při porovnávání FAO Penman-Monteithovy rovnice a ET_o měření byla plná Penman-Monteithova rovnice a související rovnice r_a a r_s zohledněny při naměřených rozdílech ET v důsledku rozdílných výšek trav. Rozdíly v naměřených výškách mohou výrazně změnit LAI, d , z_{om} a ET_o měření a tím ovlivnit předpokládané výsledné hodnoty. FAO Penman-Monteith rovnice je ucelené a jednoduché znázornění fyzikálních a fyziologických faktorů, jimiž se řídí procesy evapotranspirace.

Pomocí FAO Penman-Monteithovy rovnice pro referenční evapotranspiraci (ET_o) lze vypočítat koeficienty evapotranspirace plodin – plodinové koeficienty (K_c) ve sledovaných lokalitách, vztažených k evapotranspiraci sledovaných plodin (ET_c), tedy $K_c = ET_c/ET_o$. Odlišnosti příslušných charakteristik skutečných rostlin od hypotetického porostu jsou zahrnuty v samotném plodinovém koeficientu (K_c), sloužícím pro agregaci fyzických a fyziologických rozdílů mezi plodinami a zmíněnou definicí.

Odvodit FAO Penman-Monteithovu rovnici u referenčních plodin lze díky standardizovaným výškám pro měření rychlosti větru, teploty, vlhkosti a daným aerodynamickým a povrchovým odporům. Metoda Penman-Monteith je doporučována jako jediný způsob pro určení referenční evapotranspirace podle FAO (Xu Chong-yu at al., 2006).

3.3 Meteorologické údaje

Metody pro výpočet evapotranspirace z meteorologických dat vyžadují různé klimatologické a fyzikální parametry. Některé z těchto údajů se měří přímo v meteorologických stanicích. Ostatní parametry se týkají běžně měřených dat a mohou být odvozeny pomocí přímých nebo empirických vztahů. Výpočet proběhne pro danou časovou jednotku (metodika FAO uvádí též zpracování pro časové intervaly hodina, 10 dní a měsíc) na základě vstupu základních meteorologických údajů (teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru a trvání slunečního svitu), přičemž všechny ostatní parametry jsou nastaveny na konstantní hladinu. Tímto způsobem lze tedy relativně snadně porovnávat jednotlivé navzájem odlišné oblasti (Rožnovský a Litschmann, 2005).

3.3.1 Meteorologické faktory určující evapotranspiraci

Meteorologické faktory určující evapotranspiraci jsou meteorologické parametry, které poskytují energii pro odpařování a odstranění vodní páry z odpařujícího se povrchu. Hlavní parametry jsou: sluneční záření, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlost větru.

3.3.1.1 Záření (R)

Proces evapotranspirace je určen podle množství dostupné energie potřebné k odpařování vody. Sluneční záření je největším zdrojem energie a je schopno měnit velké množství kapalné vody na vodní páru.

Extraterestické záření (R_a)

Globální (extraterestické) záření představuje záření, dopadající na jednotku horizontální plochy na vnější hranici atmosféry (Kohut, 2005).

Místní intenzita záření je určena úhlem mezi směrem slunečních paprsků a kolmicí k povrchu atmosféry. Tento úhel se během dne bude lišit v různých zeměpisných šířkách a v různých ročních obdobích. Sluneční záření přijaté v horní části zemské atmosféry na vodorovném povrchu se nazývá extraterestické (solární) záření. Extraterestické záření je funkcí zeměpisné šířky, data, času a dne.

Sluneční nebo krátkovlnné záření (R_s)

Množství záření dosahující horizontální roviny je známé jako globální sluneční záření. Je součtem přímého záření krátkovlnného a difuzního záření oblohy. Sluneční záření lze vypočítat podle vzorce, který se týká slunečního záření, extraterestického záření a relativního slunečního svitu:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (6)$$

kde:

R_s je sluneční nebo krátkovlnné záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]

n je skutečná doba trvání slunečního svitu [h]

N je maximální možná doba trvání slunečního svitu nebo denní doby [hod]

n / N je relativní sluneční svit [-]

R_a je extraterestické záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]

Bilance dlouhovlnného záření (R_{nl})

Sluneční záření, které pohlcuje zemský povrch je převedeno na tepelnou energii. Země ztrácí tuto energii ve formě dlouhovlnného záření. Dlouhovlnné záření (R_{nl}) je pohlcováno atmosférou nebo se ztrácí ve vesmíru. Část záření najde cestu zpět k zemskému povrchu. Vyzařované dlouhovlnné záření je téměř vždy větší, než je dopadající dlouhovlnné záření. Míra vyzařované dlouhovlnné energie je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty povrchu, Tento vztah je vyjádřen kvantitativně podle Stefan-Boltzmannova zákona. Čisté dlouhovlnné záření vypočítáme podle rovnice:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max k^4} + T_{\min k^4}}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (7)$$

kde:

R_{nl} je odchozí dlouhovlnné záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta [$4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]

$T_{\max k}$ je maximální absolutní teplota během 24 hodin období [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.15$]

| | |
|----------------|---|
| $T_{\min k}$ | je minimální absolutní teplota během 24 hodin [$K = ^\circ C + 273.15$] |
| e_a | je skutečná vlhkost vzduchu [kPa] |
| R_s / R_{so} | je relativní krátkovlnné záření [$MJ m^{-2} den^{-1}$] |

Bilance krátkovlnného záření (R_{ns})

R_{ns} vyplývá z rovnováhy mezi příchozím a odrážejícím se slunečním zářením a je dána vztahem:

$$R_{ns} = (1-\alpha)R_s \quad (8)$$

kde:

R_{ns} je bilance krátkovlnného záření [$MJ m^{-2} den^{-1}$]

α je albedo, které je 0,23 pro hypotetickou plodinu na referenčním povrchu

R_s je krátkovlnné záření [$MJ m^{-2} den^{-1}$]

Celková radiační bilance (R_n)

Celkovou radiační bilanci vypočteme jako součet mezi radiační bilancí krátkovlnného záření a radiační bilancí dlouhovlnného záření.

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (9)$$

Měření

Sluneční záření lze měřit pomocí aktinometrů, pyranometrů nebo solarimetrů. Když pyranometry nejsou k dispozici, lze sluneční záření obvykle odhadnout z doby trvání slunečního svitu. Skutečná doba trvání slunečního svitu se měří Campbell-Stokesovým heliografem.

3.3.1.2 Teplota vzduchu

Sluneční záření je pohlcováno atmosférou a teplota země zvyšuje teplotu vzduchu. Zjevné teplo z okolního vzduchu přenáší energii do plodin a působí tak na rychlost evapotranspirace. Teplota vzduchu se měří pomocí termistorů, teploměrů nebo termočlánků umístěných v přístřešcích dle norem světové meteorologické organizace (WMO) ve 2m nad zemí.

Tlak par v určitém období se vypočítá jako průměr mezi tlakem par při denních maximálních a minimálních teplotách vzduchu. Průměrná denní teplota vzduchu (T_{mean}) je vyjádřena v FAO Penman-Monteith rovnici jako vliv změny teploty na hodnoty klimatických parametrů.

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2} \quad (10)$$

kde:

T_{mean} je průměrná denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

T_{max} je maximální denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

T_{min} je minimální denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

Teplota je uvedena ve stupních Celsia ($^{\circ}\text{C}$) nebo Fahrenheita ($^{\circ}\text{F}$). V některých výpočetních postupech je požadovaná teplota v Kelvinech (K).

3.3.1.3 Vlhkost vzduchu

Vodní pára je plyn a jeho tlak přispívá k celkovému atmosférickému tlaku. Vyjadřujeme jej jako tlak v centimetrech vody, milimetrech rtuti, barech atd., ale standardně v pascálech (Pa).

Teplota rosného bodu

Teplota rosného bodu je teplota, na kterou musí být vzduch ochlazen, aby byl právě nasycený vodní parou. Skutečný tlak par ve vzduchu je tlak nasycených par při teplotě rosného bodu.

Poměrná (relativní) vlhkost (RH)

Poměrná (relativní) vlhkost vyjadřuje stupeň nasycení vzduchu vodní parou a je vyjádřena poměrem skutečné a nasycené vlhkosti vzduchu při stejné teplotě T:

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^\circ(T)} \quad (11)$$

kde:

e_a je skutečná vlhkost [hPa]

$e^\circ(T)$ je tlak nasycených par při stejné teplotě [hPa]

Poměrná vlhkost vzduchu se měří přímo vlhkoměry.

Sytostní doplněk

Vypočítáme jako rozdíl hodnoty tlaku nasycené vodní páry a aktuálního tlaku vodní páry:

$$d = e_s - e_a \quad (12)$$

Proces evapotranspirace je určen podle množství dostupné energie potřebné k odpařování vody. Sluneční záření je největším zdrojem energie a je schopno měnit velké množství kapalné vody na vodní páru. Další složkou ovlivňující proces evapotranspirace je proudění vzduchu.

3.3.1.4 Rychlost větru (u)

Proces odstraňování par závisí do značné míry na větru a turbulencích, které přenáší velké množství vzduchu přes odpařovací povrch. Při odpařování vody se vzduch nad odpařovacím povrchem postupně nasytí vodní parou. Pokud není tento vzduch nepřetržitě nahrazován sušším vzduchem, frekvence evapotranspirace se snižuje.

Rychlost větru je uvedena v metrech za sekundu (ms^{-1}) nebo kilometrech za den (km den^{-1}) a měří se anemometry.

$$u_z = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (13)$$

kde:

u_2 je rychlost větru ve výšce 2 m nad povrchem země [ms^{-1}]

u_z je měřená rychlost větru nad terénem, obvykle v meteorologické praxi 10 m [m s^{-1}]

Tabulka 3 uvádí třídy rychlosti větru

3.3.2 Atmosférické parametry

Pro vyjádření některých vztahů musíme mít k dispozici potřebné hodnoty klimatických parametrů. Účinek hlavních parametrů na počasí v rámci evapotranspirace lze hodnotit pomocí těchto parametrů. Některé z těchto vztahů vyžadují hodnoty vyjadřující specifické vlastnosti atmosféry.

3.3.2.1 Atmosférický tlak (P)

Atmosférický tlak je tlak vyvíjený hmotností zemské atmosféry.

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (14)$$

kde:

P je atmosférický tlak [kPa]

z je nadmořská výška [m]

3.3.2.2 Latentní teplo výparu (λ)

Latentní teplo výparu vyjadřuje energii potřebnou pro změnu jednotkového množství vody z kapalného skupenství do vodní páry při konstantním tlaku při určité teplotě. Při teplotě 20°C dosáhne hodnoty 2,45 MJ kg^{-1} jenž je použita ve zjednodušené FAO Penman-Monteith rovnici.

