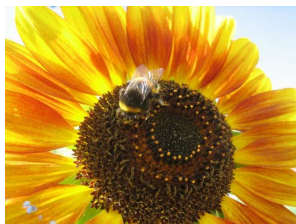




1/64

Sluneční energie

- měření
- údaje o slunečním záření
- solární mapy
- praktický přepoččet



2/64

Měření sluneční záření



Měření přímého slunečního ozáření

3/64

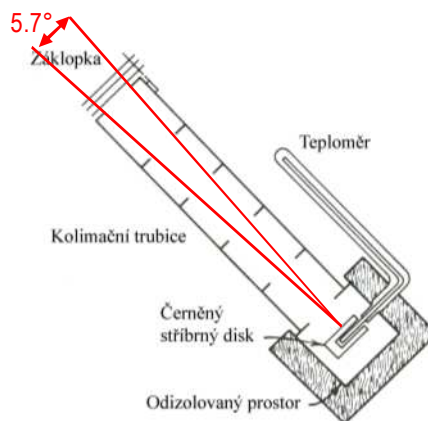
■ pyrhelimetr (actinometr)

kolimované čidlo pro měření slunečního záření přicházejícího přímo ze slunečního kotouče (a malé části oblohy okolo)

střídavé okryvání a zavírání

měření pro kolmý úhel dopadu (sledování pohybu Slunce)

etalon pro další přístroje

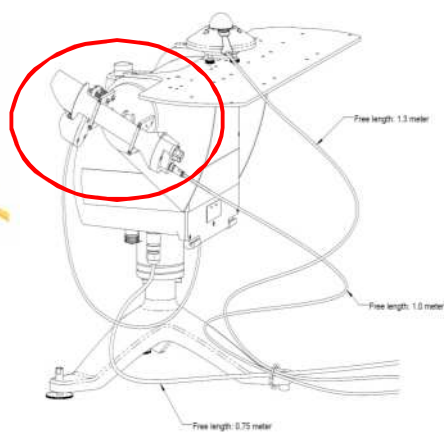
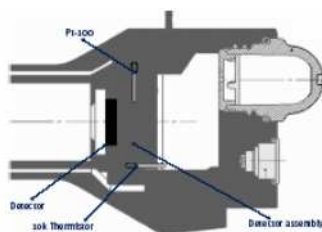


Abbotův pyrhelimetr (1902)



Měření přímého slunečního ozáření

4/64



Pyrhelimetr CHP1 (2008)



5/64

Měření celkového slunečního ozáření

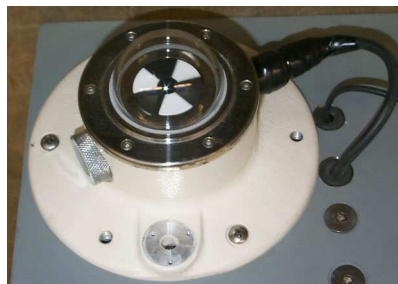
- **pyranometr** (solarimetr)
měření hemisférického celkového (přímé + difúzní) slunečního ozáření
- termočlánkové čidlo** založené na měření rozdílu teplot
rozdíl teplot ~ slunečnímu ozáření
- fotovoltaické čidlo** založené na měření produkovaného elektrického výkonu
problematické z hlediska spektrální citlivosti, teplotní závislosti ...



6/64

Termočlánkové pyranometry

- **segmentový pyranometr** (hvězdčovitý, Stern-pyranometer)
měření rozdílu teplot mezi dvěma segmenty (černý, bílý)
násobný termočlánek
USA, Kanada

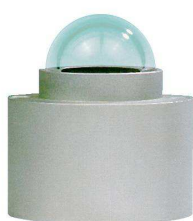




Termočláňkové pyranometry

7/64

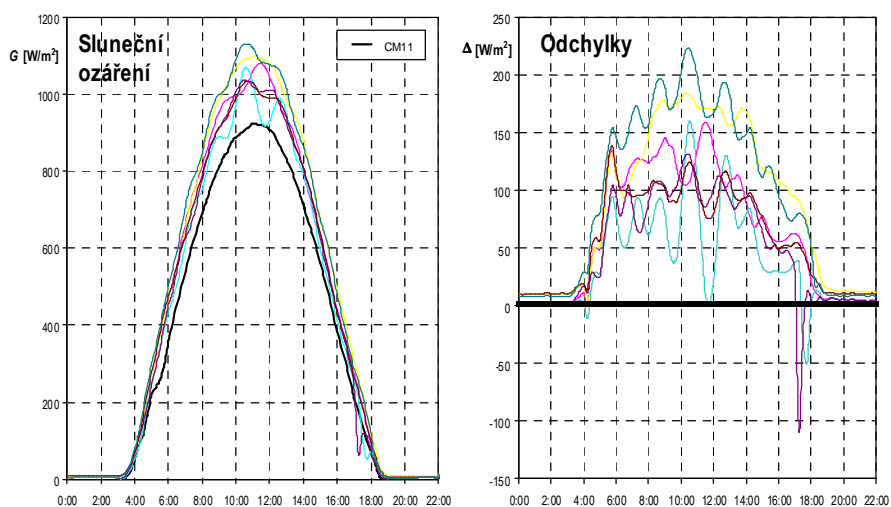
- terčikový pyranometr (Moll-Gorzynski)**
 měření rozdílu teplot mezi terčikem a tělem pyranometru
 násobný termočlánek
 Evropa



Kvalita pyranometrů

8/64

Terčikový pyranometr Kipp&Zonen CM11 x český výrobce (segmentový pyranometr)





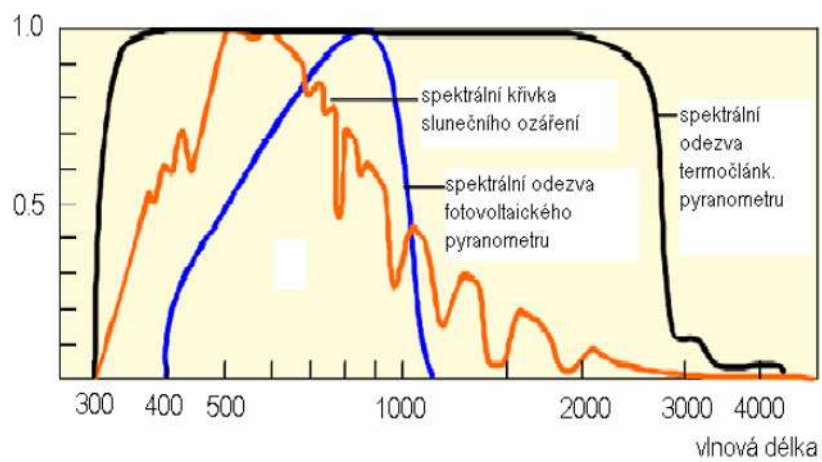
Fotovoltaická čidla

9/64



Fotovoltaická čidla: citlivost na spektrum

10/64

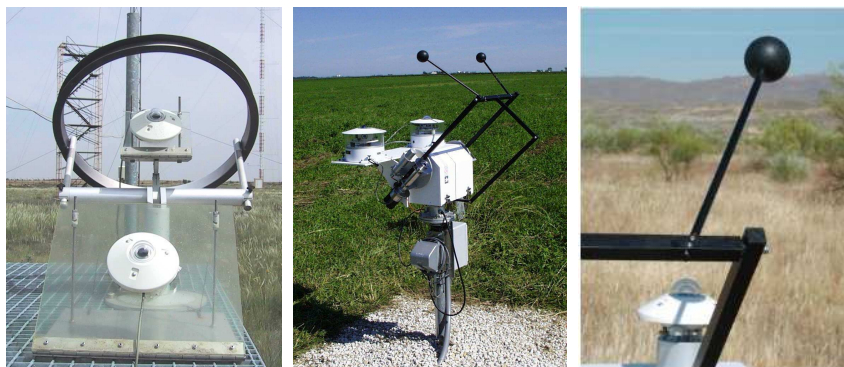




Měření difúzního slunečního ozáření

11/64

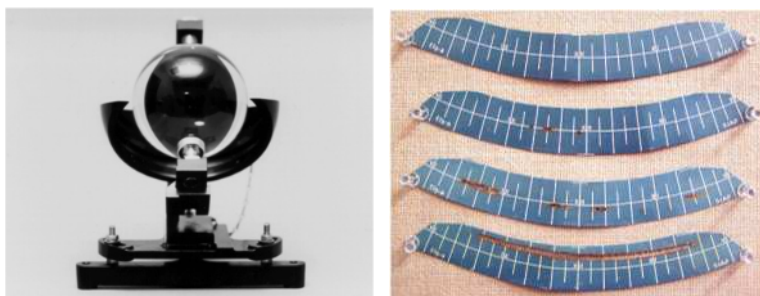
- **pyranometry se stínícím prvem** (stínění přímé složky)
 - stínící prstenec – nastavování cca 1 x 14 dní, při změně deklinace
 - stínící terčík – sledování polohy Slunce, trackovací systém



