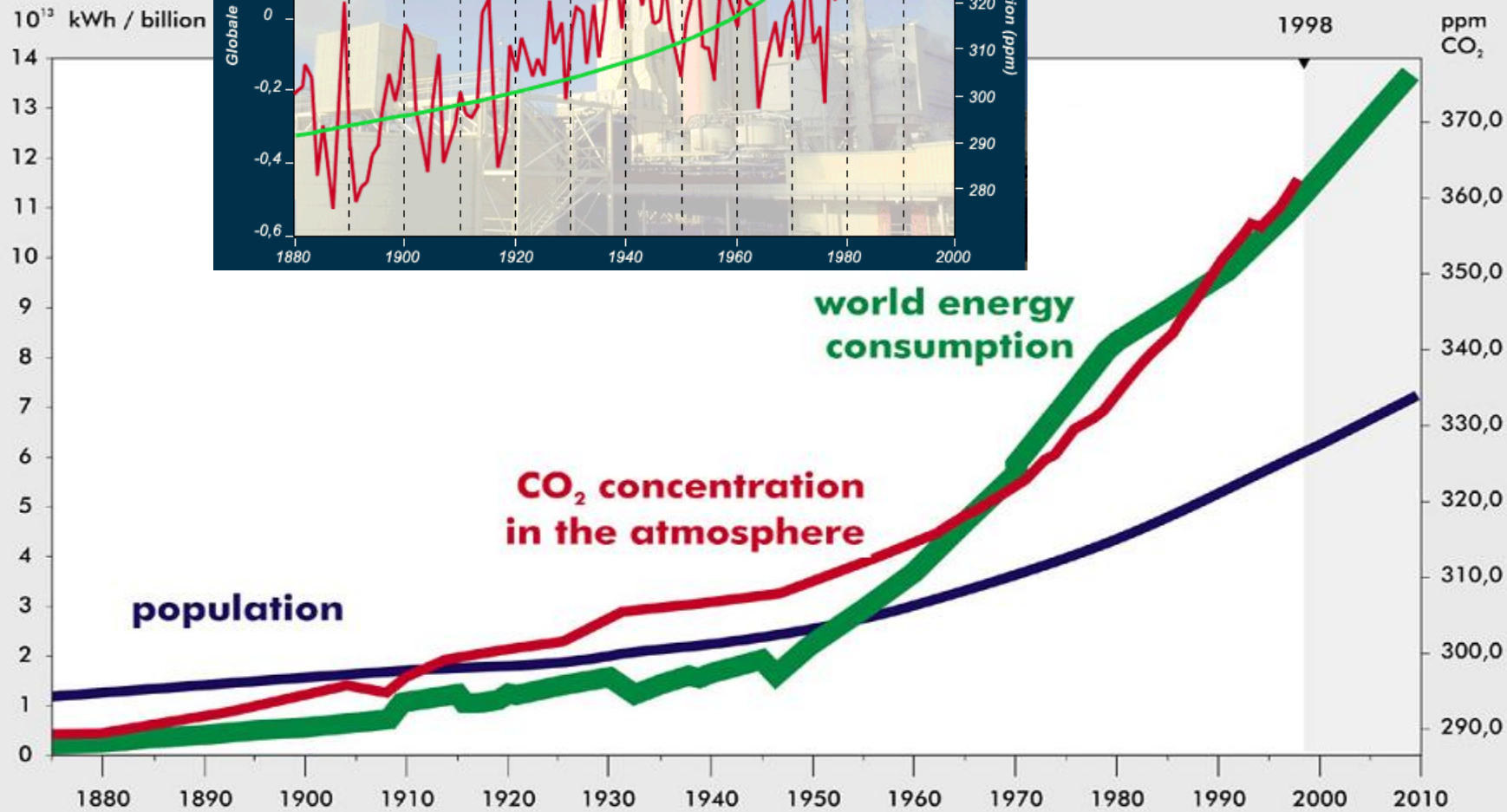
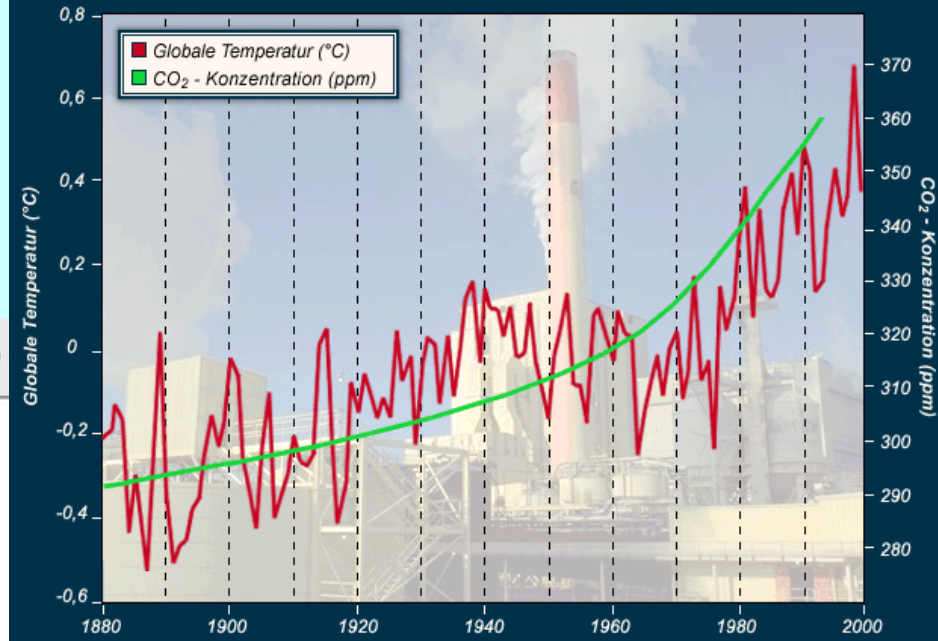


# Systemy pro využití sluneční energie



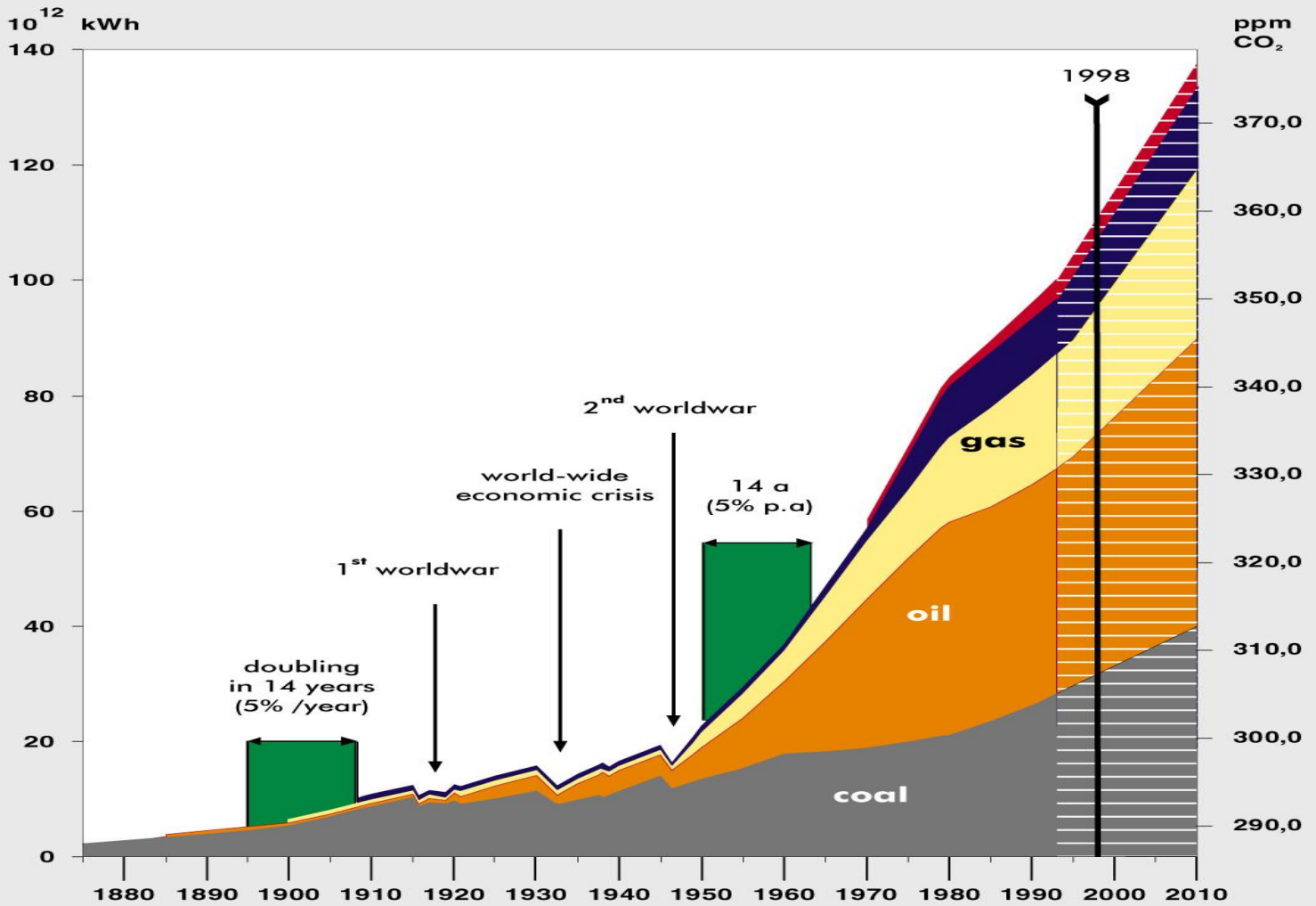
## Osnovy přednášek:

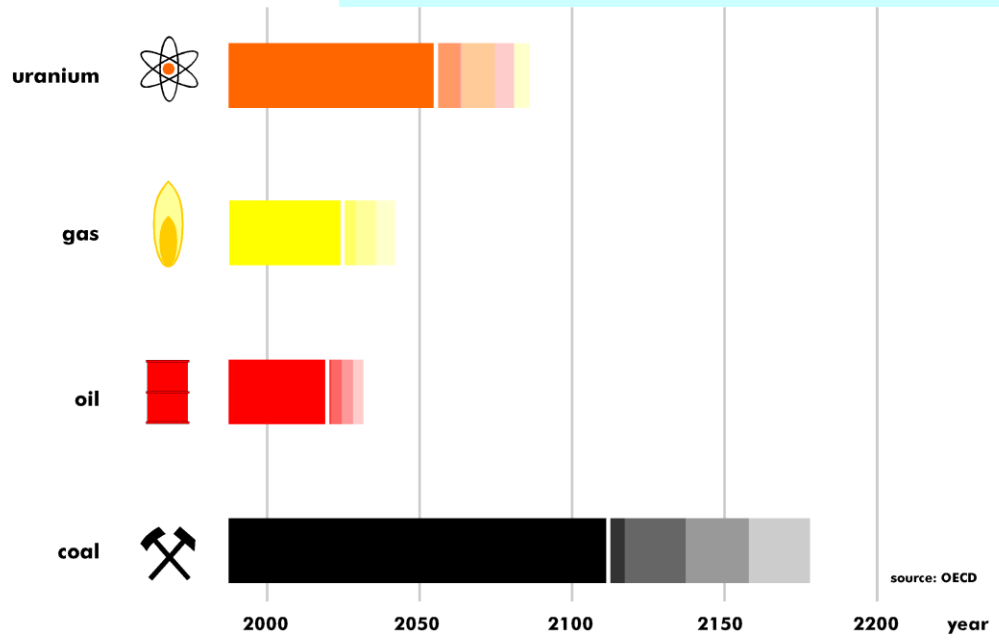
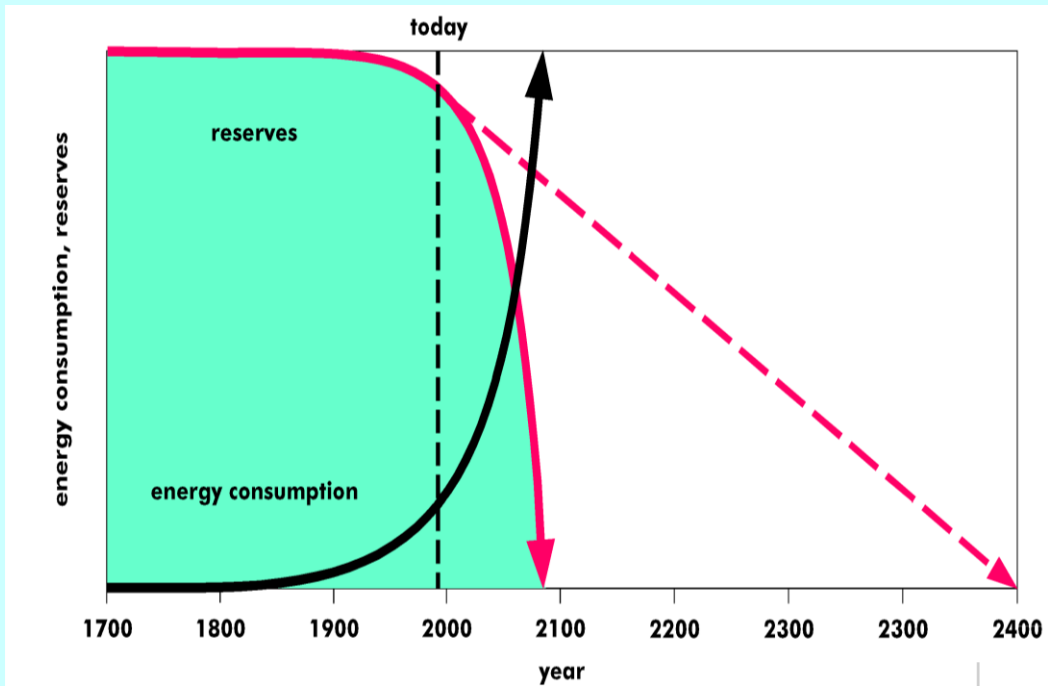
1. Sluneční energie, vliv zeměpisné polohy a klimatu na intenzitu a spektra
2. Fotovoltaický jev, fotovoltaické články a jejich charakteristiky
3. Konstrukce a výroba PV článků
4. Fotovoltaické moduly, konstrukce a technologie
5. Autonomní FV systémy
6. FV systémy připojené k rozvodné síti
7. Optimalizace provozních podmínek PV systému
8. Základní ekonomické a ekologické aspekty
9. Konverze sluneční energie na tepelnou energii
10. Solární ohřev a solární chlazení
11. Solární elektrárny
12. Využití solární energie pro vysokoteplotní procesy
13. Současné trendy v oblasti využívání sluneční energie