3.3.2.3 Tok tepla do půdy (G)

Při odhadu evapotranspirace by měly být brány v úvahu všechny složky energetické bilance. Tok tepla do půdy je energie, která je využita na ohřev půdy. Standardní jednotka, která se používá, je energie přijatá na jednotku plochy za jednotku času. Vyjadřujeme ji v megajoulech na metr čtverečný za den ($\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$) nebo (kalorie $\text{cm}^{-2} \text{den}^{-1}$). Tok tepla do země je malý ve srovnání s bilancí dlouhodobného záření. Postup výpočtu je zde založený na myšlence, že teplota půdy sleduje teplotu vzduchu:

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad (15)$$

- G je tok tepla do půdy [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$]
 C_s je tepelná kapacita půdy [$\text{MJ m}^{-3} \text{C}^{-1}$]
 T_i je teplota vzduchu v čase i [$^{\circ}\text{C}$]
 T_{i-1} je teplota vzduchu v době $i-1$ [$^{\circ}\text{C}$]
 Δt je délka časového intervalu [den]
 Δz je efektivní hloubka půdy [m]

Tepelná kapacita půdy je spojena s jeho minerálním složením a obsahem vody

3.3.3 Sběr klimatických dat

Meteorologické údaje jsou zaznamenány v různých typech meteorologických stanic. Agrometeorologické stanice jsou umístěny v oblastech, kde jsou přístroje vystaveny povětrnostním podmínkám podobným těm, kterým jsou vystaveny i okolní plodiny. Dále můžeme vycházet z dat agroklimatických měsíčních databází CLIMWAT, které poskytují podklady pro počítačový program CROPWAT (Smith at al., 1993).

3.3.4 Minimální požadavky na údaje

Pokud chybí údaje o hodnotách slunečního záření, tlaku páry a údaje o větru, je možné je odhadnout. Mnohé z navrhovaných postupů se spoléhají na měření maximální a minimální teploty vzduchu. Proto je dáno, že je nezbytné znát alespoň tyto údaje. Pro získání ostatních údajů je vhodné aplikovat FAO Penman-Monteith metodu.

Výběr vhodné metody pro odhad referenční evapotranspirace při využití omezených klimatických dat (nejsou-li údaje o počasí k dispozici) je velmi důležité (Xiaoli at al., 2015).

3.4 Stanovení referenční evapotranspirace

Výpočet a určení referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO je obecným přístupem k řešení problematiky výparu (evaporace, evapotranspirace). Referenční evapotranspirací se v tomto smyslu rozumí evapotranspirace z hypotetického povrchu velmi podobnému standardnímu travnímu porostu, který se vyznačuje během celého kalendářního roku konstantní výškou, konstantním albedem a povrchovým odporem, plným zápojem a optimálním zásobováním srážkovou vodou (Rožnovský a Litschmann, 2005). Metody pro výpočet evapotranspirace z meteorologických dat vyžadují různé klimatologické a fyzikální parametry. Některé z těchto údajů se měří přímo v meteorologických stanicích. Ostatní parametry se týkají běžně měřených dat a mohou být odvozeny pomocí přímých nebo empirických vztahů. Referenční evapotranspirace je zásadní agroklimatický parametr řešící problematiku hydrologie a zemědělství jako jsou zdroje, půda, územní plánování nebo plánování zavlažování (Mardikis at al., 2005).

Tabulka 2 uvádí průměrnou ET_0 pro různé agroklimatické regiony

3.4.1 Postup výpočtu

Postup výpočtu referenční evapotranspirace se skládá z následujících kroků:

1. výpočet rychlosti větru dle rovnice (13)
2. odvození některých klimatických parametrů z denní maximální (T_{\max}) a minimální (T_{\min}) teploty vzduchu, nadmořské výšky (z)
3. výpočet sytostního doplnku ($e_s - e_a$) dle rovnice (12)

Tlak nasycených par je odvozen od denní maximální a minimální teploty vzduchu, zatímco skutečná vlhkost vzduchu může být odvozena z teploty rosného bodu (T_{dew}), z maximální a minimální relativní vlhkosti, z maximální nebo průměrné poměrné vlhkosti vzduchu.

4. stanovení radiační bilance dle rovnice (9). Bilance záření, které je vyjádřeno v $\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$, se převede na $\text{mm H}_2\text{O}/\text{den}^{-1}$ (ekvivalent vypařování) pomocí 0,408 jako konverzního faktoru v rovnici.

5. účinek toku tepla do půdy je ignorován

6. sklon křivky nasycené vodní páry vypočteme jako:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (16)$$

kde:

Δ je sklon tečny křivky napětí nasycené vodní páry při teplotě T [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

T je teplota vzduchu [$^\circ\text{C}$]

7. Psychrometrickou konstantu vypočítáme dle rovnice:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (17)$$

kde:

ε je poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu [-], $\varepsilon = 0.622$

c_p specifické teplo vzduchu při konstantním tlaku [$\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$], $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$

P je atmosférický tlak [kPa]

γ je psychrometrická konstanta [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

λ je latentní teplo výparné [MJ kg^{-1}], $\lambda = 2,45$ [MJ kg^{-1}]

Referenční evapotranspiraci získáme tak, že kombinujeme výsledky předchozích kroků.

3.4.2 Metoda přímého měření výparu

Množství vody, které se odpaří během určitého období (mm/den) odpovídá pokles hladiny půdní vody v tomto období. Tato metoda umožňuje měření integrovaného účinku

záření, větru, teploty a vlhkosti při odpařování z otevřené vodní plochy. Vodní plocha reaguje podobným způsobem jako evapotranspirace u rostlin při stejných klimatických faktorech ovlivňujících výpar.

3.4.3 Výpar měřený výparoměry

Metodu lze použít pro stanovení referenční evapotranspirace po dobu 10 dnů nebo delší doby. Je vztažena k referenční evapotranspiraci dle empiricky odvozeného koeficientu:

$$ET_o = K_p E_{pan} \quad (18)$$

kde:

ET_o je referenční evapotranspirace [mm/den]

K_p je koeficient výparoměru [bezrozměrný]

E_{pan} je výpar z výparoměru [mm/den]

V závislosti na typu výparoměru, velikosti a vzdálenosti návětrného okraje porostu (fetch) se budou koeficienty lišit. Čím větší je fetch vzdálenost, tím vyrovnanější budou hodnoty výparu. V rovnovážném stavu vzduch obsahuje více vodní páry a méně tepla.

Obrázek 4 znázorňuje druhy výparoměrů a fungování „fetch“.

3.5 Úvod do rostlinné evapotranspirace

Tato část se zabývá rostlinnou evapotranspirací za standardních podmínek (ET_c). To je evapotranspirace u dobře hnojených plodin, pěstovaných ve velkých oblastech za optimálních podmínek půdní vody a dosažení plné produkce v rámci daných klimatických podmínek. Účinky různých klimatických podmínek na evapotranspiraci, které odlišují konkrétní plochu od referenčního povrchu, jsou integrovány do plodinových koeficientů. Rostlinná evapotranspirace je dána vynásobením referenční evapotranspirace tímto koeficientem.

3.5.1 Výpočetní postupy

Pro výpočet evapotranspirace porostu dané plodiny se obecně využívají dva výpočetní postupy. A to jednoduchá metoda, kde je rozdíl mezi plodinou a referenční trávou sloučen do jednoho koeficientu a složená metoda, kde je koeficient plodiny rozdělen do dvou faktorů, které popisují odděleně rozdíly v evaporaci a transpiraci mezi referenčním povrchem a plodinou. A to základní koeficient plodiny (K_{cb}) a koeficient výparu z půdy (K_e):

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

Výběr metody by měl být v závislosti na účelu výpočtu. Jednoduchá metoda je používána většinou pro aplikaci týkající se zavlažování, jeho plánování a návrhu. Složená metoda je relevantní ve výpočtech, kde jsou vyžadovány podrobné odhady odpařování vody z půdy (například zavlažování, modelování kvality vody v reálném čase apod.). Tento přístup se využívá i ve výzkumu. Koeficienty plodin umožní plánování zavlažování a pomáhají k dosažení plného výnosového potenciálu plodin (Bryla at al., 2010).

Obrázek 5 uvádí obecný postup výpočtu rostlinné evapotranspirace

3.5.2 Faktory ovlivňující plodinový koeficient

3.5.2.1 Typy plodin

Evapotranspirace z plně vzrostlých, dobře zavlažovaných plodin se od referenční evapotranspirace liší díky rozdílům v albedu, rostlinné výšce, aerodynamickým vlastnostem a vlastnostem průduchů. Úzké rozteče řádků rostlin, zápoje ve vyšší výšce mnoha vzrostlých

zemědělských plodin mohou způsobit, že tyto plodiny mají K_c faktory, které jsou větší než 1. Kromě reakce průduchů na prostředí, polohu a velikost průduchů lze určit ztrátu vody z úrody také pomocí listového odporu. Transpirace a rozmístění plodin, které poskytují pouze 70% pokrytí půdy vzrostlými plodinami, může způsobit, že koeficienty těchto plodin, pokud se pěstují bez půdopokryvného porostu, mohou být menší než jedna.

3.5.2.2 Podnebí

Změny v rychlosti větru mohou způsobit proměnlivý aerodynamický odpor povrchu porostu plodin a tím i jejich koeficienty (zejména u těch plodin, kde jsou koeficienty podstatně vyšší než u referenční trávy). Vliv rozdílu v aerodynamických vlastnostech mezi povrchem trávy referenční a povrchem zemědělských plodin není jen v plodinové specificitě, ale mění se také v závislosti na klimatických podmínkách a výšce plodiny.

3.5.2.3 Výpar z půdy

Rozdíly v odpařování z půdy a rostlinnou transpirací mezi polními plodinami a referenční plochou jsou integrovány v rámci plodinových koeficientů. Koeficienty pro plně zapojené porosty odráží především rozdíly v transpiraci. Vliv výparu z půdního povrchu je v takovém případě relativně malý.

3.5.3 Průběh růstu zemědělských plodin

Jak se plodiny vyvíjí, mění se velikost listové plochy a následně pokryvnost půdy. Vzhledem k rozdílům v evapotranspiraci během různých růstových fází, se budou koeficienty pro dané plodiny měnit v průběhu období růstu. Vegetační období lze rozdělit do čtyř odlišných růstových fází: počáteční fáze, vývojové stádium porostu, střední fáze vývoje porostu, fáze pozdního období vývoje porostu.

3.6 Rostlinný plodinový koeficient

Účinky různých klimatických podmínek a jejich vliv na růst plodin jsou integrovány do plodinových koeficientů. Odvození koeficientů závisí na dané růstové fázi. Koeficienty se během jednotlivých růstových fází lineárně mění. Je nutné je dle místních klimatických podmínek a ostatních faktorů dále upravovat.

Tabulka 4 udává kritéria pro výběr koeficientů

3.6.1 Jednoduchý koeficient (K_c)

Jednoduchý koeficient slučuje rozdíl mezi oříznutím a referenční trávou do jednoho koeficientu. Metoda jednoduchého koeficientu je použitelná pro výpočet evapotranspirace v týdenním nebo delším časovém období, i když výpočty mohou probíhat v denních časových krocích. Průměrný časový jednoduchý koeficient se používá pro plánování studií a design zavlažovacích systémů, kde jsou průměrné účinky smáčení půdy přijatelné a relevantní. To je případ povrchového zavlažování a systémů pro rozprašování, kde časový interval mezi dvěma zavlažováními je několik dní, často deset dnů a více. Koeficient plodiny začíná růst z počáteční hodnoty a na začátku rychlého vývoje rostlin. Maximální hodnoty dosahuje v době maximálního vývoje rostlin. Během pozdního období, tj. v době senescence v důsledku přírodních nebo kulturních praktik začne koeficient klesat, až dosáhne nižší hodnoty než na konci období růstu ($K_{c\text{ end}}$).

3.6.1.1 Délka fází růstu

Informace o všeobecných délkách čtyř odlišných fází růstu vegetačního období pro různé typy podnebí a lokality najdeme ve FAO zavlažování a odvodňování (předpis č. 24). Někdy lze dobu vzniku vegetace a čas plného krytí předvídat na základě regresivní rovnice nebo složitějších modelů růstu rostlin. Tyto modely by však měly být ověřeny v dané oblasti nebo pro odrůdy konkrétních plodiny pomocí lokálního pozorování.

