

Evapotranspirace

EVAPOTRANSPIRACE

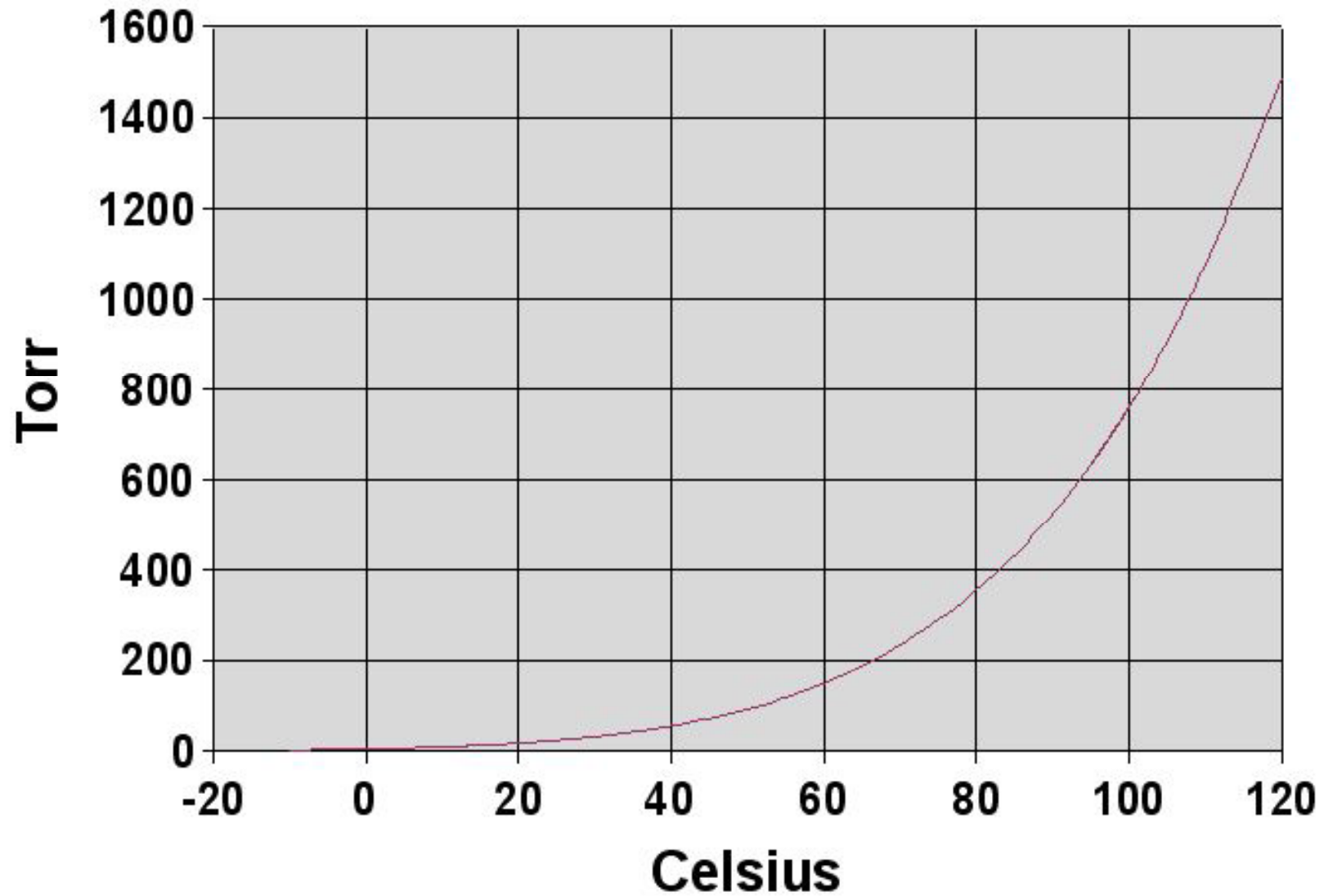
- 1) Evaporace – fyzikální výpar (proces v anorganickém prostředí). Změna skupenství: kapalně – plynné (výpar vody), pevně – plynné (sublimace ledu/sněhu).
 - 1a) Výpar z volné vodní hladiny: Výpar z povrchu vodních toků, nádrží a zatopených terénních depresí.
 - 1b) Intercepce: Výpar vody zadržované smáčeným povrchem vegetace.
- 2) Transpirace – fyziologický výpar (proces v prostředí organickém, výpar produktivní).

