



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

# Czyste energie

Wykład 2

## Wprowadzenie do energetyki słonecznej i fotowoltaiki

dr inż. Janusz Teneta

C-3 pok. 8 (parter), e-mail: [romus@agh.edu.pl](mailto:romus@agh.edu.pl)

Wydział EAIiIB  
Katedra Automatyki i Robotyki

AGH Kraków 2017

# Energia słoneczna prąźródłem innych źródeł energii



## BIOMASA



## BIOGAZ ROLNICZY



## ROPA I GAZ



## HYDROENERGIA



## WĘGIEL



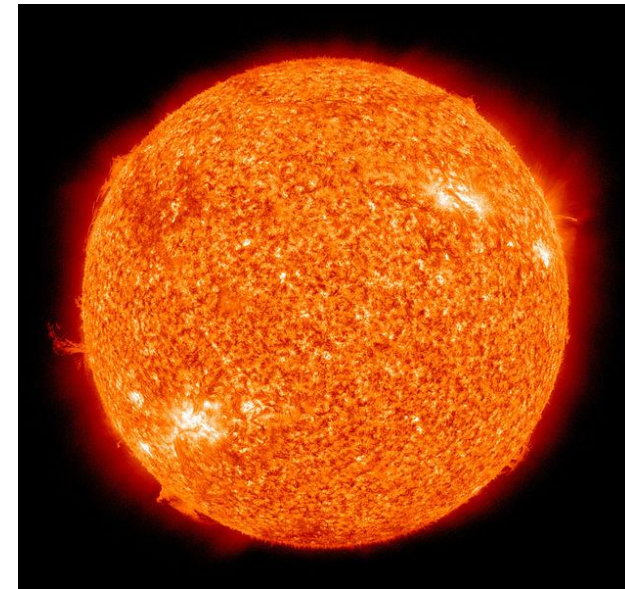
## WIATR



# Słońce

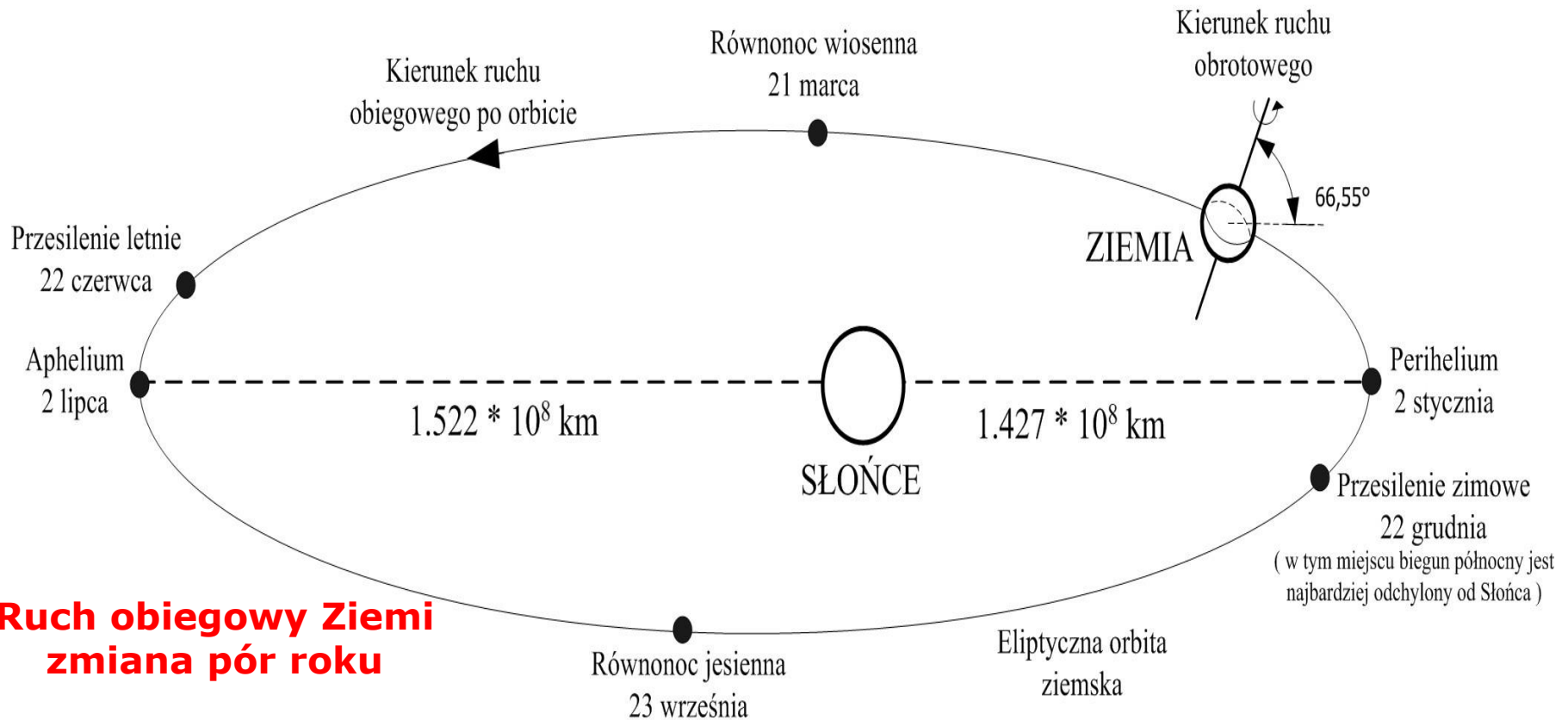
- Centralna gwiazda Układu Słonecznego, najjaśniejszy obiekt na niebie i główne źródło energii docierającej do Ziemi
- Kula zjonizowanego gazu o masie około  $1,9891 \times 10^{30}$  kg (333 950 mas Ziemi)
- Średnica  $1,392 \times 10^6$  km (109 średnic Ziemi)
- Szacowana temperatura jądra ok.  $1,36 \times 10^7$  K
- Efektywna temperatura na powierzchni 5780 K
- Wiek Słońca szacowany na 4 600 000 000 lat
- Przemiany jądrowe: fuzja 4 atomów wodoru w jedno jądro helu + emisja energii 26,732 MeV (98% zabierają fotony, 2% neutrino)
- Moc promieniowania  $3,827 \times 10^{26}$  W

źródło: [www.wikipedia.pl](http://www.wikipedia.pl)