**Growth rates for population, energy consumption and CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere**

source: Interatom/Shell 3/1992





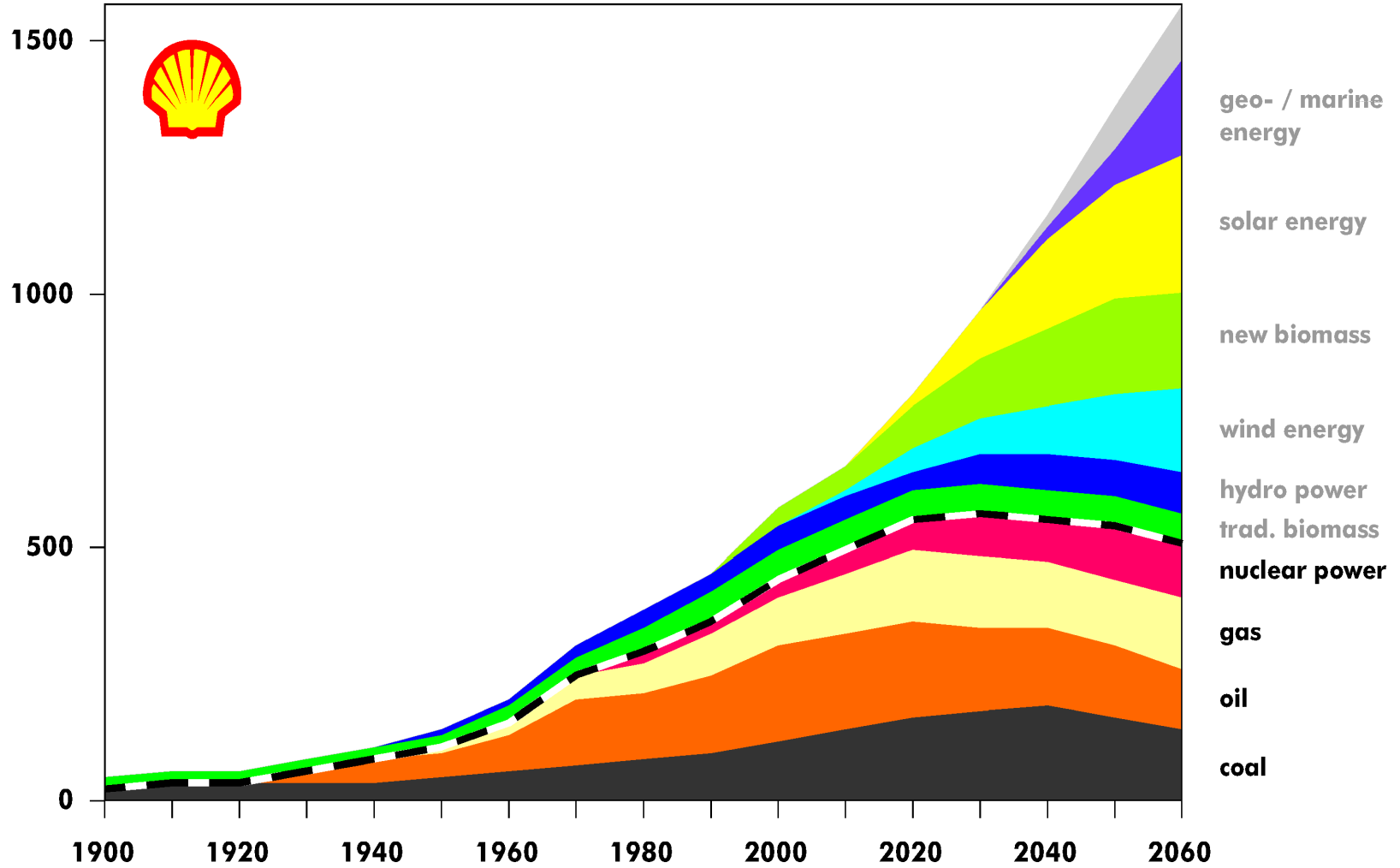
source: OECD

**Scarcity of different energy sources**

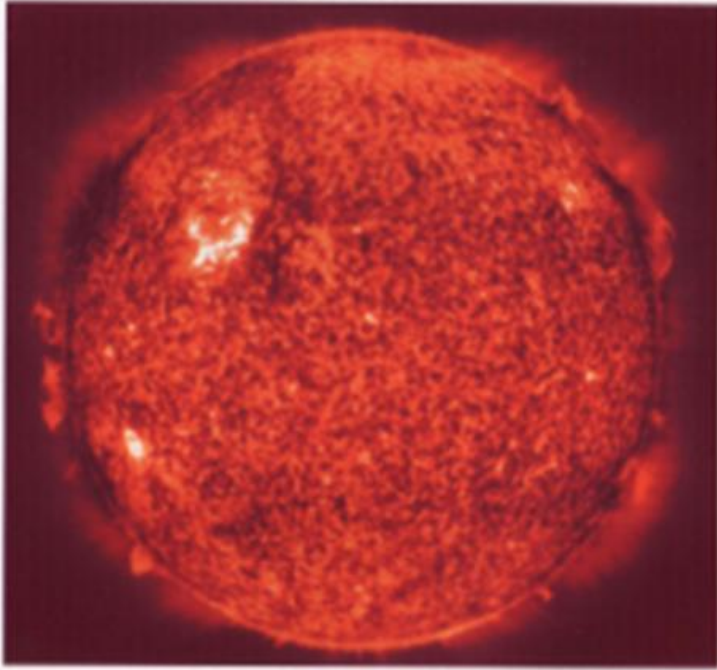




**Exajoules**



# Slunce

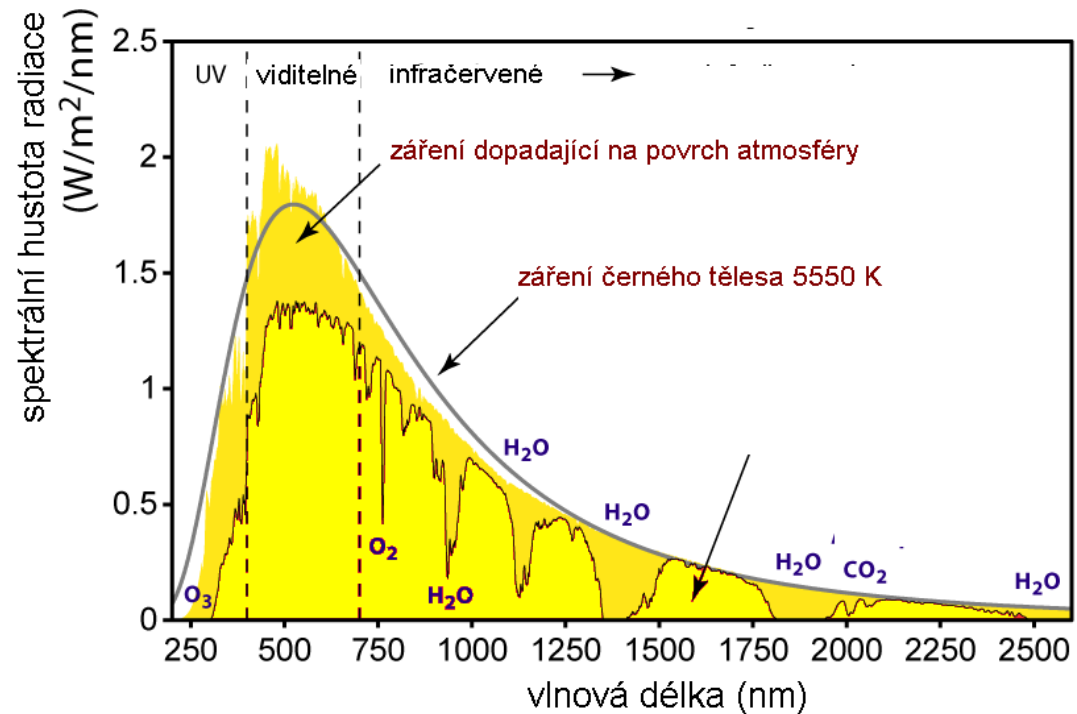


$$r_S = 0.695 \times 10^9 \text{ m}$$

povrchová teplota  $\sim 6000 \text{ K}$

vzdálenost od Země

$$1.496 \times 10^{11} \text{ m } (\pm 1.7\%)$$

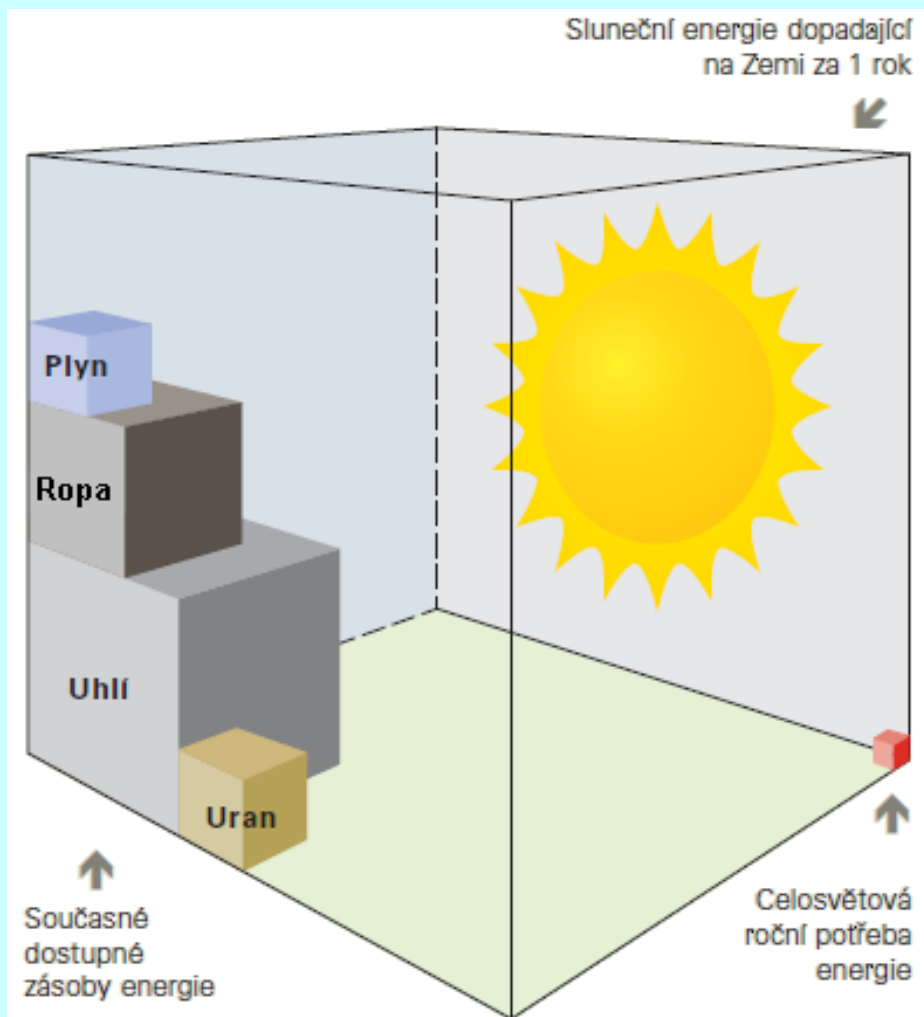




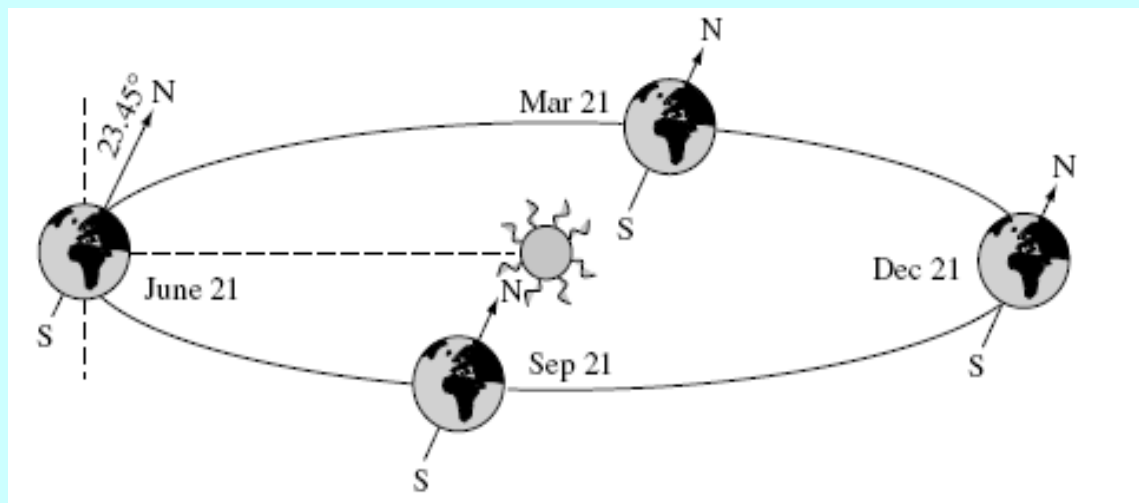
Slunce vyzáří na Zemi celosvětovou roční potřebu energie  
přibližně během tří hodin

