

Přednáška VI. Výpar

Vlastnosti vodní páry

- 1. Absolutní vlhkost (koncentrace vodní páry) χ (kg m⁻³)
- 2. (Parciální) tlak (napětí) vodní páry e (Pa, kPa, mbar=hPa, torr)
- 3. Relativní vlhkost RH (% nebo zlomek jedničky)

$$RH = \frac{e}{e_s} \approx \frac{\chi}{\chi_s}$$

$$e_s \approx A \exp\left(\frac{BT_{oC}}{T_{oC} + C}\right)$$

$$\chi \approx \frac{M_w}{RT} e$$

kde e_s and χ_s jsou tlak (Pa), resp. koncentrace (kg m⁻³) nasycené páry,

v pořadí,

T je absolutní teplota (K), $T_{oC} = T - 273,15$ (teplota ve °C)

$M_w \approx 0,018\ 015$ kg mol⁻¹ je molární hmotnost vody,

$R \approx 8,314\ 32$ J mol⁻¹ K⁻¹ je univerzální plynová konstanta ,

$A \approx 610,8$ Pa; $B \approx 17,27$; $C \approx 237,3$ K

Další důležité parametry

- 4. Psychrometrická konstanta γ (Pa K⁻¹)
- 5. Sklon křivky nasycené vodní páry Δ (Pa K⁻¹)
- 6. Skupenské teplo výparu $\lambda \approx 2,45$ MJ kg⁻¹
- 7. Střední atmosférický (barometrický) tlak p (Pa)

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} \approx \frac{B C e_s}{(T + C)^2}$$

$$\chi \approx \frac{\rho_a c_p}{\gamma \lambda} e$$

$$\gamma = \frac{c_p p}{\lambda \varepsilon} \approx 0.665 \times 10^{-3} \times p$$

$$p \approx 101\,300 \times \left(\frac{293 - 0.0065 \times z}{293} \right)^{5.26}$$

kde $c_p \approx 1,013 \cdot 10^{-3}$ MJ kg⁻¹ K⁻¹ je specifické teplo (entalpie) vzduchu při konstantním tlaku, $\rho_a \approx 1,210$ kg m⁻³ je hustota (suchého) vzduchu,

$\varepsilon \approx 0,622$ (bezrozměrný) je poměr molární hmotnosti vody ke střední molární hmotnosti vzduchu, z je nadmořská výška (m).

Definice

- ☞ **Výpar** (vypařování) = obecně změna skupenství z kapaliny na páru
- ☞ (Fyzikální) **výpar** = speciálně výpar z povrchu vody, půdy a rostlin (tj. z intercepce), včetně sublimace páry z ledu a sněhu
- ☞ **Transpirace** (fyziologický výpar) = výpar z vnitřku rostlin skrze průduchy, kutikulu a jiné orgány (analogicky u živočichů)
- ☞ **Evapotranspirace** = úhrnný výpar z povrchu Země, zahrnující fyzikální výpar i transpiraci

Definice

☛ **Potenciální evapotranspirace (PET)** má **tři** různé definice:

- 1) Evapotranspirace z **libovolného** území, na kterém roste **libovolná** vegetace dostatečně zásobená půdní vláhou, přičemž na povrchu listů není žádná intercipovaná voda (Thornthwaite ?). Tato PET je **různá pro různou vegetaci**.
- 2) Evapotranspirace **krátce zastřiženého hustého trávniku** dostatečně zásobeného půdní vodou, přičemž na povrchu listů není žádná intercipovaná voda (Penman). Tato PET závisí **pouze na atmosférických podmínkách**.

Definice

- Potenciální evapotranspirace (PET) má **tři** různé definice:

3) Upřesnění definice 2):

Evapotranspirace referenční plodiny (reference crop evapotranspiration) E_{To} je evapotranspirace hypotetického travního porostu o výšce **0,12 m**, konstantním povrchovým odporu **70 s m^{-1}** a albedu **0,23**. Tomu přibližně odpovídá **rozlehlá** plocha dobře zavlažovaného rovnoměrného trávníku, který **aktivně roste a zcela pokrývá půdu**. Povrch půdy je **mírně vyschlý**, odpovídající situaci, kdy je trávník zavlažován **jednou týdně** (FAO 56).

Základní publikace o evapotranspiraci referenční plodiny

Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome. FAO Irrigation and Drainage Paper 24

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

FAO = Food and Agriculture Organisation of the United Nations (Organizace Spojených národů pro výživu a zemědělství)



Definice

- **Aktuální** (skutečná) **evapotranspirace (AET)** = evapotranspirace skutečného porostu, ovlivněná charakterem porostu (např. jeho **hustotou** a **zapojením**), vodním a jiným **stresem** rostlin a případnou **intercepcí** vody na povrchu vegetace a charakterem **povrchu půdy**
- **Územní výpar** = aktuální evapotranspirace z většího, obvykle nestejnoroitého prostředí (např. z povodí)
- **Struktura evapotranspirace** = rozčlenění evapotranspirace na fyzikální výpar a transpiraci
- **Výparnost** = výpar z měřicího přístroje (jen v češtině)

- Plodinový součinitel (crop coefficient) K_c = součinitel, jímž násobíme ETo , abychom dostali aktuální evapotranspiraci plodiny v různých fázích vývoje a za různých situací (FAO):

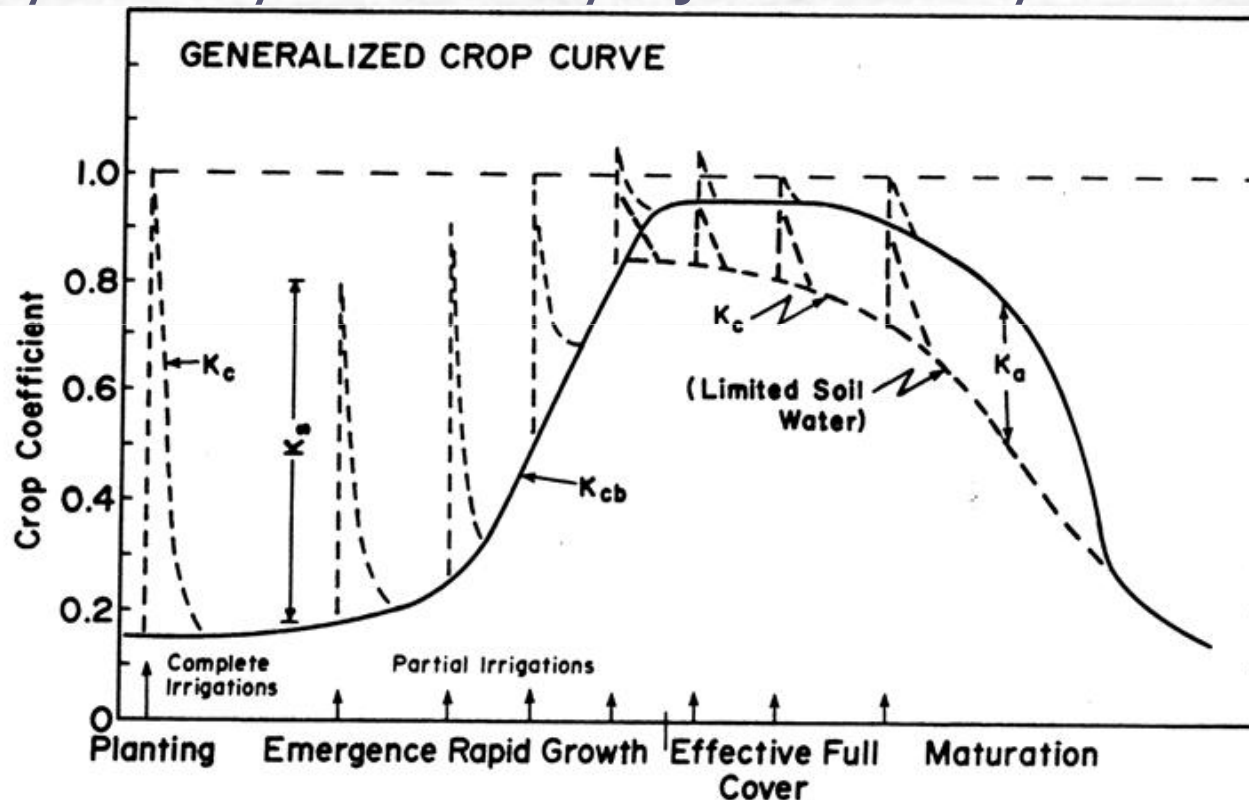


FIG. 2. Generalized basal crop ET coefficient (K_{cb}) curve showing surface wetness coefficient (K_s) and coefficient (K_a) for limiting soil moisture, used to compute an overall crop ET coefficient (K_c) (from Wright, 1982).

Fyzikální podstata procesů výparu

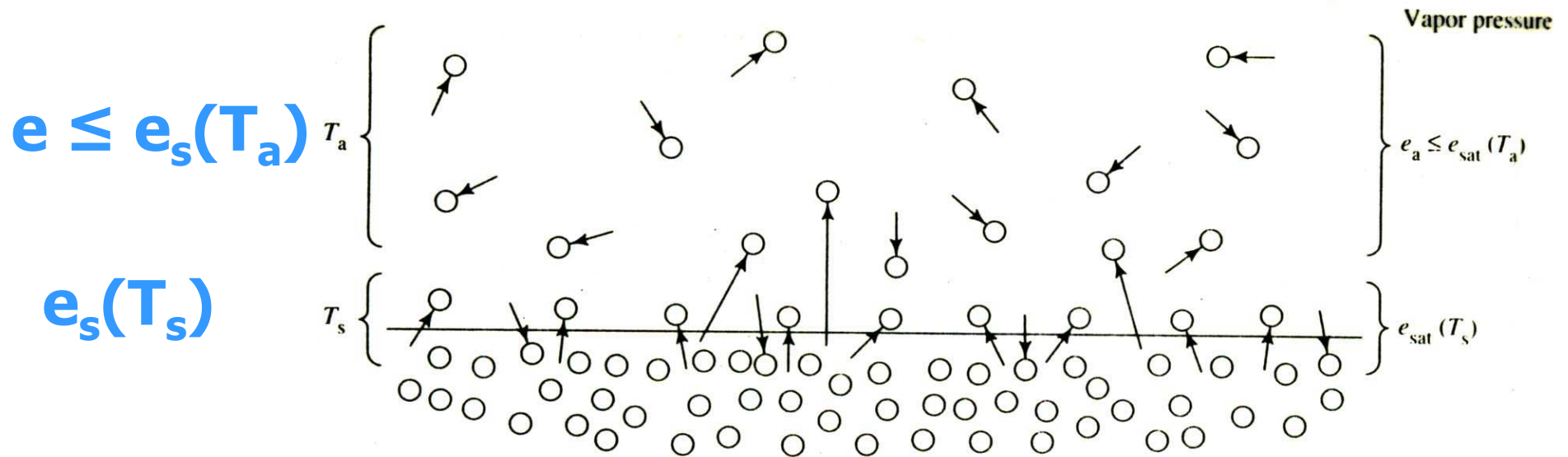


FIGURE D-4

Schematic diagram of flux of water molecules over a water surface. The vapor pressure at the surface is $e_{sat}(T_s)$; the vapor pressure of the overlying air is less than or equal to $e_{sat}(T_a)$. The rate of evaporation is proportional to $[e_{sat}(T_s) - e_a]$ [Equation (D-10)].