# Geometria słoneczna

## Ruch obrotowy Ziemi dzień - noc



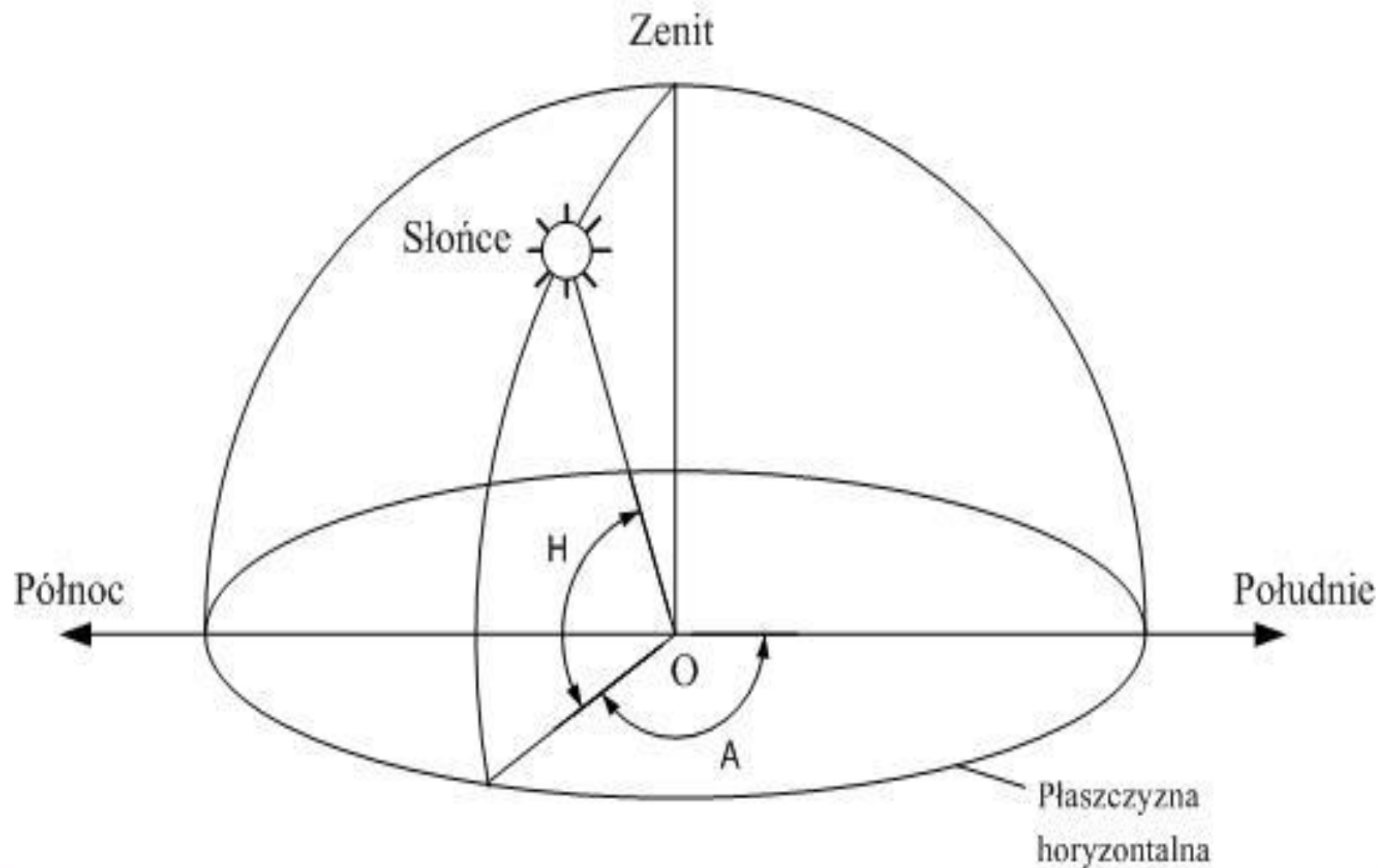
## Ruch obiegowy Ziemi zmiana pór roku

**Pory roku na półkulach północnej i południowej są przesunięte względem siebie o 6 miesięcy**

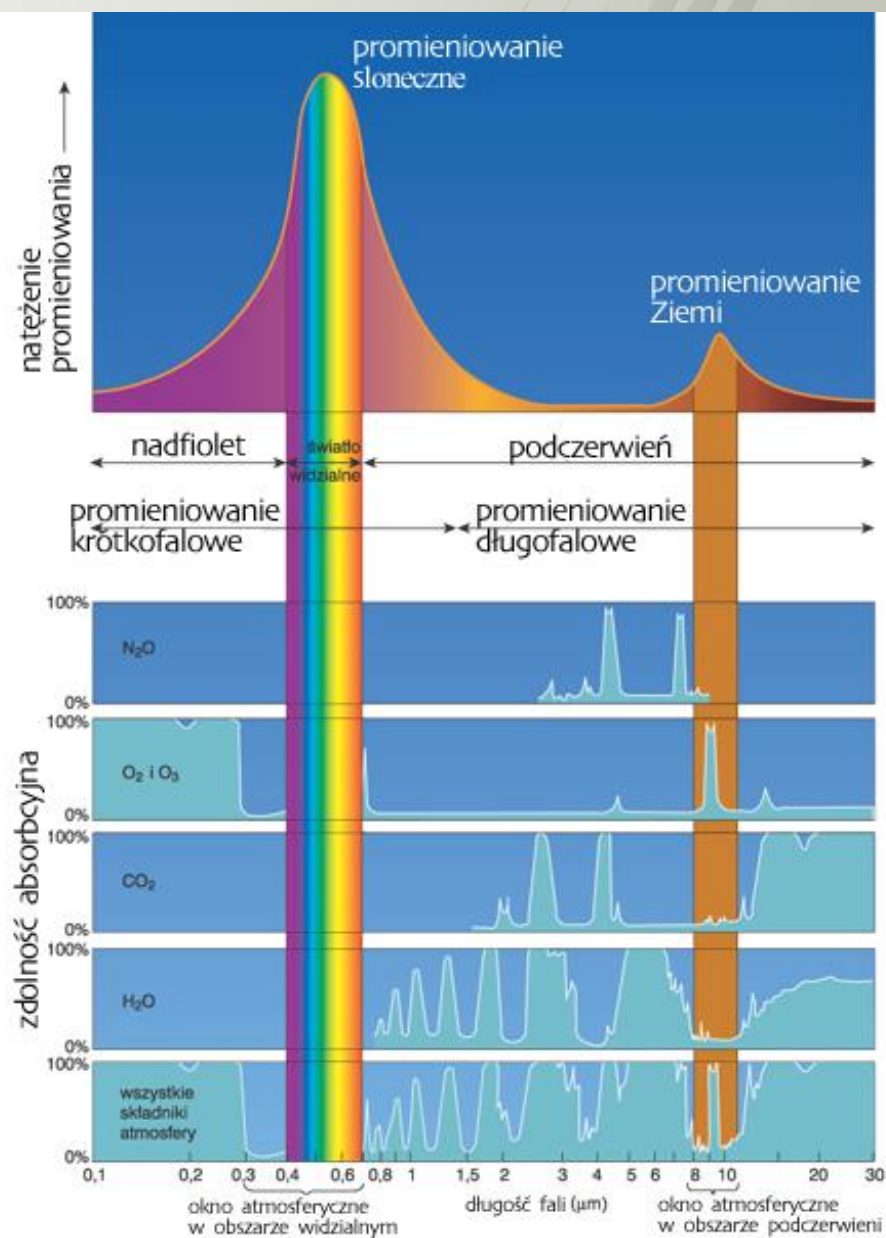
# Stała słoneczna

- Całkowita energia, jaką promieniowanie słoneczne przenosi w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca (1 j.a.) przed wejściem promieniowania do atmosfery (na wysokości ok. 100km nad powierzchnią Ziemi)
- Średnia wartość stałej słonecznej wynosi około 1366,1 W/m<sup>2</sup>
- Wartość stałej słonecznej podlega zmianom zgodnie z cyklem aktywności Słońca (cykl 11 lat, zmiana ok. 0,1%) oraz z powodu ruchu obrotowego Słońca (cykl 27 dni, zmiana ok. 0,2%)
- Rzeczywista wartość energii strumienia promieniowania słonecznego ponad ziemską atmosferą zmienia się w granicach 1,32-1,41 kW/m<sup>2</sup> w cyklu rocznym (ruch obiegowy Ziemi wokół Słońca).

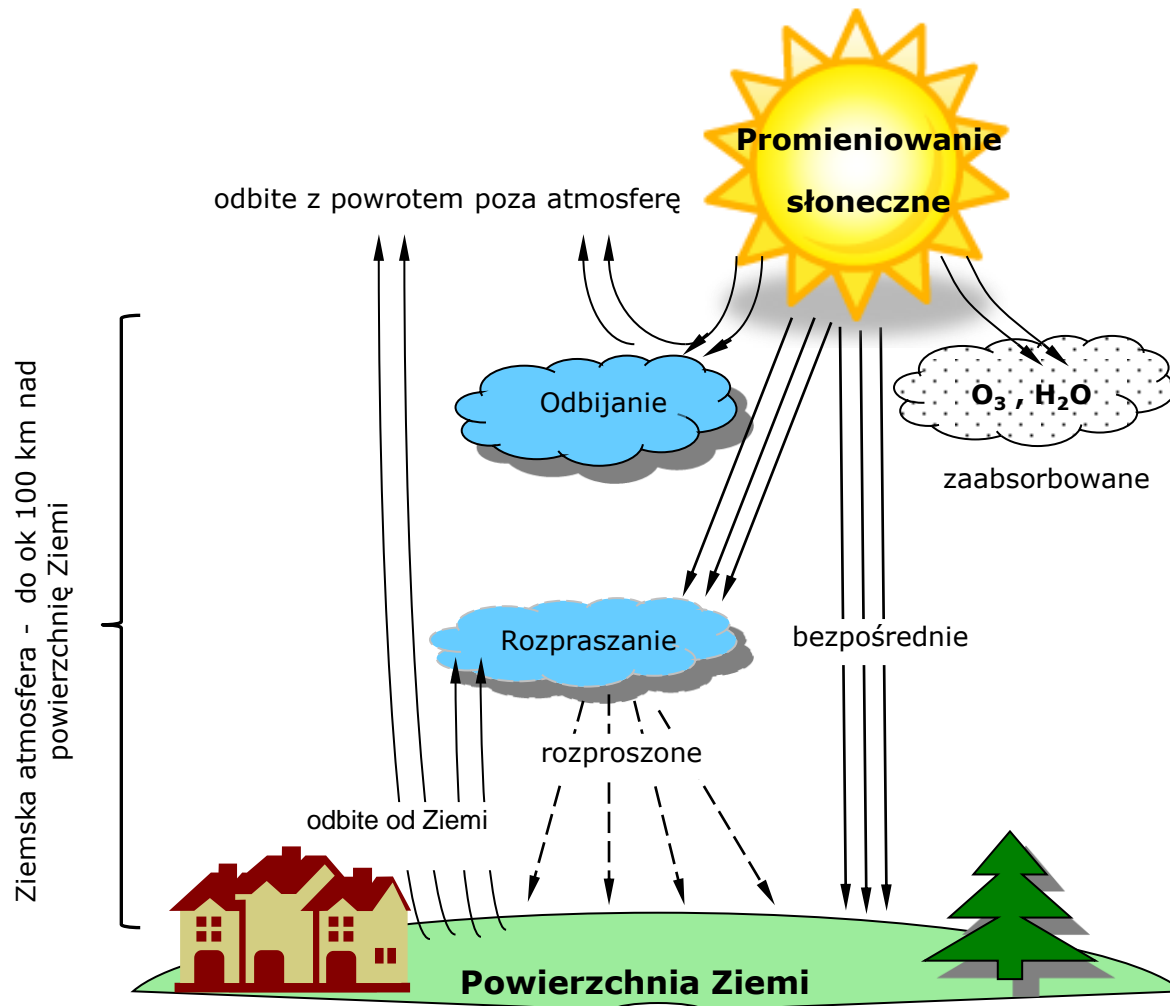
# Azymut i elewacja Słońca



# Widmo promieniowania słonecznego i zjawiska jego absorpcji w różnych składnikach ziemskiej atmosfery



# Zjawiska w ziemskiej atmosferze





# Struktura promieniowania słonecznego

- Bezpośrednie
- Rozproszone
- Odbite (współczynnik Albedo)
- Zaabsorbowane (emisja wtórna)

Źródło: [weather.uwaterloo.ca](http://weather.uwaterloo.ca)



# Droga promieni słonecznych przez atmosferę – współczynnik masy powietrza

AMm

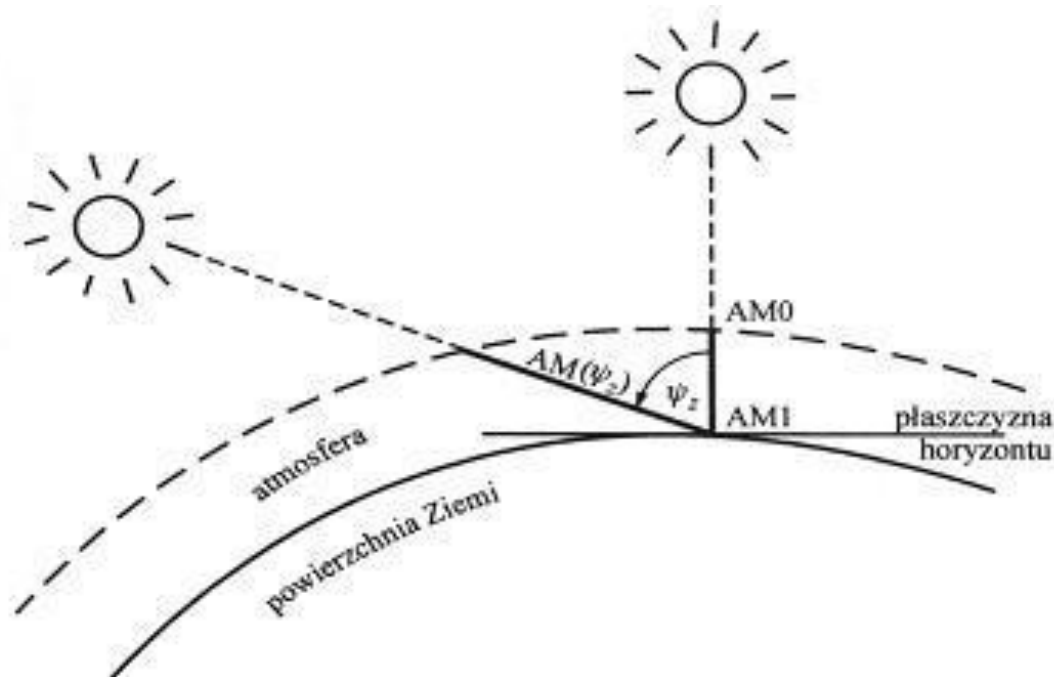
$$m = \frac{1}{\cos \psi} \quad \text{dla } \psi < 70^\circ$$