Se slunečním zářením  
jsou spojeny

- biomasa
- pohyb vzduchu
- koloběh vody



# Energie slunečního záření dopadajícího na povrch Země



$$r = r_0 \left[ 1 + 0.017 \sin \left( \frac{360(d_n - 93)}{365} \right) \right]$$

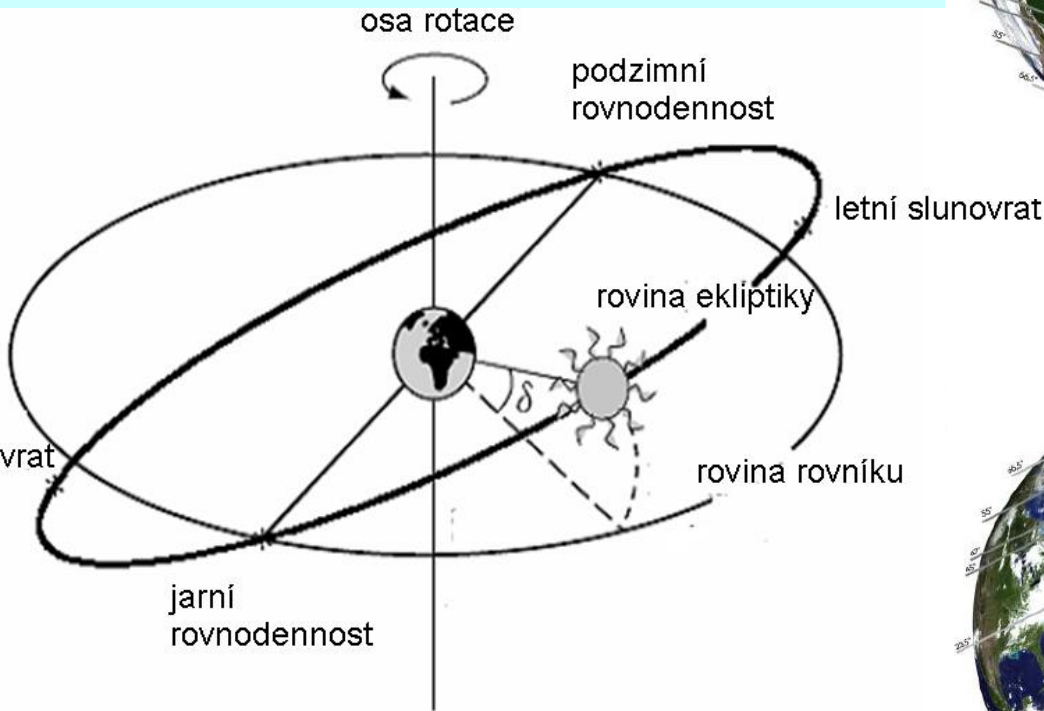
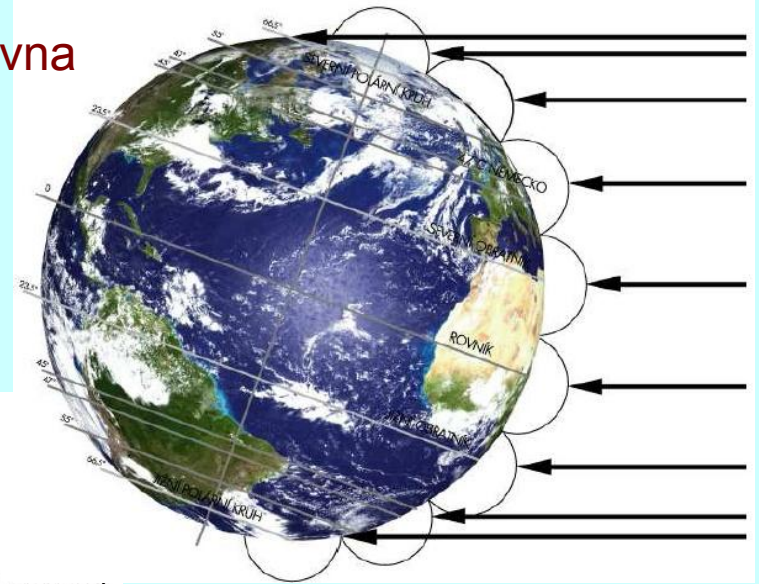
$$r_0 = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$$

excentrita

$$\varepsilon_0 = (r_0/r)^2 = 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360d_n}{365} \right)$$

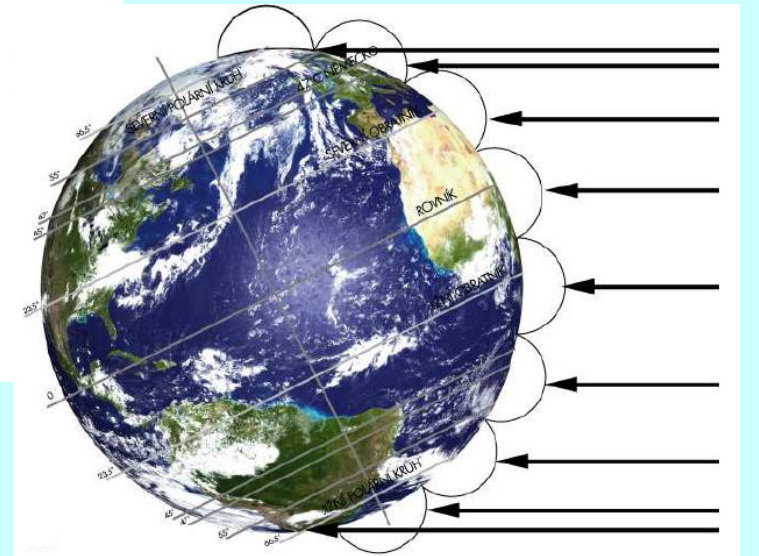
# Pohyb slunce po obloze

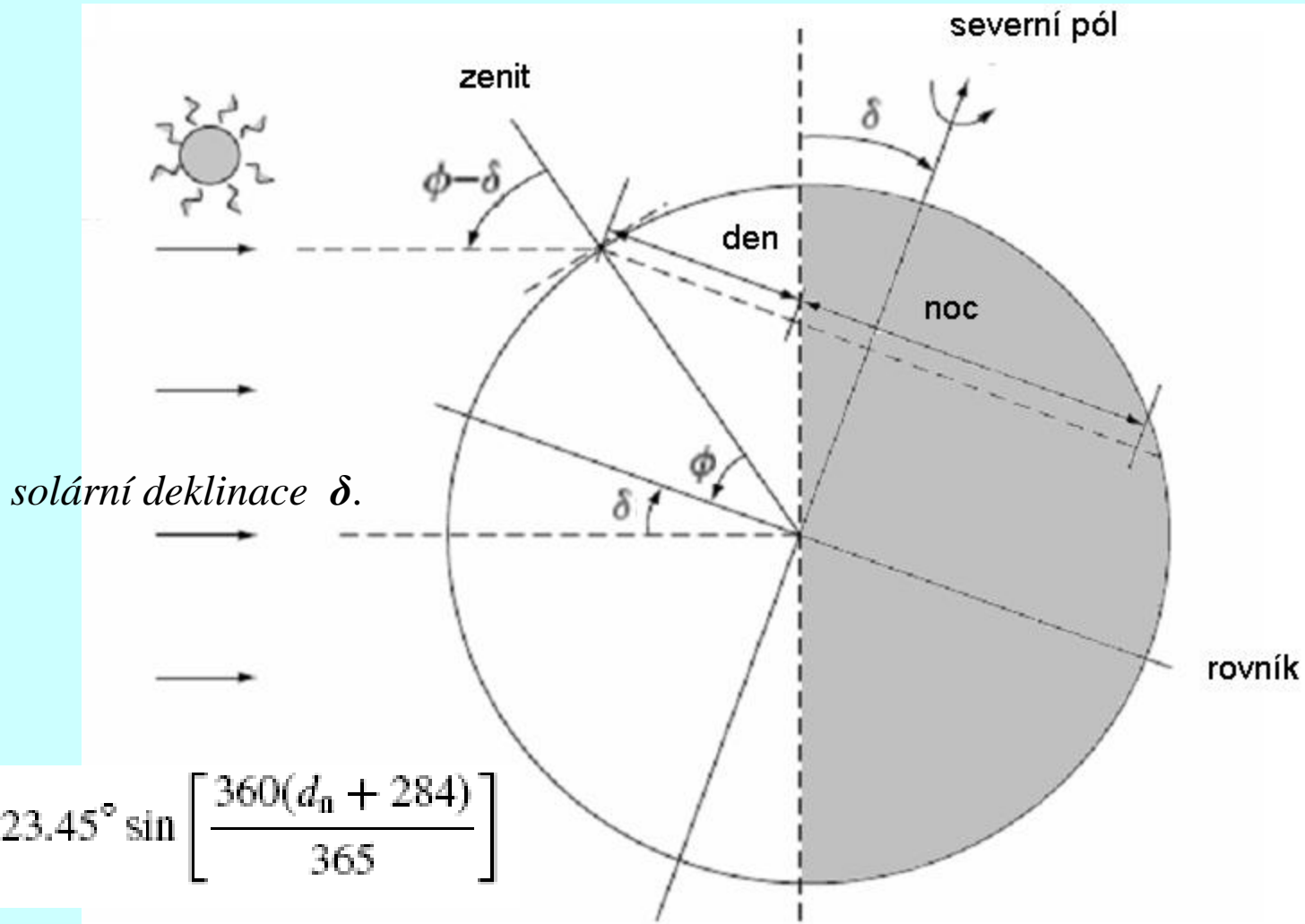
21 června



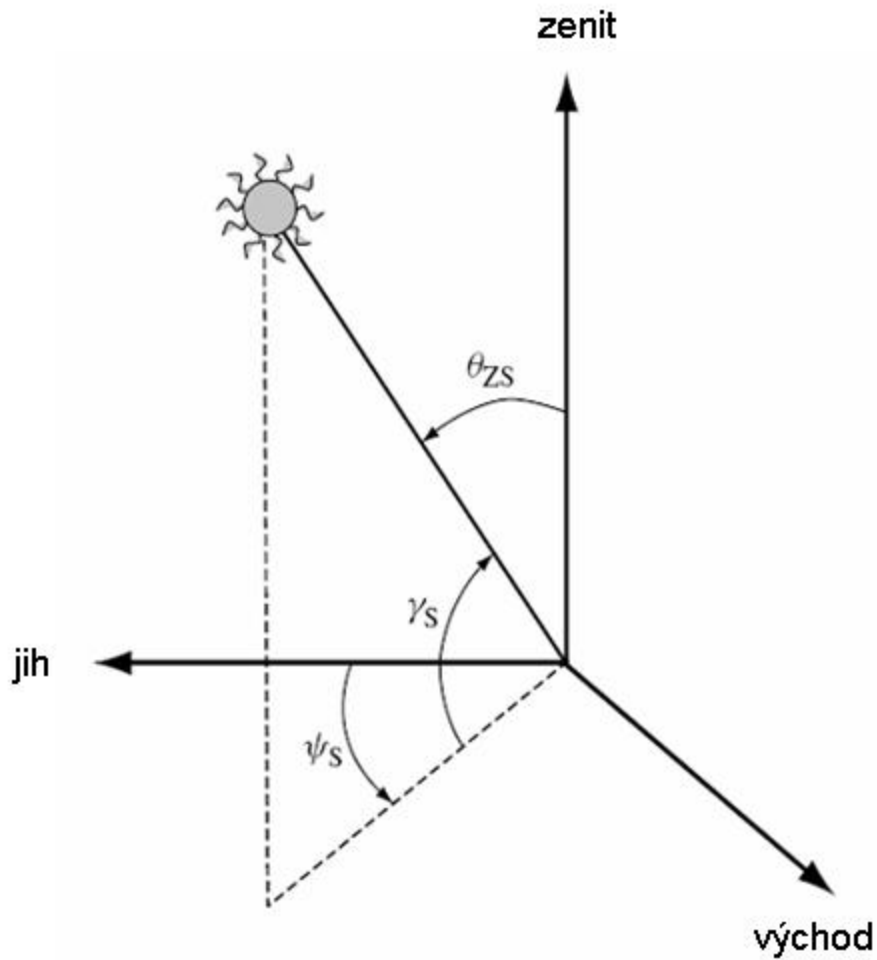
$\delta$  solární deklinace

21 prosince





$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360(d_n + 284)}{365} \right]$$