- Výparná výška (H_{ET}): Úhrn evapotranspirace (mm) za jednotku času (den, měsíc, rok).
- Klimatický výpar (\hat{H}_{ET}): Dlouhodobý průměrný roční úhrn evapotranspirace (mm/rok).
- Výparnost (potenciální evapotranspirace, ETP): Evapotranspirace za ideálních podmínek dostatku disponibilní vody – výpar z volné vodní hladiny (maximální možný výpar odpovídající daným meteorologickým podmínkám).
- Klimatická výparnost (\hat{H}_{ETP}): Dlouhodobý průměrný roční úhrn výparnosti (potenciální evapotranspirace), (mm/rok).

Globální vodní bilance

	<u>Objem (10^6 km^3)</u>	<u>% hydrosféry</u>	<u>Doba zdržení</u>
Oceán	1350,0	97,3	104 let
„Sladká voda“	37,0	2,7	dny – 10^3 let
Ledovce	29,0	2,1	102 let
Prameny	7,9	0,6	dny – 10^3 let
Jezera	0,1	0,01	10 let
Půdní vlhkost	0,1	0,01	52 let
Atmosféra	0,013	0,001	10 dnů
Řeky	0,002	0,0002	14 dnů
Biosféra	0,001	0,0001	6 dnů

Závislost napětí nasycených vodních par na teplotě (křivka nasycených par)



Absolutní vlhkost vzduchu

Měrná hmotnost vodí páry:

$$\rho = m / V \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

m - hmotnost vodní páry (kg), obsažená ve vzduchu o objemu **V** (m³)

Relativní vlhkost vzduchu

$$r = 100 \ e / e_s = 100 \ \rho / \rho_s \quad [\%]$$

e – napětí vodních par v ovzduší, **e_s** – napětí nasycených vodních par (**ρ_s** – měrná hmotnost nasycených par) ovzduší při dané teplotě vzduchu **T**.

Měrná (specifická) vlhkost vzduchu

$$S = m / (m + m_d) \quad [-]$$

m_d – měrná hmotnost suchého vzduchu [kg · m⁻³]

$$S = 0,622 e / (P - 0,328 e) \quad [-]$$

P – tlak vzduchu ,

0,622 – poměr plynových konstant suchého vzduchu R_d (287) a vodní páry R_v (461 J kg⁻¹ deg⁻¹).

Psychrometrický vzorec

$$e = e_s - \gamma P (T - T_v)$$

e_s – napětí nasycené vodní páry při teplotě „vlhkého“ teploměru T_v ,

γ - psychrometrický koeficient, T – teplota „suchého“ teploměru,

$(T - T_v)$ – „psychrometrická difference“, P – aktuální tlak vzduchu.

Ideální plyn

- Jednoatomový plyn s nekonečně malými molekulami, které za každé teploty konají pouze translační pohyb.
- Lze zanedbat přitažlivé i odpuzivé síly mezi molekulami, jejich potenciální energie je tedy nulová.
- Vnitřní energie závisí pouze na teplotě, nezávisí na objemu,
- Měrné teplo nezávisí na teplotě ani tlaku.
- Nezkapalňuje, setrvává v plynném stavu až do absolutní nuly.
- Při teplotě absolutní nuly je objem nulový.

Latentní teplo

- Práce vykonaná proti kohezním silám.
- Teplo latentní – množství tepla potřebné k tomu, aby jednotka hmotnosti změnila skupenství, aniž při tom dojde ke změně její teploty: latentní teplo tání, vypařování a sublimace.
- Latentní teplo výparné: $L_v = 597,3 - 0,564 T$ (cal/g)
T – teplota vypařujícího povrchu (°C)
při $T = 0$ °C $L_v \approx 597$ (cal/g)
při varu $L_v \approx 540$
- Latentní teplo tání ledu: $L_t \approx 80$ (cal/g)
- Latentní teplo sublimace: $L_s = L_v + L_t$

Faktory evapotranspirace

- Sluneční radiace (radiační bilance vypařujícího povrchu)
- Teplota vypařujícího povrchu.
- Sytostní deficit vzduchu (rozdíl mezi napětím nasycených vodních par a aktuálním napětím vodních par v ovzduší nad aktivním povrchem).
- Rychlost větru nad vypařujícím povrchem.
- Atmosférický tlak.
- Charakter vypařujícího povrchu (ovlivňuje bilanci sluneční radiace a drsností modifikuje režim větru).
- Zásobování aktivního povrchu vodou (stomatální regulace).
- Kvalita vody (+ 1% spec. hmotnosti \Rightarrow - 1% výparu)