lub

$$m = \left[ \cos \psi + \frac{0,15}{(93,885 - \psi)^{1,253}} \right]^{-1} \frac{p}{p_0}$$

gdzie:  $p_0$  – 1013 hPa  
 $p$  – rzeczywiste ciśnienie atmosferyczne [hPa]

dla  $\psi < 89^\circ$



# Pomiary promieniowania słonecznego

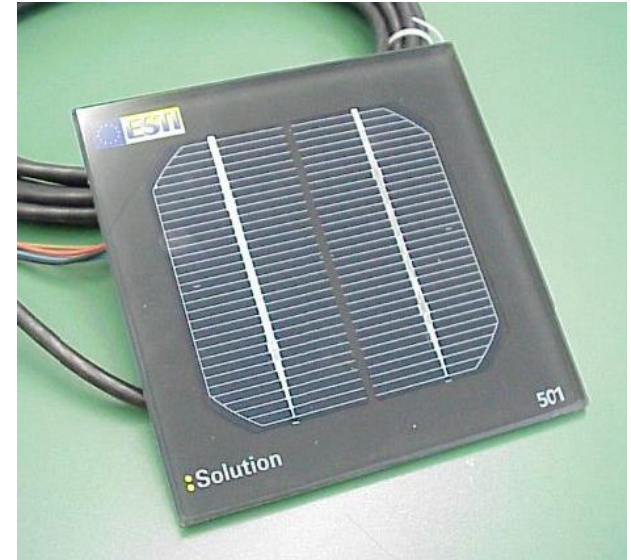
Pyranometr (solarymetr), przyrząd do pomiaru całkowitego promieniowania słonecznego (promieniowanie w atmosferze ziemskiej) w zakresie  $0,3-3 \mu\text{m}$ , padającego na poziomą płaszczyznę.



Główną częścią pyranometru jest czujnik w postaci termoelementu lub zespołu termoelementów (termostos), a pomiar polega na pomiarze powstającej w termoelemencie siły elektromotorycznej, proporcjonalnej do natężenia padającego promieniowania. Czujnik jest osłonięty ekranem (zwykle szklana czasza) zatrzymującym promieniowanie o długości fali większej od  $3 \mu\text{m}$  i chroniącym go od wpływu warunków zewnętrznych (wiatru, opadów).

# Ogniwo wzorcowe ESTI (type) Sensor

- ESTI-Sensor (European Solar Test Installation) składa się z przepołowionej celi krzemowej. Zaciski jednej połowy są rozwarte, natomiast druga połowa zwarta jest przez obciążenie (20mOhm).
- Sensor mierzy natężenie promieniowania słonecznego pod napięciem 30mV, około sześciokrotnie wyższym niż na pyranometrze.
- Promieniowanie jest proporcjonalne do prądu zwarciovego w pierwszej połówce sensora, natomiast temperatura jest proporcjonalna do napięcia układu otwartego drugiej połowy.



## Zastosowanie:

- Monitorowanie instalacji fotowoltaicznych wykonanych z takiego samego materiału co sensor.
- Mierzenie temperatury wewnętrznej modułu, co pozwala na określenie charakterystyk względem warunków nominalnych (STC – Standard Test Condition)

# Pomiar promieniowania rozproszonego

## Układy przestronowe



Pierścień K&Z



Tracker K&Z



# Tracker promieniowania słonecznego



AGH C3 02:59:57



# Monitoring pogody

## ➤ **Minimum**

- Całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej
- Temperatura otoczenia

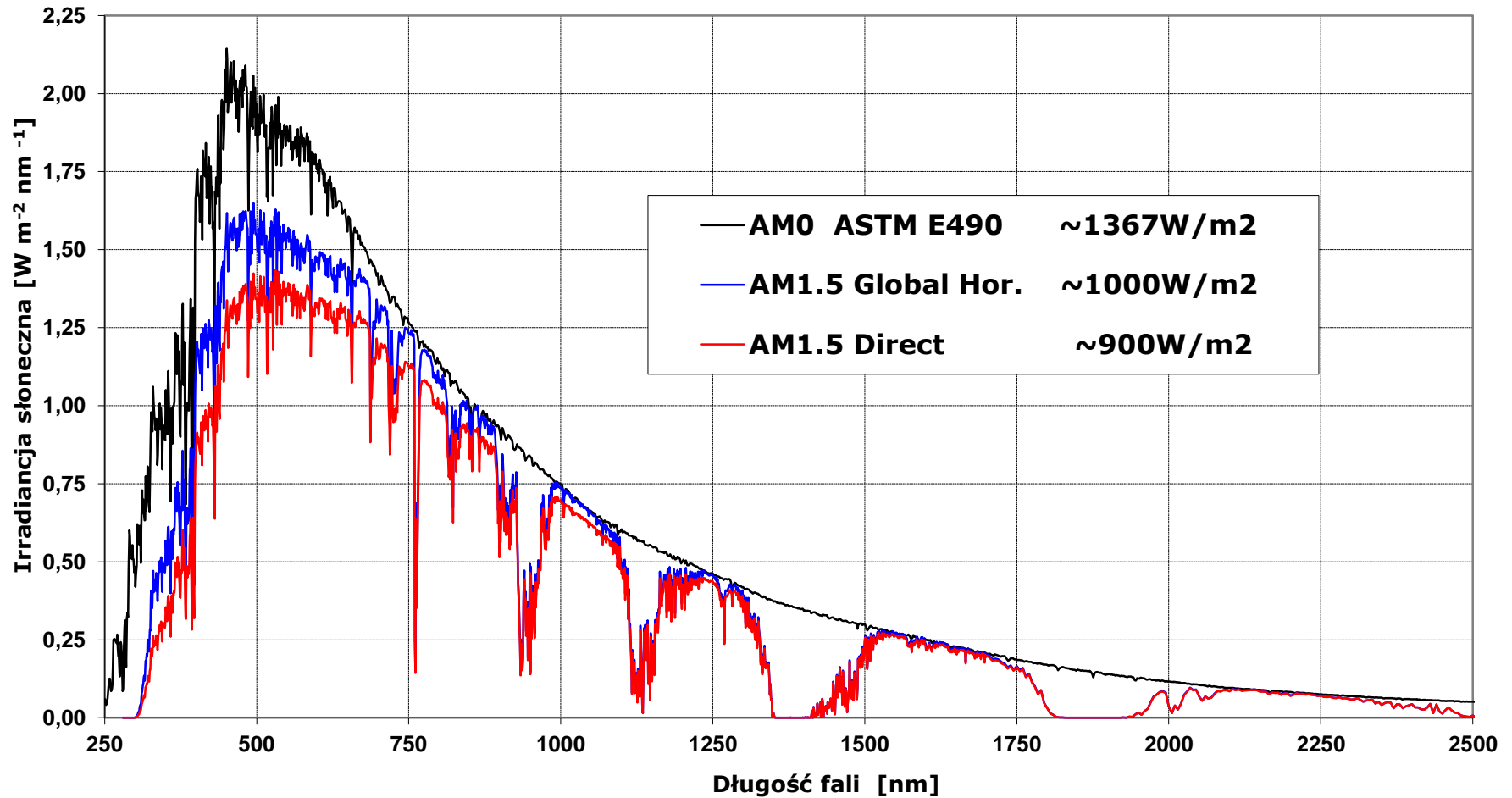
## ➤ **Optimum**

- Całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej
- Rozproszone promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej
- Całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie modułów PV
- Temperatura otoczenia (powietrza)
- Temperatura modułów PV
- Ciśnienie atmosferyczne
- Wilgotność powietrza

Pomiary zwykle co 1 sek. a uśrednianie/rejestrację danych pomiarowych przeprowadza się z krokiem czasowym nie większym niż 1 godzina (można spotkać pliki źródłowe z danymi co 5, 15 lub 30 minut).