Tabulka 5 udává délku jednotlivých fází růstu

Počáteční fáze

Počáteční fáze probíhá od data výsadby po období přibližně 10% pokrytí porostem. Délka počátečního období je velmi závislá na plodině, datu výsadby a podnebí. Konec počátečního období je stanoveno dobou, kdy je přibližně 10% povrchu pokryté plodinou. U trvalých plodin je datum výsadby nahrazeno "Greenup" datem, tj. čas, kdy dochází k zahájení růstu nových listů. Během počátečního období je listová plocha malá a evapotranspirace probíhá převážně ve formě půdního odpařování. Proto je koeficient v počáteční fázi ($K_{c\ ini}$) velký.

Fáze vývoje porostu

Vývojová etapa většiny pěstovaných plodin začíná na 10% pokryté zemi a pokračuje až do úplného zapojení/pokrytí povrchu porostní plochy. K plnému pokrytí pro mnohé plodiny dochází při zahájení fáze kvetení. Pro řádkové plodiny, jako jsou např. fazole, cukrová řepa, brambory nebo kukuřice je efektivní krytí definováno jako čas, kdy se některé listy rostlin v sousedních řádcích začínají prolínat tak, že se zastínění půdy stává téměř komplexní, nebo když rostliny dosáhnou téměř plné velikosti a dochází k jejich vzájemnému prorůstání.

Vzhledem k tomu, že je obtížné vizuálně určit, kdy hustě seté porosty jako např. zimní a jarní obiloviny a některé trávy dosáhnou plného zapojení, je snadnější toto období zjistit pomocí výšky rostliny. Další způsob jak odhadnout výskyt plného zapojení porostu je, když index listové plochy (LAI) dosáhne tří.

Během fáze rozvoje plodiny odpovídá crop koeficient plodiny hodnotě, která odpovídá množství biomasy, které je dáno vývojem rostliny.

Střední fáze vývoje porostu

Střední etapa vede z účinného plného krytí do začátku dospělosti. Začátek dospělosti je často definován jako počátek stárnutí, žloutnutí nebo senescence listů. Evapotranspirace plodiny je snížena vzhledem k referenční evapotranspiraci. Střední fáze je nejdelší fáze trvalek a letniček. Pro ostatní plodiny (sklizené časně) však může být relativně krátká. V polovině střední fáze dosáhne crop koeficient plodiny své maximální hodnoty fáze pozdního období vývoje porostu.

Pozdní fáze vývoje porostu

Pozdní období probíhá od začátku dospělosti do sklizně nebo úplného stárnutí. Pro některé trvalé vegetace v nemrznoucích klimatech může být plodina pěstována celoročně, takže může být datum ukončení stejné jako datum "výsadby". V hodnotě koeficientu plodiny v pozdní fázi ($K_{c\ end}$) se odráží druh plodiny a hospodaření s vodou. Hodnota je vysoká, pokud je plodina často zavlažovaná a do sklizně čerstvá.

3.6.1.2 Konstrukce křivky plodinového koeficientu

Po výběru metody výpočtu, stanovení délek fázi růstu plodin a odpovídajícího koeficientu plodiny, může být sestrojena křivka koeficientu. Křivka představuje změny v rostlinném koeficientu po celé délce vegetačního období. Tvar křivky představuje změny v porostu a půdopokryvnosti během vývoje rostliny a zrání, které mají vliv na poměr rostlinné evapotranspirace vůči referenční evapotranspiraci. Z křivky zjistíme faktor koeficientu plodiny, a tudíž může být evapotranspirace porostu odvozena pro jakékoliv období ve vegetačním období. Křivku vytvoříme pomocí 3 kroků:

1. Rozdělíme růstové období do čtyř obecných růstových fází, které popisují fenologii plodin nebo jejich vývoj (počáteční, vývoj plodiny, střední a pozdní fáze), určíme délku růstových fází a tři K_c hodnoty, které odpovídají $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ a $K_{c\ end}$.

2. Nastavíme K_c hodnoty četnosti závlahy nebo klimatických podmínek jednotlivých růstových fází.

3. Sestrojíme křivku připojením přímkových segmentů prostřednictvím každé ze čtyř růstových fází.

Mnoho plodin pěstovaných jako krmivo nebo sena se sklízí několikrát během vegetačního období. Každá sklizeň v podstatě ukončí "dílčí" vegetační období a související K_c křivky iniciují nové vegetační období. Výsledná K_c křivka celého vegetačního období je agregace řady K_c křivek spojených v každém sub-cyklu.

3.6.1.3 Výpočet evapotranspirace plodin

Postup výpočtu pro evapotranspiraci plodin:

- 1) určit etapy růstu zemědělských plodin, určení jejich délky a výběr odpovídajícího koeficientu plodiny
- 2) určit přístup, kterým se určují vybrané koeficienty pro frekvenci smáčení nebo klimatické podmínky během fáze
- 3) konstrukce křivky plodinového koeficientu plodiny
- 4) výpočet evapotranspirace plodiny

Z křivky vývoje koeficientu může být hodnota K_c určena graficky nebo numericky v kterékoliv době během vegetačního období. Jakmile byly odvozeny hodnoty K_c , může být evapotranspirace plodin vypočtena vynásobením K_c hodnot odpovídajícími hodnotami referenční evapotranspirace:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (19)$$

3.6.2 Složený plodinový koeficient ($K_{cb}+K_e$)

Při použití složeného koeficientu plodin jsou účinky rostlinné transpirace a vypařování půdy určeny samostatně. Používají se dva koeficienty: základní koeficient (K_{cb}) popisující transpiraci rostlin a evaporační koeficient půdy (K_e) popisující vypařování z povrchu půdy. Jednotný koeficient potom můžeme vypočítat takto:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (20)$$

kde:

K_{cb} je základní plodinový koeficient

K_e je koeficient vypařování vody z půdy - evaporace

Plodinový koeficient je definován jako poměr mezi evapotranspirací porostu a referenční evapotranspirací, kdy je povrch půdy suchý, ale průměrný obsah vody v kořenové zóně rostlin je dostatečný pro udržení stabilní evapotranspirace. Základní koeficient představuje základní potenciál crop koeficientu plodin v případě neexistence dalších vlivů na půdu, jako je smáčení, zavlažování nebo kondenzace.

Pokud je půda mokrá díky dešti nebo zavlažování, mohou být koeficienty velké. Nicméně, součet základního koeficientu plodiny a koeficientu vypařování vody z půdy nikdy nemůže překročit maximální hodnotu ($K_{c \max}$), určenou množstvím dostupné energie pro evapotranspiraci.

Složený koeficient se používá pro plánování zavlažování v reálném čase, pro výpočty půdní vodní bilance a výzkumné studie, kde jsou důležité účinky denních změn ve vlhkosti půdy na povrchu a z nich vyplývající dopady na každodenní evapotranspiraci porostu, profil půdní vody a vsakování vody do větších hloubek půdy. Použití složeného plodinového koeficientu plodiny vypočítává skutečné zvýšení koeficientu plodiny pro každý den jako funkci vývoje rostlin a vlhkosti půdního povrchu.

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (21)$$

Metoda složeného koeficientu plodiny je složitější a výpočetně náročnější než metoda jednoduchého koeficientu. Výpočet se provádí v denním kroku a s využitím počítačů. Postup výpočtu rostlinné evapotranspirace se skládá:

1. identifikace délky etap růst zemědělských plodin a výběrem odpovídajících K_{cb} koeficientů
2. úpravy vybraných koeficientů pro klimatické podmínky během fáze
3. konstrukce základního koeficientu křivky (což přesně určí hodnoty koeficientu pro jakoukoliv dobu během vegetačního období)
4. stanovení hodnoty pro povrchové odpařování
5. výpočtu evapotranspirace plodiny jako produktu referenční evapotranspirace a koeficientů ($K_{cb} + K_e$)

3.6.2.1 Transpirační složka ($K_{cb}ET_o$)

Základní plodinový koeficient plodiny (K_{cb}) je definován jako poměr evapotranspirace rostlin a referenční evapotranspirace (ET_c/ET_o), která je vodou nelimitována, potenciálně možná při suchém povrchu půdy. Tedy součin $K_{cb} ET_o$ představuje především transpirační složku rostlinné evapotranspirace. Zahrnuje difúzní pohyby vody v půdě pod suchým povrchem a vody v půdě pod hustou vegetací.

Tabulka 6 udává základní koeficienty K_c pro plodiny v polosuchých klimatických podmínkách

3.6.2.2 Evaporační složka ($K_e ET_o$)

Koeficient výparu z půdy (K_e) popisuje evaporační složku celkové evapotranspirace. Tam, kde je půda mokrá, k výparu z půdy dochází v maximální míře. Nicméně crop koeficient plodiny ($K_c = K_{cb} + K_e$) nemůže nikdy překročit maximální hodnotu ($K_{c \max}$). Tato hodnota se stanoví podle dostupné energie pro evapotranspiraci na povrchu půdy ($K_{cb} + K_e \leq K_{c \max}$ čili $K_e \leq K_{c \max} - K_{cb}$). Koeficient evaporace je roven nule, když se v horní vrstvě půdy nenachází žádná voda vhodná pro výpar.

Postup výpočtu spočívá ve stanovení:

- horní meze ($K_{c \max}$)
- koeficientu snížení evaporace z půdy (K_r)
- podílu půdy kde dochází nejvíce k evaporaci (f_{ew})

4 Využití evapotranspirace v praxi

Znalost skutečných hodnot evapotranspirace kulturních rostlin je předpokladem pro pochopení vlivu zemědělství na životní prostředí a zároveň základem pro eliminaci negativního působení zemědělské činnosti v krajině na její vodní bilanci. Z praktického hlediska lze znalost evapotranspiračních nároků plodin využít pro ovlivnění vodní bilance stanoviště na základě struktury porostu a délkou trvání a dobou nástupu vývojových fází porostu.

Hodnoty transpirace porostů závisí na způsobu obhospodařování a výživě, termínu výsevu a na druhu či odrůdě plodiny. Významné je stanovení hodnot skutečné evapotranspirace pro výpočet plodinových koeficientů. Problematika stanovení ET_c a K_c je intenzivně zkoumána především v aridních a semiaridních oblastech, zejména v souvislosti s otázkou závlahy.

V souladu se změnami vláhových podmínek stanoviště je problém nedostatku vody rovněž aktuální i pro oblasti s optimálně zavlaženým klimatem (Brant a kol., 2009). Voda není jen důležitý přírodní zdroj, ale je také velmi důležitá pro určení rozložení plodin a jejich produktivity (Chen at al., 2005).

Při stanovení vláhových potřeb vycházíme z výpočtu rostlinné evapotranspirace (výpočtem získáme informace o množství spotřebované závlahy), díky které můžeme zvolit množství a délku závlahy (Rožnovský a Litschmann, 2005).

5 Závěr

Tato práce podrobně rozebrala výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu pomocí FAO Penman – Montheit metodiky. Popsala jednotlivé kroky výpočtu a (přitom vychází z kombinační rovnice, která byla v roce 1948 zformulována H. L. Penmanem) a způsoby jejich dosažení. Dále se zabývala objasněním pojmu evapotranspirace a výčtem faktorů, které ji ovlivňují. V neposlední řadě se zabývala také výpočtem rostlinné evapotranspirace a využití v praxi.

6 Seznam literárních pramenů

Allen, R.G., Rereira, L.S., Raies, D. and Smith, M. 1998. Crop evaporation: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, United Nations, Rome I. p. 15. ISSN 0254-5284.