Fyzikální podstata procesů výparu

Daltonův zákon vypařování z vodní hladiny:

$$E = \frac{e_s(T_s) - e}{r_a}$$

kde E je intenzita výparu ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mm d^{-1}),

$e_s(T_s)$ je tlak nasycené páry při teplotě T_s
povrchu vody,

e je tlak páry v nějaké výšce nad hladinou,

r je **aerodynamický odpor** proti výparu
odpovídající této výšce a meteorologické situaci

Fyzikální podstata procesů výparu

Transpirace a výpar z půdy: navíc je odpor proudů

$$E = \frac{e_s(T_s) - e}{r_a + r_s}$$

kde r_s je **povrchový odpor**
(odpor proudů)

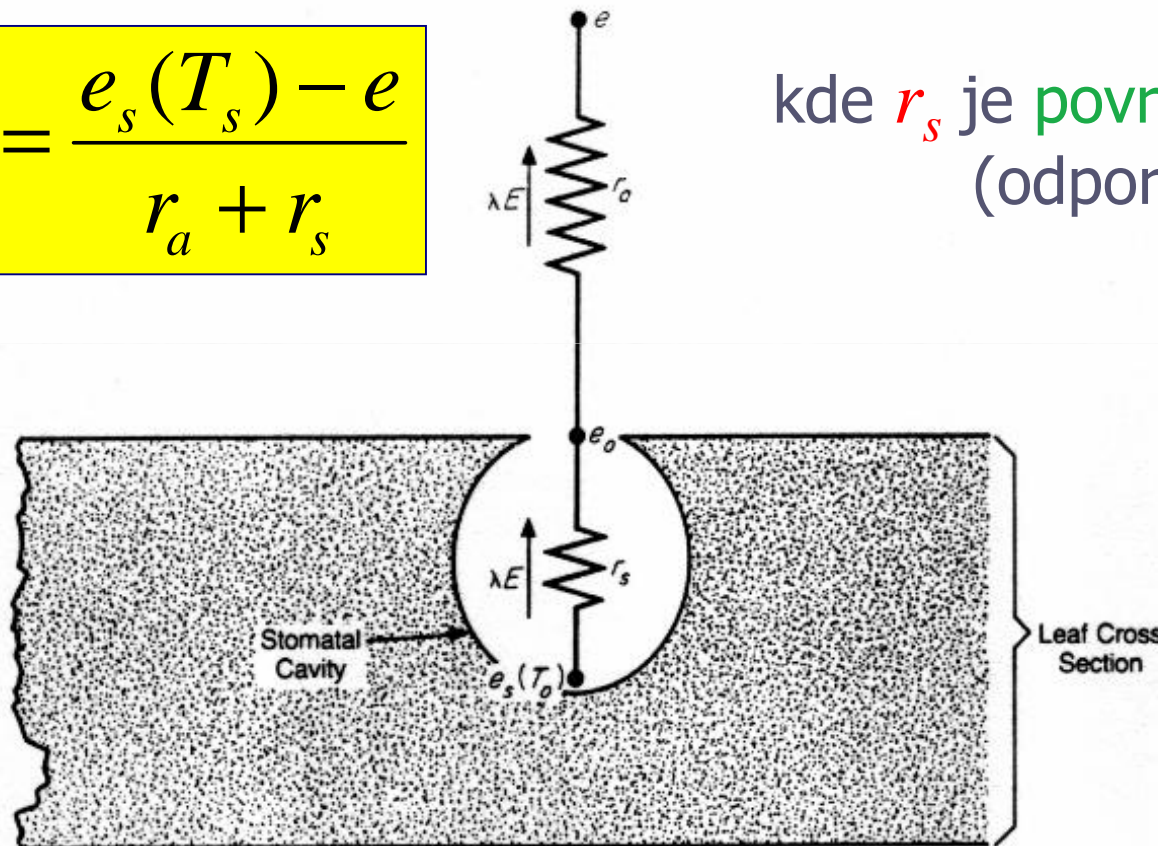


Figure 2.2 Schematic diagram illustrating how the latent heat flux is driven by humidity gradients between the inside of the stomatal cavity ($e_s(T_o)$) and the leaf surface (e_o) and between the leaf surface and the bulk atmosphere (e) against the stomatal and aerodynamic transfer resistances.

Na čem závisí odpor průduchů rostlin ?

vodivost průduchů (odpor^{-1})

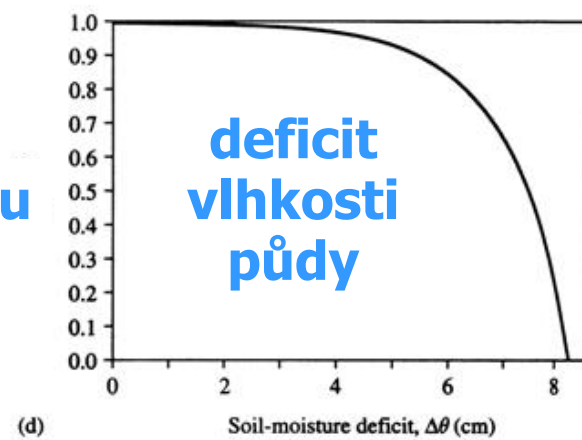
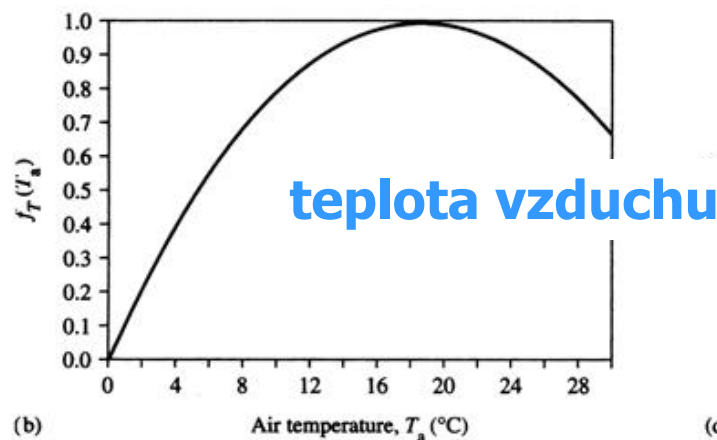
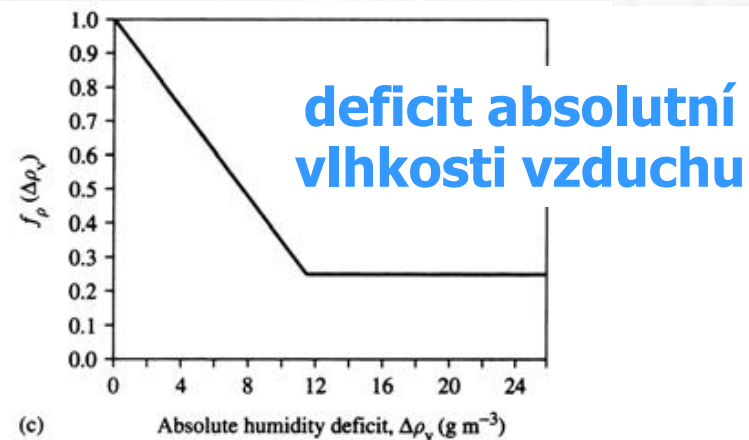
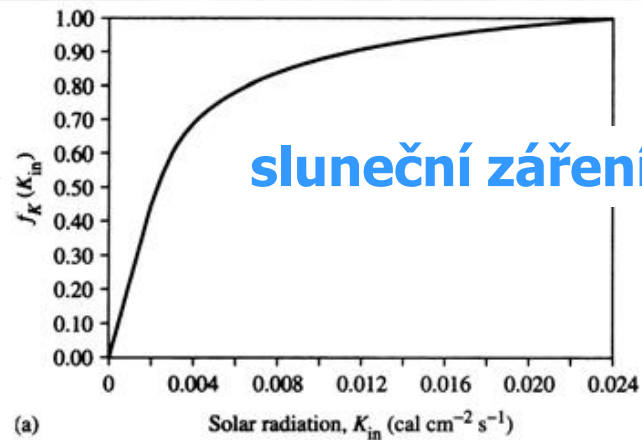
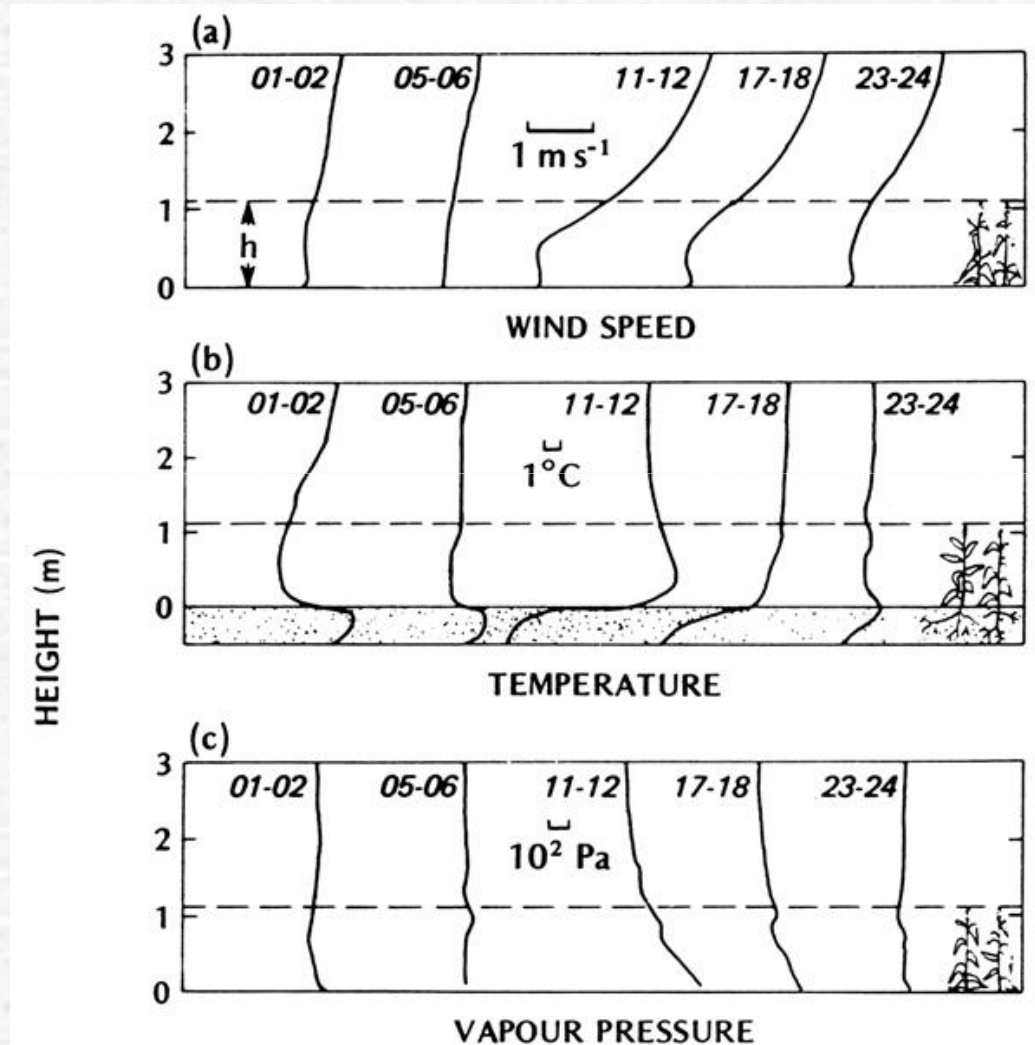