# Widmo promieniowania słonecznego

ASTM G173-03 Referencyjne spektrum słoneczne ISO 9845-1 1992





# Energia słoneczna

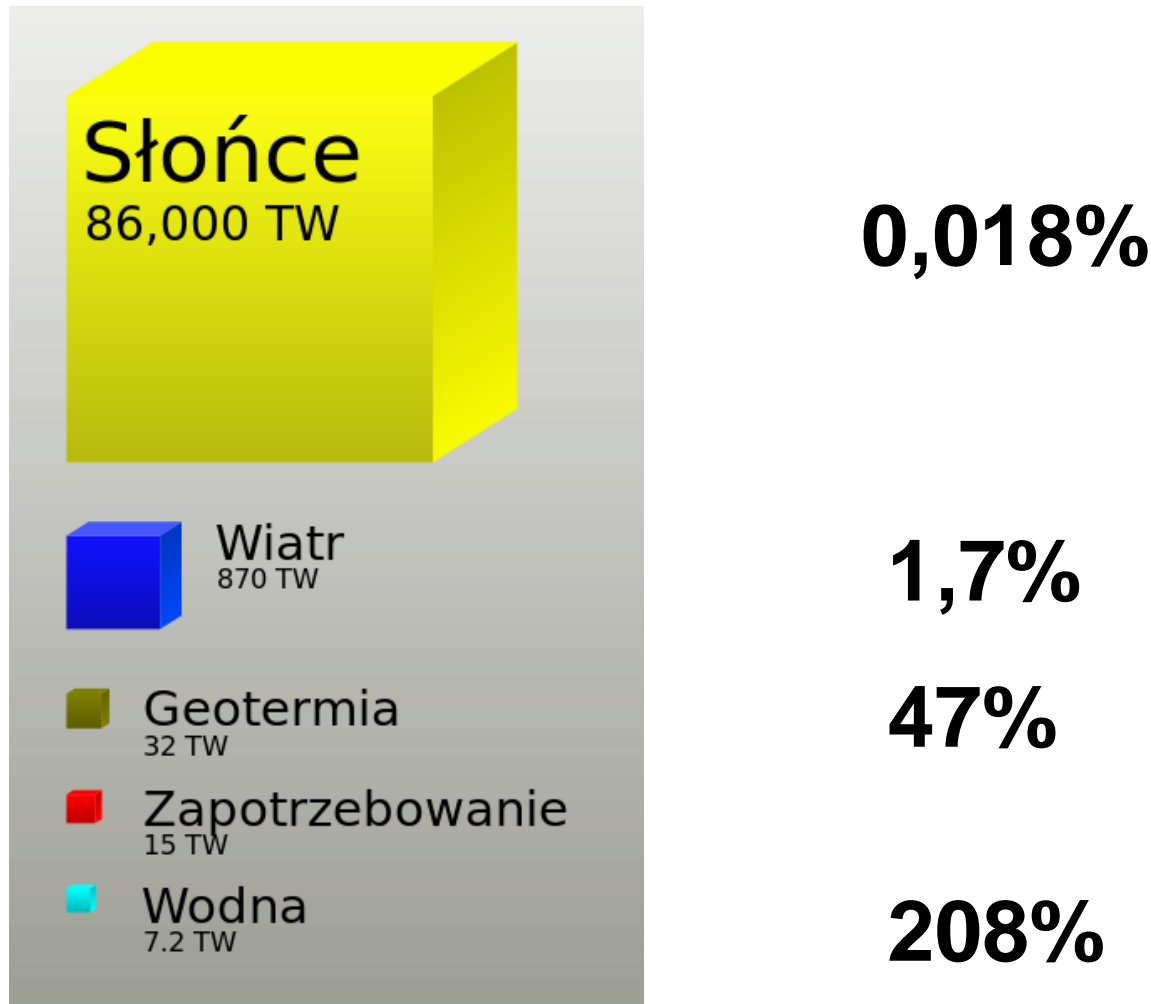


Właściwie o jakich ilościach  
dostępnej energii  
słonecznej mówimy?



# Potencjał OZE na Ziemi

Źródło: Wikipedia, Energy flow charts . Global Climate & Energy Project.



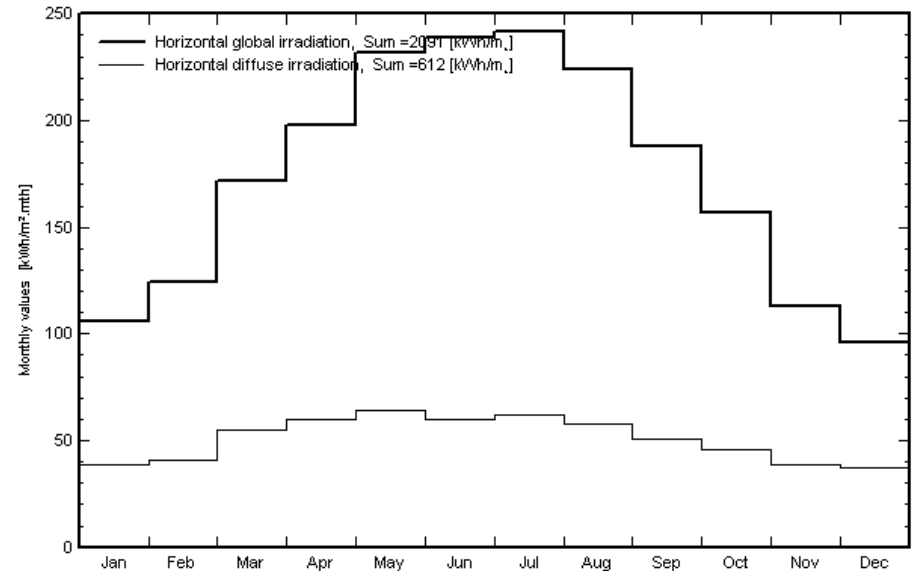
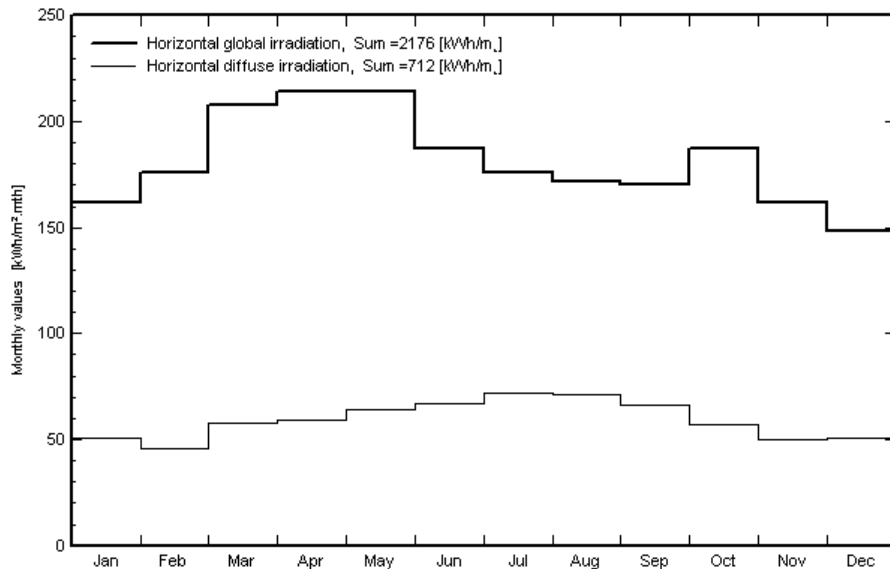
# Dostępna energia słoneczna [ kWh/m<sup>2</sup>/rok ]