Bierkens, M. F. P., Dolman, A. J. and Troch, P. E. 2008. Climate and the Hydrological Cycle. Wallingford, IAHS. p. 344. ISBN 978-1-901502-54-1.

Bryla, D. R., Trout, T. J. and Ayars, J.E. 2010. Weighing lysimeters for developing crop coefficients and efficient irrigation practices for vegetable crops. HortScience 45.11. p. 1597-1604.

Courault, D., Seguin, B. and Olioso, A. 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. Irrigation and Drainage systems 19.3-4. p. 223-249.

Donatelli, M., Bellocchi, G. and Carlini, R. 2006. Sharing knowledge via software components: models on reference evapotranspiration. European Journal of Agronomy 24. p. 186-192.

Droogers, P. and Allen, R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and drainage systems 16.1. p. 33-45.

Dufková, J. 2007. Vliv větrolemů na větrnou erozi. Bioklimatologické riziká a degradácia prírodného prostredia. Poľana nad Detvou: Slovenská bioklimatologická spoločnosť pri SAV, Česká bioklimatologická spoločnosť. str. 1-5. ISBN 978-80-228-17-60-8.

Grismer, M. E., Orang, M., Snyder, R. and Matyac, R. 2002. Pan Evaporation and Reference Evapotranspiration Conversion Methods. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 128. p 180-184.

- Chen, J. M., Chen, X., Ju, W. and Geng, X. 2005. Distributed Hydrological Model for Mapping Evapotranspiration Using Remote Sensing Inputs. *Journal of Hydrology* p. 15-39.
- Knozová, G., Rožnovský, J. a Kohut, M. 2006. Srovnání časových řad výparu naměřeného výparoměrem ggi-3000 a vypočítaného podle metodiky FAO, *Bioklimatologie současnosti a budoucnosti*, str. 9.
- Kohut, M. 2005. Referenční evapotranspirace. Rožnovský, J., Litschmann, T.(red.) *Evaporace a evapotranspirace*. Česká bioklimatologická společnost, Brno, str. 172-186. ISBN 80-86690-05-9.
- Litschmann, T. a Rožnovský, J. 2005. Optická hustota (porosita) větrolamu a její vliv na charakter proudění. *Bioklimatologie současnosti a budoucnosti* 12.14.9. str. 1-8. ISBN 80-86690-31-08.
- Mardikis, M.G., Kalivas, D.P. and Kollias, V.J. 2005. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration an application in Greece. *Water Resources Management* 19.3. p. 251-278.
- Možný, M. 2005. Problematika měření evapotranspirace v ČHMÚ. *Evaporace a evapotranspirace*. ČSBS. str. 7-10. ISBN 80-86690-24-5.
- Novak, F., Hortalová, T. a Matejka, F. 1997. Evapotranspiration components modelling and its verification for the field crops. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 1-2. p. 45.
- Pereira, A. R., Green S. and Villa-Nova N.A. 2006. Penman–Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural water management* 83. p. 153-161.
- Procházka, J. a Brom, J. 2006. Energetická a chemická účinnost krajiny – metodický nástroj pro hodnocení krajinných funkcí, výzkumná zpráva GA ZF JU, IG 08/06. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, České Budějovice.

Punčochář, P. 2011. Potenciální evapotranspirace v horském povodí. Stavební obzor 3/2011.str. 85-87. ISSN 1210-4027.

Rahimi, S., Sefidkouhi M.A.G., Raeini-Sarjaz, M. and Valipour, M. 2015. Archives of Agronomy and Soil Science .61.5. p. 695-709.

Rožnovský, J. a Litschmann, T. (ed):2005. Seminář „Mikroklima porostů“. Brno, 26. března 2005, str. 172-186, ISBN 80-86690-05-9.

Smith, M. 1993. CLIMWAT for CROPWAT. A climatic database for irrigation planning and management. FAO. Str. 116. ISBN 9251034168.

Sumner, D. M. and Jacobs, J.M. 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. Journal of Hydrology 308.1. p. 81-104.

Xiaoli G., Peng, S. , Junzeng X. , Shihong Y. and Weiguang W. 2015. Proper methods and its calibration for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data in Southwestern China. Archives of Agronomy and Soil Science 61.3., p. 415-426.

Xu, C.,Gong, L., Jiang, T., Chen, D. and Singh, V.P. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. Journal of Hydrology 327.1. p. 81-93.

Brant, V., Pivec, J. a Kroulík, M. Ekologické dni, medzinárodná vedecká konferencia, Stará Lesná, Evapotranspirační nároky porostů obilnin v oblastech s nedostatkem and srážek [online] 20.-22. září 2009. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z <http://home.czu.cz/storage/56578_Poster.pdf>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

| | |
|------------------------------------|--|
| ET | je intenzita evapotranspirace [$\text{kg m}^{-2} \text{t}^{-1}$] |
| ET _o | je referenční evapotranspirace hypotetického povrchu [mm den^{-1}] |
| ET _c | je rostlinná evapotranspirace [mm den^{-1}] |
| ET _{c adj} | je evapotranspirace za nestandardních podmínek [mm den^{-1}] |
| R _n | je radiační bilance na povrch plodiny [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| G | je tok tepla do půdy [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| (e _s - e _a) | je sytostní doplněk |
| ρ _a | je hustota vzduchu při konstantním tlaku [kg m^{-3}] |
| c _p | je měrné teplo vzduchu [$\text{kJ kg}^{-1} \text{den}^{-1} \text{C}^{-1}$] |
| Δ | představuje sklon křivky tlaku nasycené vodní páry v závislosti na teplotě vzduchu [kPa C^{-1}] |
| γ | je psychrometrická konstanta [kPa C^{-1}] |
| r _s | je povrchový odpor [s m^{-1}] |
| r _a | je aerodynamický odpor [s m^{-1}] |
| z _m | je výška měření rychlosti větru [m], z _m = 2 |
| z _h | je výška měření vlhkosti vzduchu [m], z _h = 2efektivní výška porostu |
| z _{om} | je součinitel dynamické drsnosti povrchu [m], z _{om} = 0,123 *h |
| Z _{oh} | je součinitel dynamické drsnosti pro přenos tepla a vodní páry [m], z _{oh} = 0,1 * z _{om} |
| k | je Karmanova konstanta [-], k=0,41 |
| u ₂ | je rychlost větru ve výšce měření z [m s^{-1}] |
| LAI _{active} | je aktivní (osvětlený) index listové plochy [m^2 (listová plocha) m^{-2} (povrch půdy)] |
| h | je výška standardizovaného povrchu [m] |
| T | je průměrná denní teplota vzduchu ve 2 m výšce [$^{\circ}\text{C}$] |
| e _s | je tlak nasycené vodní páry [kPa] |
| e _a | je aktuální tlak vodní páry [kPa] |
| r _l | je stomatální odpor – dobře osvětleného listu [s m^{-1}], r _l =100 s |
| z | je nadmořská výška [m] |
| T _{mean} | je průměrná denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$] |
| T _{max} | je maximální denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$] |

| | |
|------------------|---|
| T_{\min} | je minimální denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$] |
| $e^{\circ}(T)$ | je tlak par při stejné teplotě |
| R_s | je sluneční nebo krátkovlnné záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| n | je skutečná doba trvání slunečního svitu [h] |
| N | je maximální možná doba trvání slunečního svitu nebo denní doby [hod] |
| n/N | je relativní sluneční svit [-] |
| R_a | je extraterestické záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| R_{nl} | je odchozí dlouhovlnné záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| σ | je Stefan-Boltzmannova konstanta [$4,903 \cdot 10^{-9} \text{MJ K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| R_s / R_{so} | je relativní krátkovlnné záření (omezené na ≤ 1.0) [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| R_{ns} | je bilance krátkovlnné záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| α | je albedo, které je 0,23 pro hypotetickou plodinu na referenčním povrchu |
| R_s | je krátkovlnné záření [$\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$] |
| C_s | je tepelná kapacita půdy [$\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$] |
| T_i | je teplota vzduchu v čase i [$^{\circ}\text{C}$] |
| $T_{-1 i}$ | je teplota vzduchu v době $i-1$ [$^{\circ}\text{C}$] |
| Δt | je délka časového intervalu [den] |
| Δz | je efektivní hloubka půdy [m] |
| u_z | je měřená rychlost větru nad terénem [ms^{-1}] |
| $e = 2.7183$ | je základ přirozeného logaritmu [-] |
| ε | je poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu [-], $\varepsilon = 0.622$ |
| P | je atmosférický tlak kPa |
| K_p | je koeficient výparoměru [-] |
| E_{pan} | je výpar z výparoměru [mm/den] |
| K_{cb} | je základní plodinový koeficient |
| K_e | je koeficient vypařování vody z půdy - evaporace |
| $\max ()$ | je maximální hodnota parametrů v závorkách (), které jsou odděleny čárkou |

7 Samostatné přílohy

- Tabulka 1 - Konverzní faktory pro evapotranspiraci
- Tabulka 2 - Průměrná ET_0 pro různé agroklimatické regiony v mm/den
- Tabulka 3 - Obecné třídy měsíčních dat rychlosti větru
- Tabulka 4 - Obecná kritéria výběru jednoduchého a složeného přístupu koeficientu plodin
- Tabulka 5 - Délky rostlinných vývojových fází pro různou výsadbu a klimatické regiony (dny)
- Tabulka 6 - Základní koeficienty K_c pro plodiny v polosuchých klimatických podmínkách pro použití FAO Penman-Monteith ET_0
- Obrázek 1 - Formy evapotranspirace
- Obrázek 2 - Faktory ovlivňující evapotranspiraci
- Obrázek 3 - Celkový povrch a aerodynamické odpory pro průtok vodní páry (air flow = proud vzduchu; vlhkost, %)
- Obrázek 4 - Výparoměry
- Obrázek 5 - Obecný postup pro výpočet ET_c

Tabulka 1

Konverzní faktory pro evapotranspiraci

| | hloubka | objem na jednotku plochy | | energie na jednotku plochy * |
|---|----------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| | mm den ⁻¹ | m ³ ha ⁻¹ den ⁻¹ | ls ⁻¹ ha ⁻¹ | MJ m ⁻² den ⁻¹ |
| 1 mm den ⁻¹ | 1 | 10 | 0,116 | 2.45 |
| 1 m ³ ha ⁻¹ den ⁻¹ | 0.1 | 1 | 0,012 | 0,245 |
| 1 ls ⁻¹ ha ⁻¹ | 8,640 | 86.40 | 1 | 21.17 |
| 1 MJ m ⁻² den ⁻¹ | 0,408 | 4,082 | 0,047 | 1 |

* Pro vodu s hustotou 1000 kg m⁻³ a při teplotě 20 ° C.