Měření doby trvání slunečního svitu

12/64

- **slunoměr** (Campbell-Stokesův heliograf)
 - skleněná koule 10 cm se chová jako čočka, soustředění slunečních paprsků
 - pokud je přímá složka vyšší než prahová hodnota, vypaluje se stopa na záznamovém heliogramu, **délka vypálené stopy = doba trvání svitu**



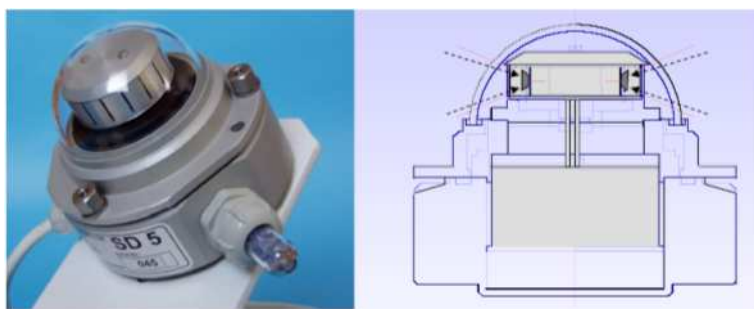


Měření doby trvání slunečního svitu

13/64

- **elektronické typy**

štěrbinové s bimetalickými pásky, štěrbinové s fotodiodami
štěrbinou proniká přímé záření a působí na čidlo



Měření albeda

14/64

- **albedometr (dvojpyranometr)**

horní pyranometr přijímá sluneční ozáření dopadající na daný povrch

dolní pyranometr je natočen čelem vůči povrchu a přijímá pouze z něj odražené záření





15/64

Zdroje údajů o slunečním záření



16/64

Zdroje údajů o slunečním záření

- **PVGIS** – Photovoltaic Geographical Information System
aplikace Joint Research Centre EC, původně pouze pro FV
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>
- **Meteonorm** – aplikace společnosti Meteotest
komplexní meteorologická reference s katalogem meteorologických
údajů, <http://www.meteonorm.com>
- **ČHMÚ** – Český hydrometeorologický ústav, <http://www.chmu.cz>
klimatická data – hodinová pro reálné změřené roky
- **Tabulky** – teoretický výpočet pro typické oblasti, korekce poměrnou
dobou slunečního svitu (B. Šourek)



PV GIS - vstupy

17/64

- **model terénu**

digitální model U.S. Geological Survey, Shuttle Radar Topography Mission (nadmořská výška, profil terénu)

- **klimatické údaje**

satelitní data

566 evropských pozemních meteorologických stanic

reálné změřené klimatické údaje - úhrny



PV GIS - výstupy

18/64

- **měsíční i hodinové údaje**

denní dávka slunečního ozáření na zadanou plochu

venkovní teplota

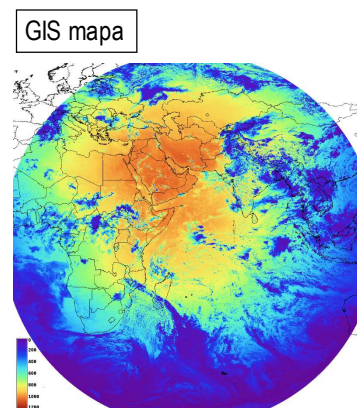
teplota v době slunečního svitu

- **na základě vlastností terénu**

nadmořská výška

stínění reliéfem krajiny

- **v rozlišení 1 km²**





PV GIS - postup

19/64

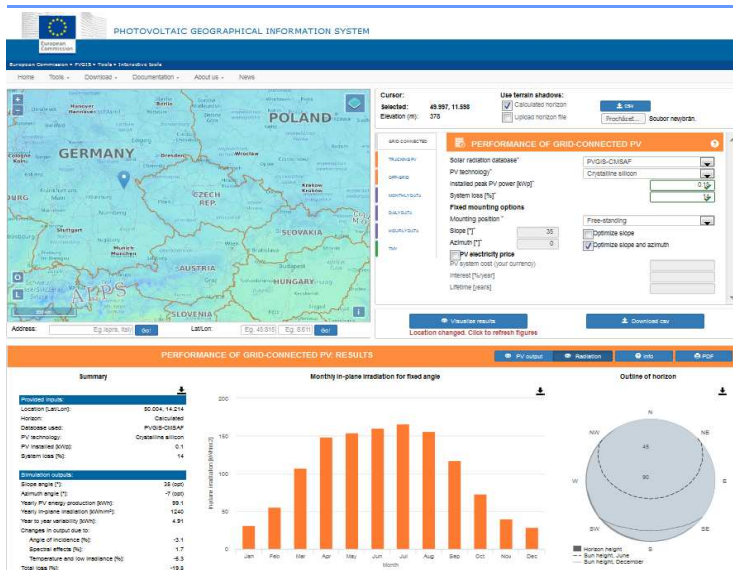
- **teoretický výpočet** slunečního ozáření pro **jasnou oblohu** na **vodorovnou plochu** pro nadmořskou výšku a danou atmosféru
- **výpočet** celkového slunečního ozáření na vodorovnou rovinu pro **reálnou oblačnost** na **vodorovnou plochu** na základě **indexu jasné oblohy** (poměr reálná / jasná obloha; měsíční průměry z meteostanic, **interpolace do rastru GIS**)
- **výpočet** celkového slunečního ozáření na obecnou rovinu pro **reálnou oblačnost** na **obecnou plochu**

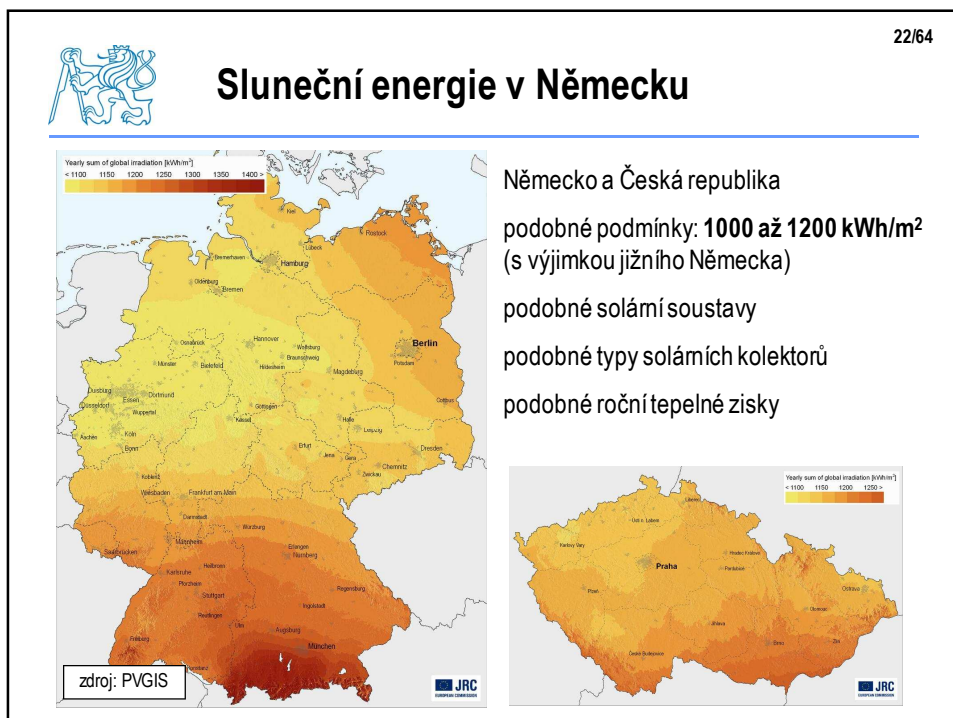
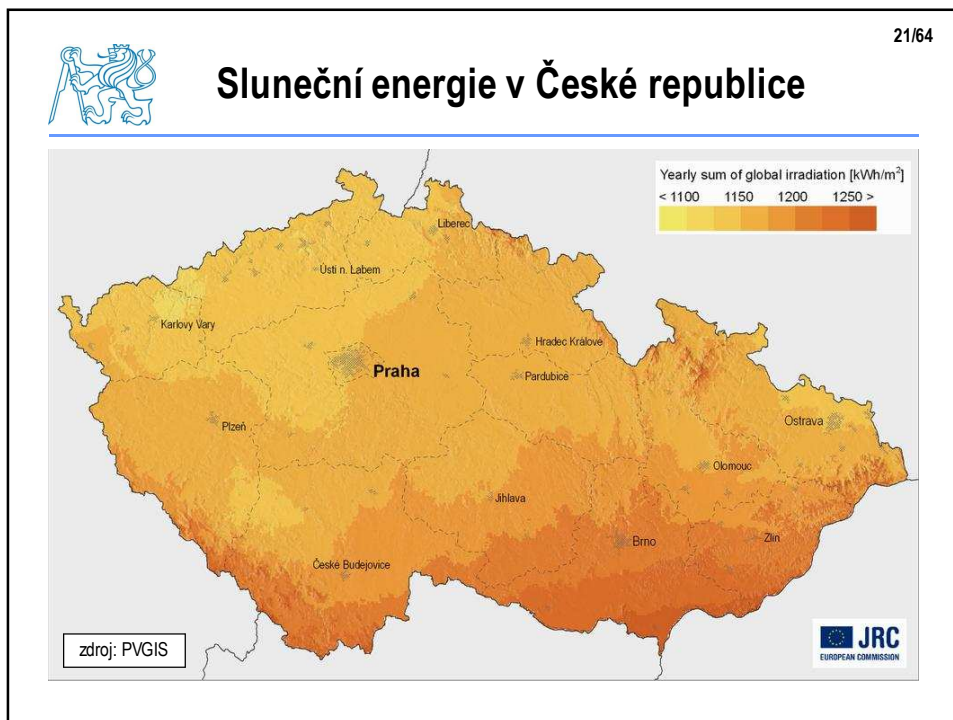
rozpočet celkové dávky na přímou a difúzní, přepočítání na obecnou plochu, odrazivost terénu 15 %