Energetická bilance aktivního povrchu

$$R_n = H + \lambda E + G \quad [\text{W m}^2]$$

R_n ... radiační bilance (“net radiation”),

H ... tok zjevného (sensibilního) tepla do atmosféry:
ohřev atmosféry na úkor energie aktivního povrchu,

G ... tok tepla z aktivního povrchu do hlubších vrstev
vypařujícího systému (\approx tok tepla do půdy),

λE ... tok latentního tepla do ovzduší: ztráta energie
výparem,

E ... intenzita výparu [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

λ ... latentní výparné teplo, $\lambda \approx 2.5 \times 10^6$ [J kg^{-1}].

Výpočet radiační bilance (net radiation) R_n

$$R_n = R_s^\downarrow (1 - \alpha) + L^\downarrow - \sigma T_w^4$$

kde albedo $\alpha = f(\theta, A)$

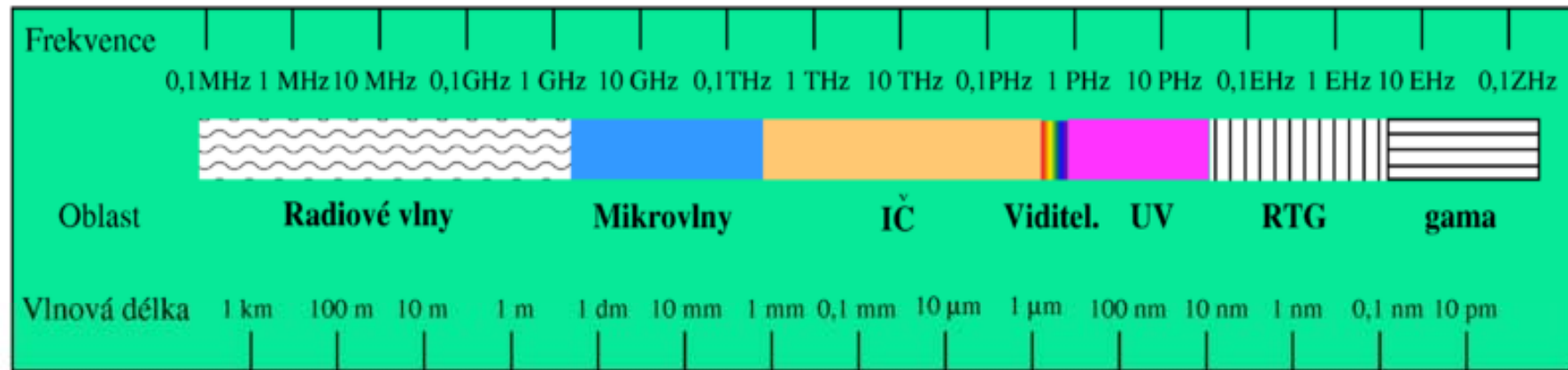
↑
výška Slunce (solární elevace)

↑
transmissivita

R_s ... globální radiace (krátkovlnná), L ... dlouhovlnná radiace z atmosféry, T_w ... teplota vypařujícího povrchu,
 σ ... Stefan-Boltzmanova konstanta ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Hodnota albeda α se během roku mění, např. pro vodní povrch kolísá mezi 0.04 (léto) a 0.16 (zima).