*úhel mezi Sluncem a zenitem,  $\theta_{zs}$*

*sluneční azimut,  $\psi_s$ ,*

*úhel mezi Sluncem a horizontem,  $\gamma_s$*

*zeměpisná šířka  $\Phi$*

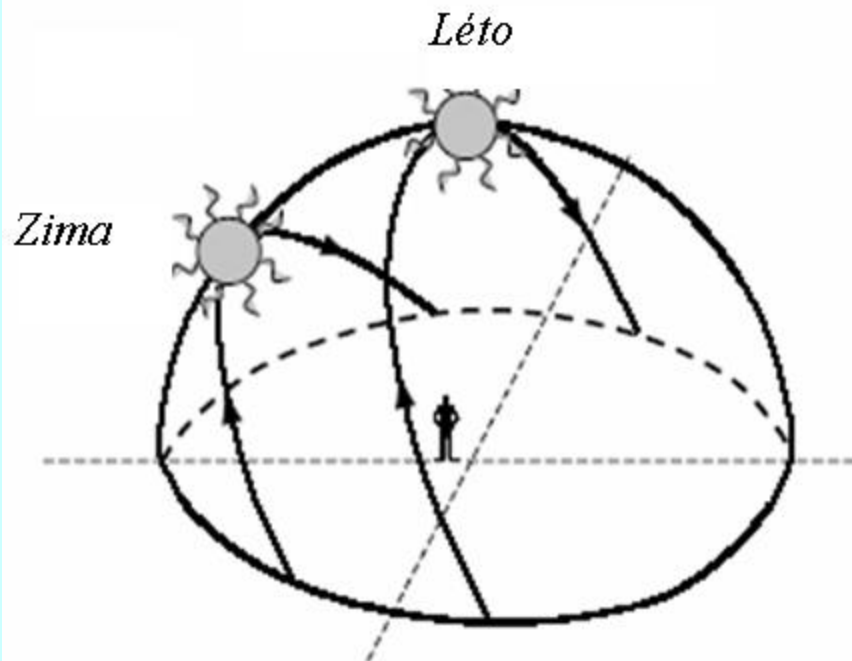
*$\omega$  skutečný sluneční čas*

$$\cos \theta_{zs} = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \gamma_s$$

$$\cos \psi_s = \frac{(\sin \gamma_s \sin \phi - \sin \delta)}{\cos \gamma_s \cos \phi} [\text{sign}(\phi)]$$

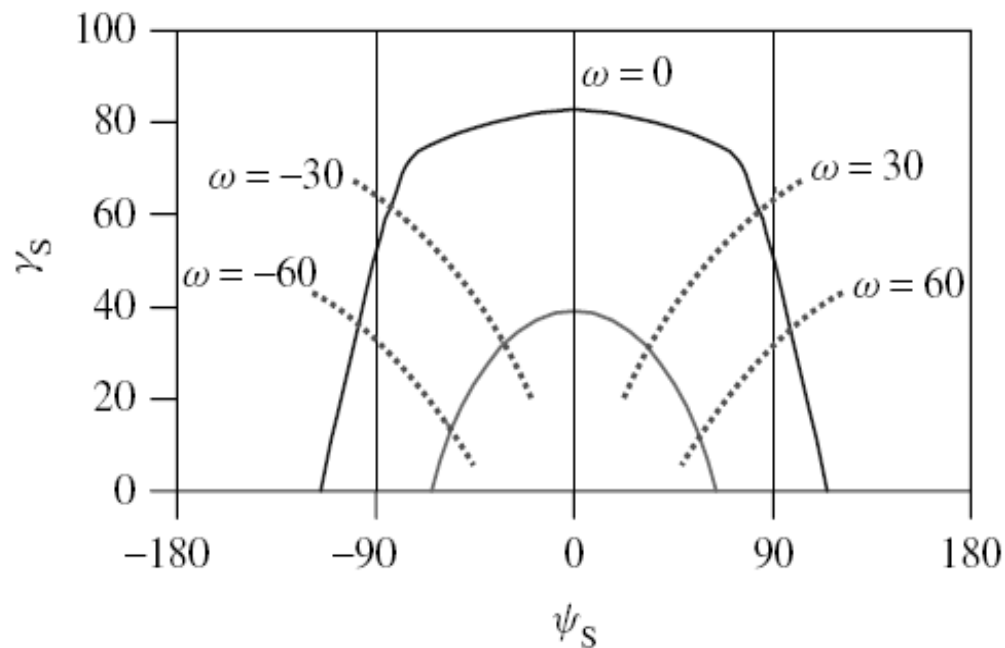
$$\omega_s = -\arccos(-\tan \delta \tan \phi)$$

*východ slunce,  $\omega_s$ ,*



$\omega$  skutečný sluneční čas

úhel  $\gamma_S$  jako funkce slunečního azimutu  $\psi_S$ .

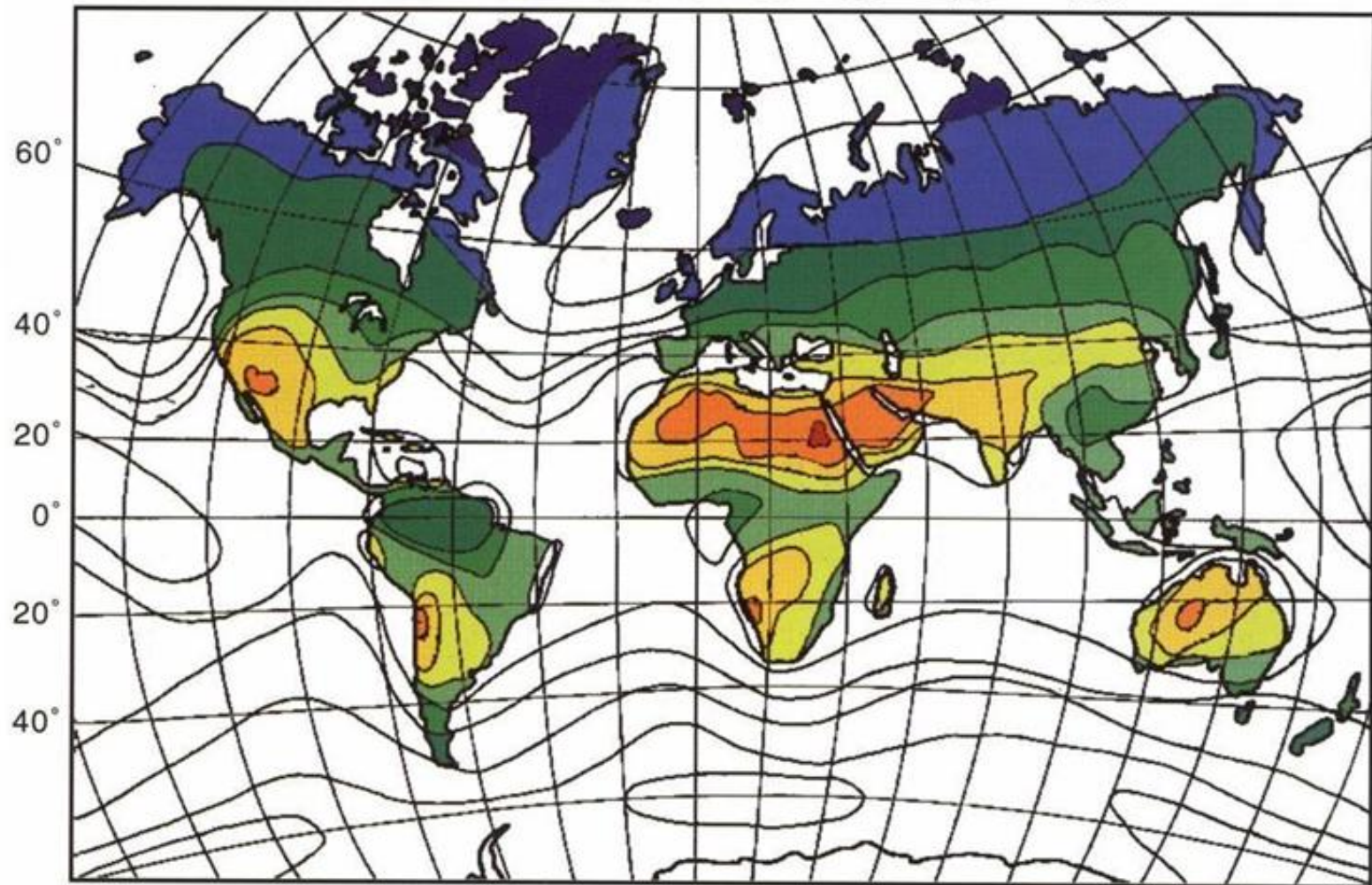


## Mesíční střední hodnota energie dopadající na povrch atmosféry za jeden den $H_{0dm}(\theta)$ závisí na zeměpisné šířce

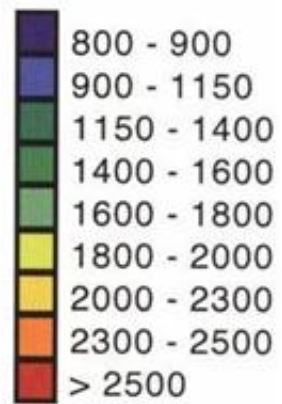
Deklinace a intenzita záření mimo atmosféru v typickém dnu v jednotlivých měsících

| Měsíc    | den | $d_n$ | $\delta$<br>(°) | $H_{0d}(\theta) = H_{0dm}(\theta)$ , (Wh/m <sup>2</sup> ) |                   |                    |                    |
|----------|-----|-------|-----------------|---|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |     |       |                 | $\phi = 30^\circ$   | $\phi = 60^\circ$ | $\phi = -30^\circ$ | $\phi = -60^\circ$ |
| Leden    | 17  | 17    | -20.92          | 5 907   | 949               | 11 949             | 11 413             |
| Únor     | 14  | 45    | -13.62          | 7 108   | 2 235             | 11 062             | 9 083              |
| Březen   | 15  | 74    | -2.82           | 8 717   | 4 579             | 9 531              | 5 990              |
| Duben    | 15  | 105   | +9.41           | 10 225  | 7 630             | 7 562              | 3 018              |
| Květen   | 15  | 135   | +18.79          | 11 113  | 10 171            | 5 948              | 1 225              |
| Červen   | 10  | 161   | +23.01          | 11 420  | 11 371            | 5 204              | 605                |
| Červenec | 18  | 199   | +21.00          | 11 224  | 10 741            | 5 530              | 878                |
| Srpen    | 18  | 230   | +12.78          | 10 469  | 8 440             | 6 921              | 2 294              |
| Září     | 18  | 261   | +1.01           | 9 121   | 5 434             | 8 835              | 4 937              |
| Říjen    | 19  | 292   | -11.05          | 7 436   | 2 726             | 10 612             | 8 226              |
| Listopad | 18  | 322   | -19.82          | 6 056   | 1 114             | 11 754             | 10 983             |
| Prosinec | 13  | 347   | -23.24          | 5 498   | 613               | 12 174             | 12 177             |

200° 240° 280° 320° 0° 40° 80° 120° 160°



[kWh/(m<sup>2</sup>a)]

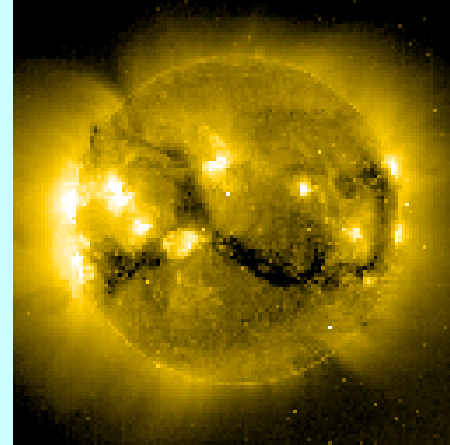
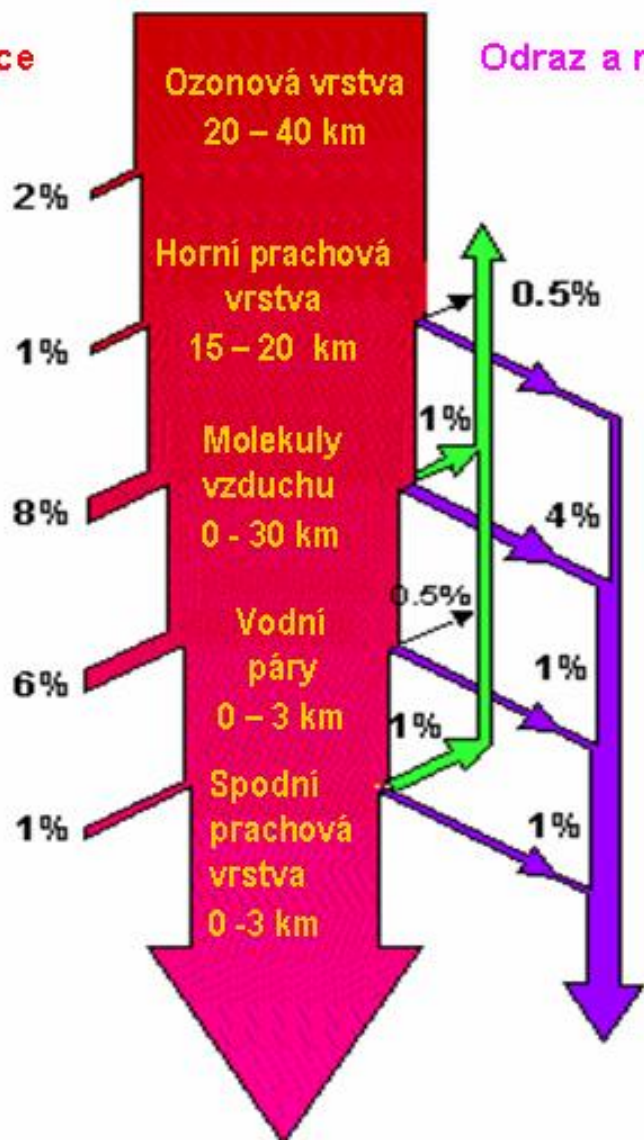