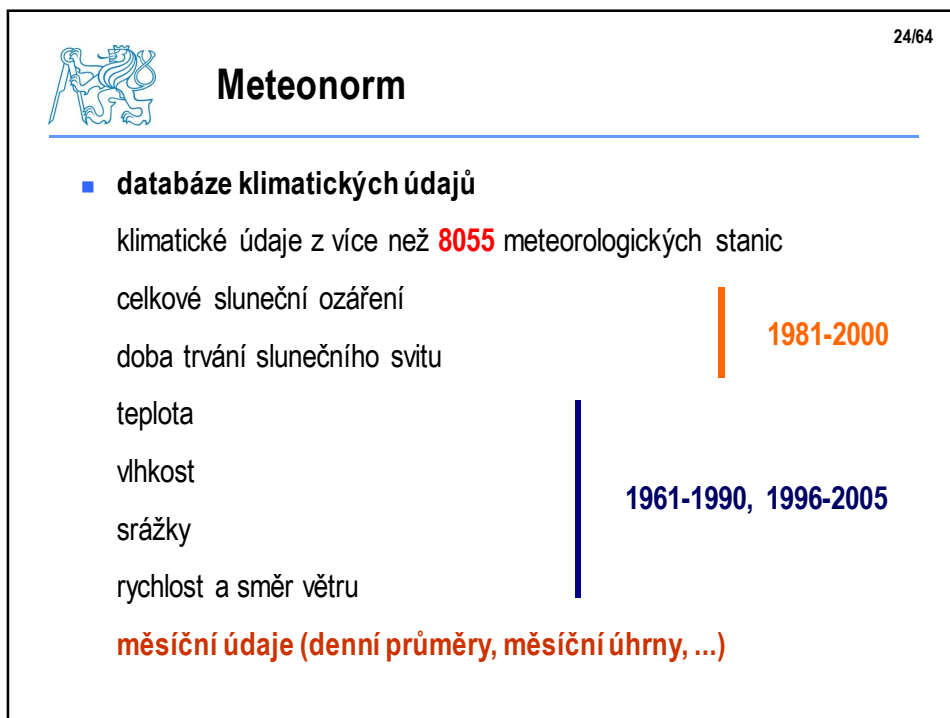
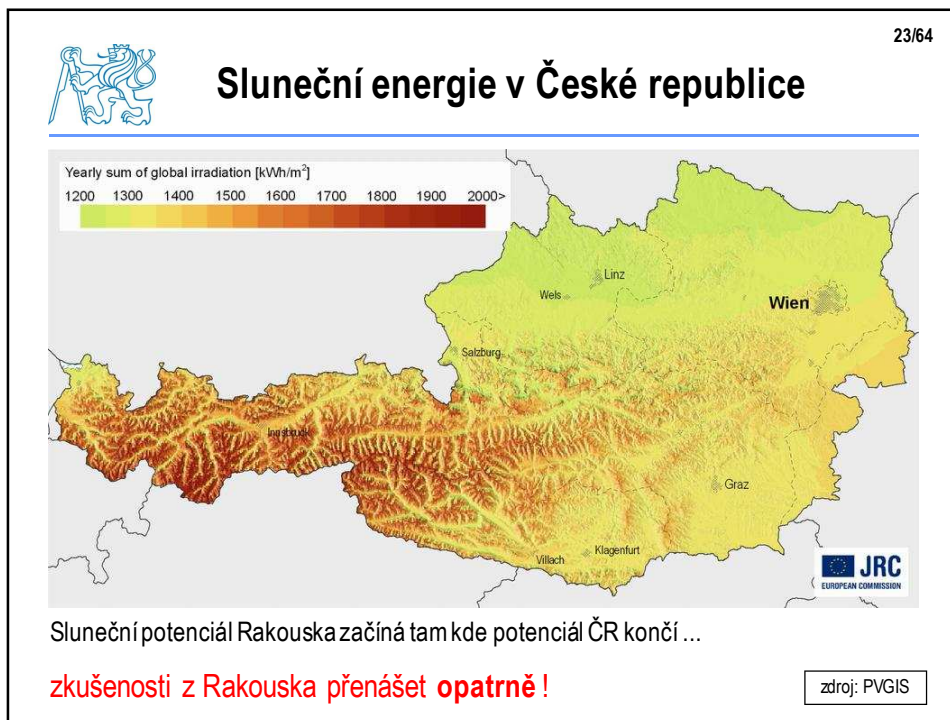


PV GIS

20/64









25/64

Meteonorm

- **pozemní meteorologické stanice**

ČR: využívá 32 pozemních stanic, 8 stanic s měřením slunečního záření

Evropa: 1551 stanic, z toho 361 sluneční záření

- **satelitní údaje Heliosat II**

území s hustotou stanic (> 300 km): používají se pouze **satelitní údaje**

území s hustotou stanic (> 50 km): **interpolace pozemních a satelitních údajů**



26/64

Meteonorm - metoda

- **prostorová interpolace** měsíčních průměrů slunečního ozáření na *vodorovnou rovinu* podle typu klimatické oblasti, nadmořské výšky, topografie, aj.
- **generátor hodinových klimatických údajů**
výpočet hodinových údajů celkového slunečního ozáření na *vodorovnou rovinu* s měsíčními průměry = desetiletým průměrům
- **rozpočet** celkového slunečního ozáření na přímou a difúzní složku pro *vodorovnou rovinu*
- **výpočet** celkového slunečního ozáření *na obecnou plochu*, zohlednění zadaného místního profilu obzoru