Dakar **2176**

Kair **2091**

Meteo for Dakar, Synthetic data

Meteo for Cairo, Synthetic data

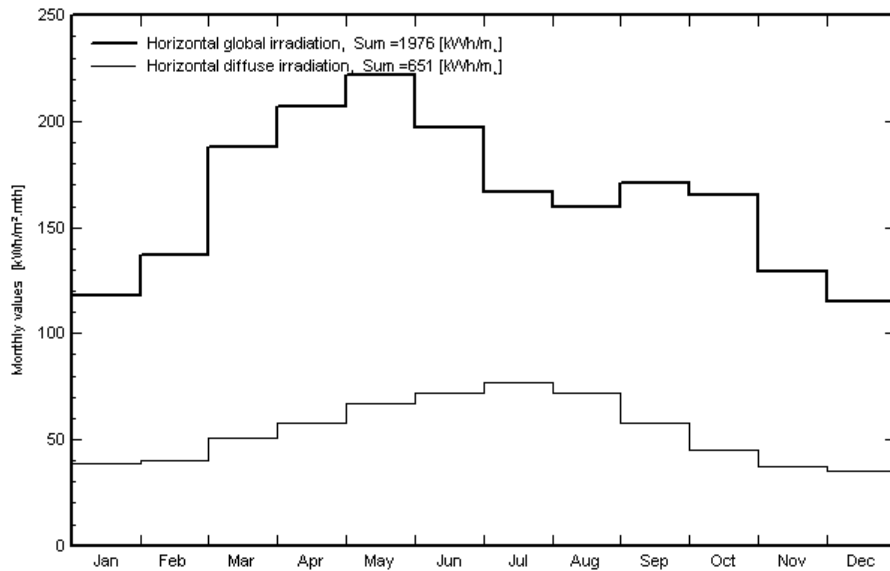


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

# Dostępna energia słoneczna [ kWh/m<sup>2</sup>/rok ]

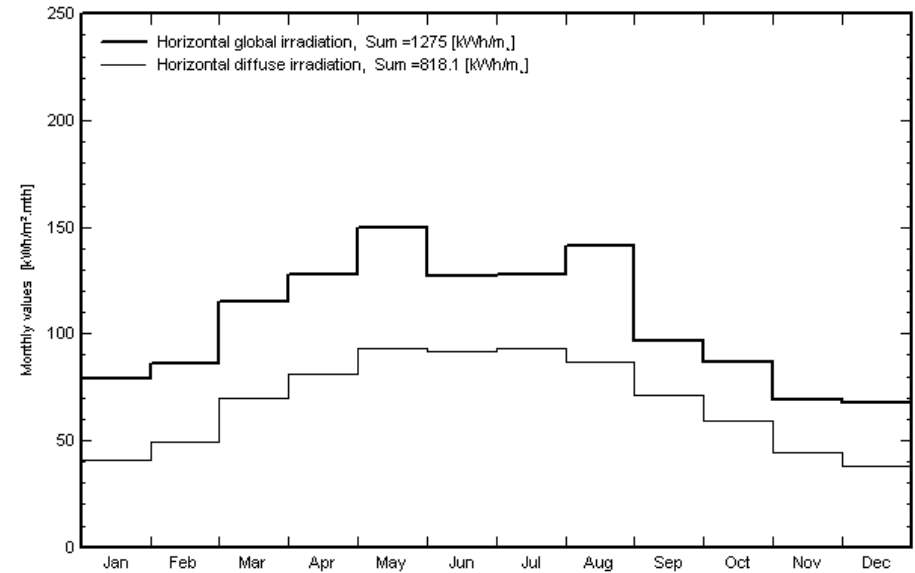
## Delhi 1976

Meteo for Delhi, Synthetic data



## Tokyo 1275

Meteo for Tokyo, Synthetic data

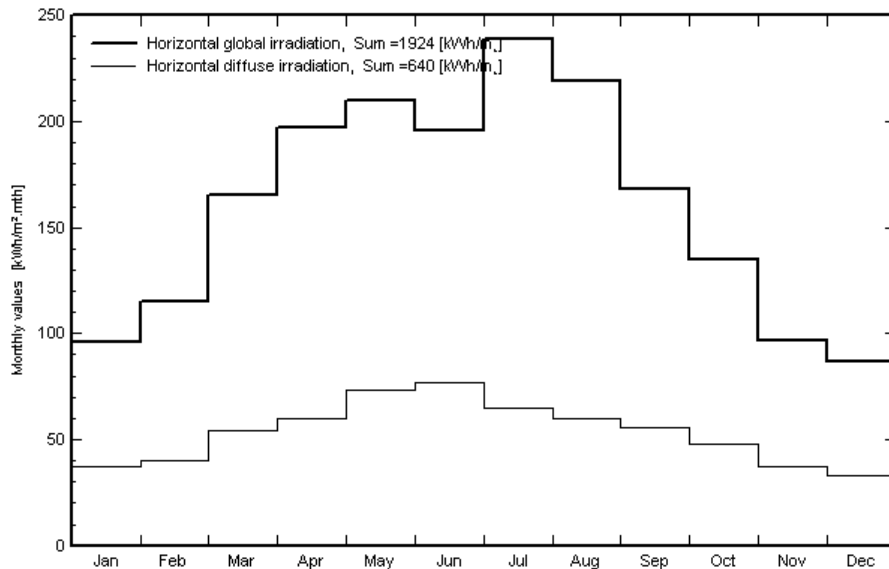


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

# Dostępna energia słoneczna [ kWh/m<sup>2</sup>/rok ]

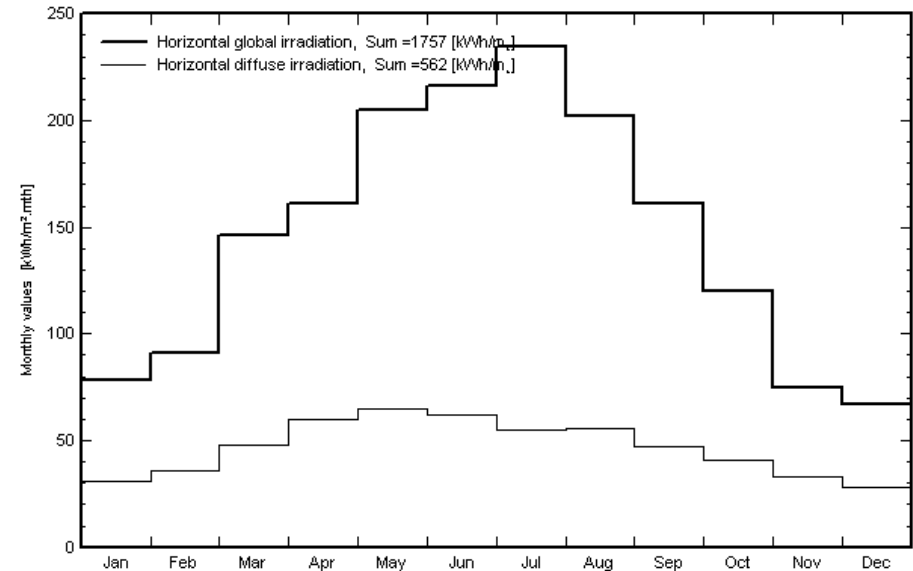
## Los Angeles **1924**

Meteo for Los Angeles, Synthetic data



## Sevilla **1757**

Meteo for Sevilla, Synthetic data

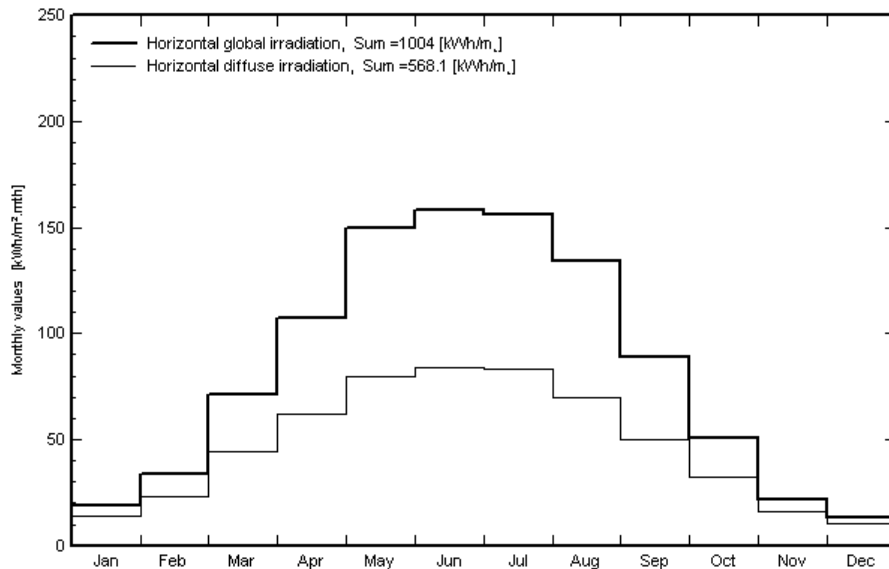


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

# Dostępna energia słoneczna [ kWh/m<sup>2</sup>/rok ]

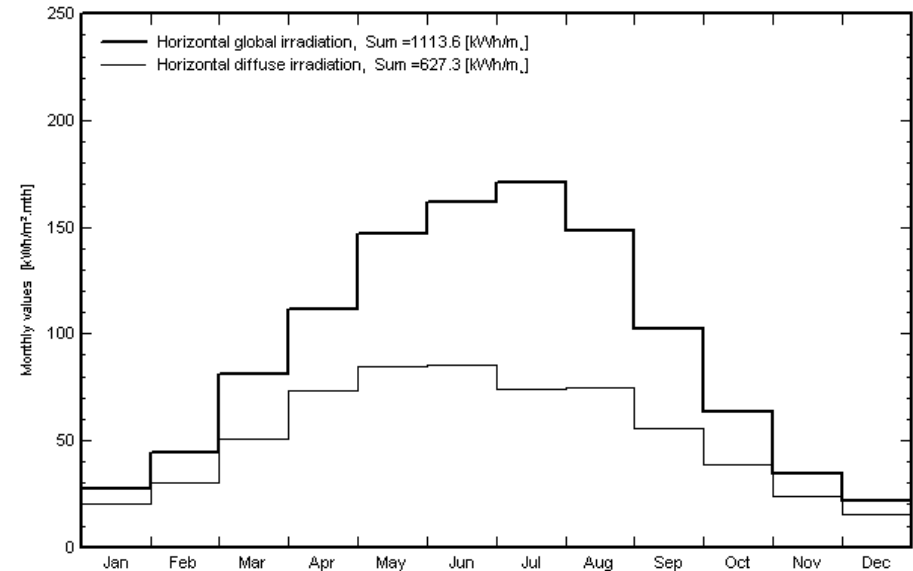