Elektromagnetické spektrum



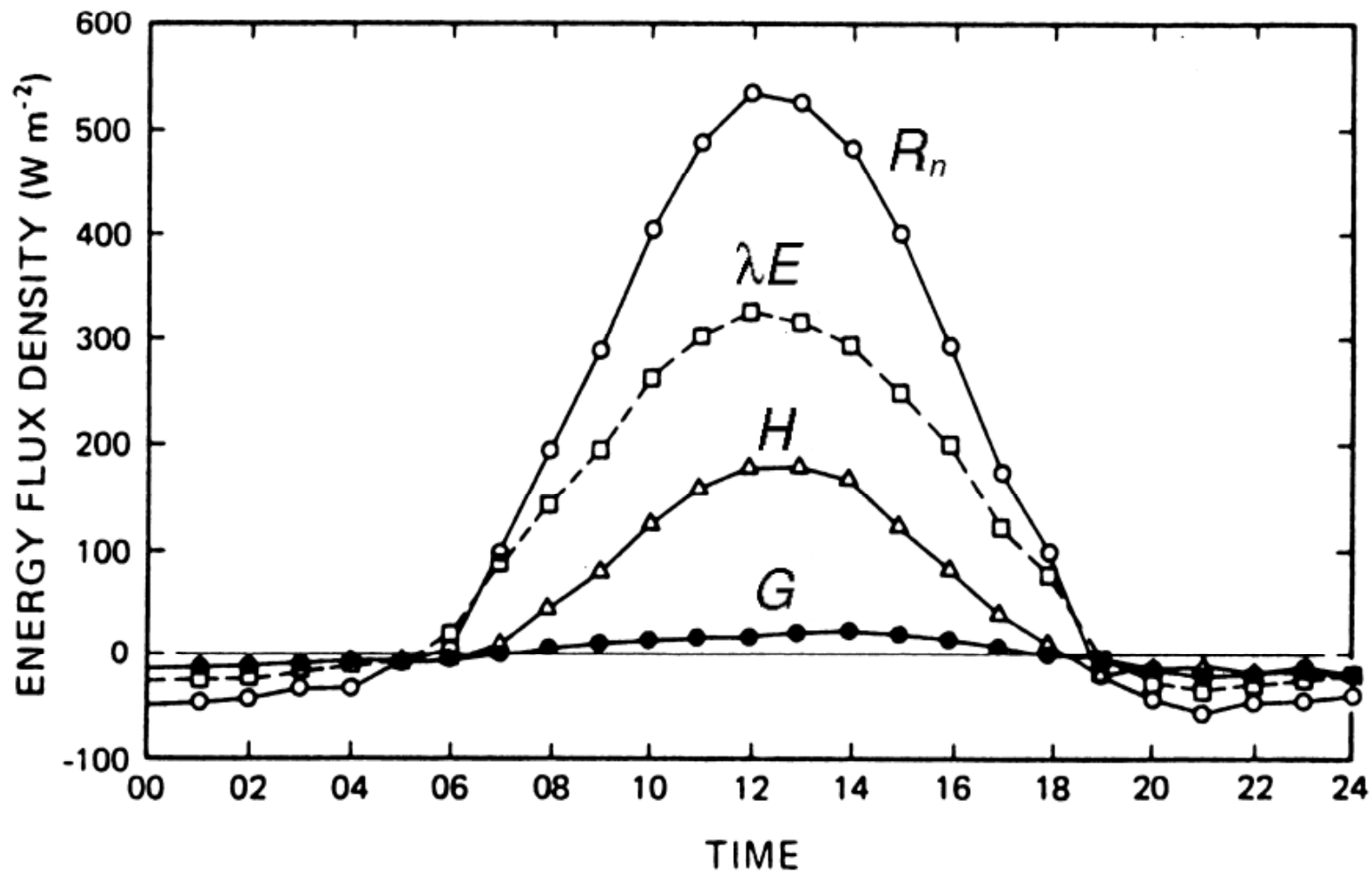
Viditelné: 300 – 700 nm

Blízké infračervené: 700 – 1 100 nm

Tepelné infračervené: 4 000 – 50 000 nm

Sluneční záření: 150 – 4 000 nm (maximum: 500 nm)

Pro jasný letní den mírného klimatického pásma



Měření výparu z volné vodní hladiny

Vodní bilance nádrží

- pro časový úsek Δt :

$$H_{ET} = H_S + H_I - H_O - \Delta Z \quad (\text{mm})$$

H_S ... úhrn atmosférických srážek,

H_I ... přítok do nádrže,

H_O ... odtok,

ΔZ ... změna zásoby vody v nádrži

Vodní bilance výparoměrů (malých zásobníků):