Meteonorm - výstupy

27/64

- hodinové klimatické údaje

pro zadané podmínky

30 formátů pro různé simulační programy

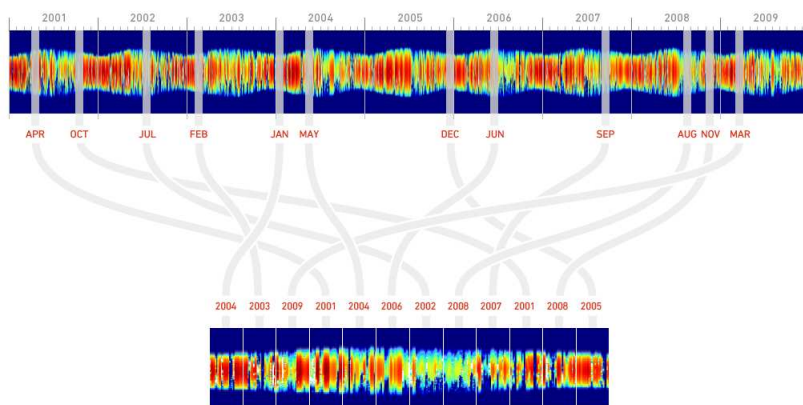
TMY, TRY, DRY

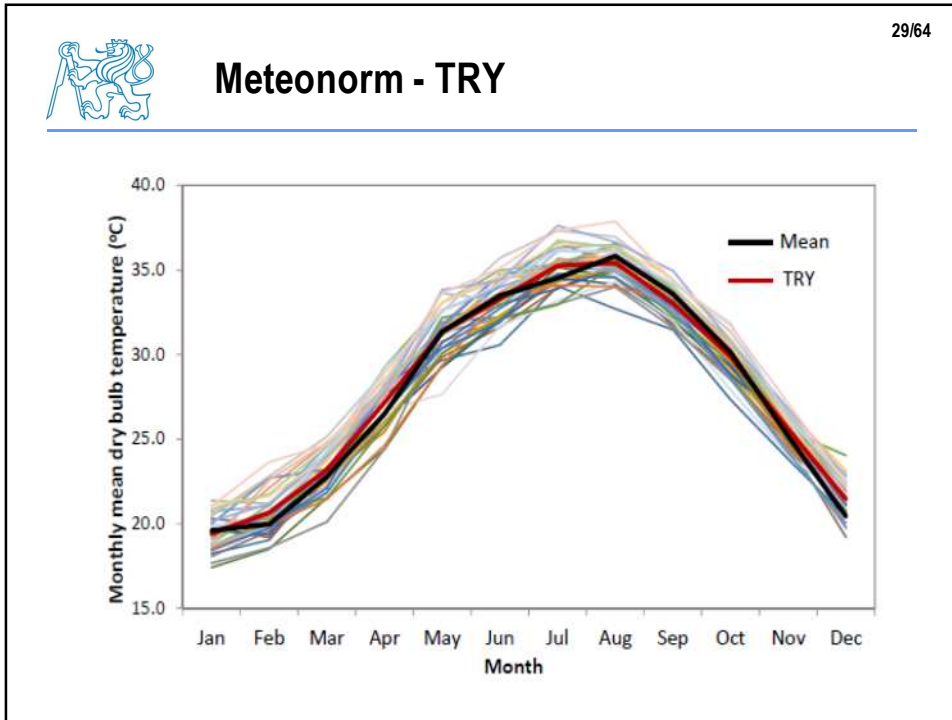
programy TRNSYS, DOE, T-SOL,
POLYSUN



Meteonorm - TMY

28/64





Meteonorm - výstupy

30/64

Meteonorm 7 V73.0

File Locations Tools Help

- Location selection: Santiago
- Modifications & data import
- Calculation settings: 1991-2010
- Output formats: Standard
- Results and export

Results and export

Santiago -33.4°N / -70.8°E, 474 m

Weather station: [Status icons]

Santiago

Daily global radiation
 Daily temperature
 Data table
 Radiation
 Temperature
 Precipitation
 Sunshine duration

Radiation [kWh/m²]

Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec

Legend: Diffuse radiation [kWh/m²] (orange), Global radiation [kWh/m²] (yellow)

Result informations

Uncertainty of yearly values: Gh = 4%, Bn = 8%, Gk = 4%, Ta = 0.3 °C
 Trend of Gh / decade = Variability of Gh / year 3.4%
 Radiation interpolation locations = (Share of satellite data: 0%)
 Temperature interpolation locations = -

Buttons: Save all results to disk, Open output directory, Back



Meteonorm – možné výstupní formáty

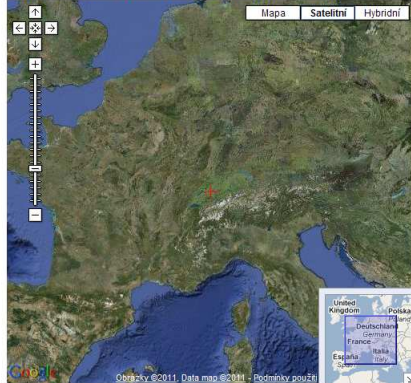


Meteonorm – webová aplikace

Climate data worldwide

Get an impression of METEONORM's capabilities! With a few clicks you can create climate diagrams for any site in the world.

Please center the desired site on the map...



... or select site

either by address, eg. "Hamburg, Germany":

or by Geographical coordinates:

... and get the result!

Geographical:
 Lat: 46.953 N Lon: 7.423 E

UTM:
 x: 380004 y: 5201148
 UTM zone: 32

Swiss Grid:
 x: 596810 y: 200213

Altitude: 355 masl

[show climate data](#)

Hint: To navigate, either use the map tools, or directly use the mouse (doubleclick = center and zoom, drag = move map).





33/64

Další zdroje údajů o slunečním záření

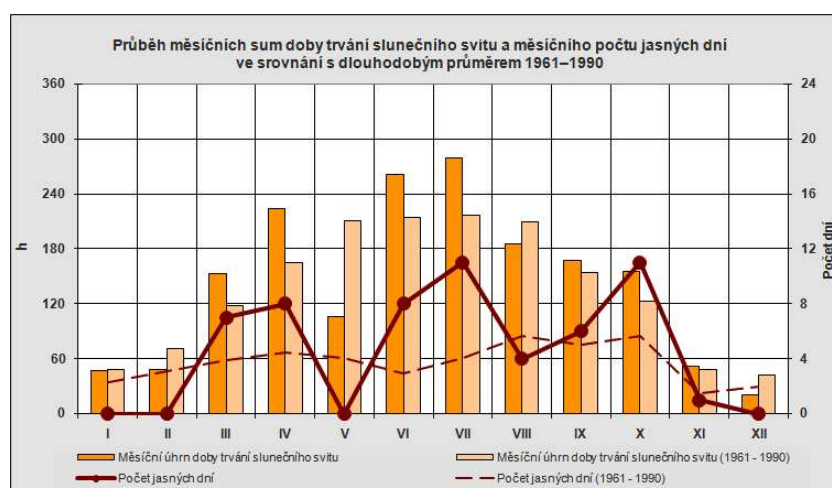
- **ČHMÚ** – Český hydrometeorologický ústav , <http://www.chmu.cz>
spravuje meteorologické stanice
- **poskytuje**
klimatická data – úhrny i hodinová pro reálné změřené roky

referenční klimatický rok (RKR) – hodinová data pro statisticky
průměrný rok v souladu s EN ISO 15927-4



34/64

ČHMÚ


<http://www.chmi.cz>



35/64

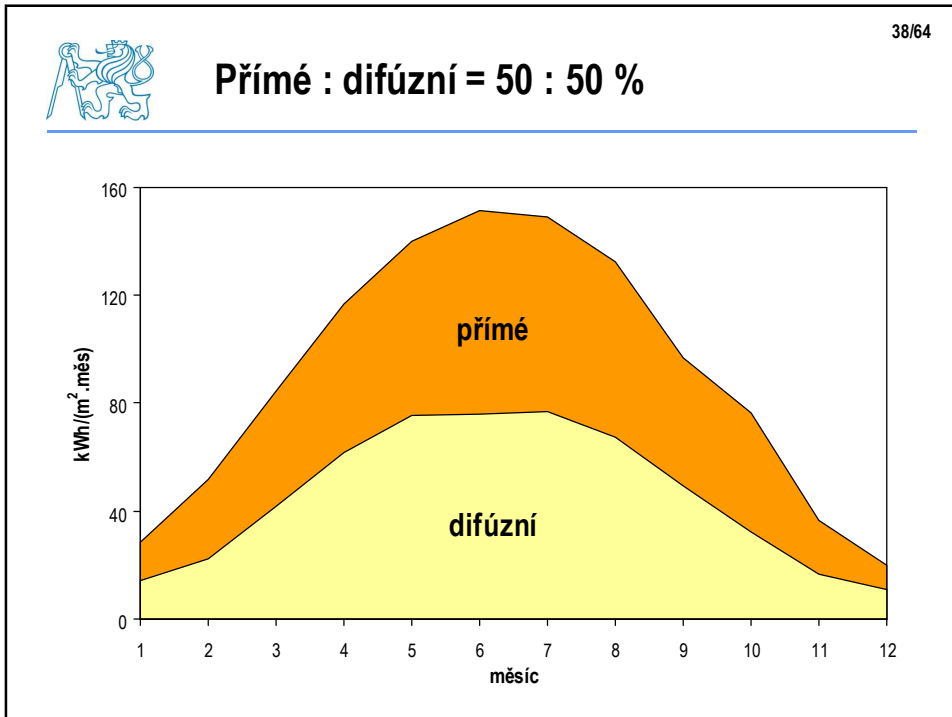
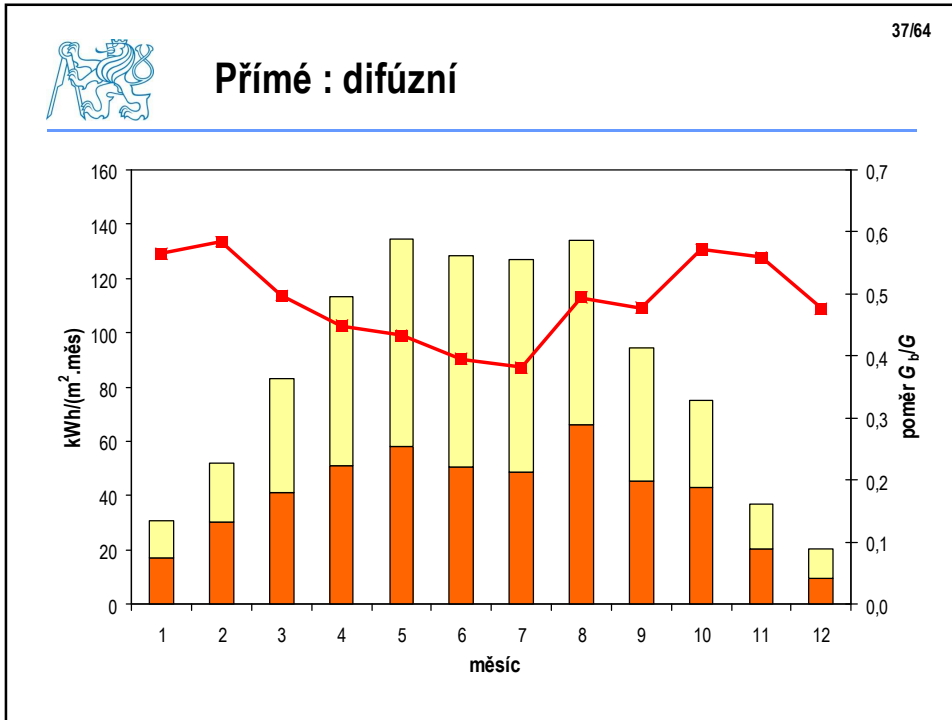
Referenční klimatický rok (RKR)