## Berlin **1004**

Meteo for Berlin, Synthetic data



## Freiburg **1113**

Meteo for Freiburg, Synthetic data

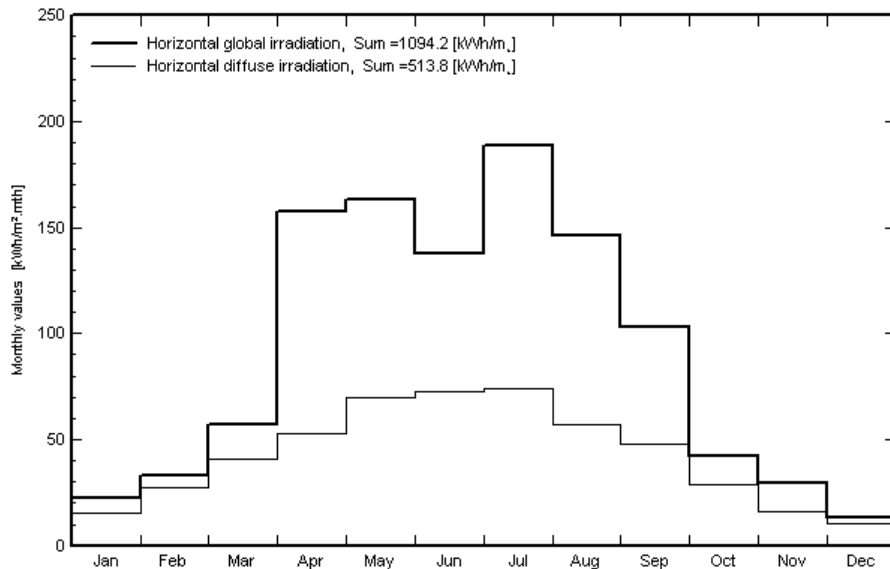


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

# Dostępna energia słoneczna [ kWh/m<sup>2</sup>/rok ]

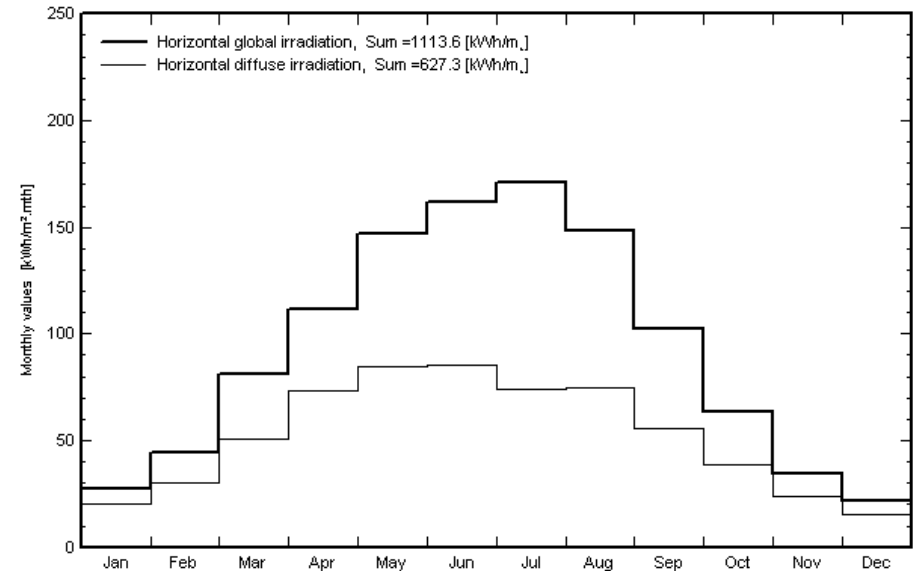
## Kraków **1094**

Meteo for Krakow, Data recorded from 01/01/09 to 31/12/09



## Freiburg **1113**

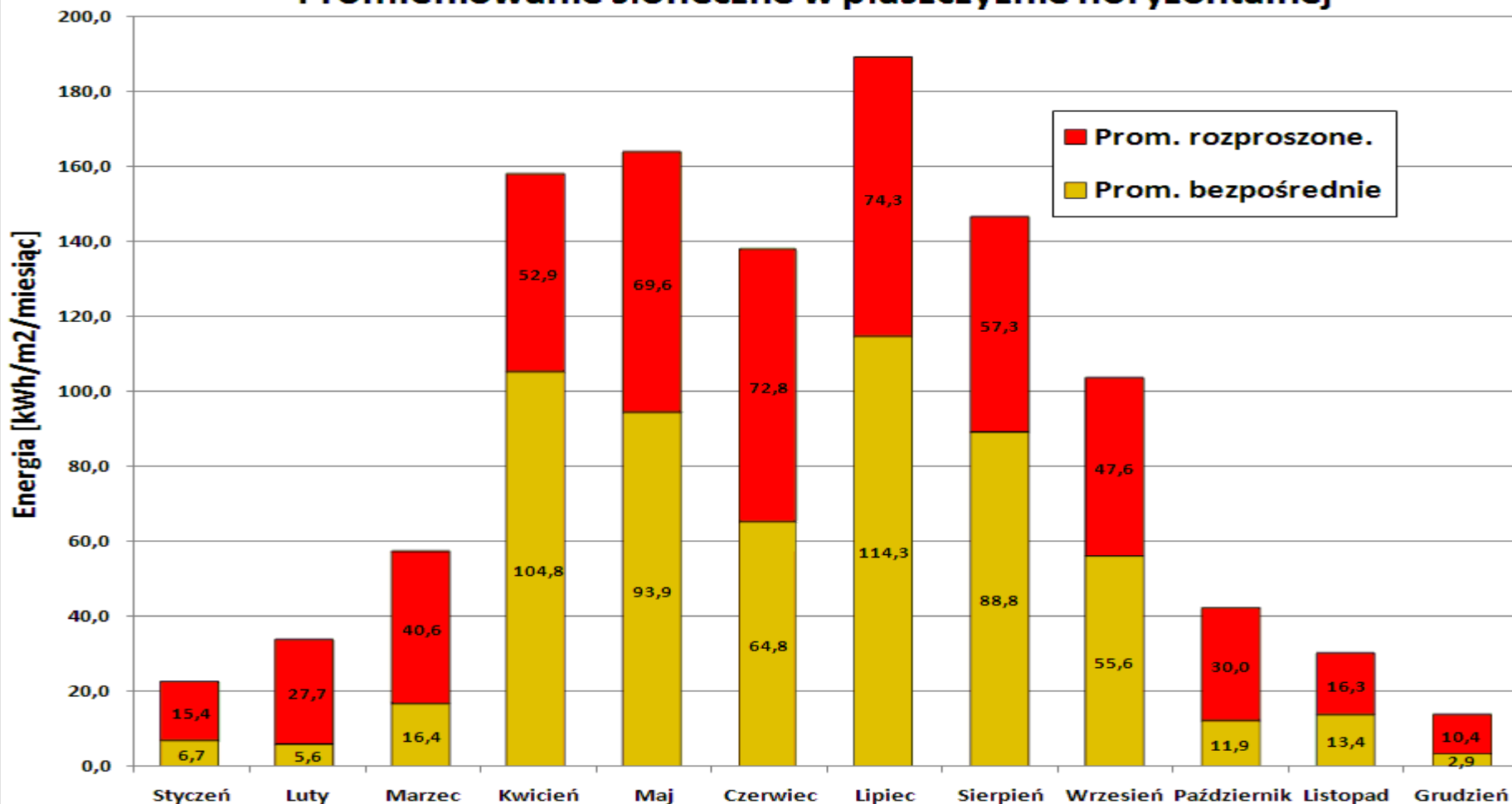
Meteo for Freiburg, Synthetic data



Źródło: PVSyst (Meteonorm)

# Struktura promieniowania słonecznego - pomiary

Promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej

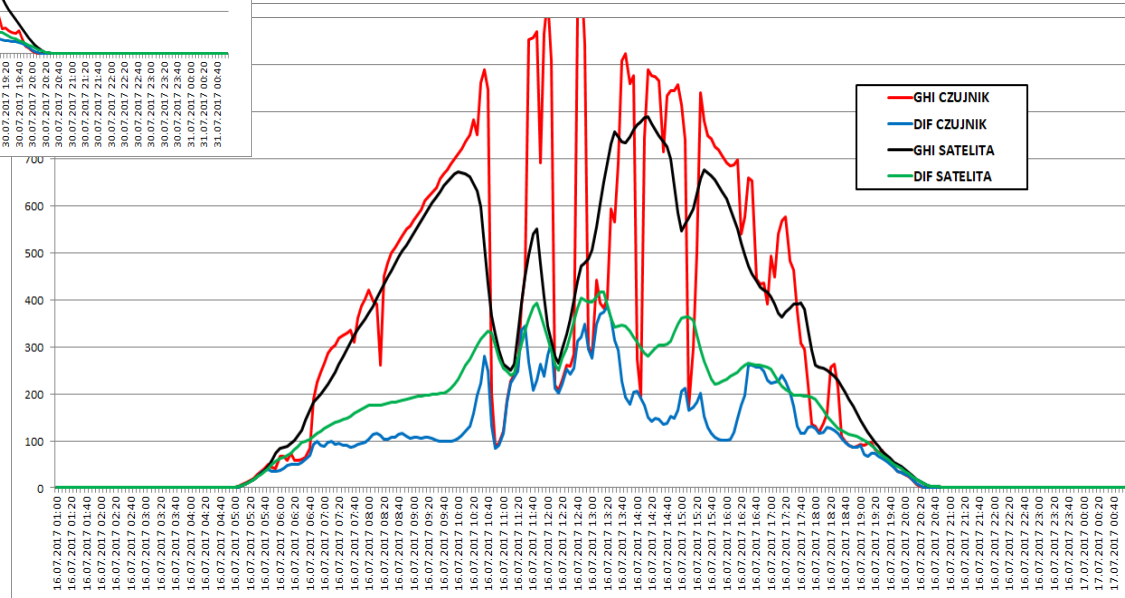
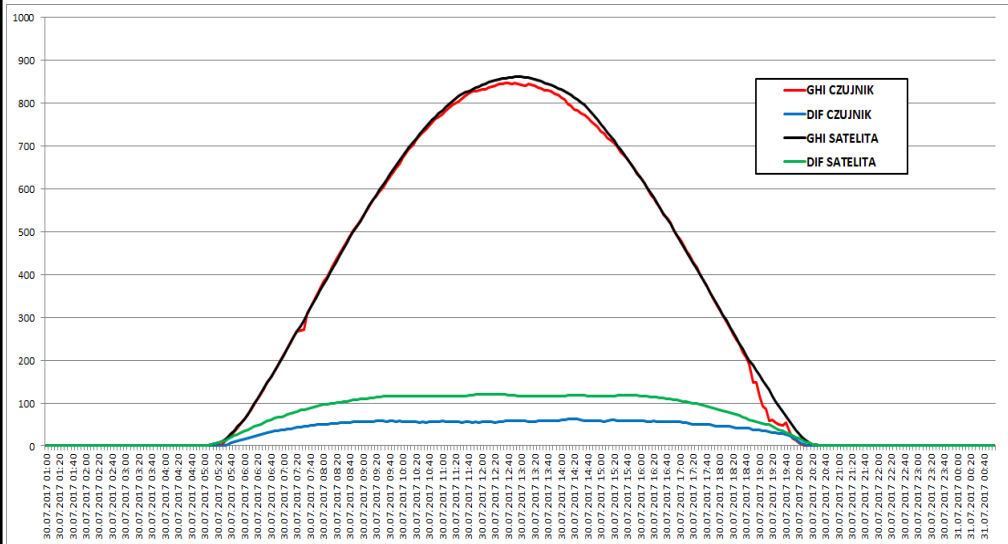


Struktura promieniowania słonecznego - Kraków rok 2009



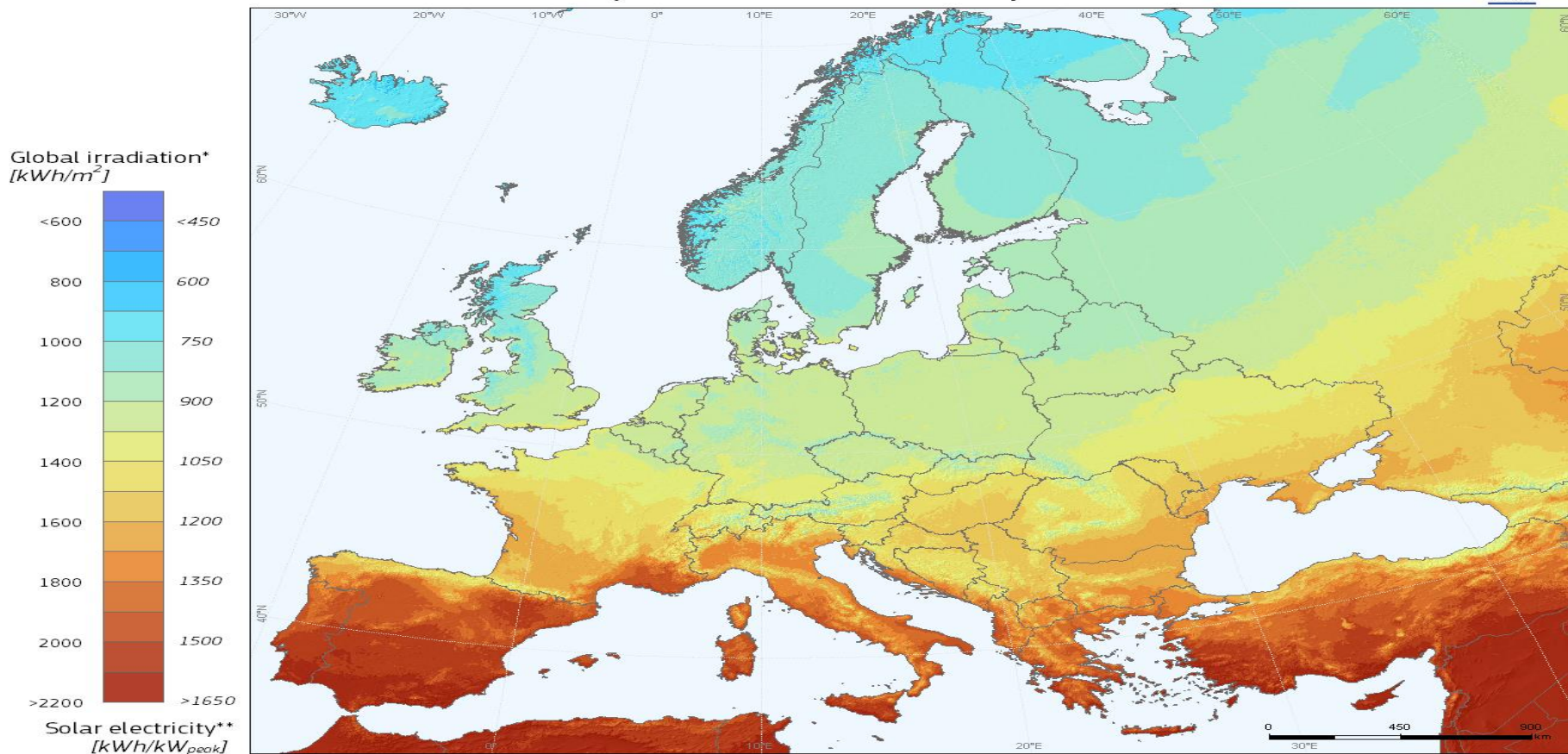
# Źródła danych o promieniowaniu słonecznym