Zdroj: Allen at al, 1998

Tabulka 2

Průměrná ET₀ pro různé agroklimatické regiony v mm / den

| Regiony | Průměrná denní teplota (°C) | | |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| | chladná ~ 10 ° C | střední 20 ° C | teplá > 30 ° C |
| Tropy a subtropy | | | |
| - vlhké a polosuchý | 2-3 | 3-5 | 5-7 |
| -vyprahlé | 2-4 | 4-6 | 6-8 |
| Mírný region | | | |
| - vlhký a polosuchý | 1 - 2 | 2-4 | 4-7 |
| -vyprahlý | 1-3 | 4-7 | 6-9 |

Zdroj: Allen at al, 1998

Tabulka 3

Obecné třídy měsíčních dat rychlosti větru

| Popis | Průměrné měsíční rychlosti větru ve výšce 2 m |
|--------------------|--|
| slabý vítr | $\leq 1.0 \text{ m / s}$ |
| mírný vítr | 1 - 3 m / s |
| středně silný vítr | 3 - 5 m / s |
| silný vítr | $\geq 5.0 \text{ m / s}$ |

Zdroj: Allen at al, 1998

Tabulka 4

Obecná kritéria výběru jednoduchého a složeného přístupu koeficientu plodin

| | jednoduchý koeficient K_c | Složený koeficient $K_{cb} + K_e$ |
|----------------------|--|--|
| Účel výpočtu | <ul style="list-style-type: none"> - zavlažování, plánování a design - zavlažování, řízení - základní zavlažovací plány - zavlažování a plánování v reálném čase pro nízké frekvence použití vody (povrchové postřikovací zavlažování) | <ul style="list-style-type: none"> - výzkum - zavlažování a plánování v reálném čase - zavlažování a plánování pro vysoké frekvence použití vody (automatické postřikovací zavlažování) - doplňkové zavlažování - podrobné hydrologické studie půdy a vodní bilance |
| Časový krok | denní, 10denní, měsíční (data a výpočet) | denní (data a výpočet) |
| Řešení metoda | grafická kapesní kalkulačka, počítač | počítač |

Zdroj: Allen at al, 1998

Tabulka 5

Délky rostlinných* vývojových fází pro různou výsadbu a klimatické regiony (dny)

| Plodina | Init. (L _{ini}) | Dev. (L _{dev}) | Mid (L _{mid}) | Pozdní (L _{pozdě}) | Celkový | Datum | Kraj |
|----------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|---------|---------------------|------------------|
| Malá zelenina | | | | | | | |
| brokolice | 35 | 45 | 40 | 15 | 135 | září | Kalifornie, USA |
| zelí | 40 | 60 | 50 | 15 | 165 | září | Kalifornie, USA |
| mrkev | 20 | 30 | 50/30 | 20 | 100 | říjen / leden | suché podnebí |
| | 30 | 40 | 60 | 20 | 150 | únor / březen | Středomoří |
| | 30 | 50 | 90 | 30 | 200 | říjen | Kalifornie, USA |
| květák | 35 | 50 | 40 | 15 | 140 | září | Kalifornie, USA |
| celer | 25 | 40 | 95 | 20 | 180 | říjen | arid. klima |
| | 25 | 40 | 45 | 15 | 125 | duben | Středomoří |
| | 30 | 55 | 105 | 20 | 210 | leden | arid. klima |
| brukvovité | 20 | 30 | 20 | 10 | 80 | duben | Středomoří |
| | 25 | 35 | 25 | 10 | 95 | únor | Středomoří |
| | 30 | 35 | 90 | 40 | 195 | říjen / listopad | Středomoří |
| salát | 20 | 30 | 15 | 10 | 75 | duben | Středomoří |
| | 30 | 40 | 25 | 10 | 105 | listopad / leden | Středomoří |
| | 25 | 35 | 30 | 10 | 100 | říjen / listopad | suché podnebí |
| | 35 | 50 | 45 | 10 | 140 | únor | Středomoří |
| cibule (suchá) | 15 | 25 | 70 | 40 | 150 | duben | Středomoří |
| | 20 | 35 | 110 | 45 | 210 | srpen/ leden | suché podnebí |
| cibule (zelená) | 25 | 30 | 10 | 5 | 70 | duben / květen | Středomoří |
| | 20 | 45 | 20 | 10 | 95 | říjen | vyprahlé regiony |
| | 30 | 55 | 55 | 40 | 180 | březen | Kalifornie, USA |
| cibule (semena) | 20 | 45 | 165 | 45 | 275 | září | Kalifornie, USA |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|----|-------|----|---------|------------------------|------------------|
| špenát | 20 | 20 | 15/25 | 5 | 60/70 | duben, září / říjen | Středomoří |
| | 20 | 30 | 40 | 10 | 100 | listopad | vyprahlé regiony |
| ředkev | 5 | 10 | 15 | 5 | 35 | březen / duben | Evropa |
| | 10 | 10 | 15 | 5 | 40 | zimní m. | vyprahlé regiony |
| Zelenina - (Solanaceae) | | | | | | | |
| lilek | 30 | 40 | 40 | 20 | 130 \ 1 | říjen | vyprahlé regiony |
| | 30 | 45 | 40 | 25 | 40 | květen / červen | Středomoří |
| sladká paprika | 25/30 | 35 | 40 | 20 | 125 | duben / červen | Evropa |
| | 30 | 40 | 110 | 30 | 210 | říjen | vyprahlá regiony |
| rajče | 30 | 40 | 40 | 25 | 135 | leden | vyprahlé regiony |
| | 35 | 40 | 50 | 30 | 155 | duben / květen | Kalifornie, USA |
| | 25 | 40 | 60 | 30 | 155 | leden | Kalifornie, USA |
| | 35 | 45 | 70 | 30 | 180 | říjen / listopad | vyprahlé regiony |
| | 30 | 40 | 45 | 30 | 145 | duben / květen | Středomoří |
| Zelenina - (Cucurbitaceae) | | | | | | | |
| ananasový meloun | 30 | 45 | 35 | 10 | 120 | leden | Kalifornie, USA |
| | 10 | 60 | 25 | 25 | 120 | srpen | Kalifornie, USA |
| okurka | 20 | 30 | 40 | 15 | 105 | červen / srpen | vyprahlé regiony |
| | 25 | 35 | 50 | 20 | 130 | prosinec/ únor | vyprahlé regiony |
| dýně | 20 | 30 | 30 | 20 | 100 | červenec/ srpen | Středomoří |
| | 25 | 35 | 35 | 25 | 120 | červen | Evropa |
| cuketa | 25 | 35 | 25 | 15 | 100 | duben/ prosinec | arid. klima |
| | 20 | 30 | 25 | 15 | 90 | květen / červen | střední Evropa |

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|----|-------|----|---------|------------------|--------------------------|
| sladké melouny | 25 | 35 | 40 | 20 | 120 | květen | Středomoří |
| | 30 | 30 | 50 | 30 | 140 | březen | Kalifornie, USA |
| | 15 | 40 | 65 | 15 | 135 | srpen | Kalifornie, USA |
| | 30 | 45 | 65 | 20 | 160 | prosinec / leden | vyprahlé regiony |
| vodní melouny | 20 | 30 | 30 | 30 | 110 | duben | Itálie |
| | 10 | 20 | 20 | 30 | 80 | červenec / srpen | blízký východ (poušť) |
| Kořeny a hlízy | | | | | | | |
| řepa stolní | 15 | 25 | 20 | 10 | 70 | duben / květen | Středomoří |
| | 25 | 30 | 25 | 10 | 90 | únor / březen | Středomoří a arid. klima |
| maniok: 1. rok | 20 | 40 | 90 | 60 | 210 | deštivé m. | tropické oblasti |
| 2. rok | 150 | 40 | 110 | 60 | 360 | sezóna | |
| brambor | 25 | 30 | 30/45 | 30 | 115/130 | leden / listopad | (semi)arid. klima |
| | 25 | 30 | 45 | 30 | 130 | květen | kontinentální klima |
| | 30 | 35 | 50 | 30 | 145 | duben | Evropa |
| | 45 | 30 | 70 | 20 | 165 | duben / květen | Idaho, USA |
| | 30 | 35 | 50 | 25 | 140 | prosinec | Kalifornie, USA |
| sladký brambor | 20 | 30 | 60 | 40 | 150 | duben | Středomoří |
| | 15 | 30 | 50 | 30 | 125 | deštivé m. | tropické oblasti |
| cukrová řepa | 30 | 45 | 90 | 15 | 180 | březen | Kalifornie, USA |
| | 25 | 30 | 90 | 10 | 155 | červen | Kalifornie, USA |
| | 25 | 65 | 100 | 65 | 255 | září | Kalifornie, USA |
| | 50 | 40 | 50 | 40 | 180 | duben | Idaho, USA |
| | 25 | 35 | 50 | 50 | 160 | květen | Středomoří |
| | 45 | 75 | 80 | 30 | 230 | listopad | Středomoří |
| | 35 | 60 | 70 | 40 | 205 | listopad | suché oblasti |
| Luštěniny (<i>Leguminosae</i>) | | | | | | | |
| fazole (zelené) | 20 | 30 | 30 | 10 | 90 | únor / březen | Kalifornie, Středomoří |

| | | | | | | | |
|--------------------------|----|-------|-----|----|-----|----------------------|-------------------------------|
| | 15 | 25 | 25 | 10 | 75 | srpen / září | Kalifornie, Egypt, Libanon |
| fazole (suché) | 20 | 30 | 40 | 20 | 110 | květen / červen | kontinentální klima |
| | 15 | 25 | 35 | 20 | 95 | červen | Pákistán, Kalifornie |
| | 25 | 25 | 30 | 20 | 100 | červen | Idaho, USA |
| fazole, bob | 15 | 25 | 35 | 15 | 90 | květen | Evropa |
| | 20 | 30 | 35 | 15 | 100 | březen / duben | Středomoří |
| - suché | 90 | 45 | 40 | 60 | 235 | listopad | Evropa |
| - zelené | 90 | 45 | 40 | 0 | 175 | listopad | Evropa |
| zelený hrášek | 20 | 30 | 30 | 20 | 110 | březen | Středomoří |
| arašídý | 25 | 35 | 45 | 25 | 130 | suché m. | západní Afrika |
| | 35 | 35 | 35 | 35 | 140 | sezóna | kontinentální klima |
| | 35 | 45 | 35 | 25 | 140 | květen / červen | Středomoří |
| čočka | 20 | 30 | 60 | 40 | 150 | duben | Evropa |
| | 25 | 35 | 70 | 40 | 170 | říjen / listopad | vyprahlé regiony |
| Hrášek | 15 | 25 | 35 | 15 | 90 | květen | Evropa |
| | 20 | 30 | 35 | 15 | 100 | březen / duben | Středomoří |
| | 35 | 25 | 30 | 20 | 110 | duben | Idaho, USA |
| sójové boby | 15 | 15 | 40 | 15 | 85 | prosinec | tropické oblasti |
| | 20 | 30/35 | 60 | 25 | 140 | květen | centrální USA |
| | 20 | 25 | 75 | 30 | 150 | červen | Japonsko |
| Vytrvalá zelenina | | | | | | | |
| artyčok | 40 | 40 | 250 | 30 | 360 | duben , 1.rok | Kalifornie |
| | 20 | 25 | 250 | 30 | 325 | květen 2. rok | |
| chřest | 50 | 30 | 100 | 50 | 230 | únor | oblasti s teplými zimami |
| | 90 | 30 | 200 | 45 | 365 | únor | Středomoří |