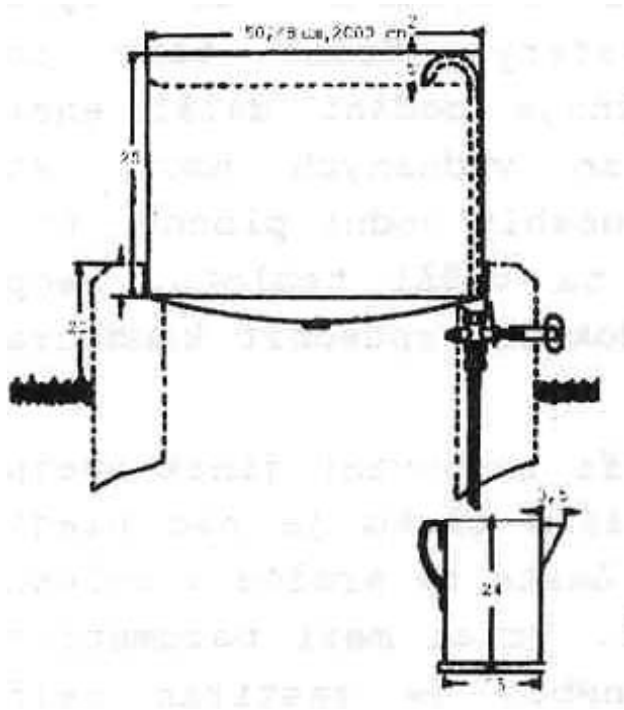
Změna zásoby vody v časových intervalech hodina – den

Výparoměr Wildův (250 cm², 480 cm³, odečet 0,1 mm)

Umísťuje se v meteorologické žaluziové budce.

Konstrukce stejná jako u listovních vah, výparoměrná miska je kovová, plní se vodou a měří se váhový úbytek (denně v 7 a 21 hod).

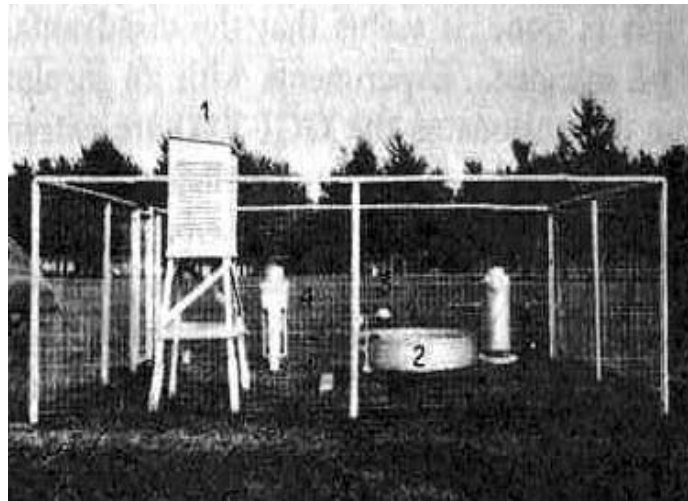
Výparoměr Rónův (0,2 m², 42 litrů, výška 25 cm)



Rozdílový výparoměr

Používán v síti výparoměrných stanice ČHMÚ
Denní odečet v 7:00

Class A Pan (1,17 m², objem 280 l, 0,15 m nad povrchem)

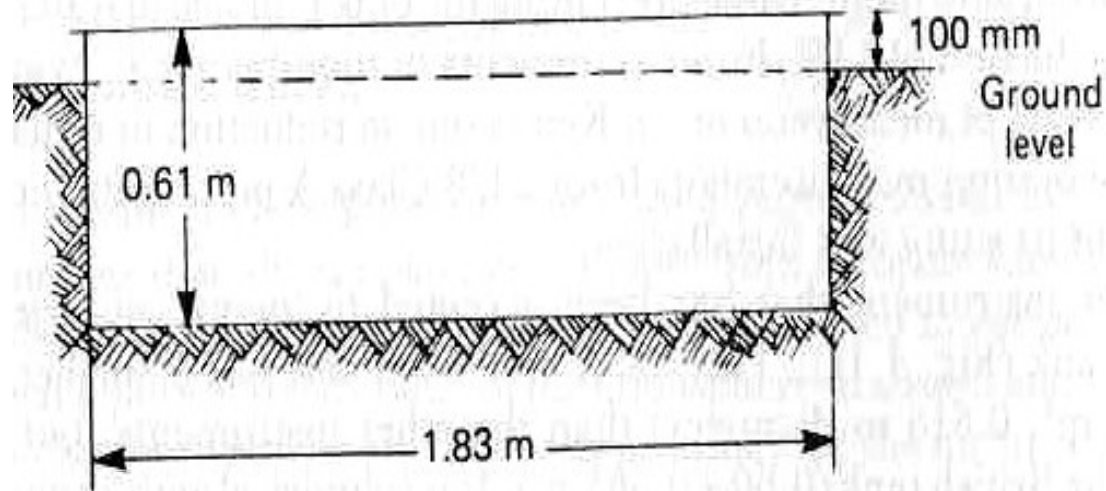


Denní odečet: hladina vody udržována 5 cm pod okrajem

$$ETP = k_p ETP_{\text{classA}} \quad k_p = 0,67 - 0,81 \quad (\text{WMO})$$

Lake Hefner (USA) $k_p = 0,34$ (květen) – 1,31 (listopad)