## Pomiary naziemne i analizy satelitarne



# Potencjał PV w Europie

## Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



\* Yearly sum of global irradiation incident on optimally-inclined south-oriented photovoltaic modules

\*\*Yearly sum of solar electricity generated by optimally-inclined 1kW<sub>p</sub> system with a performance ratio of 0.75

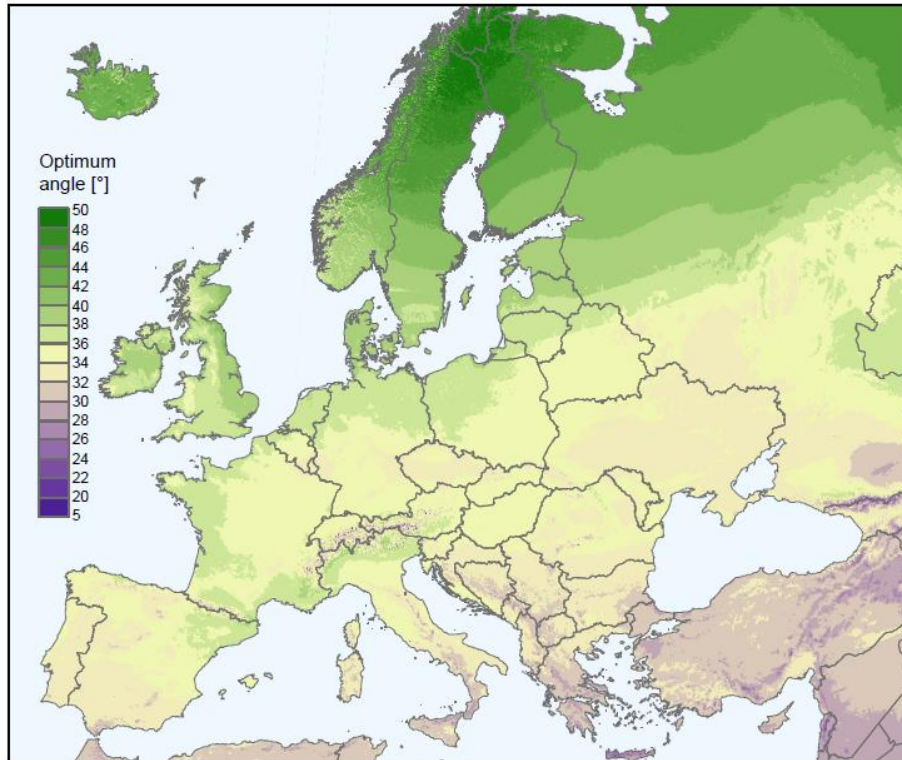
© European Union, 2012  
 PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua  
 EC - Joint Research Centre  
 In collaboration with: CM SAF, [www.cmsafeu](http://www.cmsafeu)

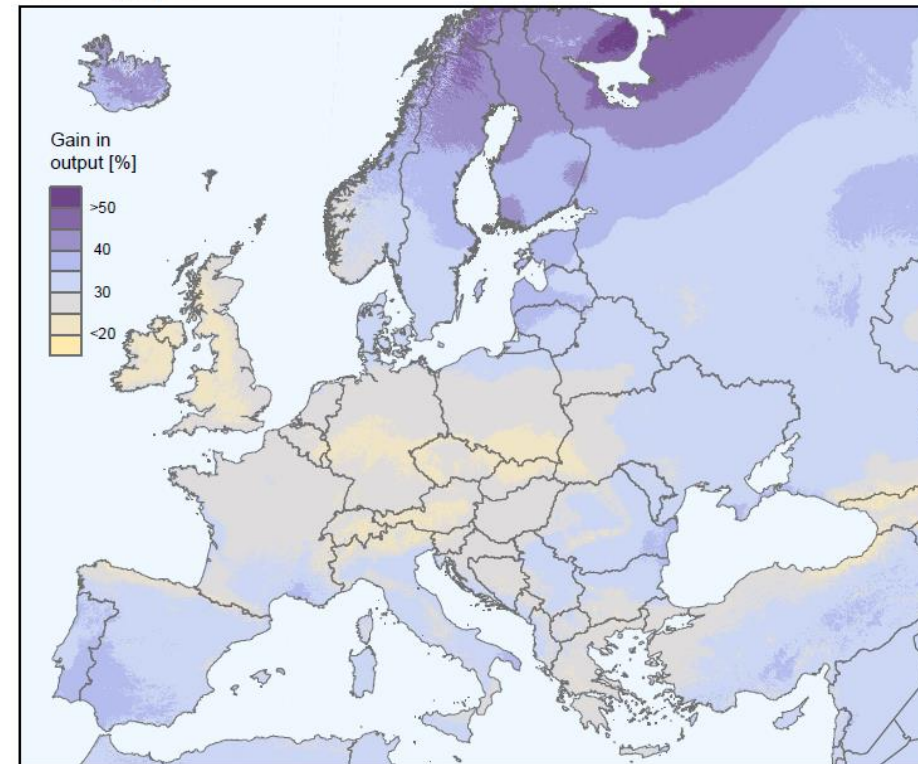
Legal notice: Neither the European Commission nor any person acting on behalf of the Commission is responsible for the use which might be made of this publication.

# Potencjał PV w Europie

Optimum inclination of PV modules to maximize yearly energy yield



PV output: difference between fixed optimum angle and one-axis tracking system



© European Union, 2012

PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

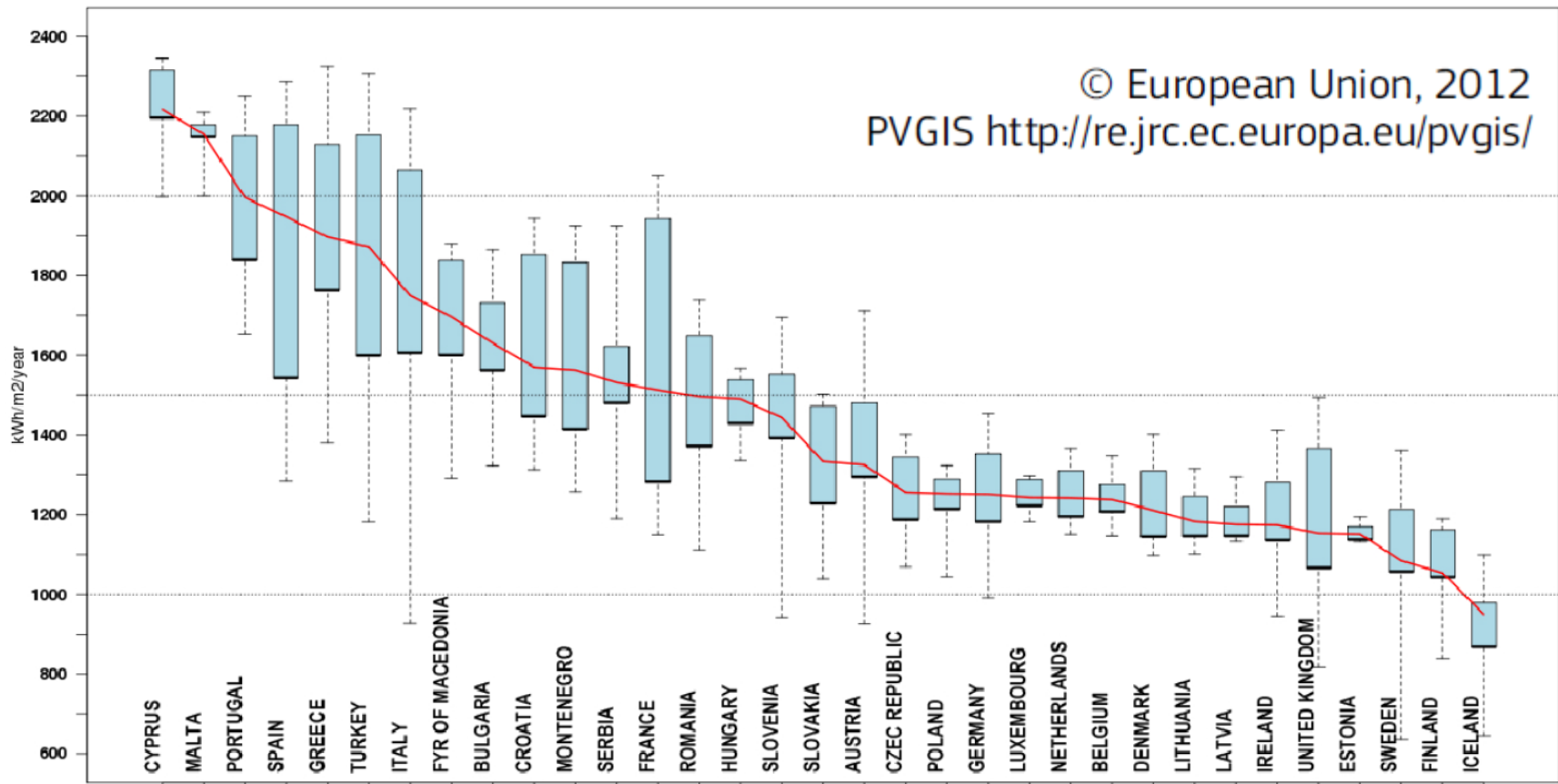
**Authors:**

Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua  
 European Commission • Joint Research Centre  
 Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit  
 TP 450 I-21027 Ispra (VA) Italy