FIGURE 7-13
Effects of (a) solar radiation, K_{in} ; (b) air temperature, T_a ; (c) vapor-pressure deficit, $\Delta\rho_v$; and (d) soil-moisture deficit, $\Delta\theta$, on relative leaf conductances. (See Table 7-6.) After Stewart (1988).

Situace nad porostem

Rothamsted, Anglie,
porost ječmene,
23. července 1963
(podle Longa et al.,
1964)



Turbulentní difúze (víry místo molekul)

je mechanismem přenosu:

hybnosti (rychlosti větru)

tepla (teploty vzduchu)

hmotnosti (vlhkosti vzduchu)

Výška

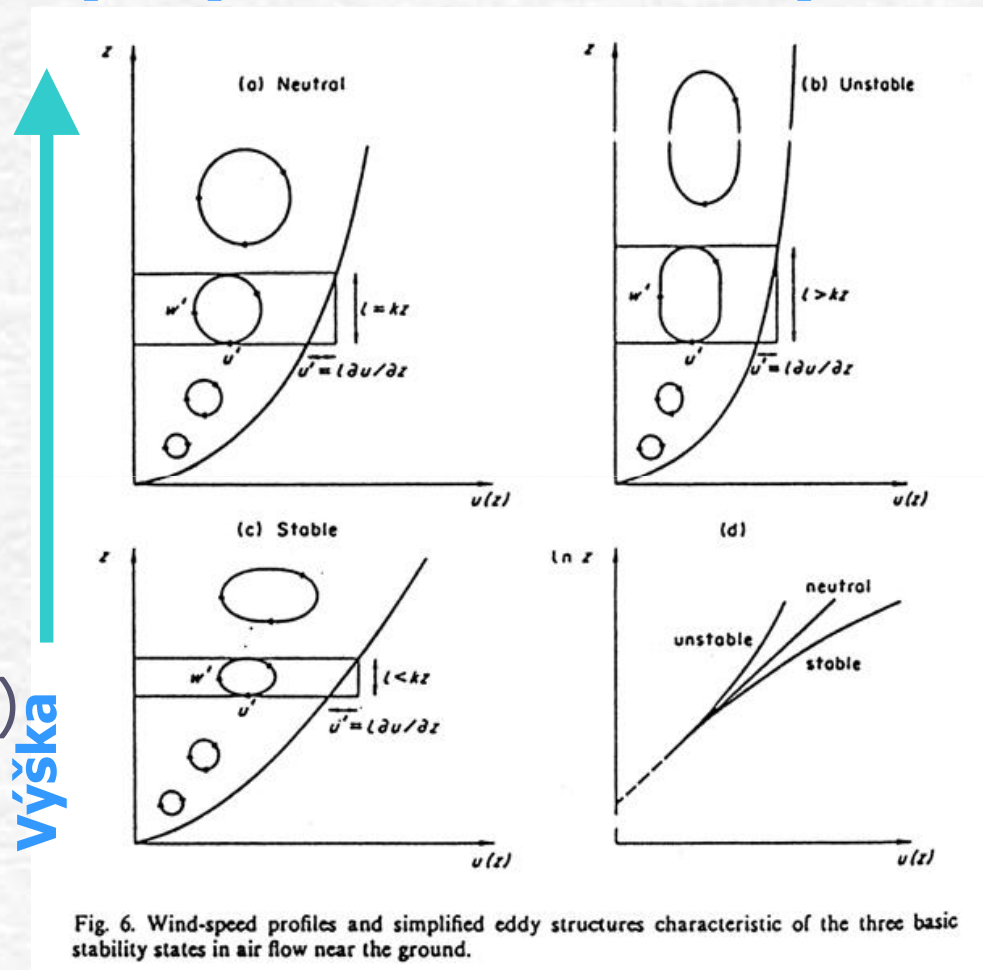


Fig. 6. Wind-speed profiles and simplified eddy structures characteristic of the three basic stability states in air flow near the ground.

Rychlost větru

Výpar z holé půdy:

1. stádium je určováno atmosférou,

2. stádium je určováno povrchovým odporem půdy

Výpar (mm d^{-1})

Albedo

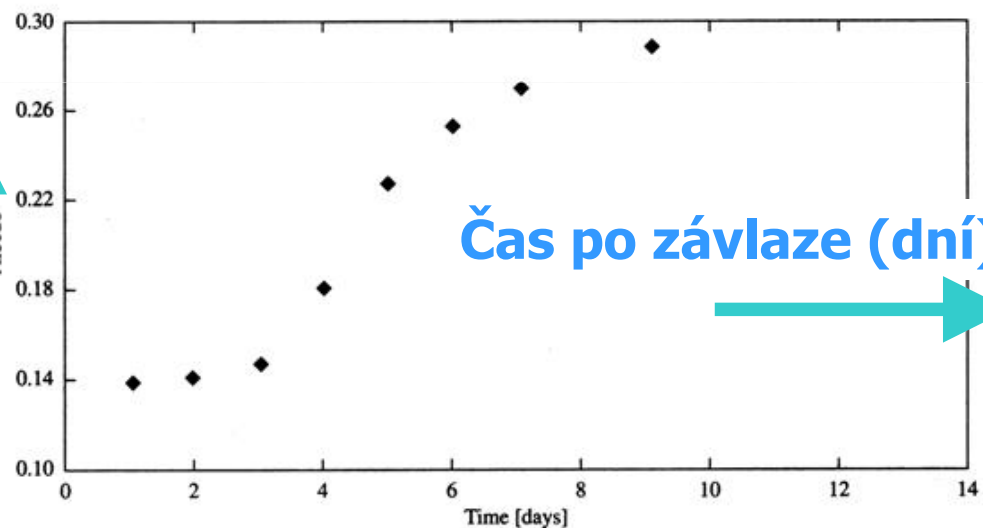
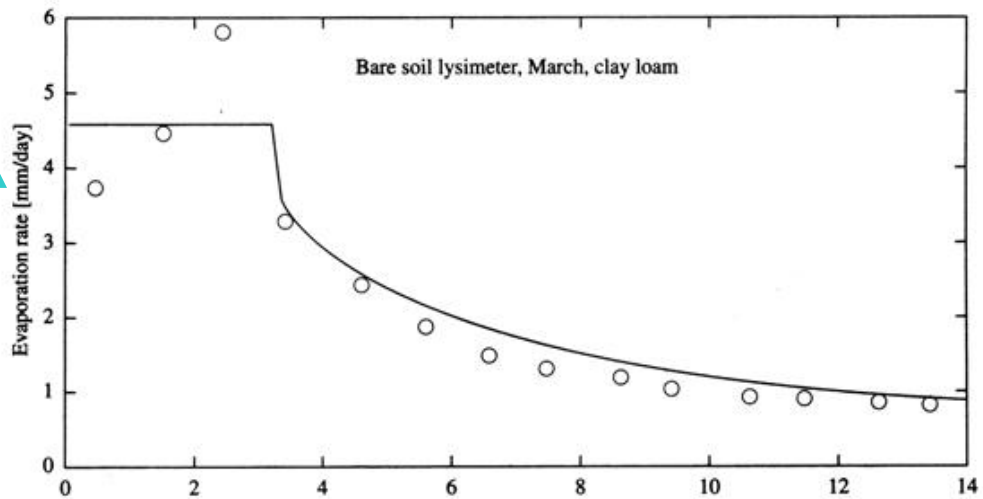


FIGURE 7-8

(a) Bare-soil evaporation following irrigation as measured in a lysimeter (circles) and computed via Equation (7-45) (line). (b) Concurrent soil-surface albedo. Figure provided by Guido Salvucci, Boston University.