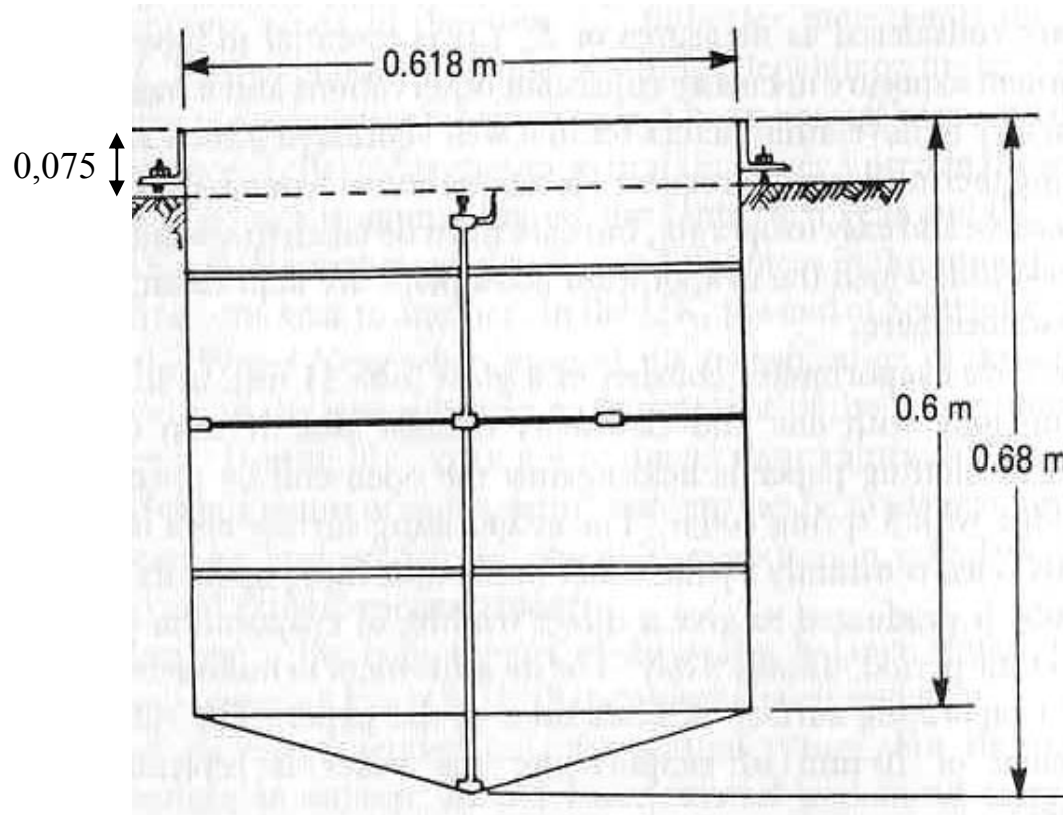
British standard Tank (3,35 m², objem 1800 l, v zemi)
(Symons, 1860)



Denní odečet v 9:00

$$ETP = k_p ETP_{BST} \quad k_p = 0,85 \text{ (červen)} - 2,2 \text{ (listopad)} \quad (\text{UK})$$