| Přadné plodiny | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----|----|-----|---------------------|--------------------------------|
| bavlna | 30 | 50 | 60 | 55 | 195 | květen | Egypt, Pákistán, Kalifornie |
| | 45 | 90 | 45 | 45 | 225 | červen | Kalifornie, USA |
| | 30 | 50 | 60 | 55 | 195 | září | Jemen |
| | 30 | 50 | 55 | 45 | 180 | duben | Texas |
| len | 25 | 35 | 50 | 40 | 150 | duben | Evropa |
| | 30 | 40 | 100 | 50 | 220 | říjen | Arizona |
| Olejniny | | | | | | | |
| fazole | 25 | 40 | 65 | 50 | 180 | březen | suché podnebí |
| | 20 | 40 | 50 | 25 | 135 | listopad | Indonésie |
| světlice barvířská | 20 | 35 | 45 | 25 | 125 | duben | Kalifornie, USA |
| | 25 | 35 | 55 | 30 | 145 | červen | Evropa |
| | 35 | 55 | 60 | 40 | 190 | říjen / listopad | vyprahlé regiony |
| sezam | 20 | 30 | 40 | 20 | 100 | červen | Čína |
| slunečnice | 25 | 35 | 45 | 25 | 130 | duben / květen | Kalifornie, USA |
| Cereálie | | | | | | | |
| ječmen / oves / pšenice | 15 | 25 | 50 | 30 | 120 | listopad | centrální Indie |
| | 20 | 25 | 60 | 30 | 135 | březen / duben | 35-45 ° v.š. |
| | 15 | 30 | 65 | 40 | 150 | červenec | východní Afrika |
| | 40 | 30 | 40 | 20 | 130 | duben | |
| | 40 | 60 | 60 | 40 | 200 | listopad | |
| | 20 | 50 | 60 | 30 | 160 | prosinec | Kalifornie, USA |
| zimní pšenice | 20 ² | 60 ² | 70 | 30 | 180 | prosinec | Kalifornie, USA |
| | 30 | 140 | 40 | 30 | 240 | listopad | Středomoří |
| | 160 | 75 | 75 | 25 | 335 | říjen | Idaho, USA |
| zrna (malé) | 20 | 30 | 60 | 40 | 150 | duben | Středomoří |
| | 25 | 35 | 65 | 40 | 165 | říjen / listopad | Pákistán, arid. klima |

| | | | | | | | |
|---------------------------------|----|-----|-------|------|------|---------------------------------|--|
| kukuřice (na zrno) | 30 | 50 | 60 | 40 | 180 | duben | východní Afrika |
| | 25 | 40 | 45 | 30 | 140 | prosinec / leden | vyprahlé regiony |
| | 20 | 35 | 40 | 30 | 125 | Červen | Nigérie (vlhké) |
| | 20 | 35 | 40 | 30 | 125 | Říjen | Indie (suché, chladné) |
| | 30 | 40 | 50 | 30 | 150 | Duben | Španělsko, Kalifornie |
| | 30 | 40 | 50 | 50 | 170 | Duben | Idaho, USA |
| kukuřice (sladká) | 20 | 20 | 30 | 10 | 80 | Březen | Filipíny |
| | 20 | 25 | 25 | 10 | 80 | květen / červen | Středomoří |
| | 20 | 30 | 50/30 | 10 | 90 | říjen / prosinec | vyprahlé regiony |
| | 30 | 30 | 30 | 103 | 110 | duben | Idaho, USA |
| | 20 | 40 | 70 | 10 | 140 | leden | Kalifornie, USA |
| proso | 15 | 25 | 40 | 25 | 105 | červen | Pákistán |
| | 20 | 30 | 55 | 35 | 140 | duben | Central USA |
| čirok | 20 | 35 | 40 | 30 | 130 | květen / červen | USA, Pákistán |
| | 20 | 35 | 45 | 30 | 140 | duben | vyprahlé regiony |
| rýže | 30 | 30 | 60 | 30 | 150 | prosinec/ květen | Středomoří |
| | 30 | 30. | 80 | 40 | 180 | květen | tropické oblasti |
| Krmiva | | | | | | | |
| vojtěška, celkem sezóna | 10 | 30 | var. | var. | var. | | poslední -4 ° C na jaře až do první -4 ° C na podzim |
| vojtěška 1. řezací cyklus | 10 | 20 | 20 | 10 | 60 | leden/ duben (poslední - 4 ° C) | Kalifornie, USA |
| | 10 | 30 | 25 | 10 | 75 | | Idaho, USA |
| vojtěška - ostatní řezací cykly | 5 | 10 | 10 | 5 | 30 | | Kalifornie, USA |
| | 5 | 20 | 10 | 10 | 45 | červen | Idaho, USA. |
| Bermuda pro osivo | 10 | 25 | 35 | 35 | 105 | březen | Kalifornie, USA |
| Bermuda na seno | 10 | 15 | 75 | 35 | 135 | | Kalifornie, USA |

| | | | | | | | |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|--------|---|
| (řízky) | | | | | | | |
| pastviny | 10 | 20 | - | - | - | | 4 ° C na jaře do 7 dnů po prvních -4 ° C na podzim -4 ° C na jaře do 7 dnů po prvních -4 ° C na podzim |
| 1. řezací cyklus | 25 | 25 | 15 | 10 | 75 | duben | Kalifornie, USA |
| jiné řezací cykly | 3 | 15 | 12 | 7 | 37 | červen | Kalifornie, USA |
| Cukrová třtina | | | | | | | |
| cukrová třtina | 35 | 60 | 190 | 120 | 405 | | v. š. |
| | 50 | 70 | 220 | 140 | 480 | | tropické oblasti |
| | 75 | 105 | 330 | 210 | 720 | | Hawaii, USA |
| cukrová třtina | 25 | 70 | 135 | 50 | 280 | | nízké zeměpisné š. |
| | 30 | 50 | 180 | 60 | 320 | | tropické oblasti |
| | 35 | 105 | 210 | 70 | 420 | | Hawaii, USA |
| Tropické ovoce a stromy | | | | | | | |
| banány, 1. rok | 120 | 90 | 120 | 60 | 390 | květen | Středomoří |
| banány, 2. rok | 120 | 60 | 180 | 5 | 365 | únor | Středomoří |
| ananas | 60 | 120 | 600 | 10 | 790 | | Hawaii, USA |
| Hrozny a bobule | | | | | | | |
| hrozny | 20 | 40 | 120 | 60 | 240 | duben | nízké zeměpisné š. |
| | 20 | 50 | 75 | 60 | 205 | květen | Kalifornie, USA |
| | 20 | 50 | 90 | 20 | 180 | květen | vysoké zeměpisné š. |
| | 30 | 60 | 40 | 80 | 210 | duben | střední zeměpisné š. (víno) |
| chmel | 25 | 40 | 80 | 10 | 155 | duben | Idaho, USA |
| Ovocné stromy | | | | | | | |
| citrus | 60 | 90 | 120 | 95 | 365 | leden | Středomoří |
| opadavé ovoc. stromy | 20 | 70 | 90 | 30 | 210 | březen | vysoké zeměpisné š. |
| | 20 | 70 | 120 | 60 | 270 | březen | nízké zeměpisné š. |
| | 30 | 50 | 130 | 30 | 240 | březen | Kalifornie, USA |
| olivy | 30 | 90 | 60 | 90 | 2705 | březen | Středomoří |
| pistácie | 20 | 60 | 30 | 40 | 150 | únor | Středomoří |
| vlašské ořechy | 20 | 10 | 130 | 30 | 190 | duben | Utah, USA |

| Mokřady - mírné klima | | | | | | | |
|-----------------------|-----|----|----|----|-----|----------|--------------|
| orobinec, síťina | 10 | 30 | 80 | 20 | 140 | květen | Utah, USA |
| | 180 | 60 | 90 | 35 | 365 | listopad | Florida, USA |
| mokřady (krátký veg.) | 180 | 60 | 90 | 35 | 365 | listopad | USA |

* Délky etap rozvoje plodin uvedených v této tabulce jsou orientační a mohou se značně lišit region od regionu. Uživateli je důrazně doporučeno získat odpovídající místní informace.

Zdroj: Allen at al, 1998

Tabulka 6

Základní koeficienty K_c pro plodiny v polosuchých klimatických ($RH_{\min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ m / s) podmínkách pro použití FAO Penman-Monteith ET_0

| Plodina | K_{cbini}^1 | $K_{cb\ mid}$ | $K_{cb\ end}$ |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Malá zelenina | 0.15 | 0.95 | 0.85 |
| brokolice | | 0.95 | 0.85 |
| růžičková kapusta | | 0.95 | 0.85 |
| zelí | | 0.95 | 0.85 |
| mrkev | | 0.95 | 0.85 |
| květák | | 0.95 | 0.85 |
| celer | | 0.95 | 0.90 |
| česnek | | 0.90 | 0.60 |
| salát | | 0.90 | 0.90 |
| cibule | | | |
| - suchá | | 0.95 | 0.65 |
| - zelená | | 0.90 | 0.90 |
| - osivo | | 1.05 | 0.70 |
| špenát | | 0.90 | 0.85 |
| ředkvičky | | 0.85 | 0.75 |
| Zelenina - (<i>Solanaceae</i>) | 0.15 | 1.10 | 0.70 |
| lilek | | 1.00 | 0.80 |
| sladká paprika (zvonek) | | 1,00 | 0.80 |
| rajče | | 1,10 | 0.60-0.80 |
| Zelenina -(<i>Cucurbitaceae</i>) | 0.15 | 0.95 | 0.70 |
| ananasový meloun | | 0.75 | 0.50 |
| okurka | | | |
| - čerstvá | | 0,95 | 0.70 |
| - strojově sklizená | | 0.95 | 0.80 |
| dýně | | 0.95 | 0.70 |

| | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| cuketa | | 0.90 | 0.70 |
| sladké melouny | | 1.00 | 0.70 |
| vodní melouny | | 0.95 | 0.70 |
| Kořeny a hlízy | 0.15 | 1.00 | 0.85 |
| řepa | | 0.95 | 0.85 |
| maniok | | | |
| - 1. Rok | | 0.70 | 0.20 |
| - 2. Rok | | 1.00 | 0.45 |
| pastinák | | 0.95 | 0.85 |
| brambor | | 1.10 | 0.65 |
| sladký brambor | | 1.10 | 0.55 |
| vodnice (tuřín) | | 1.00 | 0.85 |
| cukrová řepa | | 1.15 | 0.50 |
| Luštěniny (<i>Leguminosae</i>) | 0.15 | 1.10 | 0.50 |
| fazole zelené | | 1,00 | 0.80 |
| fazole suché a luštěniny | | 1,10 | 0.25 |
| cizrnové | | 0.95 | 0.25 |
| bob | | | |
| - čerstvý | | 1,10 | 1.05 |
| - sušený/ na semeno | | 1,10 | 0.20 |
| cizrna | | 1.05 | 0.25 |
| zelený hrášek | | 1.00 | 0,55-0,25 |
| podzemnice (arašídý) | | 1.10 | 0.50 |
| čočka | | 1.05 | 0.20 |
| hrášek | | | |
| - čerstvý | | 1,10 | 1.05 |
| - sušený/ na semeno | | 1.10 | 0.20 |
| sójové boby | | 1.10 | 0.30 |
| Vytrvalá zelenina (na původně holých nebo mulčovaných půdách) | | | |
| artyčoky | 0.15 | 0.95 | 0.90 |
| chřest | 0.15 | 0.90 | 0.20 |
| máta | 0.40 | 1.10 | 1.05 |

| | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| jahody | 0.30 | 0.80 | 0.70 |
| Přadné plodiny | 0.15 | | |
| bavlna | | 1.10-1.15 | 0.50-0.40 |
| len | | 1.05 | 0.20 |
| sisal | | 0.4-0.7 | 0.4-0.7 |
| Olejníny | 0.15 | 1.10 | 0.25 |
| skočec | | 1.10 | 0.45 |
| řepka | | 0,95-1,10 | 0.25 |
| světlice barvířská | | 0,95-1,10 | 0.20 |
| sezam | | 1.05 | 0.20 |
| slunečnice | | 0,95-1,10 | 0.25 |
| Cereálie | 0.15 | 1.10 | 0.25 |
| ječmen | | 1.10 | 0.15 |
| oves | | 1.10 | 0.15 |
| jarní pšenice | | 1.10 | 0,15 až 0,3 |
| zimní pšenice | 0.15-,5 | 1.10 | 0,15 až 0,3 |
| kukuřice | | | |
| -zrno | 0.15 | 1.15 | 0.50,0.15 |
| - kukuřice | | 1.10 | 1.00 |
| proso | | 0.95 | 0.20 |
| čirok | | | |
| - obilí | | 0.95-1.05 | 0.35 |
| - sladký | | 1.15 | 1.00 |
| rýže | 1.00 | 1.15 | 0.70-0.45 |
| Krmiva | | | |
| Hay vojtěška | | | |
| - individuální řezné období | 0.30 | 1.15 | 1.10 |
| - pro osivo | 0.30 | 0.45 | 0.45 |
| Bermuda seno | | | |
| - průměrné řezné účinky | 0.50 | 0.95 | 0.80 |
| - jarní plodiny pro osivo | 0.15 | 0.85 | 0.60 |
| Clover seno, Berseem - jednotlivé řezné období | 0.30 | 1.10 | 1.05 |