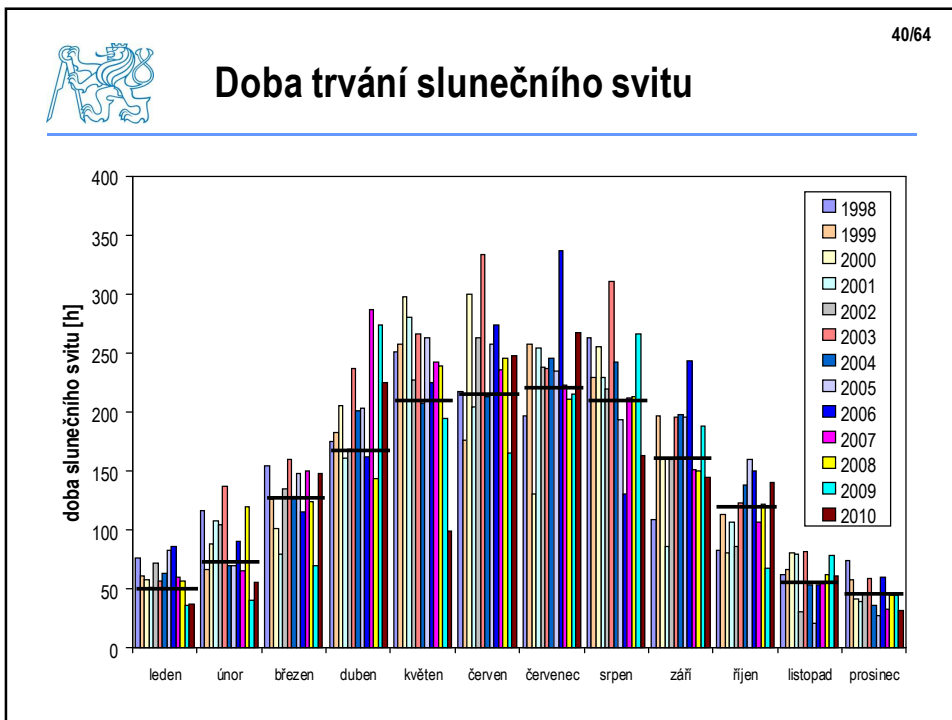
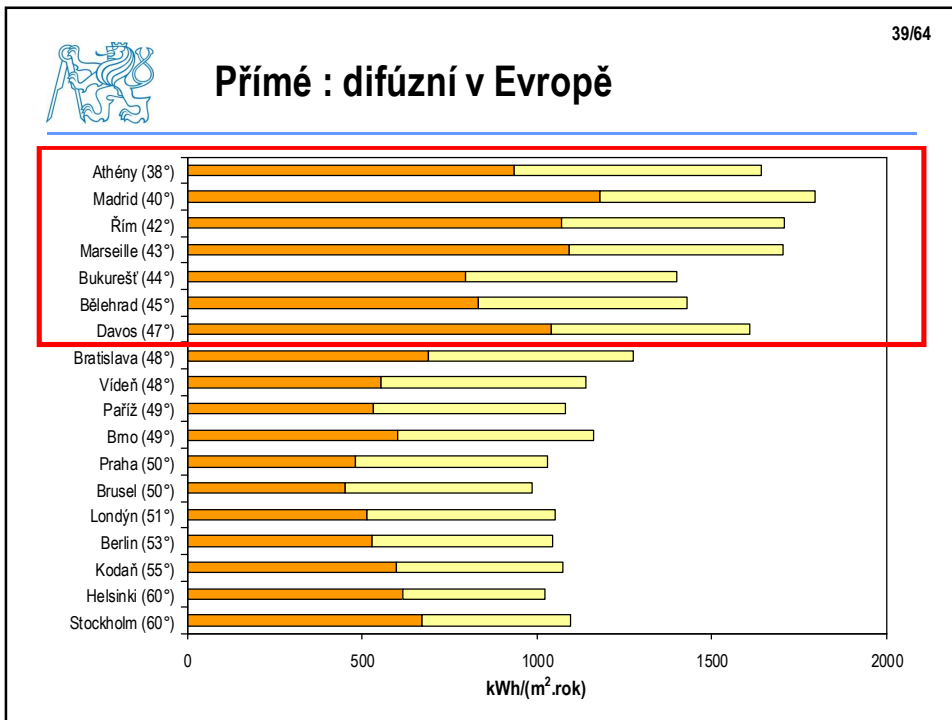
- typický rok pro danou souřadnici (GPS)
- statisticky zpracovaný podle ČSN EN ISO 15927-4
- dostupné hodinové údaje, 1500 Kč/lokality
- www.chmu.cz



36/64

Statistiky



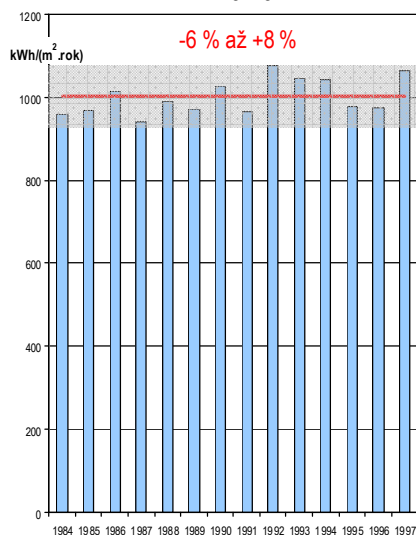




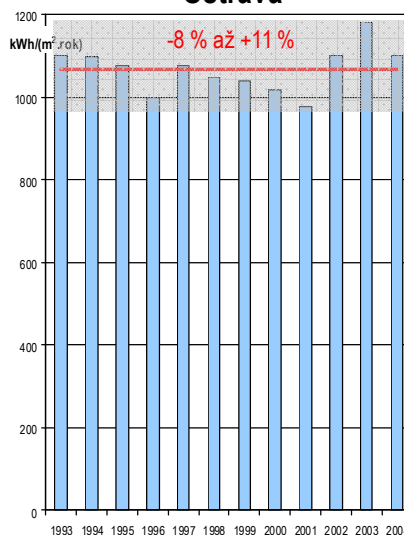
41/64

Jak se mění meziročně dopadá energie?