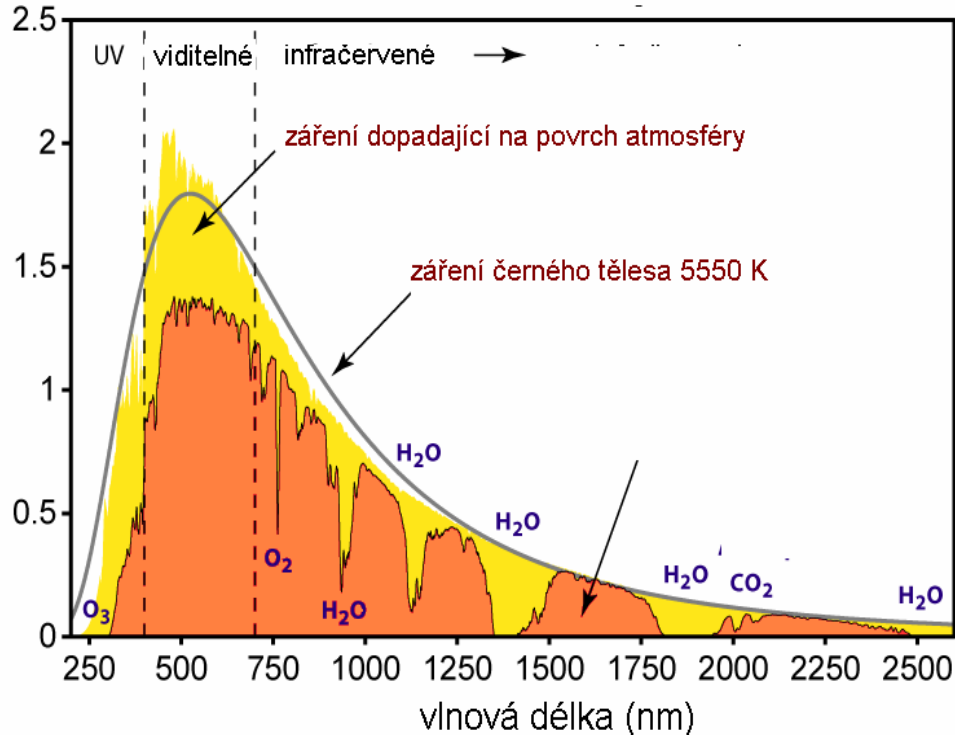
Vstupuje 1367 W/m<sup>2</sup>

Absorpce

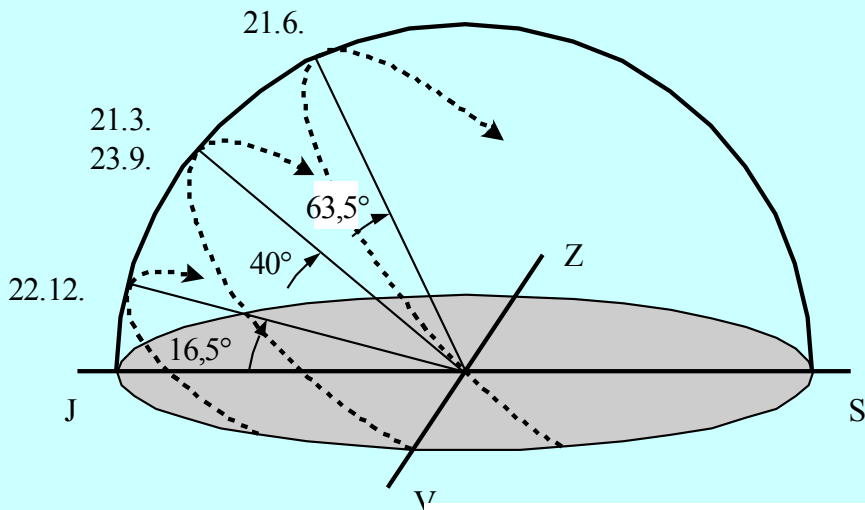
Odraz a rozptyl



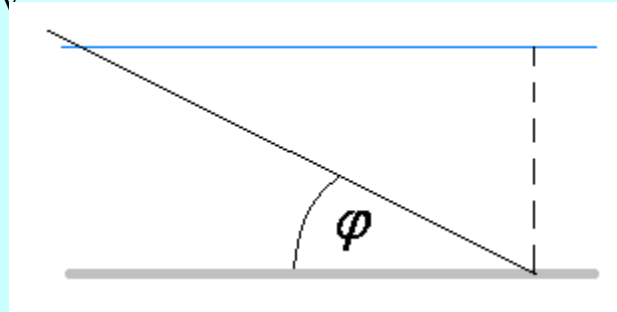
spektrální hustota radiace (W/m<sup>2</sup>/nm)



Při nejkratší dráze (záření kolmo k horizontální rovině) dopadá na povrch výkon 1000 W/m<sup>2</sup>



**Pokud záření vstupuje do atmosféry pod úhlem  $\varphi$**   
 ( $\varphi$  je úhel od horizontální roviny)



Dráha paprsku v atmosféře se prodlužuje v závislosti na úhlu

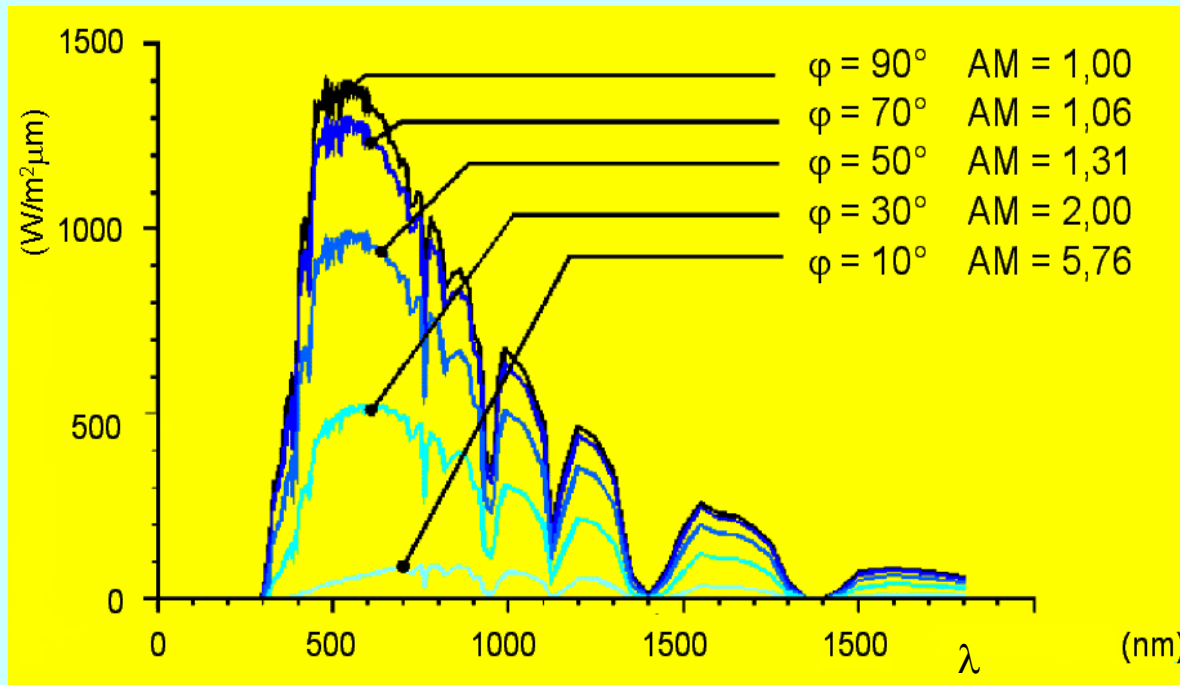
V případě jasné, oblohy je možno vyjádřit intenzitu přímého dopadajícího záření

**Koeficient atmosférické masy**

$$G_B(\varphi) = G_{B0}(0,7)^{AM}$$

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi}$$

Koeficient atmosférické masy ovlivňuje spektrální rozložení intenzity dopadajícího záření

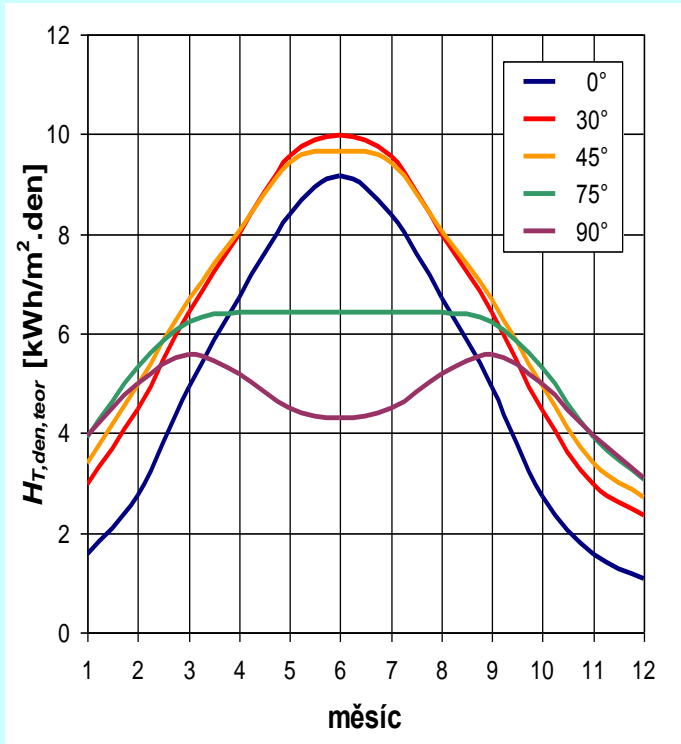


Závislost na nadmořské výšce  $h$

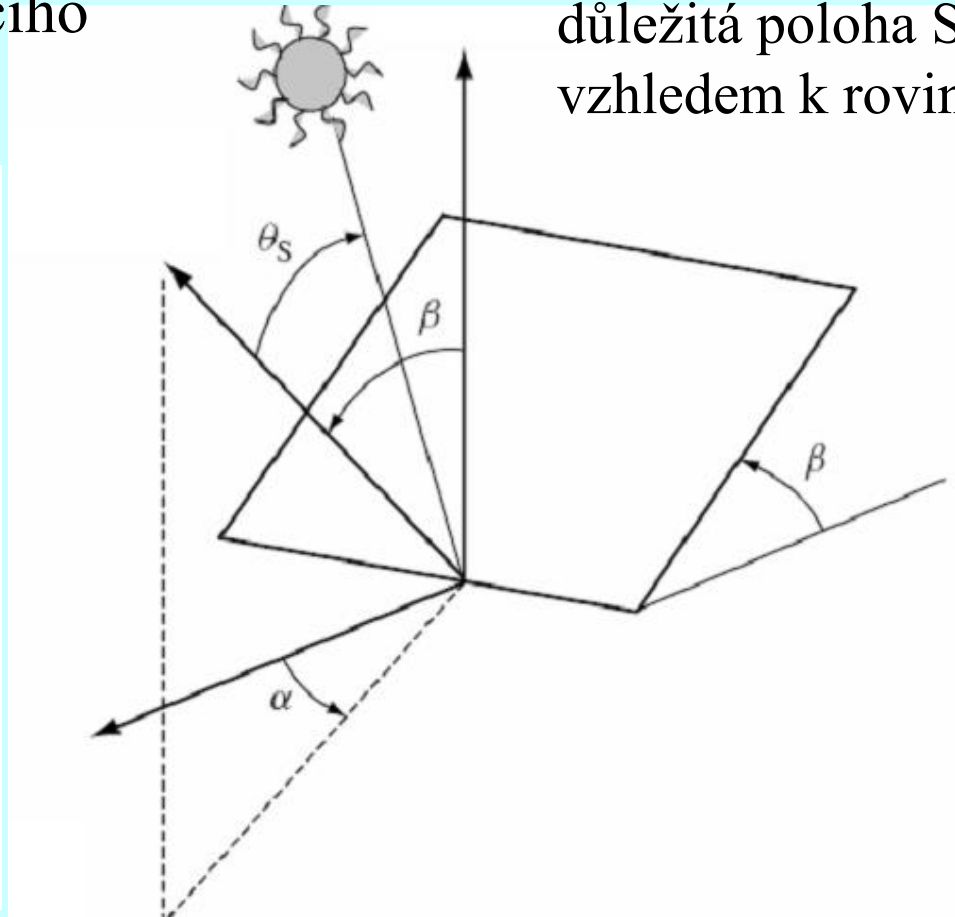
$$AM(h) \approx AM(0) \frac{p_{at}(h)}{p_{at}(0)}$$