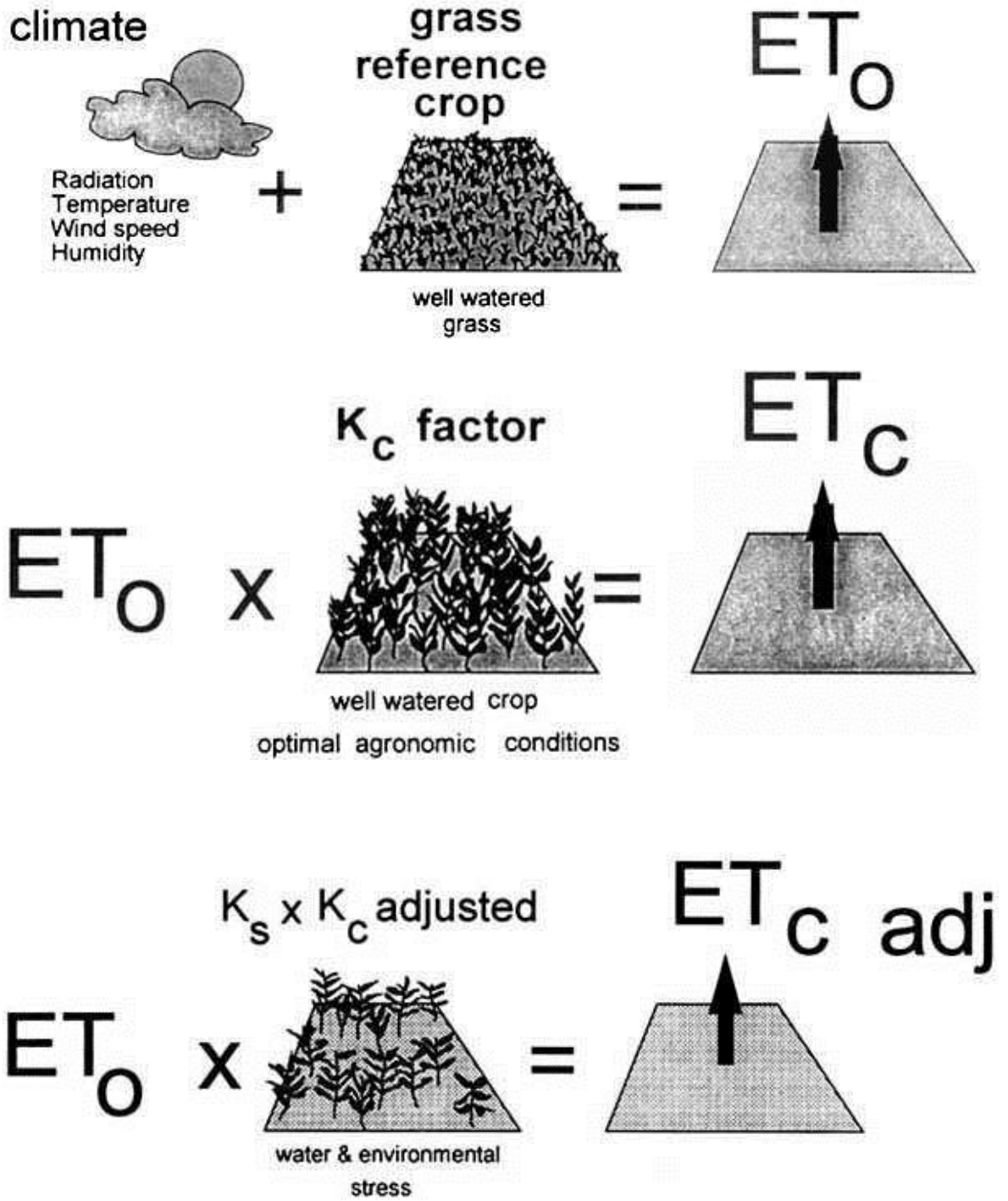
| | | | |
|--|------|-----------|------|
| Rye Grass seno - průměrné řezné účinky | 0.85 | 1.00 | 0.95 |
| Súdán Grass seno (roční) - jednotlivé řezné období | 0.30 | 1.10 | 1.05 |
| pastva | | | |
| - rotační pastva | 0.30 | 0.80-1.00 | 0.80 |
| - extenzivní pastviny | 0.30 | 0.70 | 0.70 |
| Trávníky | | | |
| - studené období sezóna | 0.85 | 0.90 | 0.90 |
| - teplé období | 0.75 | 0.80 | 0.80 |
| cukrová třtina | 0.15 | 1.20 | 0.70 |
| Tropické ovoce a stromy | | | |
| banán | | | |
| - 1. Rok | 0.15 | 1.05 | 0.90 |
| - 2. Rok | 0.60 | 1.10 | 1.05 |
| kakao | 0.90 | 1.00 | 1.00 |
| káva | | | |
| - holé porosty | 0.80 | 0.90 | 0.90 |
| - s plevelem | 1.00 | 1.05 | 1.05 |
| pom. palmy | 0.80 | 0.85 | 0.85 |
| palmy | 0.85 | 0.90 | 0.90 |
| ananas (víceleté plodiny) | | | |
| - holé půdy | 0.15 | 0.25 | 0.25 |
| - s travním porostem | 0.30 | 0.45 | 0.45 |
| gumové stromy | 0.85 | 0.90 | 0.90 |
| čaj | | | |
| - bez stínu | 0.90 | 0.95 | 0.90 |
| - ve stínu | 1.00 | 1.10 | 1.05 |
| Hrozny a bobule | | | |
| bobule (keře) | 0.20 | 1.00 | 0.40 |
| hrozny | | | |
| - hrozinky | 0.15 | 0.80 | 0.40 |
| - víno | 0.15 | 0.65 | 0.40 |
| chmel | 0.15 | 1.00 | 0.80 |

| Ovocné stromy | | | |
|--------------------------------|------|------|--------|
| mandle | 0.20 | 0.85 | 0.6019 |
| jablka, třešně, hrušky | | | |
| - žádný pokrytí, mráz | 0.35 | 0.90 | 0.6519 |
| - žádný pokrytí, žádné mrazy | 0.50 | 0.90 | 0.7019 |
| - aktivní porosty, mráz | 0.45 | 1.15 | 0.9019 |
| - aktivní porosty, žádné mrazy | 0.75 | 1.15 | 0.8019 |
| meruňky, broskve, peckoviny | | | |
| - žádné pokrytí, mráz | 0.35 | 0.85 | 0.6019 |
| - žádné pokrytí, žádné mrazy | 0.45 | 0.85 | 0.6019 |
| - aktivní porosty, mráz | 0.45 | 1.10 | 0.8519 |
| - aktivní porosty, bez mrazů | 0.75 | 1.10 | 0.8019 |
| avokádo | 0.50 | 0.80 | 0.70 |
| Citrus bez zápoje | | | |
| 70% zápoj | 0.65 | 0.60 | 0.65 |
| 50% zápoj | 0.60 | 0.55 | 0.60 |
| 20% zápoj | 0.45 | 0.40 | 0.50 |
| citrus s aktivním zápojem | | | |
| 70% zápoj | 0.75 | 0.70 | 0,75 |
| 50% zápoj | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 20% zápoj | 0.80 | 0.80 | 0.85 |
| jehličnany | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| kiwi | 0.20 | 1.00 | 1.00 |
| olivy | 0.55 | 0.65 | 0.65 |
| pistácie | 0.20 | 1.05 | 0.40 |
| ořech | 0.40 | 1.05 | 0.6019 |