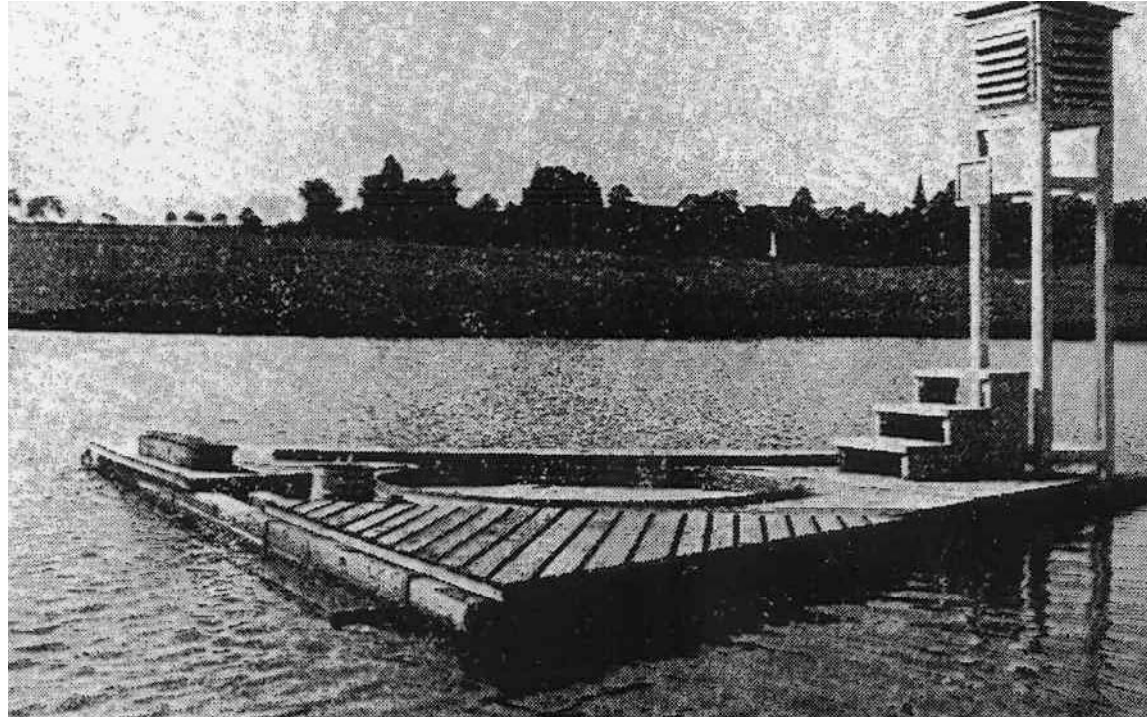
GGI - 3000 ($3000 \text{ cm}^2 = 0,3 \text{ m}^2$, objem 180 l, v zemi)



Odečet 2x denně v 7:00 a 19:00

Pro roční ETP: $ETP_{GGI} / ETP_{classA} = 0,78$ (Valdaj, Rusko)

A2f) *Plovoucí výparoměr* (1,17 m², objem 280 l)



- Simulace výparu z vodních nádrží
- Hladina vody v úrovni hladiny nádrže
- $k_p = 0,8$ (WMO)

Měření potenciálního výparu z porézního povrchu

Atmometr Piché

- Výpar ze zeleného filtračního papíru Ø 3 cm, odečet hladiny vody ve skleněné trubici Ø 1,5 cm.
- Observatoire de Montsouris (Paris) od roku 1872.
- Denní odečet v 9:00.

Livingstone

- Výpar z porcelánového sférického povrchu Ø 3,3 cm.

Měření transpiračního výparu

Phytometr – nádoba s vodou a zakořeněnou rostlinou, omezení výparu z půdy parafínem atd., měří se úbytek váhy phytometru s rostlinou.

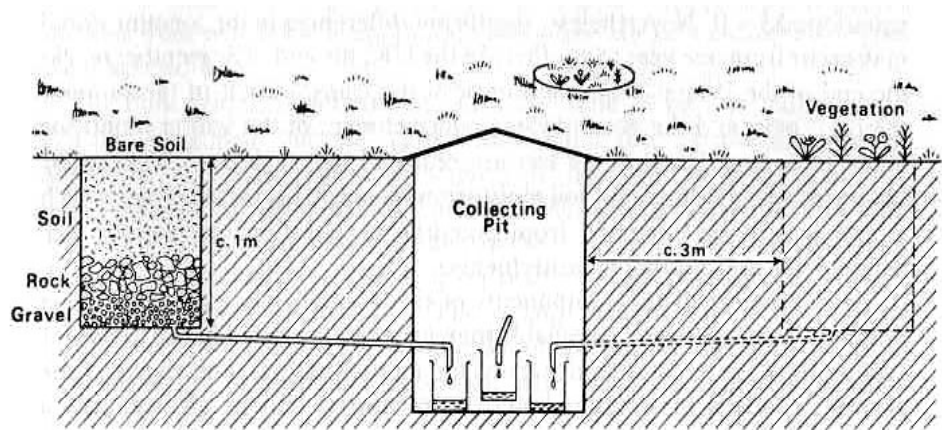
Potometr – nádoba s uříznutu částí rostliny, naplněná vodou, únik vláhy možný jen formou transpirace.