Praha



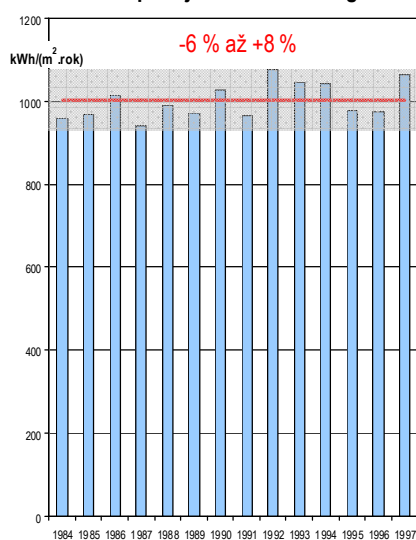
Ostrava



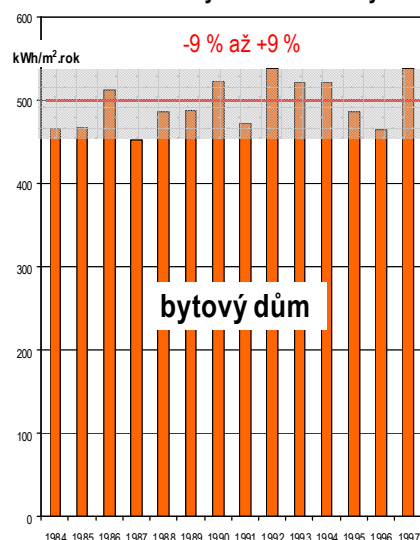
42/64

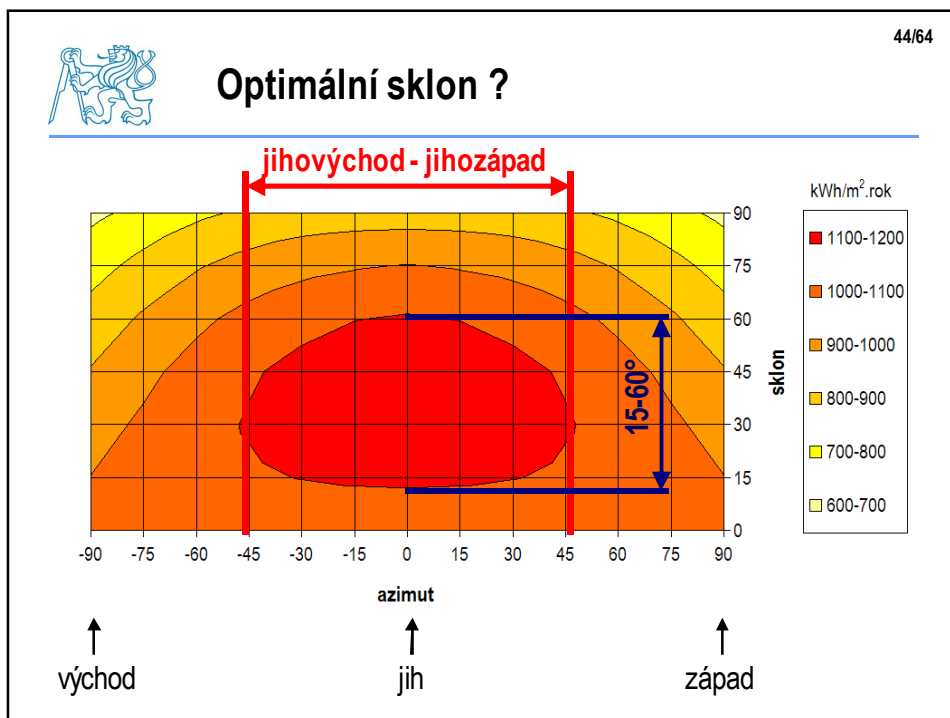
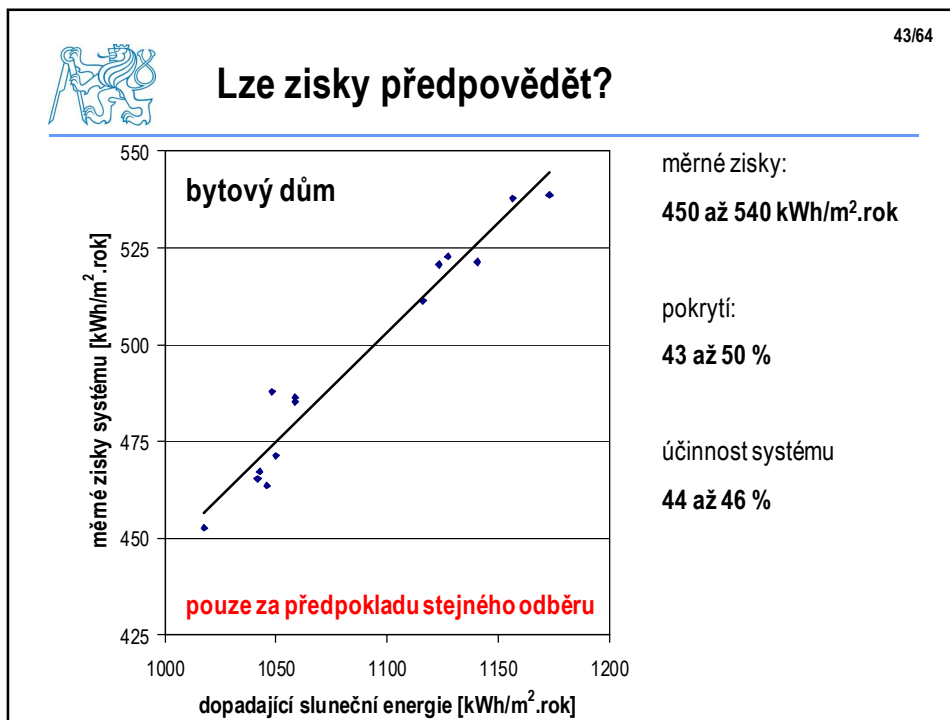
Mění se i zisky solární soustavy?