$p_{at}$  je atmosférický tlak

# Intenzita záření dopadajícího na FV modul



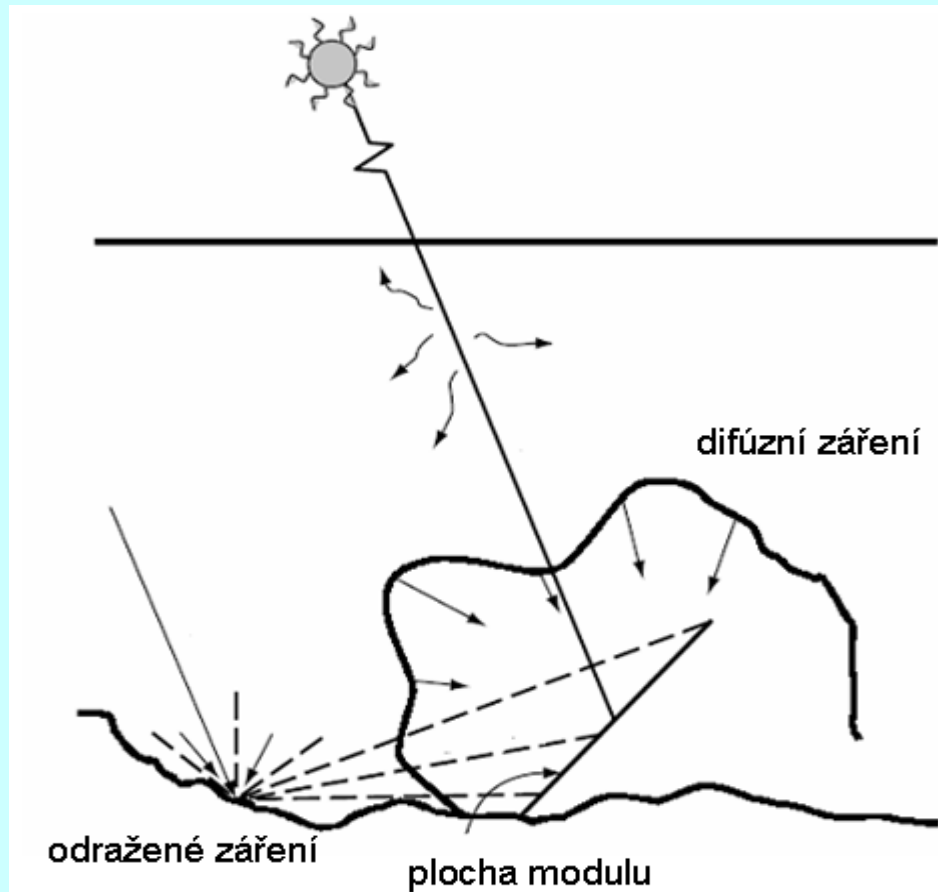
Pro praktické aplikace je důležitá poloha Slunce vzhledem k rovině modulu



$$\cos \theta_s = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - [\text{sign}(\phi)] \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \alpha + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + [\text{sign}(\phi)] \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \alpha \cos \omega + \cos \delta \sin \alpha \sin \omega \sin \beta$$

$$\cos \theta_s = [\text{sign}(\phi)] \sin \delta \sin(\text{abs}(\phi) - \beta) + \cos \delta \cos(\text{abs}(\phi) - \beta) \cos \omega$$

*Intenzita záření* hustota výkonu dopadajícího na povrch ( $\text{W}/\text{m}^2$ )



*Solární konstanta*  
 $G_{B0} = 1367 \text{ W}/\text{m}^2$

*prímé záření*, paprsky světla, které nejsou ani odražené, ani rozptýlené -  $G_B$

*difúzní záření*, přichází z celé oblohy mimo sluneční kotouč -  $G_D$

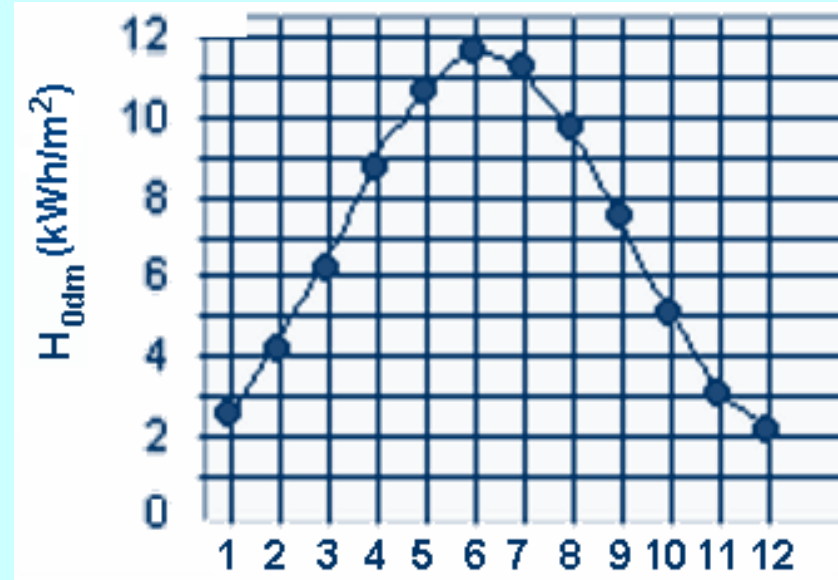
*odražené záření (albedo)* je záření odražené od okolních předmětů -  $G_R$

*celkové (globální) záření* (prímé + difúzní + odražené).  $G = G_B + G_D + G_R$

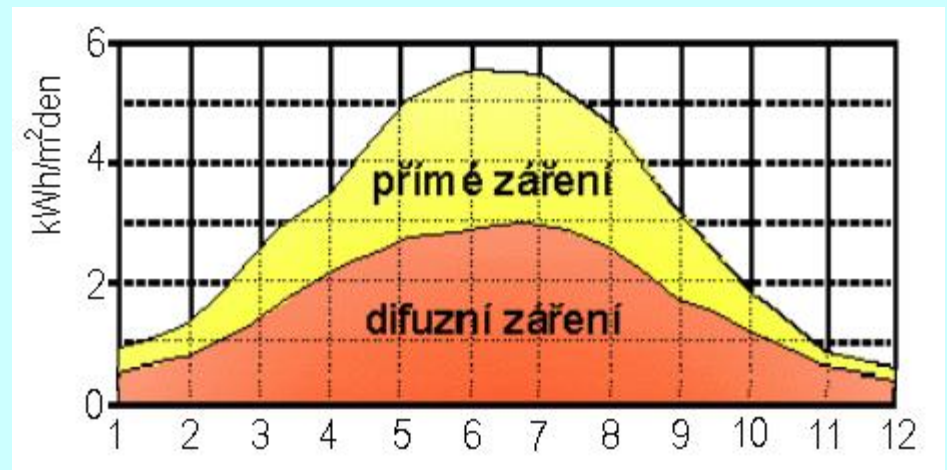
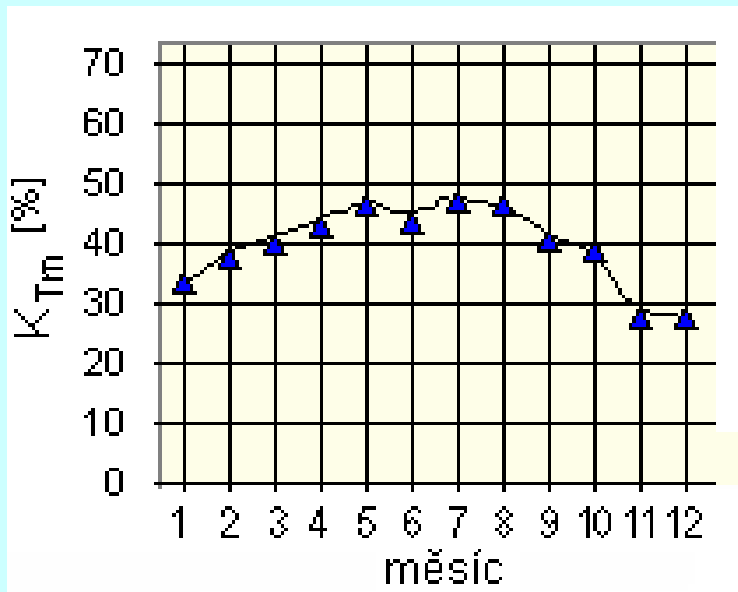
Intenzita záření je ovlivňována klimatickými podmínkami : oblačnost, prašnost, mlha apod.

Mesíční střední hodnota energie dopadající na povrch atmosféry za jeden den  $H_{0dm}(0)$ ; energie dopadající na zemský povrch  $H_{Gdm}(0)$

*Index průzračnosti  $K_{Tm}$ ,  
(počítaný pro každý měsíc)*



$$K_{Tm} = \frac{H_{Gdm}(0)}{H_{0dm}(0)}$$



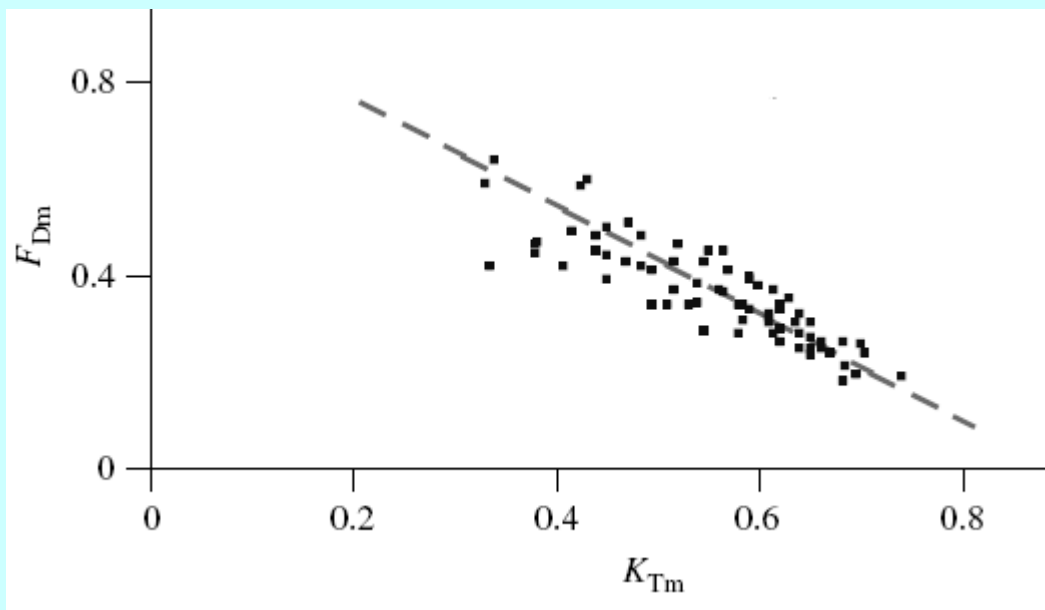
Při poklesu indexu průzračnosti roste podíl difúzního záření