Měření výparnosti - Wildův výparoměr

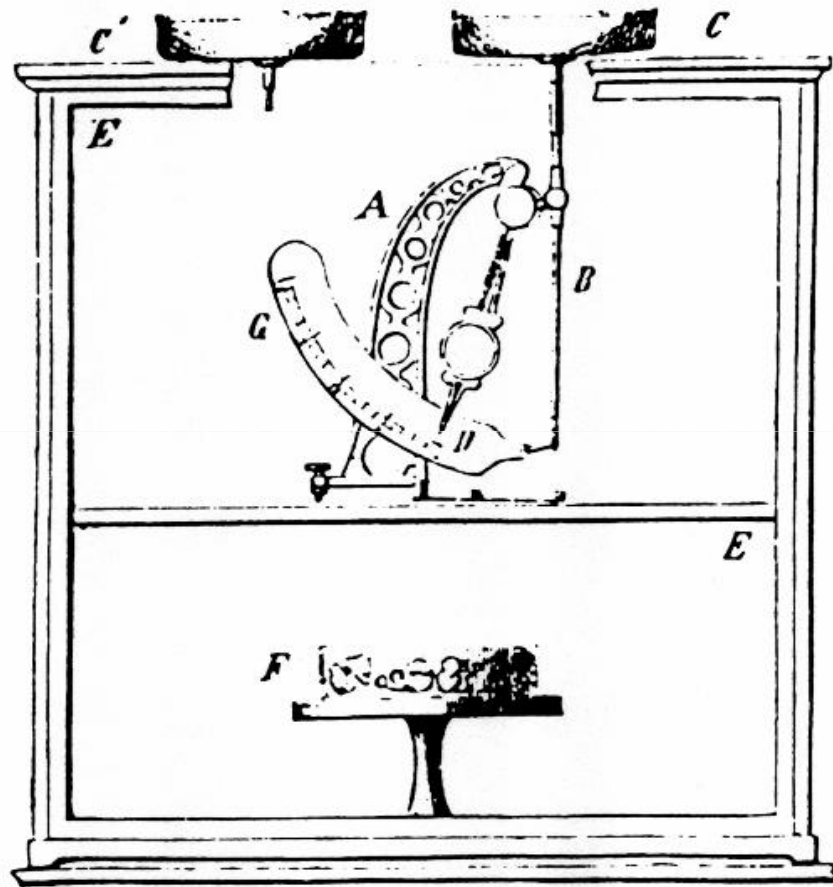


Fig. 11.16. The Wild evaporimeter scale (from Wild, 1874).

Měření výparnosti - Pichého výparoměr

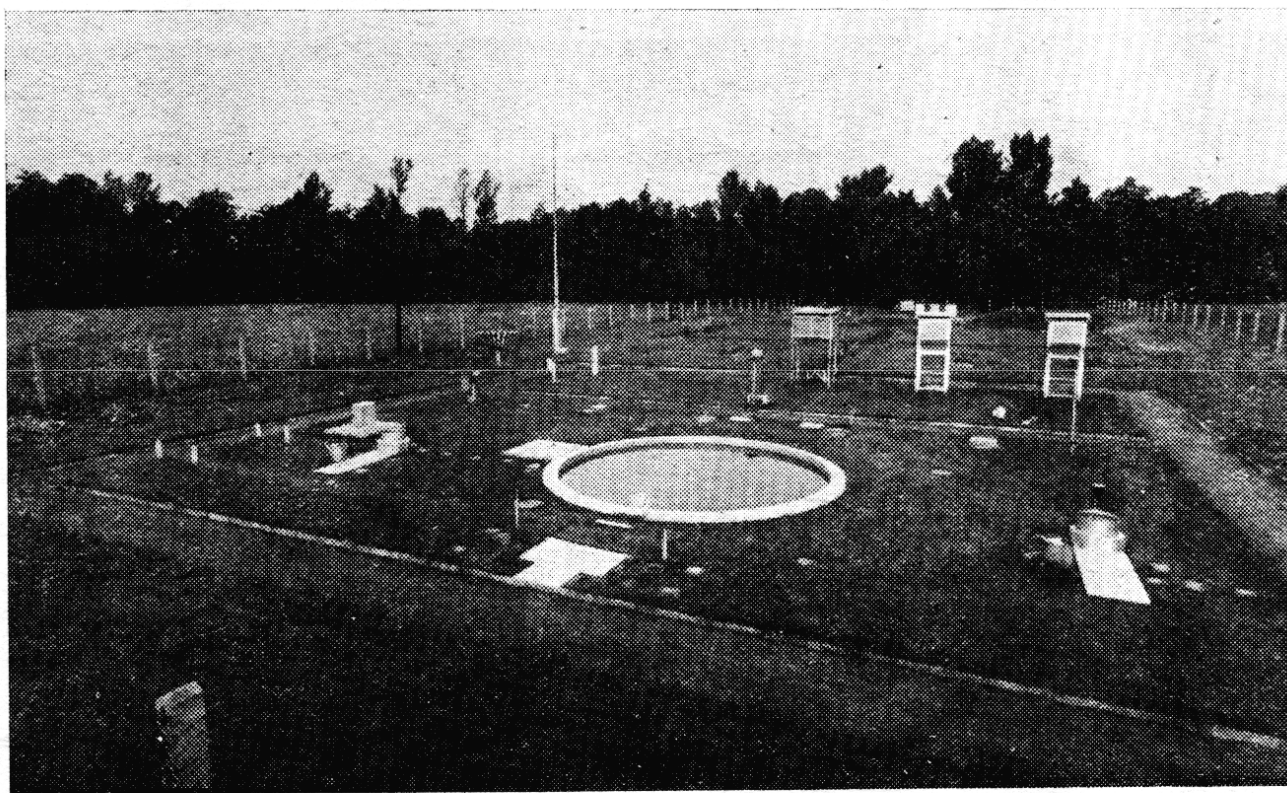


11.15. The Piche evaporimeter
(from Abbe, 1905).

Měření výparnosti - ARS Beltsville, MD, USA

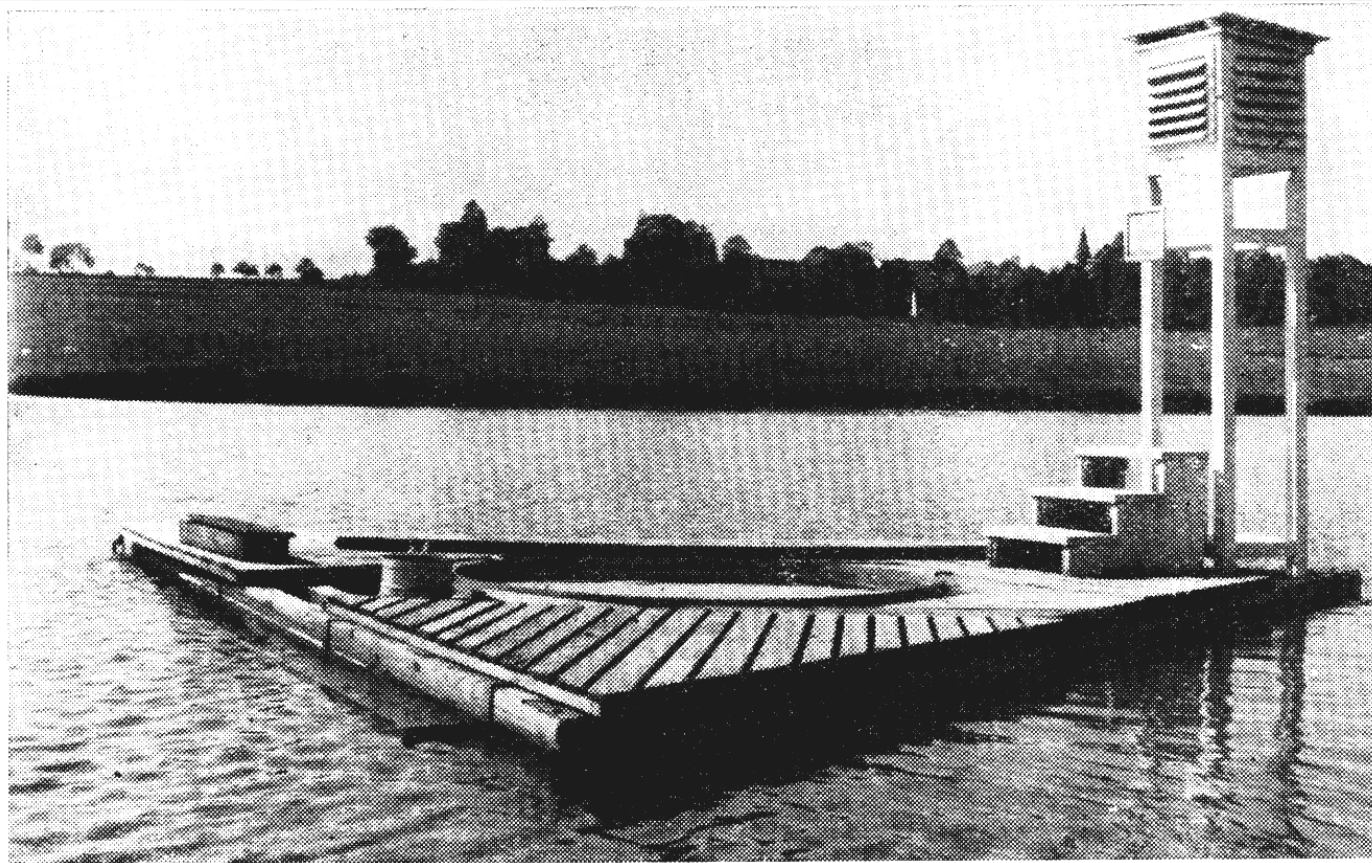


Měření výparu - velký (standardní) výparoměr (ČHMÚ + VÚZH, Tišice)



Obr. 4.3. Výparoměrná stanice v Tišicích

Měření výparu - velký plovoucí výparoměr



Obr. 4.2. Plovoucí výparoměr

Měření výparu - Class „A” pan



(<http://www.crh.noaa.gov/images/lbf/localinfo/coop/equipment/evap.jpg>)

Zapuštěný výparoměr



(b)

FIG. 11-2. Pans for evaporation measurements. (a) U.S. Weather Bureau Class A land pan; (b) U.S. Bureau of Plant Industry sunken pan.