dopadající sluneční energie



měrné zisky solární soustavy



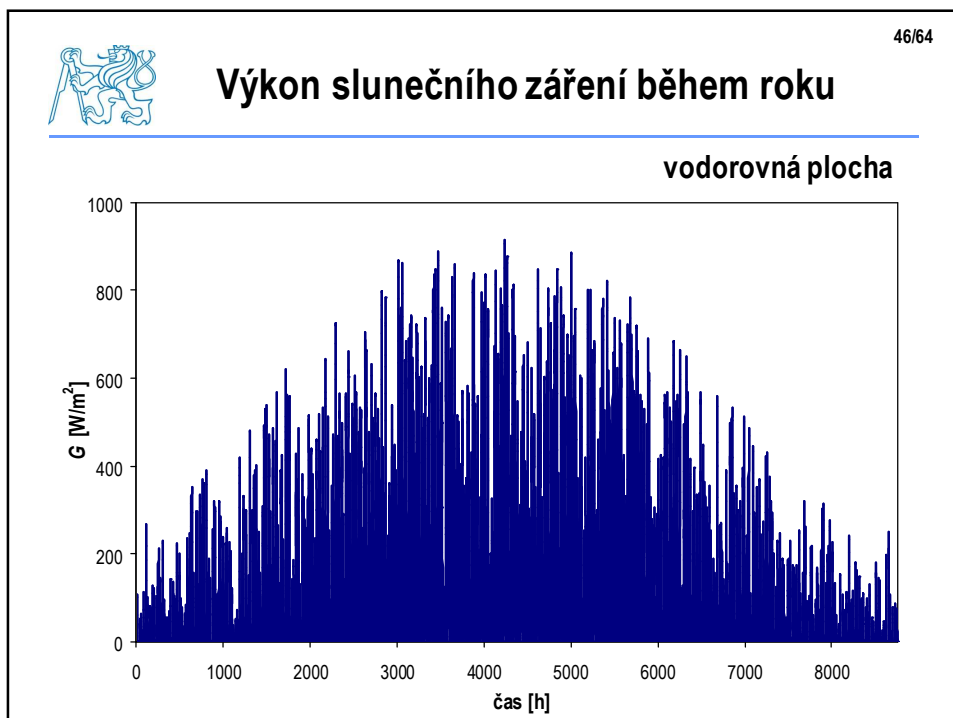


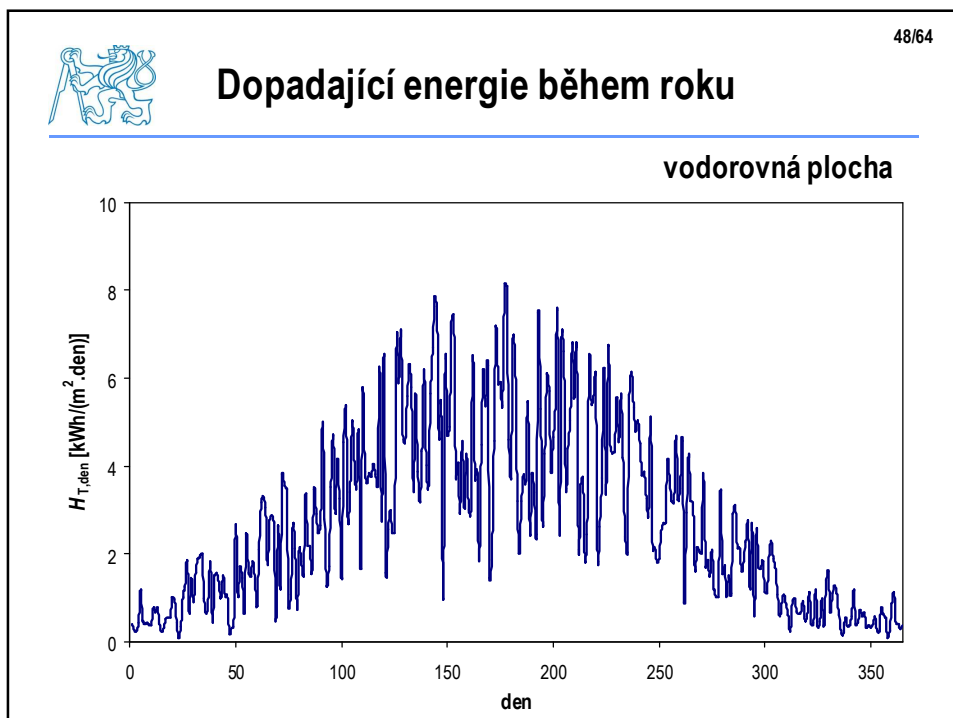
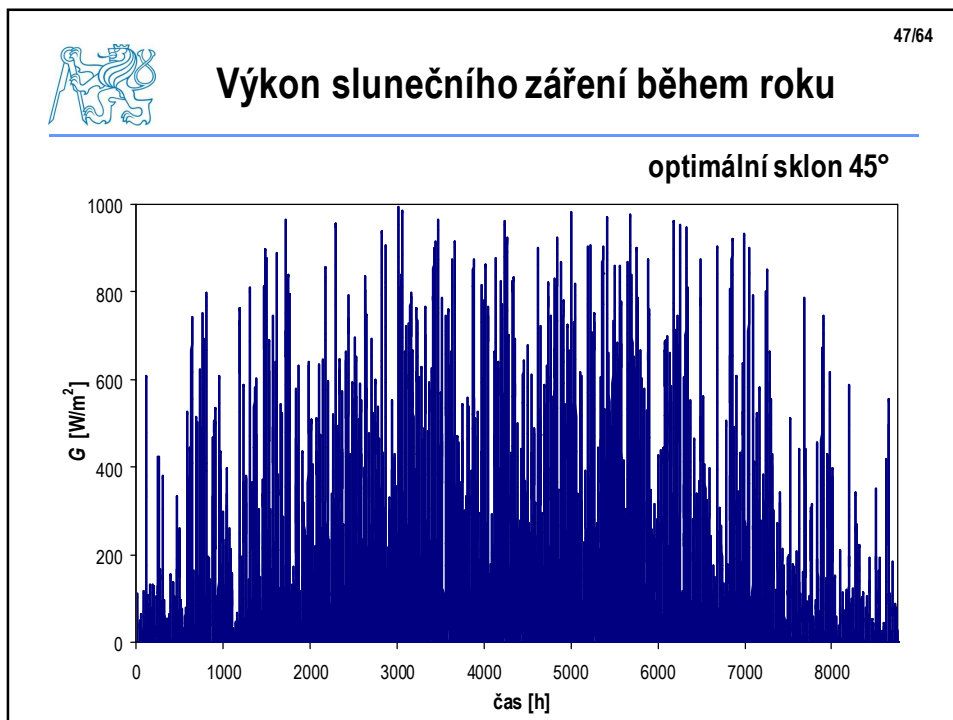
45/64

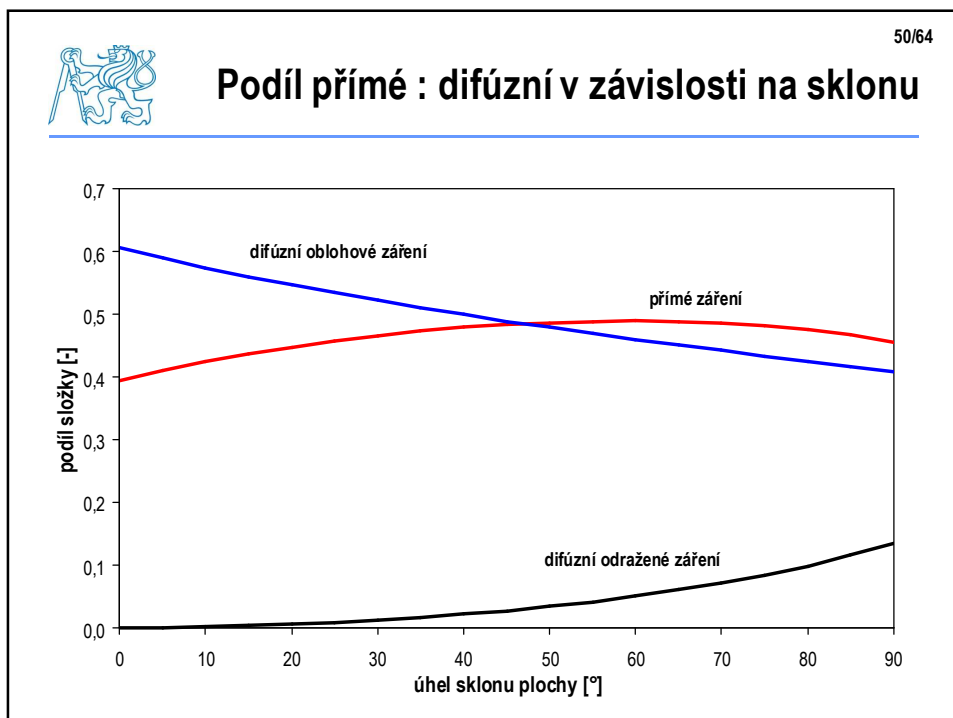
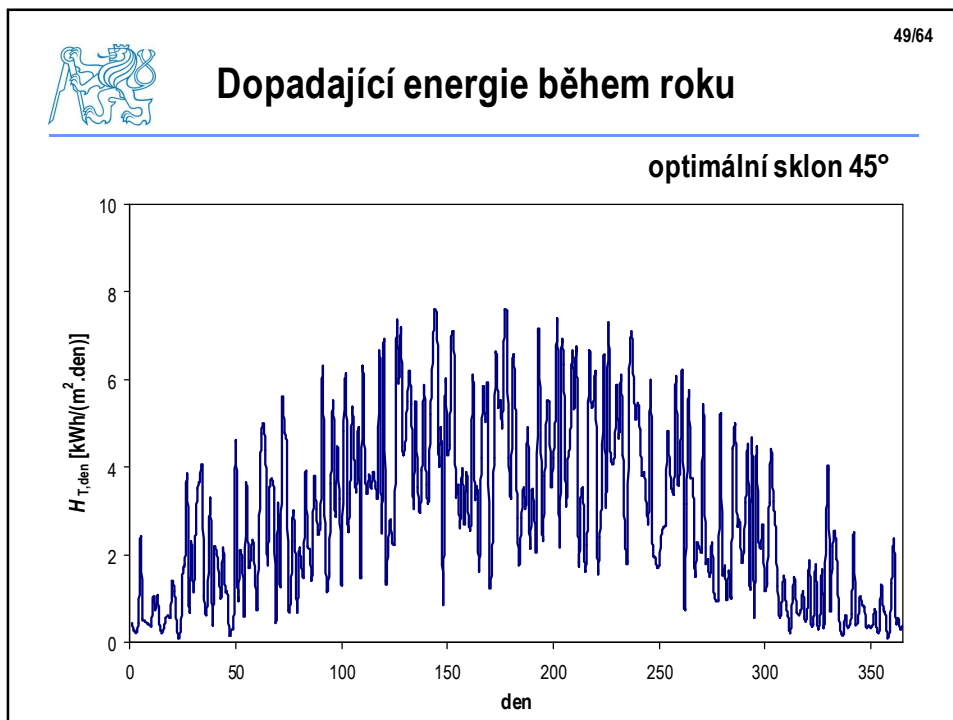


Různý optimální sklon pro solární zařízení

<p>fotovoltaika 35°</p> <p>produkce el. energie</p> <p>produkce do veřejné sítě bez ohledu na místní odběr</p> <p>bez nutnosti akumulovat</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>maximalizace zisku</p>	?	<p>fototermika 45°</p> <p>produkce tepla</p> <p>produkce pro místní spotřebu (odběr)</p> <p>nutnost akumulace</p> <p>omezený přenos solárního tepla sítěmi</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>optimalizace zisku</p>
--	---	---