Podíl difúzního záření

$$F_{Dm} = \frac{H_{Ddm}(0)}{H_{Gdm}(0)}$$

Index průzračnosti

$$K_{Tm} = \frac{H_{Gdm}(0)}{H_{0dm}(0)}$$

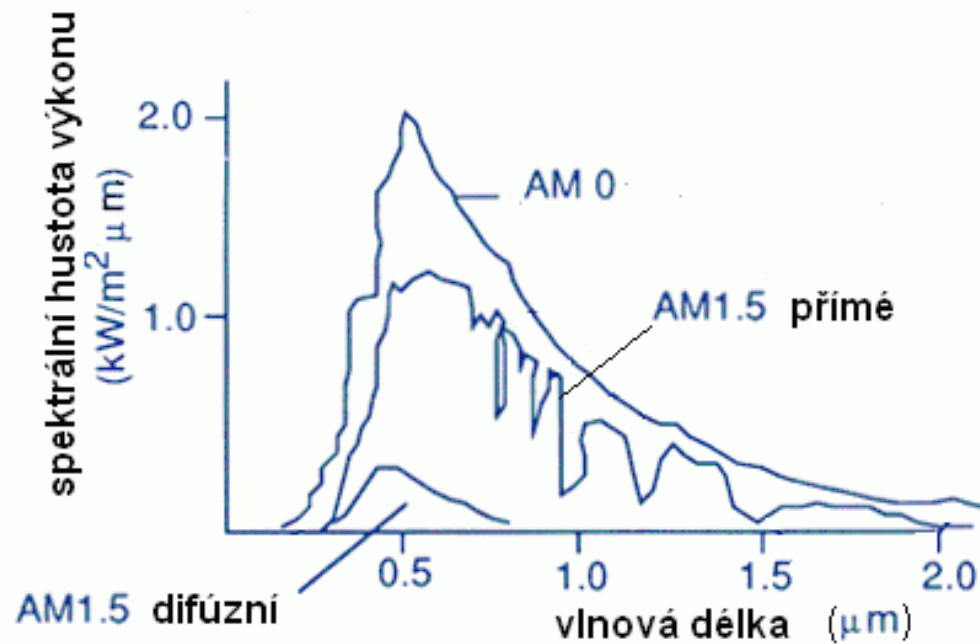
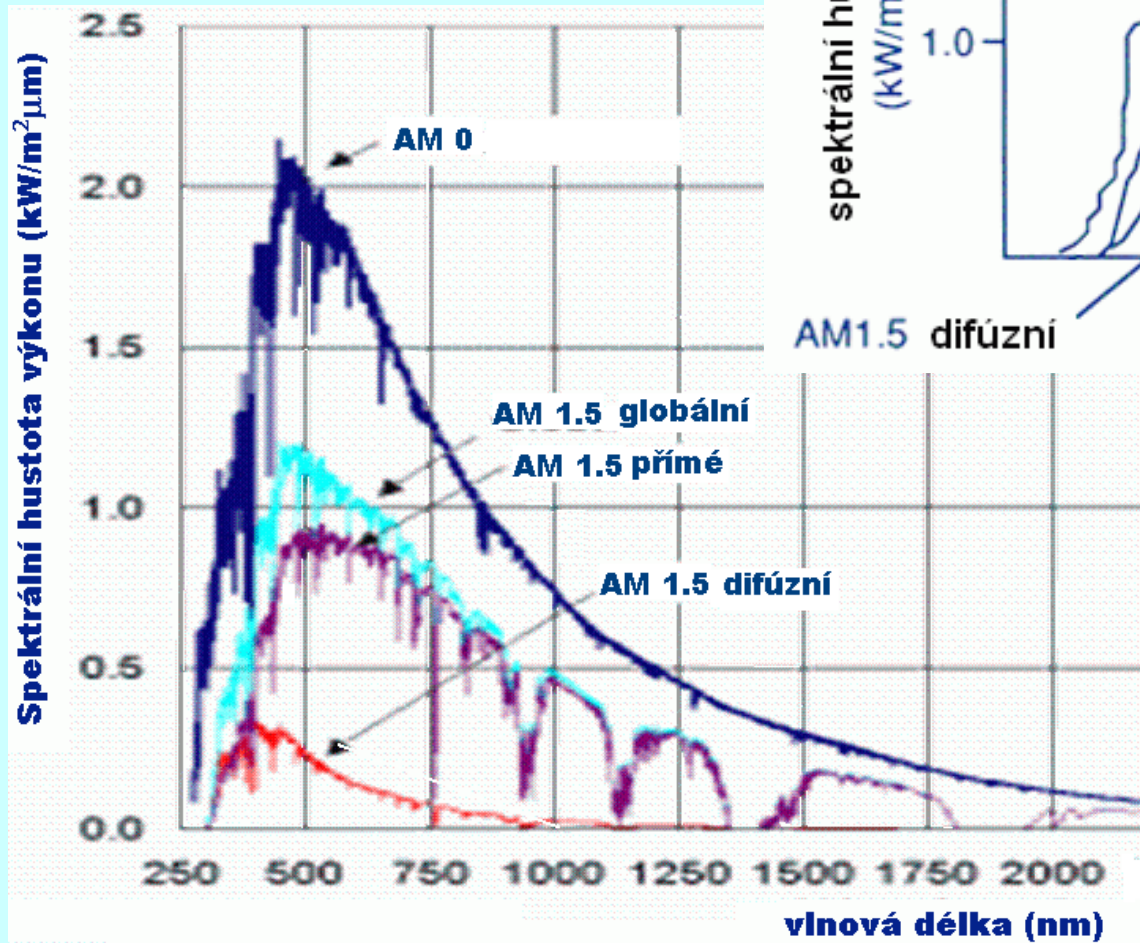


$$F_{Dm} = 1 - 1.13K_{Tm}$$

|                     | <b>Záření (W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Difúzní podíl (%)</b> |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Modré nebe          | 800 – 1000                      | 10                       |
| Zamlžené nebe       | 600 – 900                       | až 50                    |
| Mlhavý podzimní den | 100 – 300                       | 100                      |
| Zamračený zimní den | 50                              | 100                      |
| Celoroční průměr    | 600                             | 50 až 60                 |

| <b>Sluneční záření</b> | <b>Jasno</b>             | <b>Oblačno</b>         |
|------------------------|--------------------------|------------------------|
| <b>Léto</b>            | 7 – 8 kWh/m <sup>2</sup> | 2 kWh/m <sup>2</sup>   |
| <b>Jaro / podzim</b>   | 5 kWh/m <sup>2</sup>     | 1,2 kWh/m <sup>2</sup> |
| <b>Zima</b>            | 3 kWh/m <sup>2</sup>     | 0,3 kWh/m <sup>2</sup> |





Nejčastěji se získává celková intenzita záření jako součet intenzit přímého, difúzního a odraženého záření dopadající na plochu odkloněnou o úhel  $\alpha$  od jihu a o úhel  $\beta$  od horizontální roviny

$$G(\beta, \alpha) = G_B(\beta, \alpha) + G_D(\beta, \alpha) + G_R(\beta, \alpha)$$

*přímé záření*

$$G_B(\beta, \alpha) = G_B(0) \cos \theta_S$$

*difúzní záření*

$$G_D(\beta, \alpha) = G_D(0) \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

*odražené záření*

$$G_R(\beta, \alpha) = \rho G(0) \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

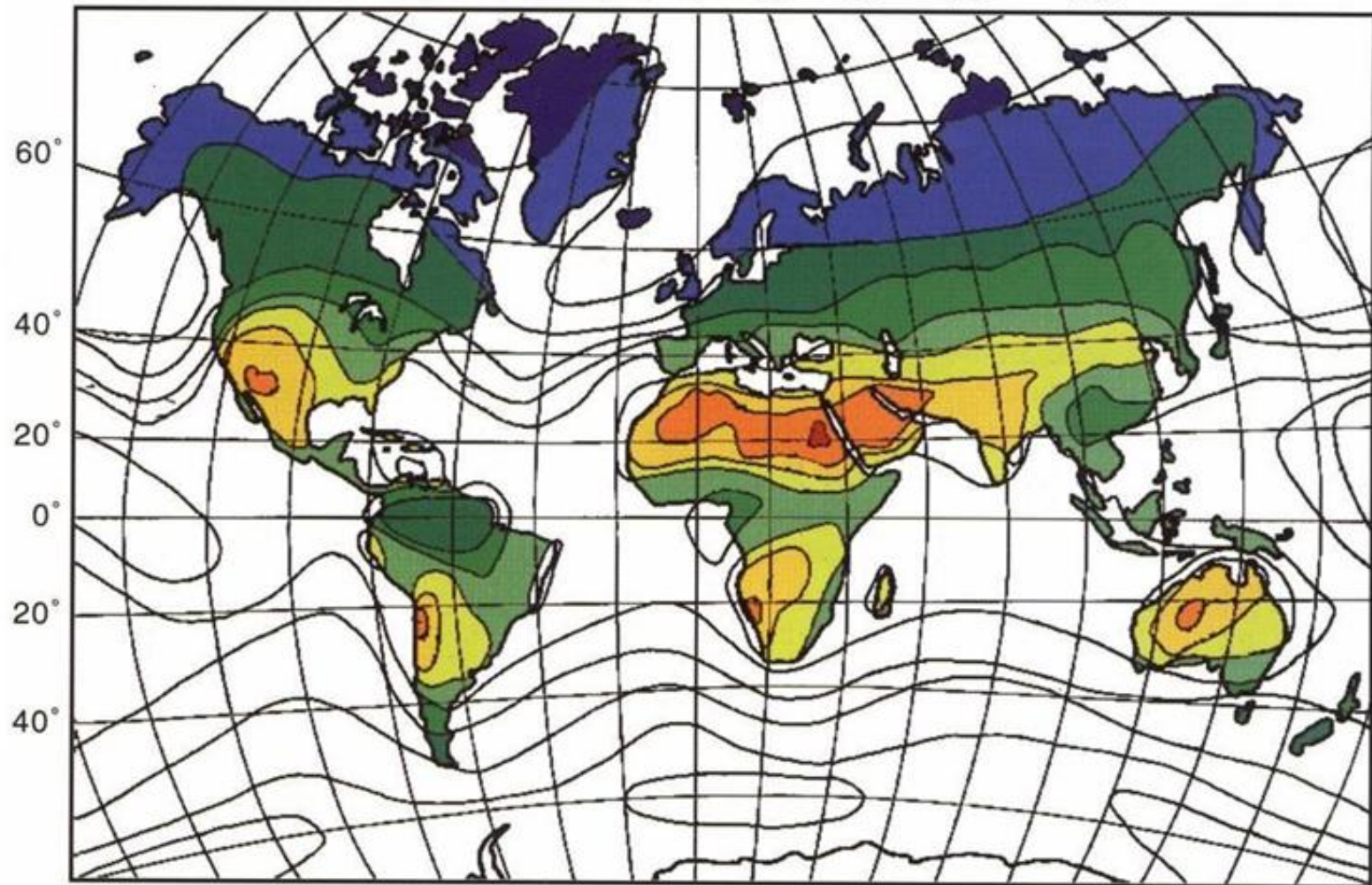
$\rho$  je odrazivost povrchu

### *Odrazivost vybraných povrchů*

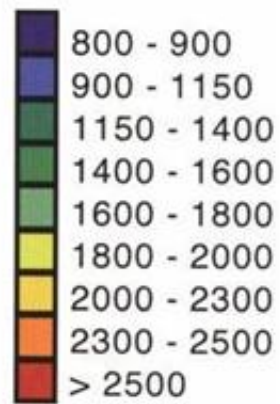
| <b>Okolní plocha</b>       | <b>Odrazivost</b> | <b>Okolní plocha</b>   | <b>Odrazivost</b> |
|----------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Polní cesta                | 4 %               | Betonový povrch        | 22 %              |
| Jehličnatý les             | 7 %               | Zelená tráva           | 26 %              |
| Asfaltová cesta            | 10 %              | Tmavé stavební povrchy | 27 %              |
| Štěrková asfaltová střecha | 13 %              | Opadané listí          | 30 %              |
| Pole (jíl, hlína)          | 14 %              | Písek                  | 40 %              |
| Suchá tráva                | 20 %              | Světlé stavební plochy | 60 %              |
| Kamenitý povrch            | 20 %              | Sníh                   | 75 %              |

Odrazivost okolí může zvýšit celkovou energii slunečního záření, dopadající na plochu skloněnou vůči horizontální rovině

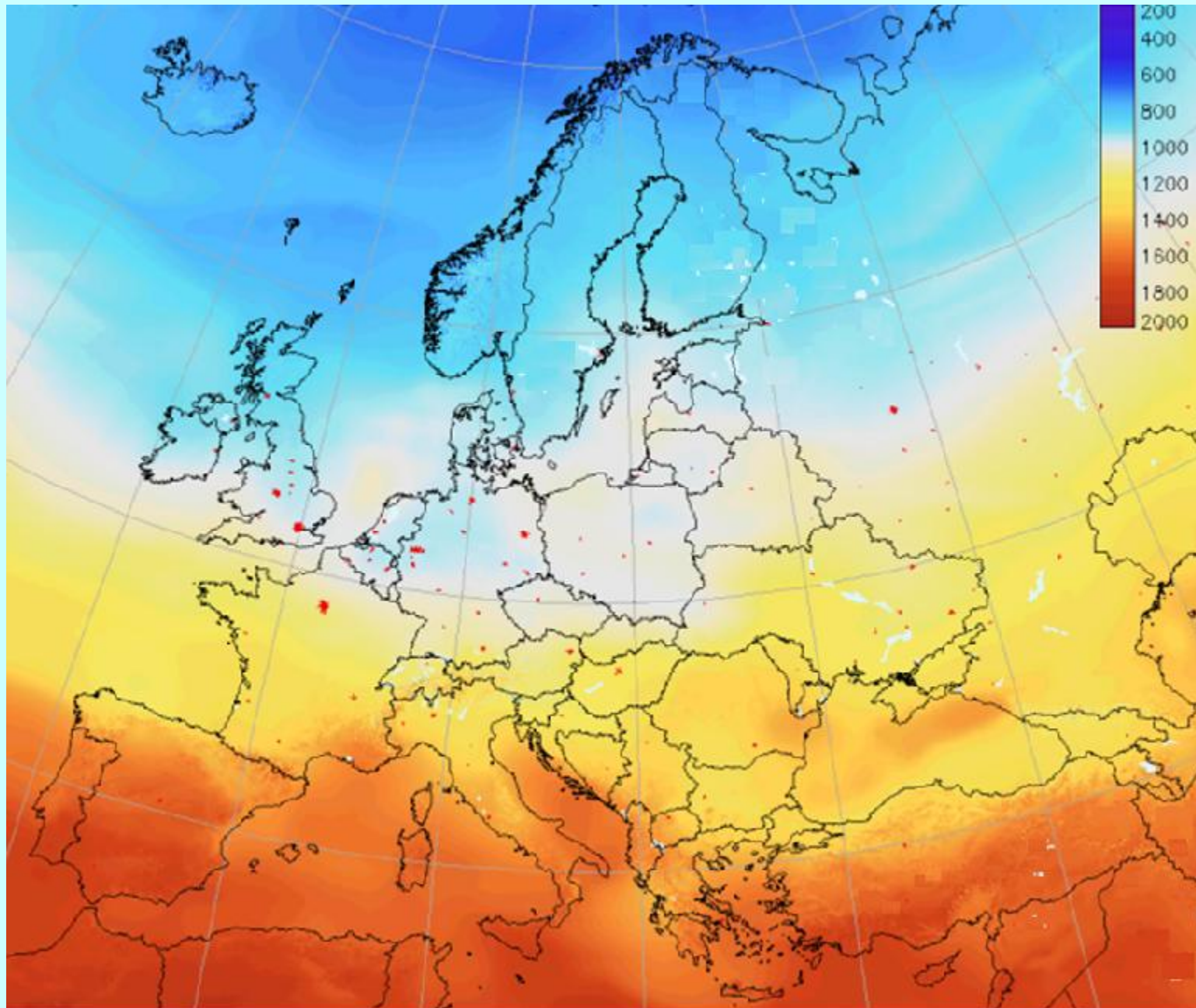
200° 240° 280° 320° 0° 40° 80° 120° 160°