Měření transpiračního toku v kmenech stromů

- elektrické impulsy,
- měření měnicího se obvodu/průměru kmene,
- injekce stopovacích látek

Výpar z půdy a povrchu vegetace

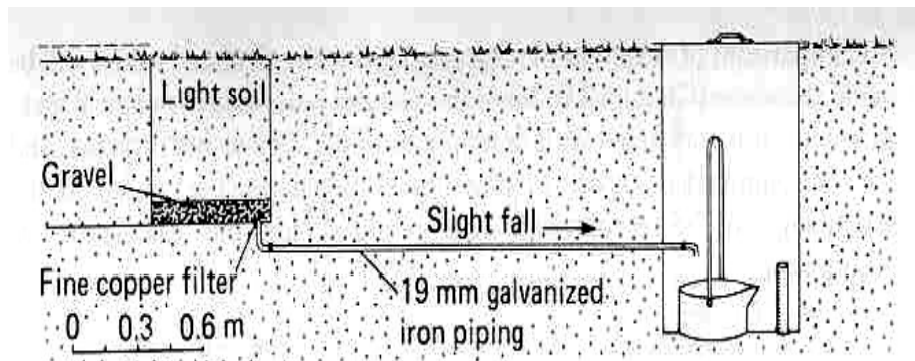
Průsakoměr



- „Větší“ bloky půdy.
- Neuvažují změnu vlhkosti.

$$ET = H_s - P$$

Lyzimetr



- „Menší“ bloky půdy.
- Uvažují měny vlhkosti půdy vážením.

$$ET = H_s - P \pm W$$

Možnosti stanovení aktuální ET z meteorologických dat

Energetická bilance:

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

Substituce Bowenova poměru:

$$B = H / \lambda E = f \{ (T_1 - T_2) / (e_1 - e_2) \}$$

Turbulentní výměna:

$$ET = f(v_2 - v_1) (e_1 - e_2) / P (\ln z_2 / z_1)^2$$

T – teplota vzduchu, e – napětí vodních par, v – rychlost větru, z – výška nad aktivním povrchem, P – tlak vzduchu.

EMPIRICKÉ VZTAHY

Hamon (teplotní): $EP-HAM = 2.98 N e_s / (T_a + 273.3)$ (mm/den)

Priestley-Taylor: $EP-PRT = 1.3 \Delta H_T / (\Delta + \gamma)$
(radiační)

Penman: $EP-PEN = \frac{(\Delta / \gamma) H_T + E_{at}}{(\Delta / \gamma) + 1}$
(kombinovaný)

N – maximální možná doba slunečního svitu (hod/den), T_a – průměrná denní teplota vzduchu (°C), e_s – napětí nasycených vodních par (mm), $\Delta = de_s/dT_a$ – sklon křivky „nasycených par“ (mm/°C), γ – psychrometrická konstanta (mm/°C), H_T – radiační ekvivalent výparu (mm), E_{at} – aerodynamický ekvivalent výparu (mm)

Monteith-Penman:

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

λ ... latentní výparné teplo, $\lambda \approx 2.5 \times 10^6$ [J kg⁻¹],

ρ_a - hustota vzduchu (kg/m³),

c_p - specifické teplo vzduchu (J/kg °C),

R_n - radiační bilance (J/m²),

G - tok tepla do půdy ((J/m²),

e - napětí vodních par v ovzduší (mm),

e_s - napětí nasycených vodních par (mm) při aktuální teplotě vzduchu T_a ,

$\Delta = de_s/dT_a$ - sklon křivky „nasycených par“ (mm/°C),

γ - psychrometrická konstanta (mm/°C),

r_s - povrchový odpor (s/m), r_a - atmosférický odpor (s/m).

Empirické vztahy pro aktuální ET

Turc: Výpočet roční aktuální evapotranspirace na základě analýzy 254 povodí různých klimatických oblastí.

$$ET = H_s / [0,9 + (H_s / K)^2]^{0,5} \quad (\text{mm/rok})$$

$$K = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (\text{mm})$$

H_s - roční srážkový úhrn (mm),

T – průměrná roční teplota vzduchu (°C)

Blaney - Criddle

Kombinace hodnot potenciálního výparu EP
a vláhové potřeby rostlin k_c

$$EP = p (0,46 T_a + 8)$$

$$ET = k_c EP \quad (\text{mm/den})$$

p – procentický podíl denního slunečního svitu
(hod/den) z ročního úhrnu slunečního svitu (hod/rok)
[%],

T_a - průměrná denní teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$),

k_c – koeficient vláhové potřeby rostlin (-).