51/64

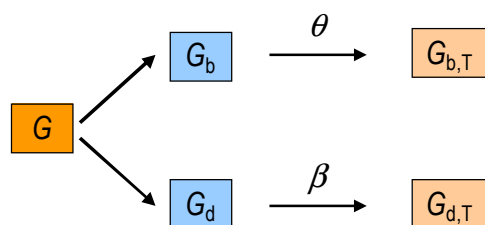
Výpočty



52/64

Praktický výpočet slunečního ozáření

- naměřené hodnoty celkového slunečního ozáření na vodorovnou rovinu $G = (G_b + G_d)$
- potřeba přepočtu na jiný sklon a orientaci $G_T = G_{b,T} + G_{d,T} (+ G_{r,T})$



rozpočet

přepočet

→ různé modely:
- izotropický
- anizotropické



53/64

Rozpočet slunečního ozáření

- známe:
 - **naměřená** hodnota celkového slunečního ozáření na vodorovnou rovinu G
 - teoretická hodnota celkového slunečního ozáření na stejnou rovinu mimo atmosféru G_o

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \sin h$$

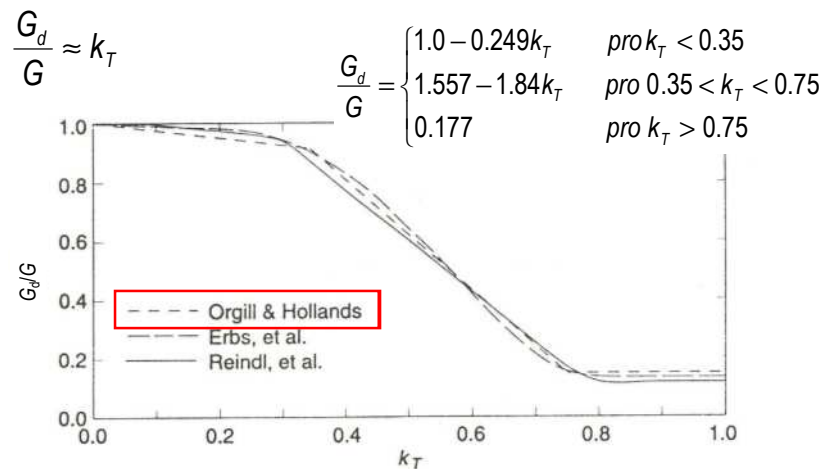
index čistoty atmosféry (analogie propustnosti) $k_T = \frac{G}{G_o}$



54/64

Rozpočet slunečního ozáření

- existuje **korelace** mezi indexem čistoty atmosféry a podílem difúzního záření z celkového na vodorovnou rovinu

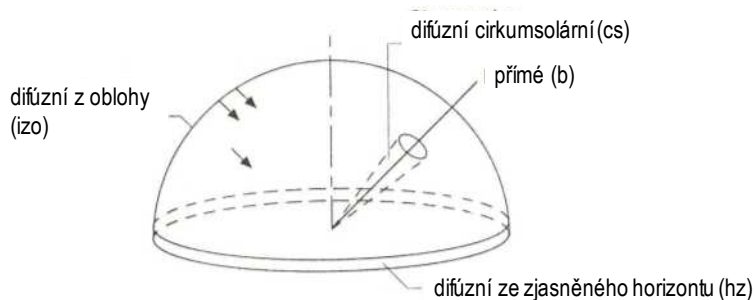




55/64

Přepočet slunečního ozáření

- známe:
 - **rozpočtené** hodnoty celkového slunečního ozáření na vodorovnou rovinu $G = G_b + G_d$
 - výpočet na obecně skloněnou a orientovanou rovinu



56/64

Složky slunečního ozáření (podrobně)

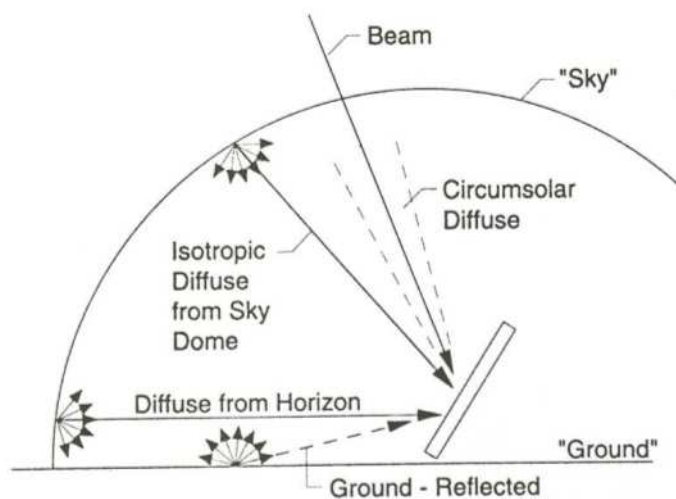
- **přímá** – vychází z geometrie slunečního záření
- **difúzní složky:**
 - **izotropická** – rovnoměrně z celé oblohy (polokoule)
 - **cirkumsolární** (v okolí Slunce) – rozptýl záření okolo „paprsků“ procházejících atmosférou, sice uvažováno jako difúzní, avšak určitá směrová závislost
 - **zjasnění horizontu** – za jasné oblohy je pás nad horizontem jasnější než zbytek oblohy, vlivem tlustší vrstvy ... větší rozptýl

$$G_T = G_{bT} + G_{dT,izo} + \overset{\text{anizotropické}}{G_{dT,cs} + G_{dT,hz}} + G_{rT}$$



57/64

Složky slunečního ozáření (podrobně)



58/64

Přímá složka

$$\left. \begin{aligned} G_{bT} &= G_{bn} \cos \theta \\ G_b &= G_{bn} \cos \theta_z \end{aligned} \right\} R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cos \theta}{G_{bn} \cos \theta_z}$$

geometrický faktor $R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$

přepočítání mezi vodorovnou a obecnou rovinou $G_{bT} = G_b R_b$



59/64

Difúzní složka – modely difúzní oblohy

- **izotropická** obloha – difúzní i odražené je **pouze** izotropické
- **anizotropická** obloha – kromě izotropického další zdroje difúzního
 - **Hay-Davies**: cirkumsolární (ANO), zjasnění horizontu (NE)
 - **Hay-Davies-Klutcher-Reindl** (HDKR): model HD + korekce na zjasnění horizontu
 - **Perez**: nejsložitější, velmi detailní analýza všech 3 složek

všechny uvedené modely výpočtu difúzního ozáření se objevují v simulačních programech jako použitelné varianty (ESP-r, TRNSYS, aj.)



60/64

Izotropický model

- sluneční ozáření ve třech složkách: přímá, izotropická difúzní (rovnoměrně z celé oblohy) a difúzně odražená od terénu

$$G_T = G_b R_b + G_d \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + G \rho_g \left[\frac{1 - \cos \beta}{2} \right]$$

směrový činitel plochy
kolektoru k obloze

směrový činitel plochy
kolektoru k zemi



61/64

Anizotropický model Hay-Davies

- relativně jednoduché rozšíření izotropického
- zavádí **index anizotropie** A_i : jaká část difúzního je cirkumsolární

$$A_i = \frac{G_b}{G_o} = \frac{G_{bn} \sinh}{G_{on} \sinh} = \frac{G_{bn}}{G_{on}}$$

- cirkumsolární je směrově závislé

$$G_T = (G_b + G_d A_i) R_b + G_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

jasno: A_i je vysoký, většina difúzního je cirkumsolární

zataženo bez přímého záření: A_i je nízký, přechází do izotropického



62/64

Anizotropický model HDKR

- modifikace Hay-Daviesova
- zavádí **korekci na zjasnění horizontu**

$$\begin{aligned} G_T &= G_b R_b + G_{dT} + G \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \\ &= (G_b + G_d A_i) R_b + G_d \left\{ (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{3} \right) \right] \right\} + G \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \end{aligned}$$

modulační činitel $f = \sqrt{\frac{G_b}{G}}$



Anizotropický model Perezův

63/64

- odlišný od předchozích

$$G_{dT} = G_d \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad \frac{a}{b} = R_b$$

po většinu dne

F_1 součinitel cirkumsolarity (viz dále)

F_2 součinitel zjasnění horizontu (viz dále)

a člen zohledňující dopad kužele cirkumsolárního záření na skloněnou plochu

$$a = \max [0, \cos \theta]$$

b člen zohledňující dopad kužele cirkumsolárního záření na vodorovnou rovinu

$$b = \max [\cos 85, \cos \theta_z]$$



Anizotropický model Perezův

64/64

$$F_1 = \max \left[0, \left(f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right) \right]$$

jas $\Delta = AM \frac{G_d}{G_{on}}$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23}$$

čistota $\varepsilon = \frac{G_d + G_{bn}}{G_d} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3$
 $\varepsilon = \frac{G_d + G_{bn}}{G_d} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3$

Range of ε	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1.000–1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065–1.230	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.230–1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500–1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	0.014
1.950–2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800–4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.500–6.200	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
6.200– ∞	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

*From Perez et al. (1990).