Class „A” pan - opravné součinitele k odhadu E_{T0}

TABLE 4.3.1 Suggested Values for the Pan Coefficient k_{pan}^A , Which Relates Reference Crop Evaporation E_{rc} to Measured Class A Pan Evaporation E_{pan}^A

Wind	Upwind fetch of green crop, m	Case A: Pan surrounded by short green crop Mean relative humidity, %			Upwind fetch of dry fallow, m	Case B: Pan surrounded by dry, bare area Mean relative humidity, %		
		Low	Med	High		Low	Med	High
		<40	40–70	>70		<40	40–70	>70
Light (< 1 m/s)	0	0.55	0.65	0.75	0	0.7	0.8	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.6	0.7	0.8
	100	0.7	0.8	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.5	0.6	0.7

Výparoměr EWM (podle ruského GGI-3000)



„Na základě zkušeností z Doksan je pro stanovení evapotranspirace výhodnější měření z výparoměru EWM (korelační koeficient $r = 0,892$), než z Class-A-Pan, kde je nutné provést poměrně složité korekce na vítr.“
(ČHMÚ, Dr. Ing. M. Možný)

(<http://www.cbks.cz/sbornik05/prezentace/mozny.pd>;
<http://www.chmi.cz/meteo/ok/oba/obs/o22.html>)

Lyzimetry

Lyzimetry mají **dvojitý** účel:

- 1) Měření evapotranspirace (aktuální nebo potenciální)
- 2) Sledování průsaku a vyplavování látek z půdy (dnes převažuje)

Měření evapotranspirace - lyzimetry

Lyzimetr s volným výtokem (výronovou plochou):

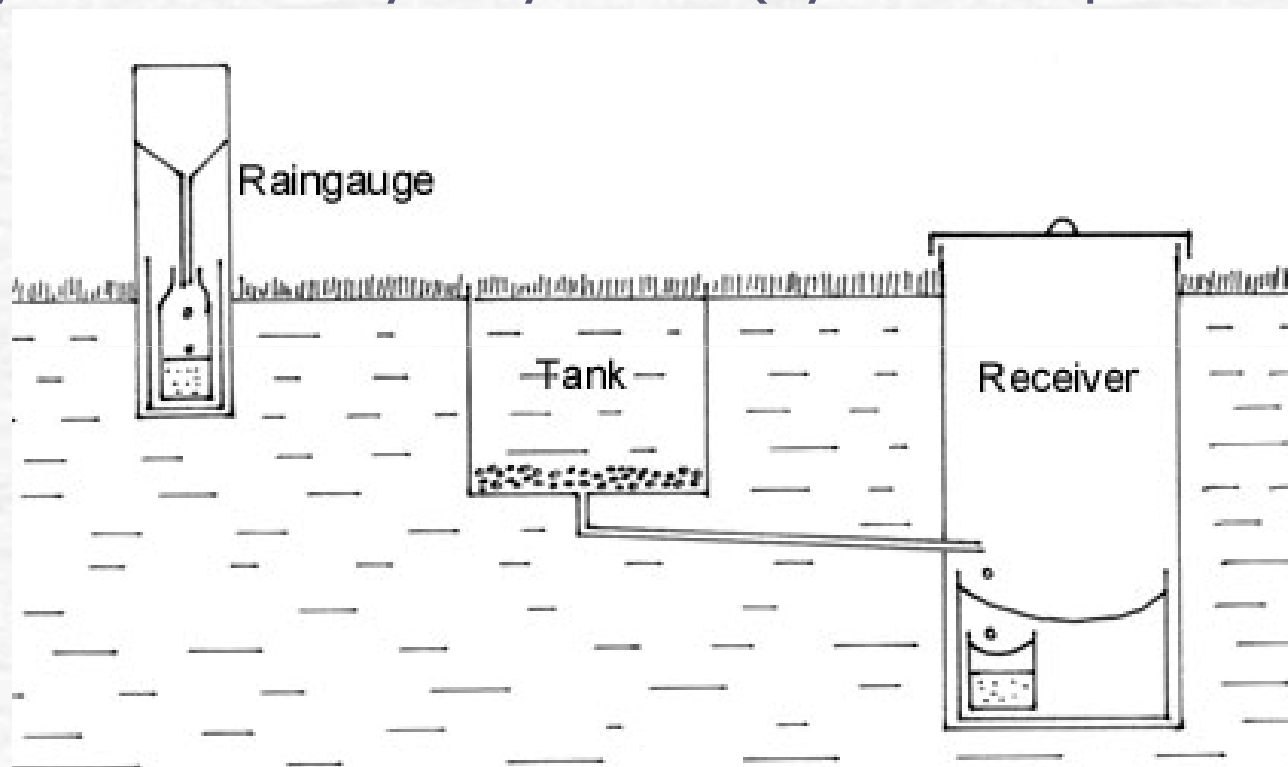


Fig 2. Lysimeter apparatus for measuring evapotranspiration

Lyzimetr s volným výtokem (výronovou plochou):



Obr. 1. Porast lucerny v lyzimetrech — zistenie celkovej potreby vody

Měření evapotranspirace - lyzimetry

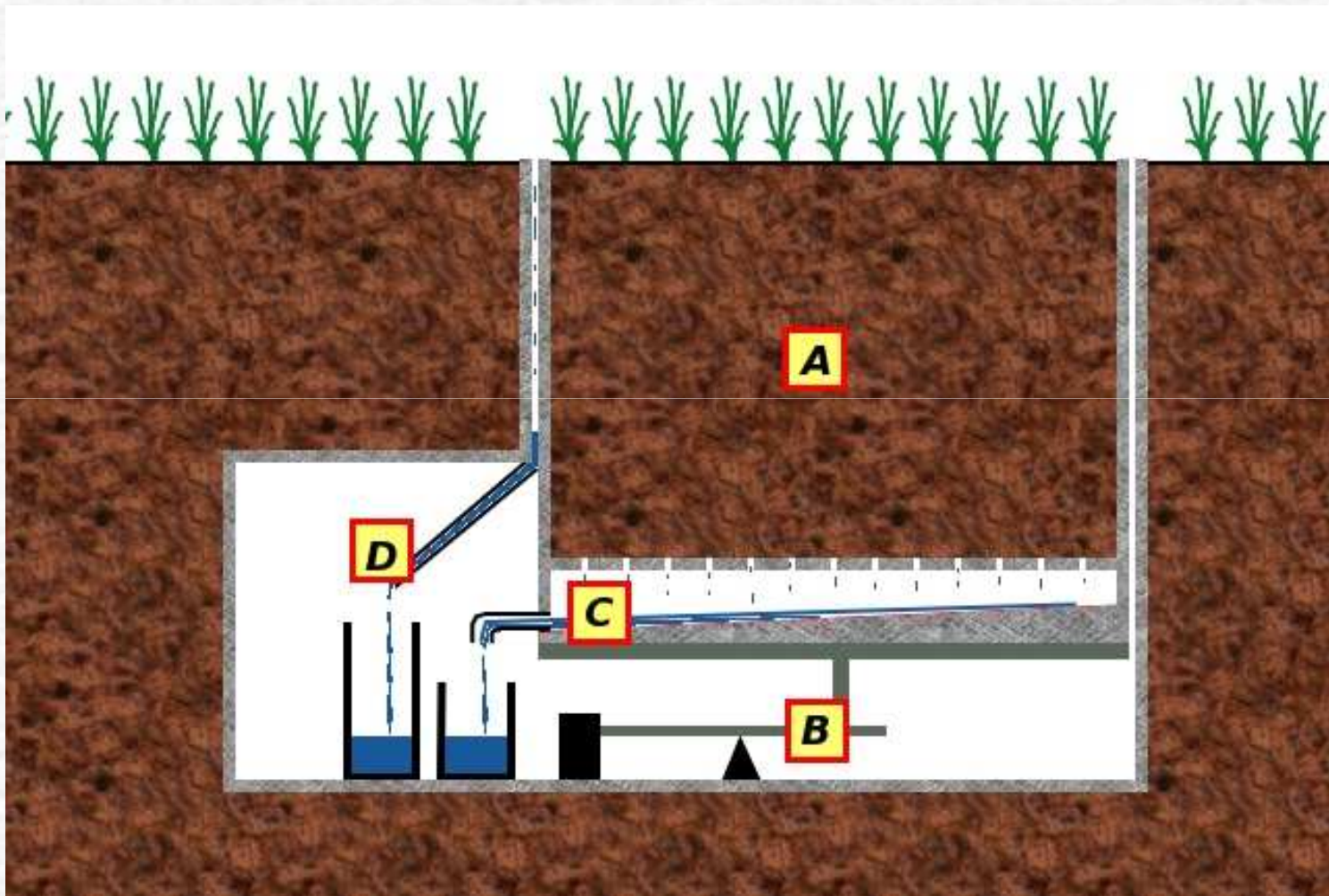
Lyzimetr s volným výtokem (výronovou plochou):



Jednoduché lyzimetry s volným výtokem



Vážený lyzimetr s volným výtokem:



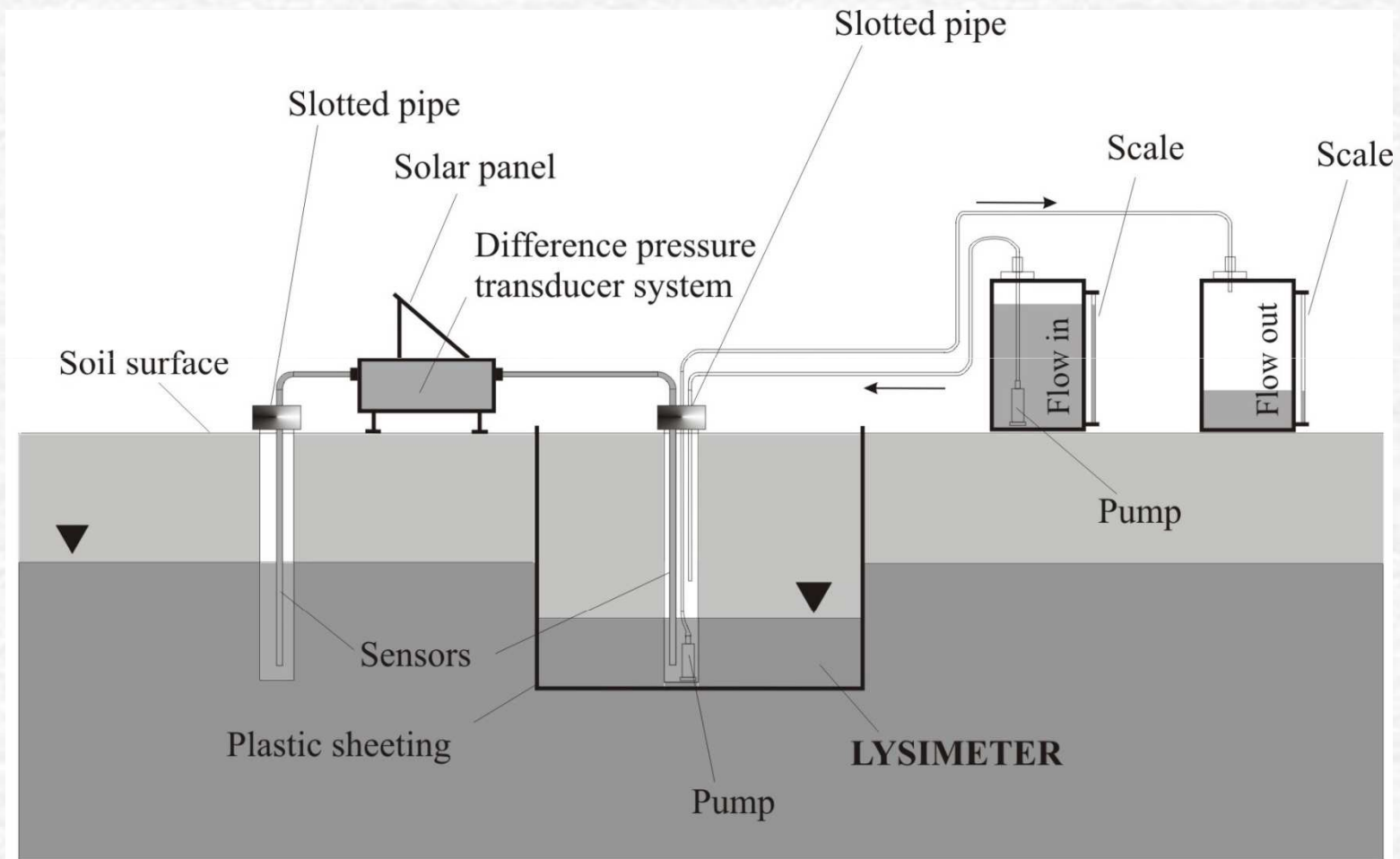
Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz



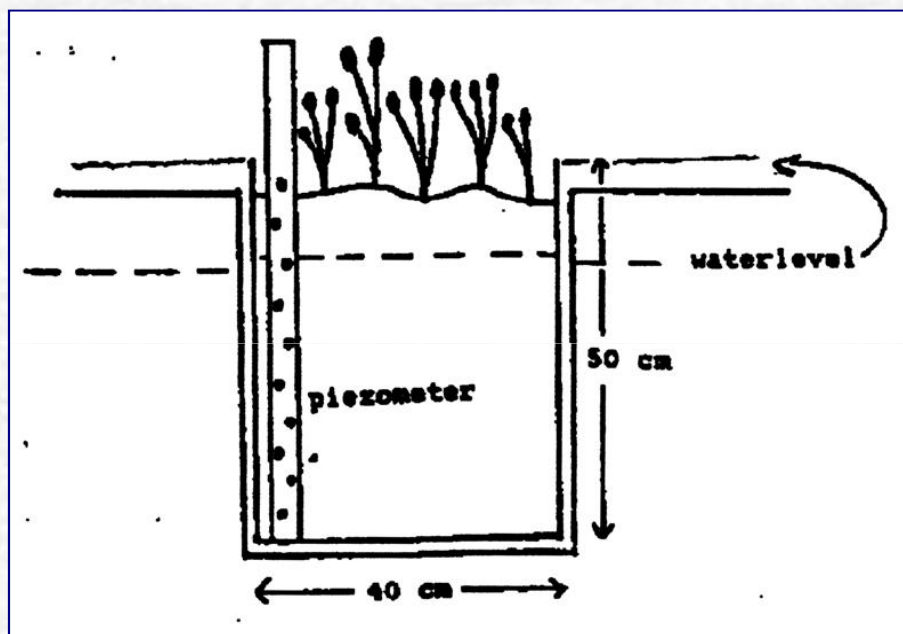
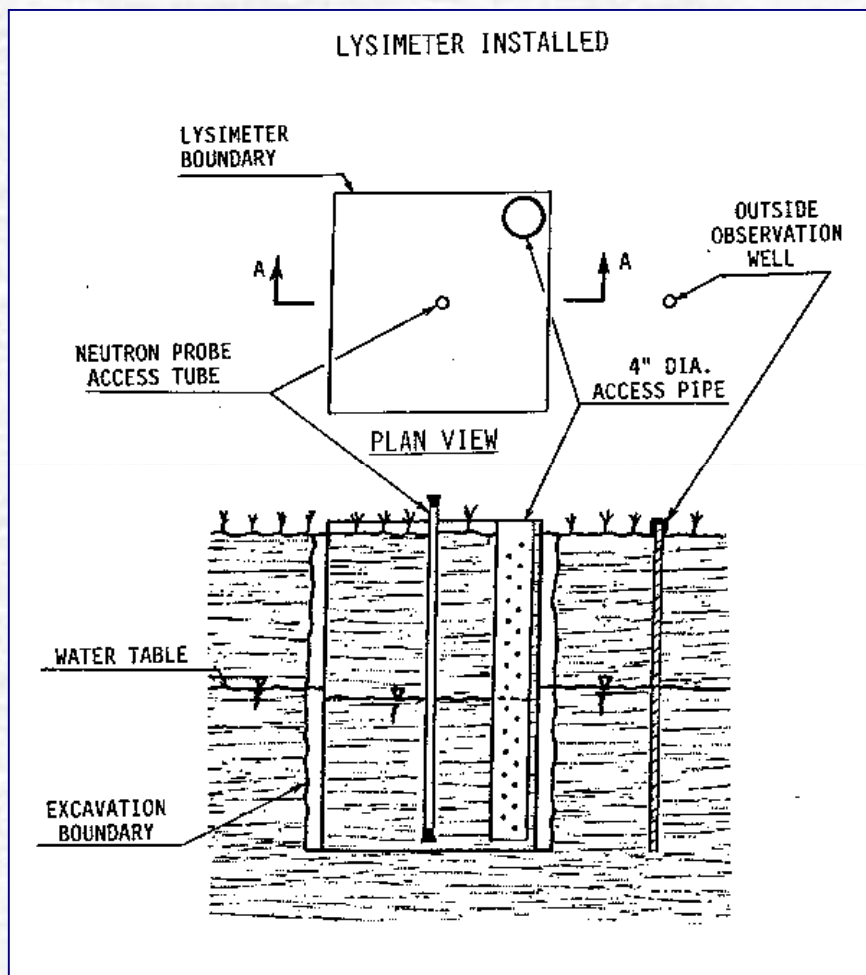
Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz



Lyzimetr s konstantní hladinou podzemní vody



Jednoduché lyzimetry s hladinou přibližně konstantní



(<http://library.wrds.uwo.edu/images/wrp/87-06/fig03.gif>;
<http://www.npws.ie/en/media/NPWS/Publications/BogReport/Media,6770,en.pdf>)

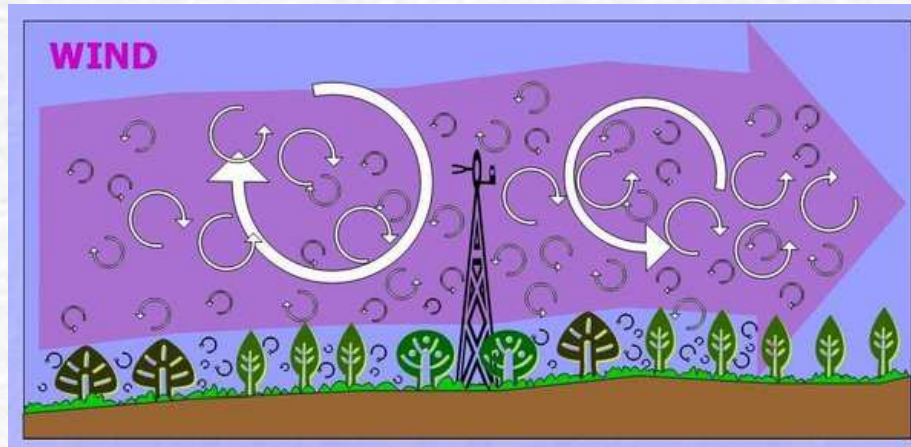
Lyzimetrem svého druhu je také:

1) Odvodněný pozemek (např. drenáží)

2) Celé povodí

(z hydrologické bilance lze odhadnout AET)

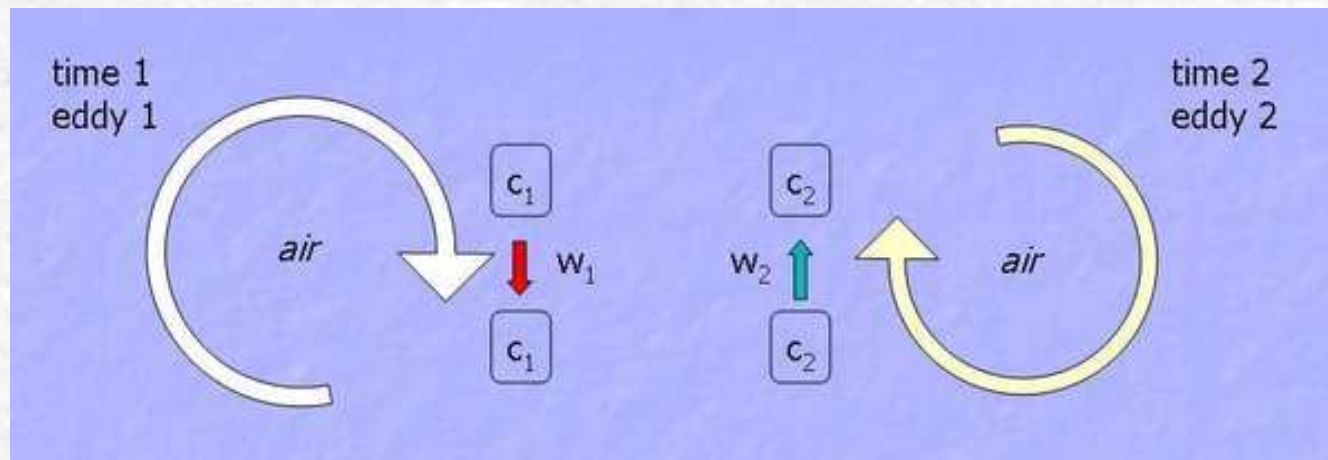
Měření nad porostem - korelace vírů



Integruje se svislý tok
vodní páry:

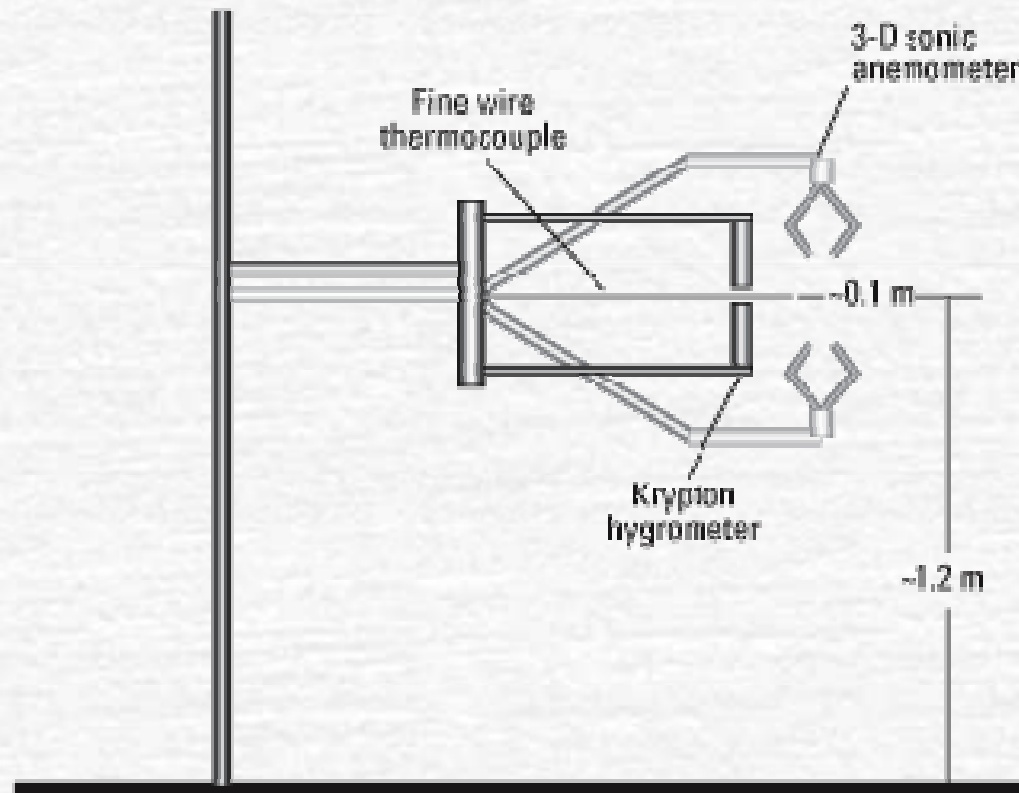
w = svislá rychlost větru,

$c = \chi$ = absolutní vlhkost

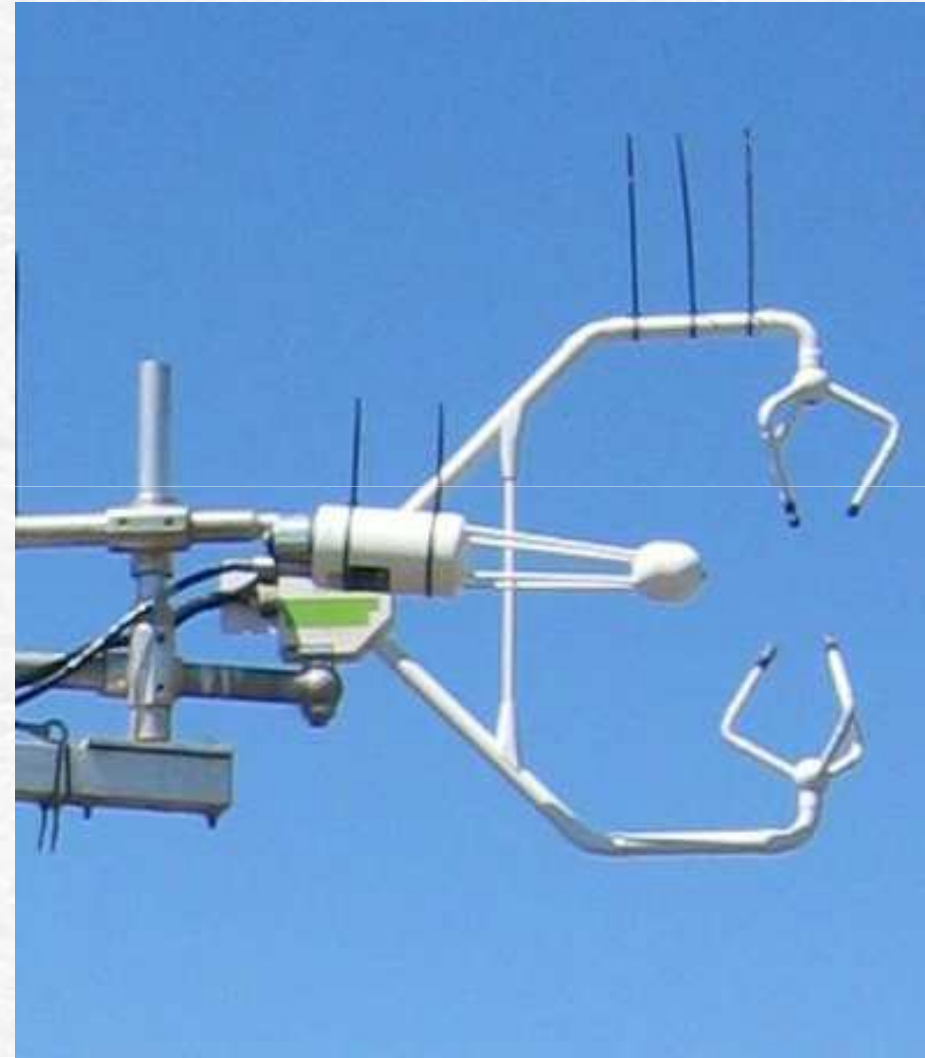


Měření nad porostem - korelace vírů

B—Data collection instruments for use in the eddy covariance method to calculate evapotranspiration

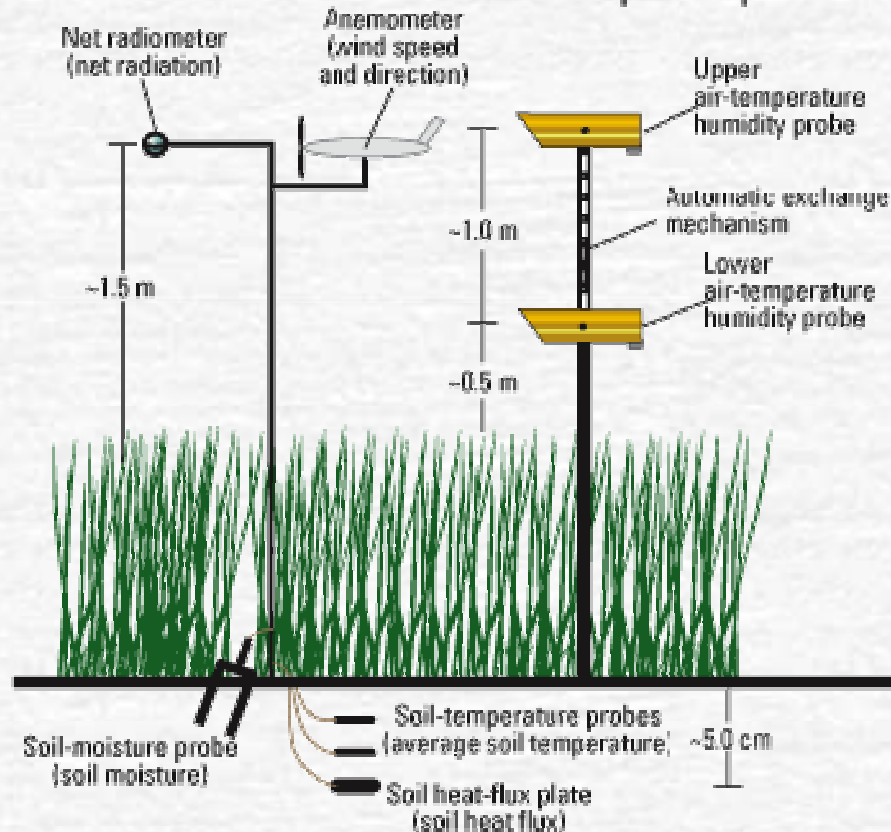


Měření nad porostem - korelace vírů



Měření nad porostem - Bowenův poměr

A—Data collection instruments for use in the Bowen ratio method to calculate evapotranspiration



Bowenův poměr β =
poměr toku zjevného tepla
k toku skrytého tepla:

$$\beta \approx \gamma \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1}$$

γ = psychrometrická
konstanta,

T = teplota,

e = tlak vodní páry

Měření nad porostem - Bowenův poměr



Kombinační metoda

Kombinuje:

- 1) Energetickou bilanci vypařujícího povrchu
- 2) Aerodynamický přenos vodní páry (Daltonův zákon)

V důsledku kombinace není nutno měřit teplotu vypařujícího povrchu.

Stačí měřit teplotu i vlhkost vzduchu v jedné výšce.

Důležité vzorce:

Penman, Penman-Monteith, kombinační vzorec FAO 56

Penmanova rovnice - výpar z vodní hladiny

$$E = \frac{\Delta(R - G) + \gamma f(u) [e_s(T) - e]}{\Delta + \gamma}$$

$$f(u) = 0,26 \left(1 + \frac{u}{100} \right)$$

E = výpar (**mm d⁻¹**)

Δ = sklon křivky nasycené páry (mbar °C⁻¹)

γ = psychrometrická konstanta (mbar °C⁻¹)

R = radiační bilance (**mm d⁻¹**)

G = tok tepla do půdy (**mm d⁻¹**)

T = teplota vzduchu ve 2 m (°C)

e = tlak páry ve 2 m (**mbar**)

$e_s(T)$ = tlak nasycené páry při teplotě T (**mbar**)

$f(u)$ = větrová funkce (**mm d⁻¹ mbar⁻¹**)

u = rychlost větru ve 2 m (**míle d⁻¹**)

$e_s(T) - e = D =$
= sytostní doplněk

Penman - Monteithova rovnice - AET

$$F = \frac{1}{\lambda} \left[\Delta(R - G) + \frac{\rho_a c_p}{r_a} D \right] / \left(\Delta + \gamma \frac{r_a + r_s}{r_a} \right)$$

F = intenzita evapotranspirace ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

λ = skupenské teplo vypařování (J kg^{-1})

Δ = sklon křivky nasycené páry (Pa K^{-1})

γ = psychrometrická konstanta (Pa K^{-1})

R = radiační bilance (W m^{-2})

G = tok tepla do půdy (W m^{-2})

ρ_a = hustota vzduchu (kg m^{-3})

c_p = specifické teplo vzduchu při konstantním tlaku ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

r_a = aerodynamický odpor (s m^{-1}); r_s = povrchový odpor (s m^{-1})

D = sytostní doplněk (Pa)

Kombinační vzorec FAO 56 - ET_o

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R - G) + \gamma f^*(u)D}{\Delta + \gamma^*}$$

$$f^*(u) = \frac{900}{T + 273}u; \gamma^* = \gamma(1 + 0,34u)$$

ET_o = evapotranspirace referenční plodiny (mm d^{-1})

Δ = sklon křivky nasycené páry (kPa K^{-1})

γ = psychrometrická konstanta (kPa K^{-1})

R = radiační bilance ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G = tok tepla do půdy ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

D = sytostní doplněk ve 2 m (kPa)

u = rychlost větru ve 2 m (m s^{-1})

Existuje řada (semi-)empirických vzorců:

Thornhwaite

Blaney-Criddle

Hargreaves

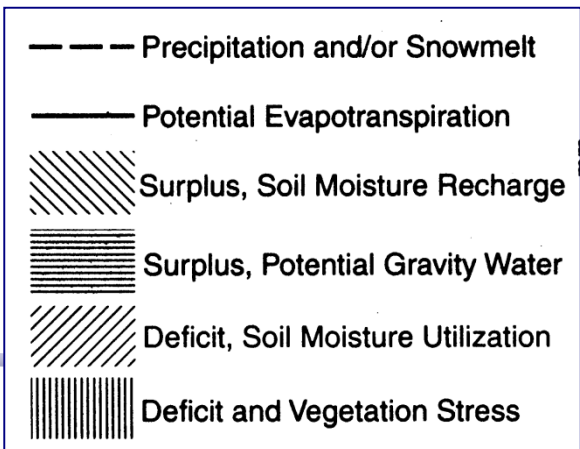
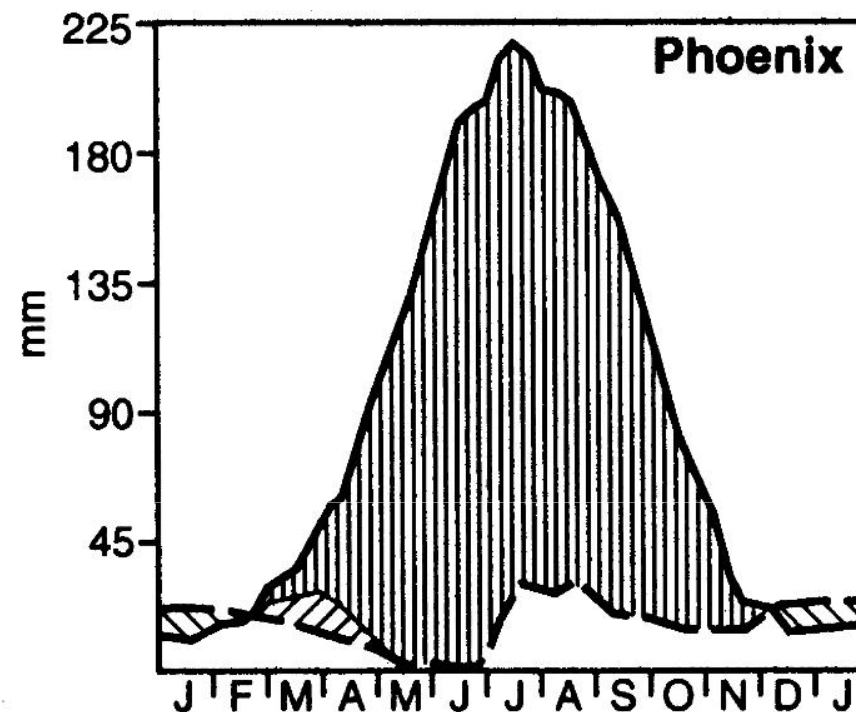
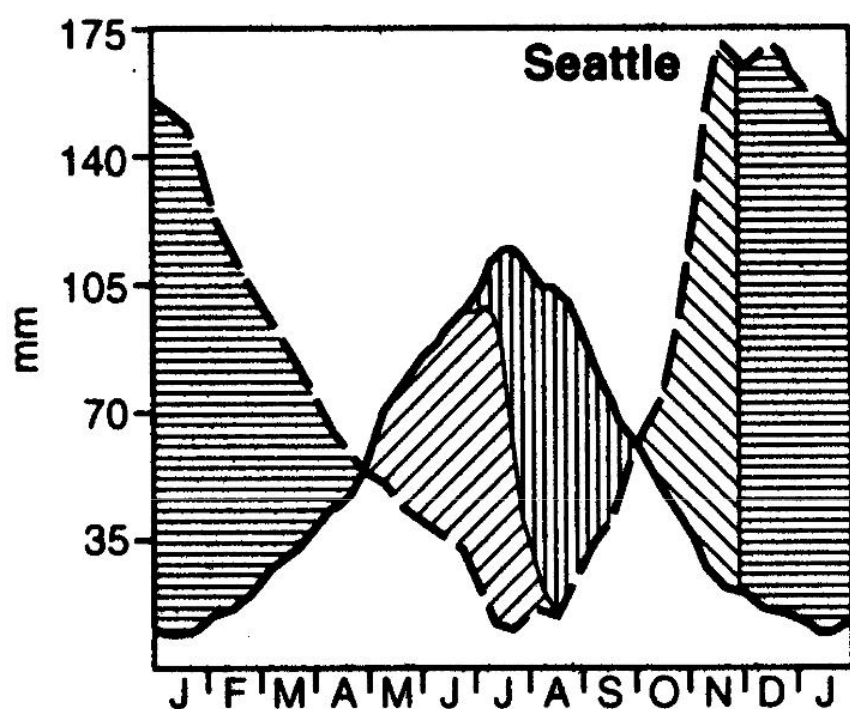
Turc

Priestley-Taylor

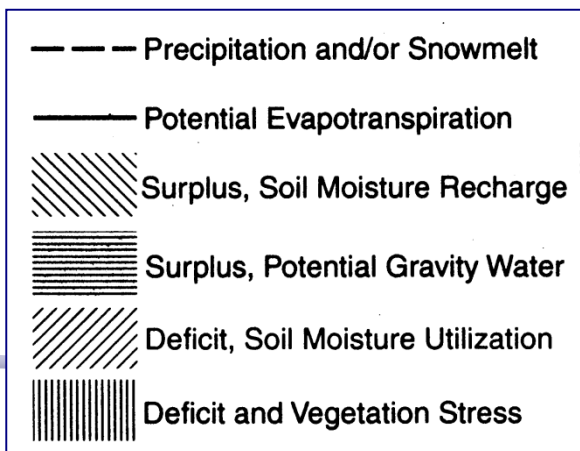
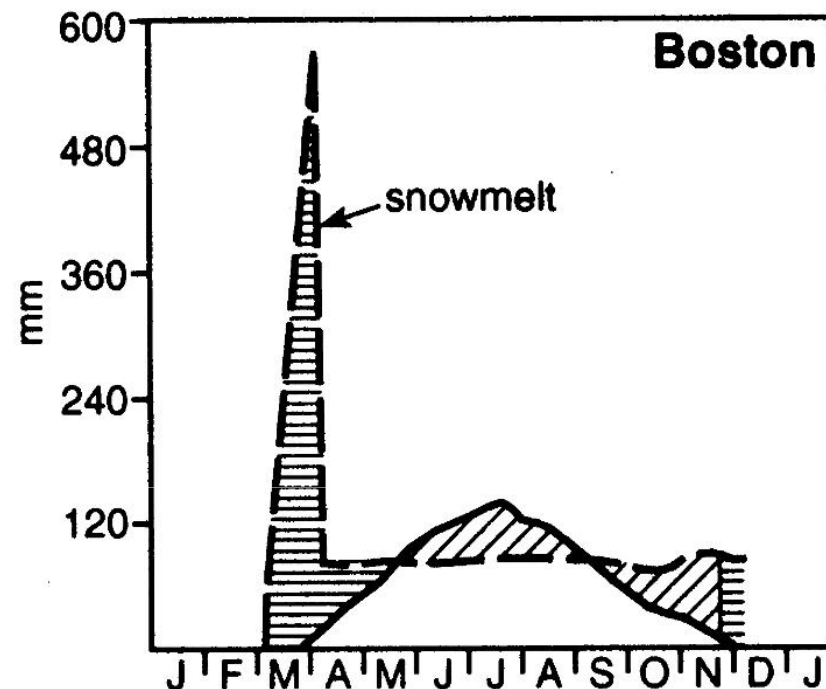
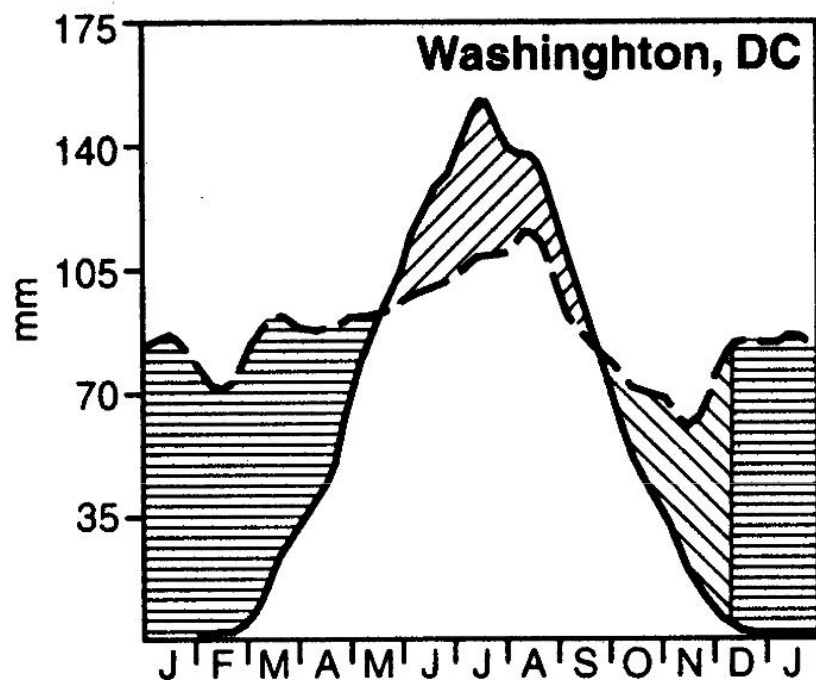
Makkink

Jsou užitečné, ale je nutno s nimi zacházet opatrně

Bilance půdní vody (Thornthwaite - Mather):



Bilance půdní vody (Thornthwaite - Mather):



Bilance půdní vody (Thornthwaite - Mather):

- 1) Bilanční intervaly jsou **měsíční**.
- 2) Evapotranspirace není výsledkem bilance, ale počítá se nezávisle (např. z Thornthwaitova empirického vzorce).
- 3) Aktuální ET se odhaduje z potenciální ET na základě zásoby využitelné vláhy v půdě, např. přímou úměrností:

$$AET/PET = (zásoba - WP) / (FC - WP)$$

WP = zásoba vláhy při bodu vadnutí

FC = zásoba vody při polní kapacitě

- 4) Přebytek srážek nad PET tvoří odtok nebo doplňuje zásoby podzemní vody (to se už neřeší).

Obdobně se (v kratších intervalech) bilancuje půdní vláhá při **řízení závlah**.

Děkuji za pozornost