Zdroj: Allen at al, 1998

Obrázek 1

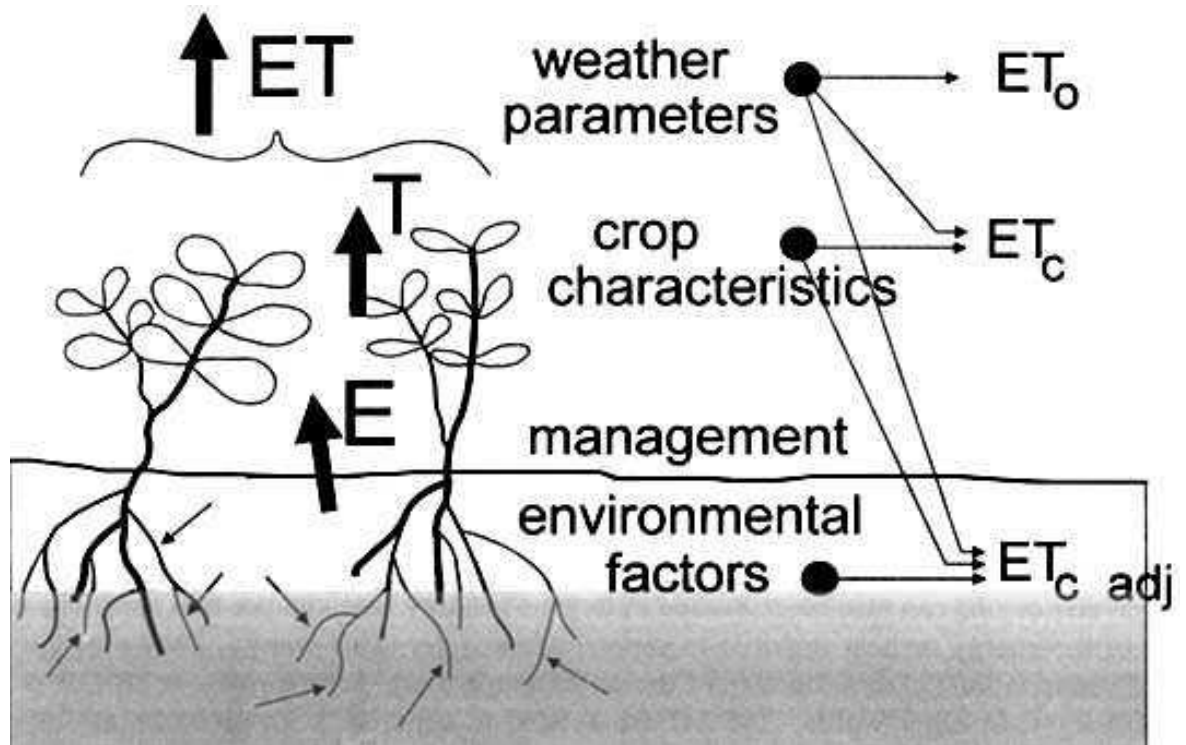
Formy evapotranspirace



Zdroj: Allen at al, 1998

Obrázek 2

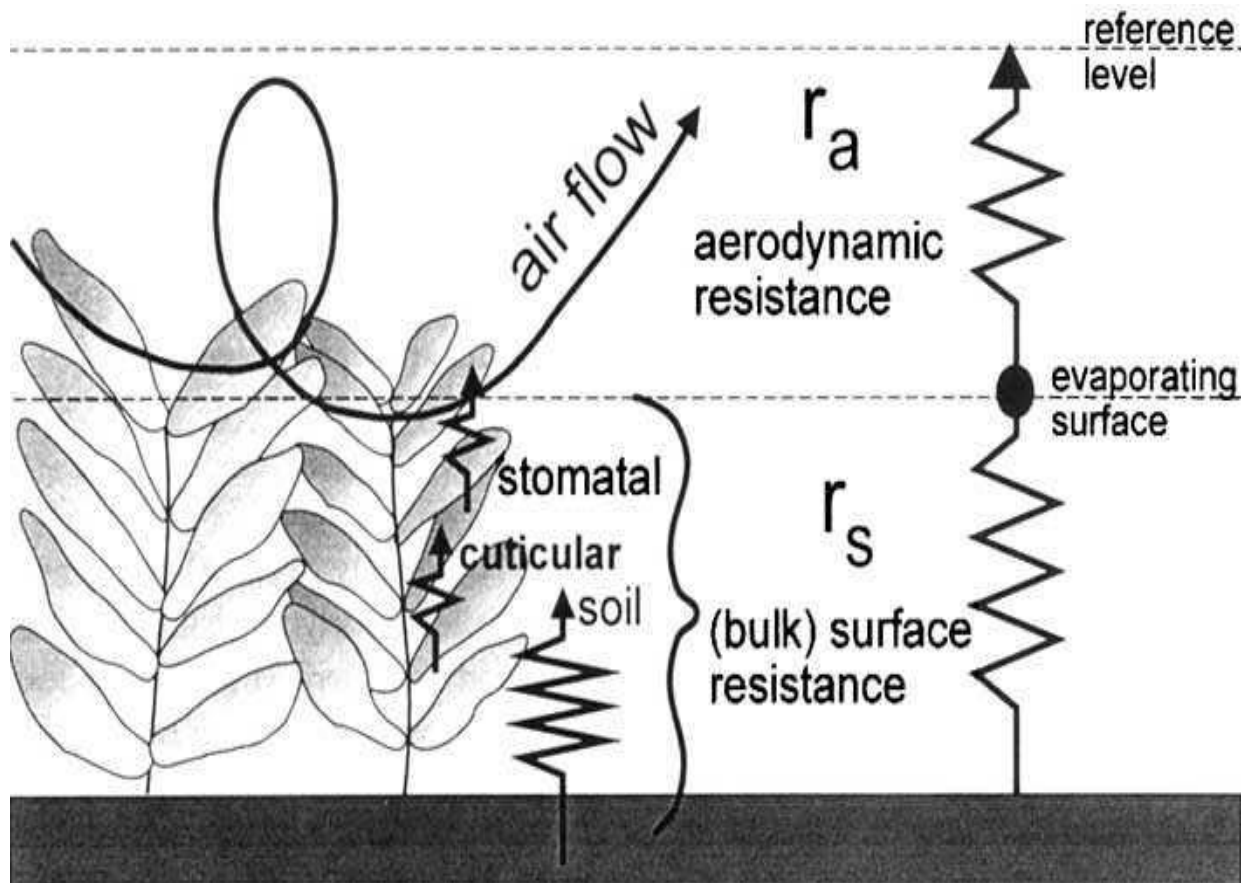
Faktory ovlivňující evapotranspiraci



Zdroj: Allen at al, 1998

Obrázek 3

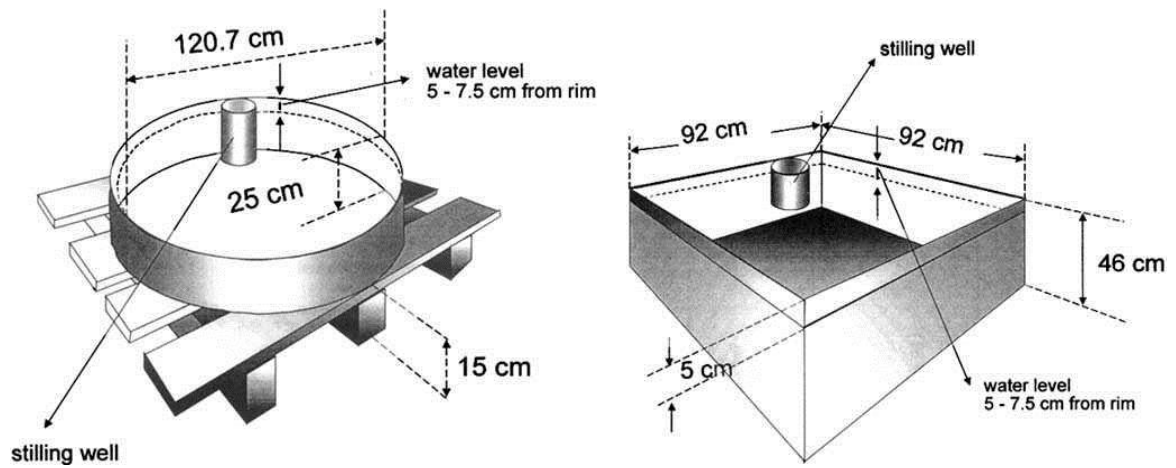
Celkový povrch a aerodynamické odpory pro průtok vodní páry (air flow = proud vzduchu; vlhkost, %)



Zdroj: Allen et al., 1998

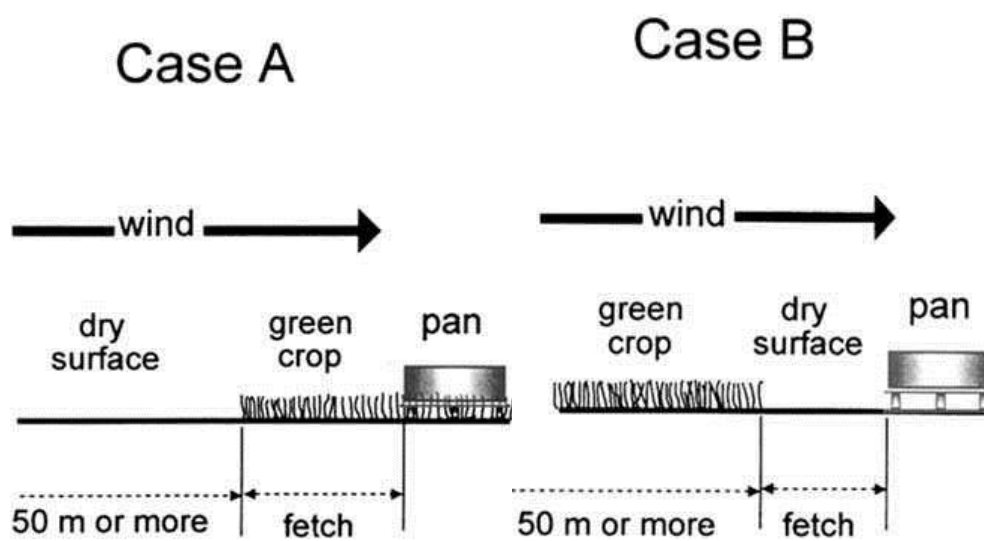
Obrázek 4

Výparoměry



Zdroj: Allen at al, 1998

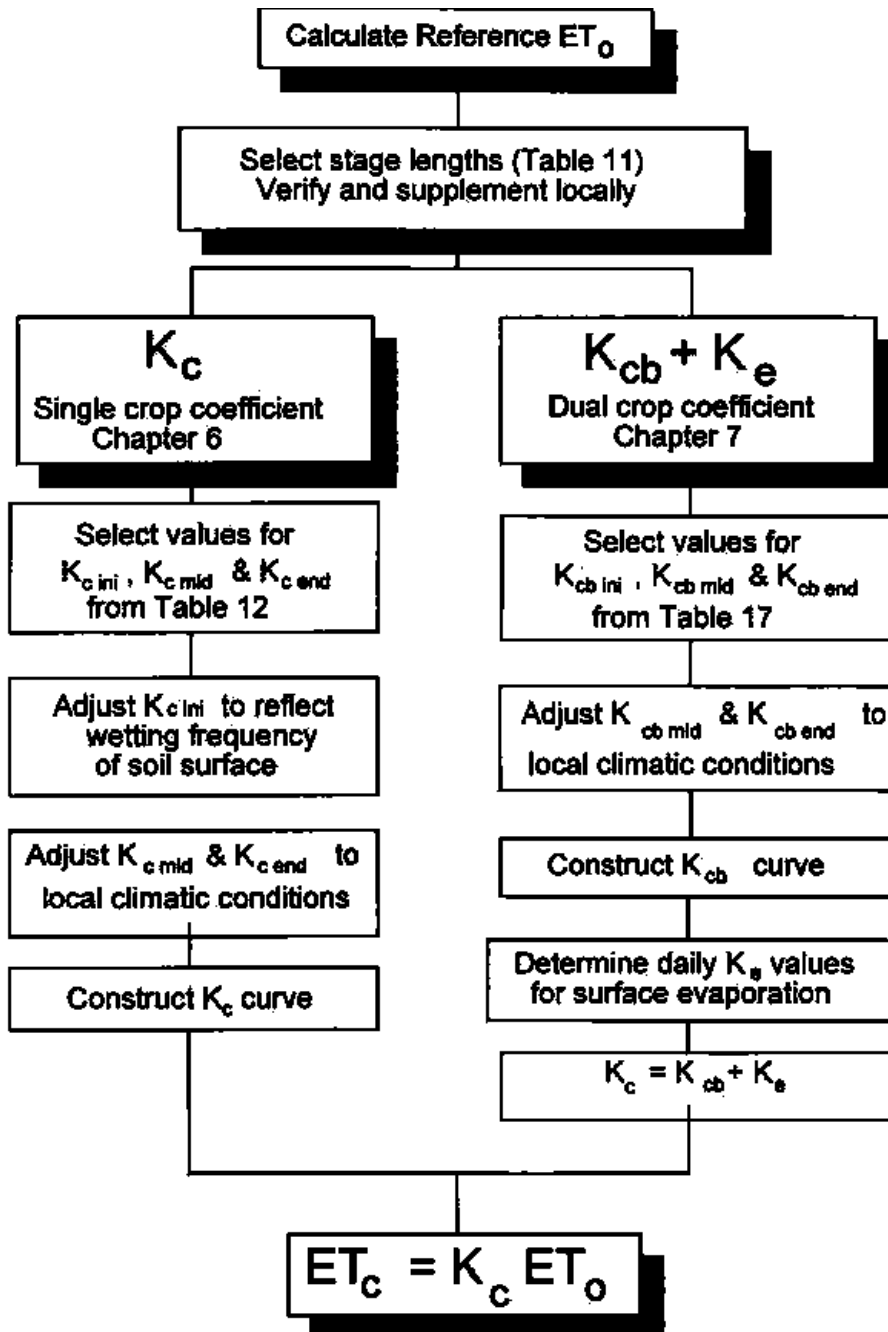
Fetch



Zdroj: Allen at al, 1998

Obrázek 5

Obcný postup pro výpočet ET_c



Zdroj: Allen at al, 1998