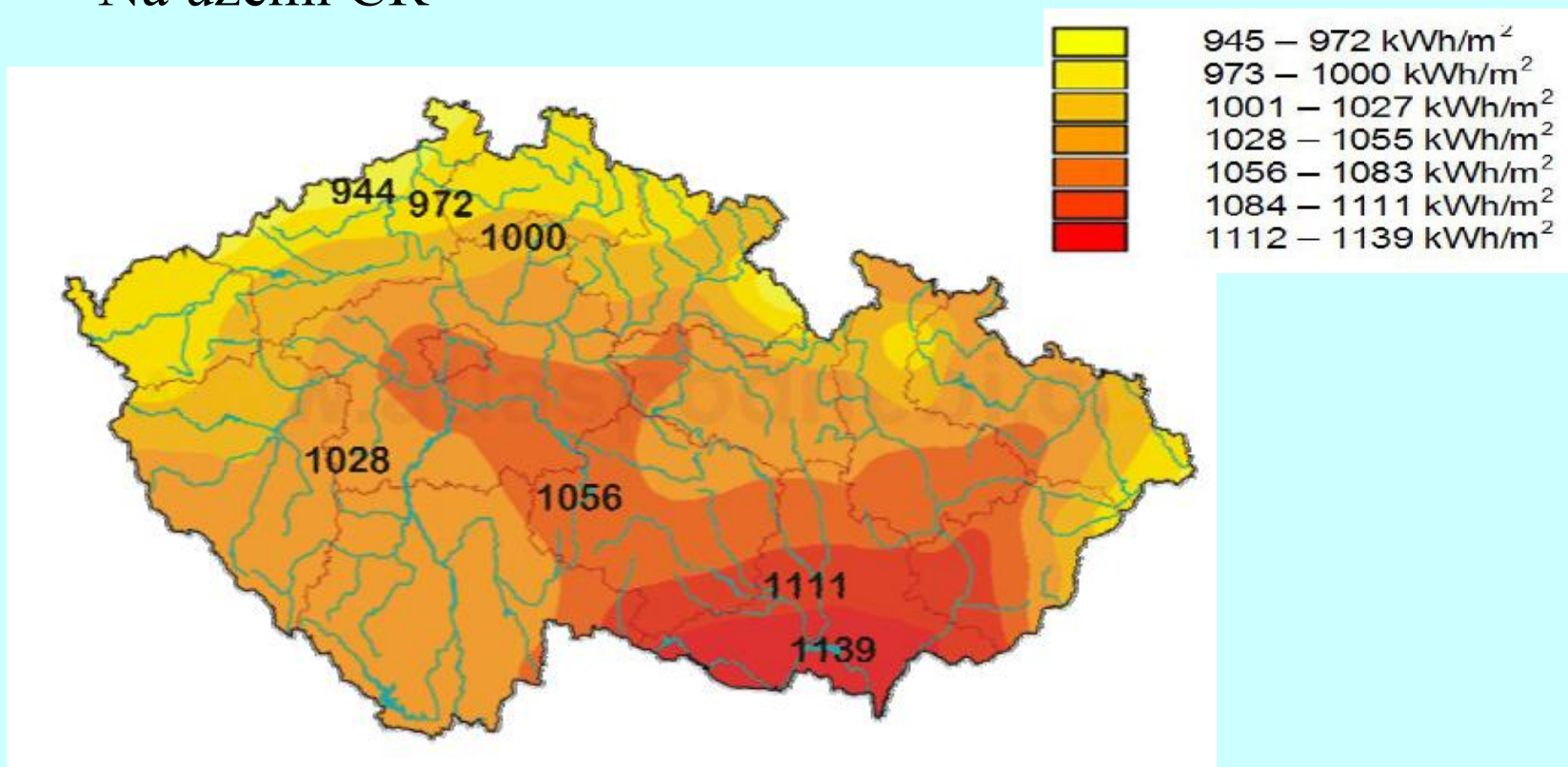
[kWh/(m²a)]



# Energie dopadající na zemský povrch za jeden rok (kWh/m<sup>2</sup>)

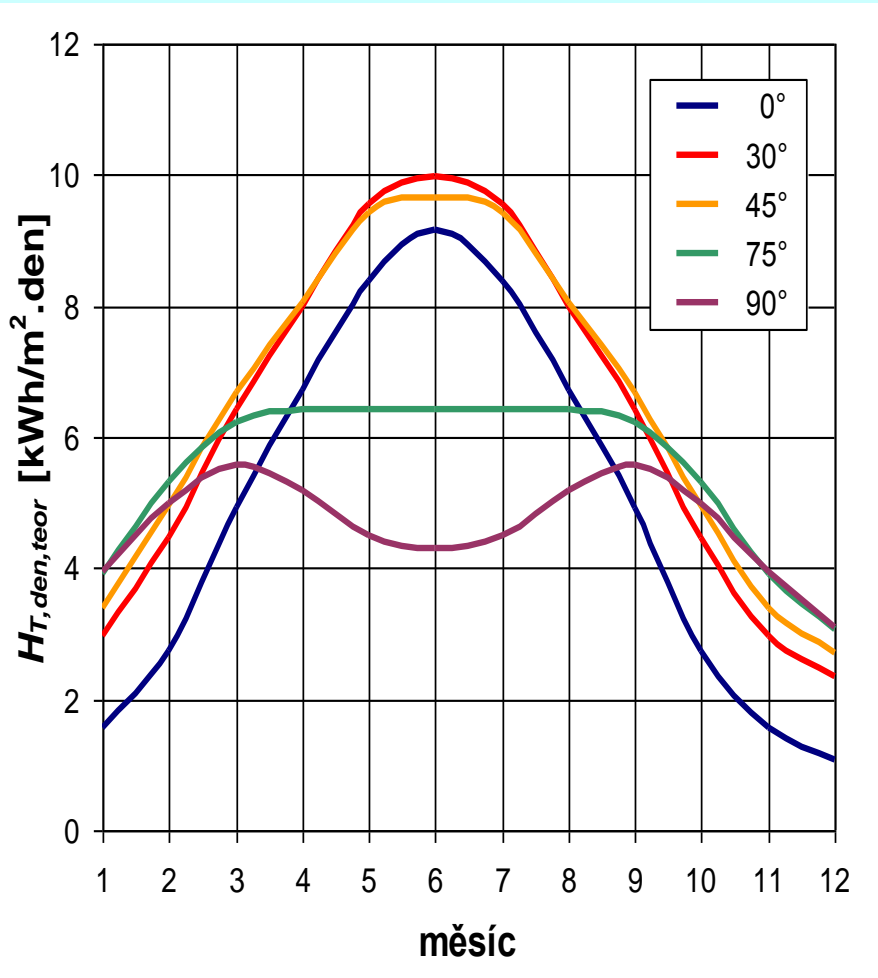


Na území ČR



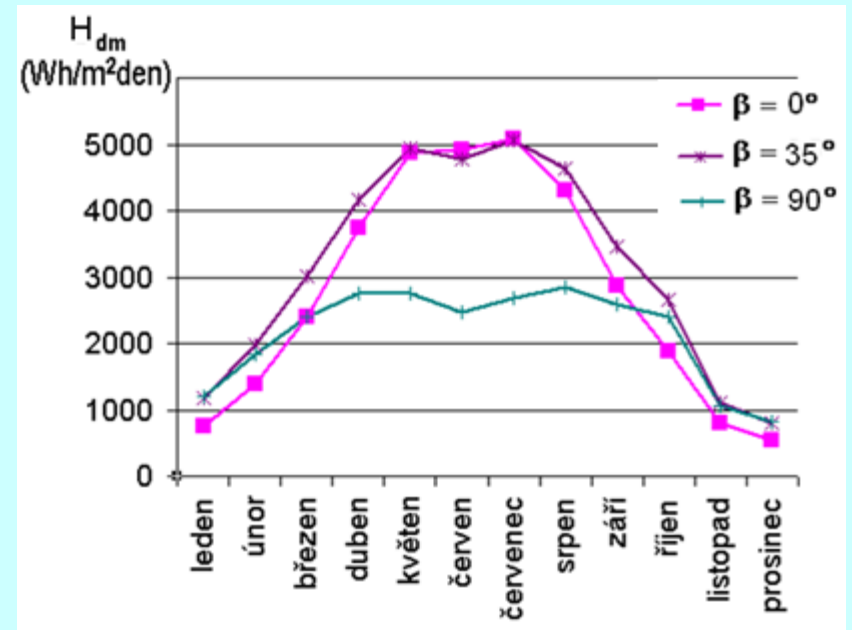
Údaje jsou mnohaleté průměry stanovené na základě pozorování řady meteorologických stanic

Za předpokladu jasné oblohy

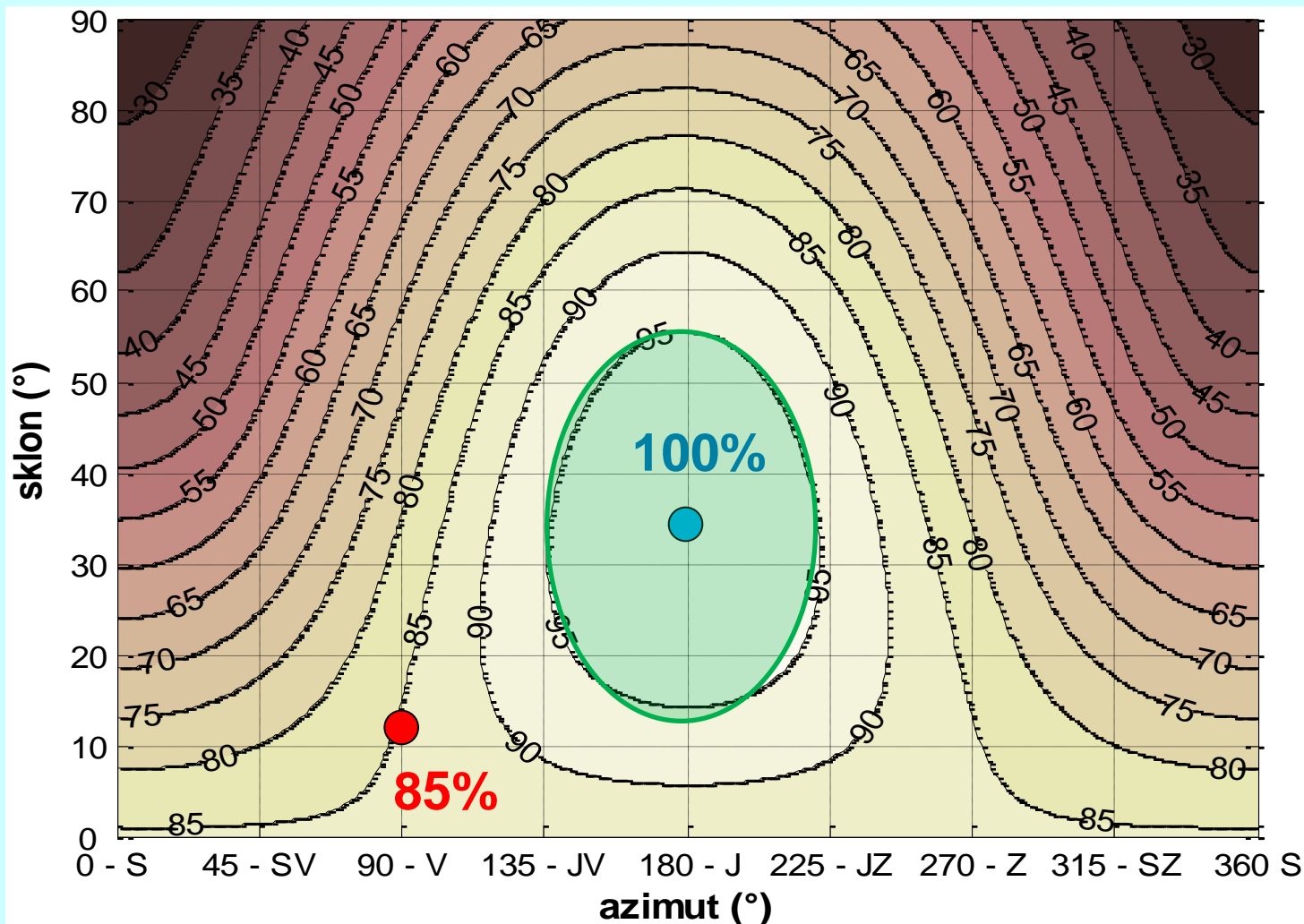


Globální ozáření v průběhu roku v lokalitě v blízkosti Prahy pro různé sklony plochy kolektoru vůči horizontální rovině

**Realita:**



Výrazně se projevuje vliv vysokého podílu difúzního záření, který zvýhodňuje menší úhly sklonu



Informace o ozáření v jednotlivých lokalitách je možno nalézt na  
<http://sunbird.jrc.it/pvgis/apps/pvest.php>



# Absorpce světla a generace nosičů náboje

Absorpce je způsobena interakcí světla s částicemi hmoty (elektrony a jádry)

Je-li energie částice před interakcí  $W_1$ , po absorpci fotonu je energie  $W_1 + h\nu$

- interakce s mřížkou – **nízkoenergetické fotony, následkem je zvýšení teploty**
- interakce s volnými elektrony – **zvýšení teploty**

## **Solar Thermal** – generace tepla

- interakce s vázanými elektrony - **může dojít k uvolnění elektronu z vazby, vznik volných nosičů náboje**

Může dojít k vytvoření rozdílu potenciálu – **Fotovoltaický jev**