In collaboration with:



# Potencjał energii słonecznej na optymalnie pochylonej powierzchni w warunkach miejskich



### Data description:

The PVGIS database has been developed from solar radiation data estimated from satellite using the CMSAF models ([www.cmsaf.eu](http://www.cmsaf.eu)), representing the period 1996-2011. In areas north of 58 °N the data are derived from ground stations measurements collected within the European Solar Radiation Atlas and interpolated spatially. For more details, see: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/mapinfo.htm>  
Grid resolution (enhanced by terrain) : 1km x 1km  
Map projection : Lambert Azimutal Equal Area, WGS84, lat 52° lon 10°

### Authors:

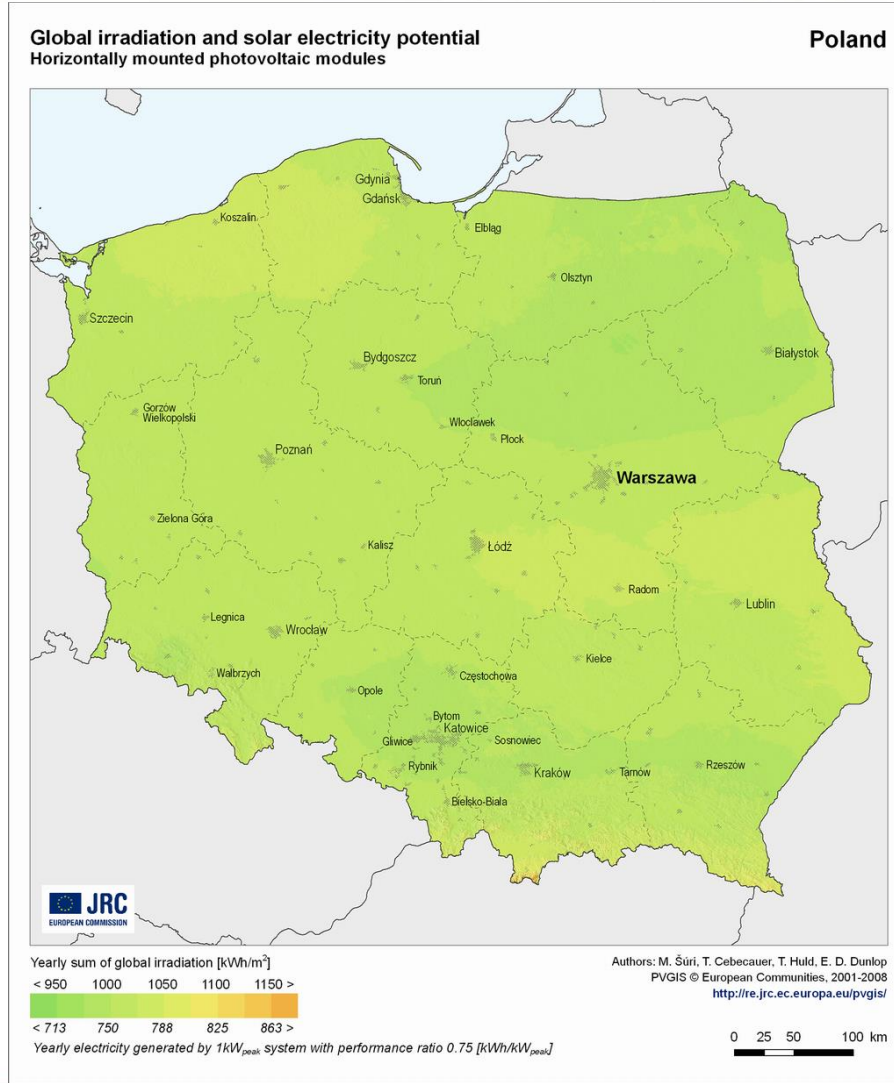
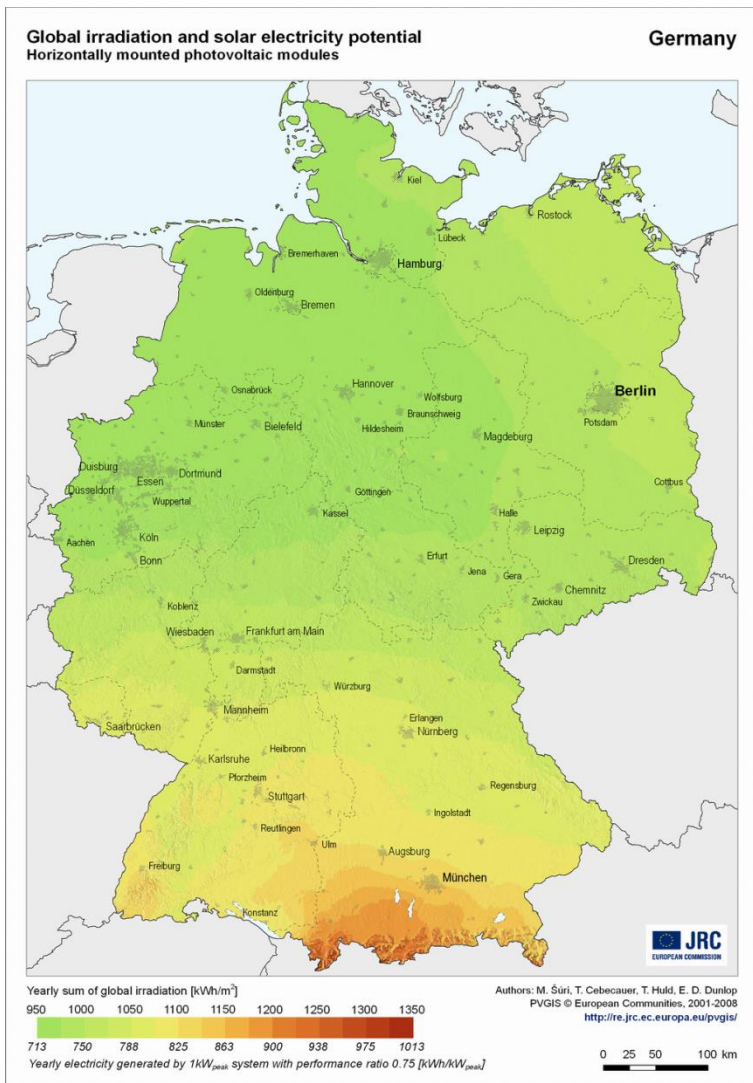
Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua  
European Commission • Joint Research Centre  
Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit  
TP 450 I-21027 Ispra (VA) Italy

### In collaboration with:



Climate Monitoring  
[www.cmsaf.eu](http://www.cmsaf.eu)

# Nasłonecznienie w Niemczech i w Polsce



# Potencjał produkcji energii z PV w Niemczech i w Polsce

Global irradiation and solar electricity potential  
Optimally-inclined photovoltaic modules

Germany



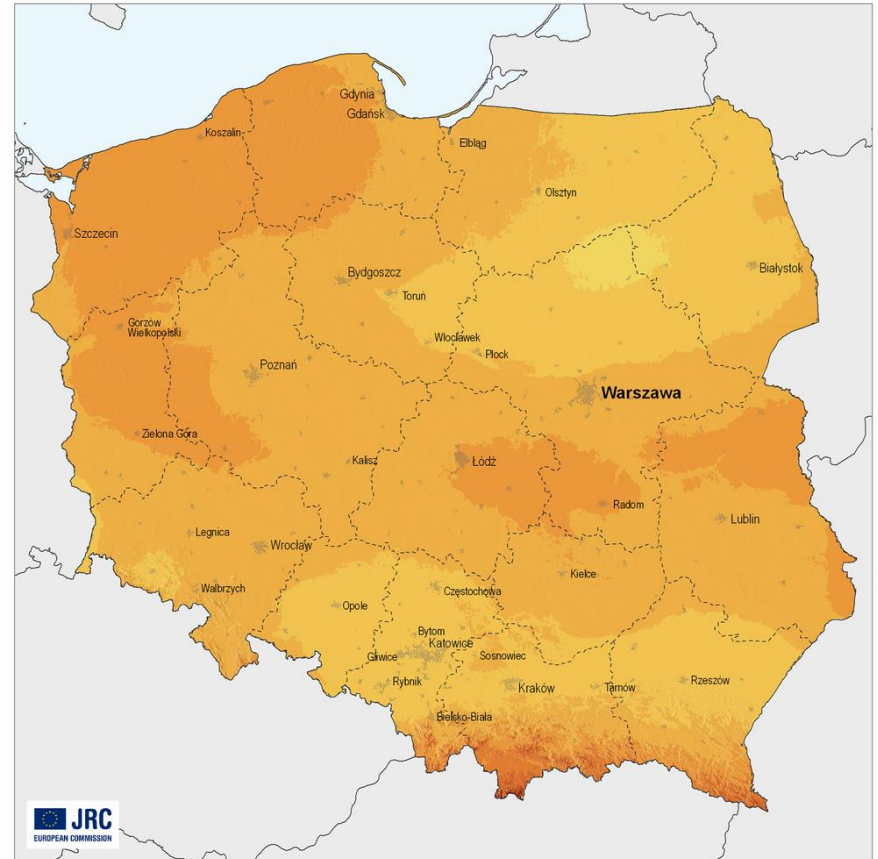
Yearly sum of global irradiation [kWh/m<sup>2</sup>]  
 < 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 >  
 < 825 863 900 938 975 1013 1050 >  
 Yearly electricity generated by 1kW<sub>peak</sub> system with performance ratio 0.75 [kWh/kW<sub>peak</sub>]

Authors: M. Šúri, T. Cebebauer, T. Huld, E. D. Dunlop  
 PVGIS © European Communities, 2001-2008  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

0 25 50 100 km

Global irradiation and solar electricity potential  
Optimally-inclined photovoltaic modules

Poland



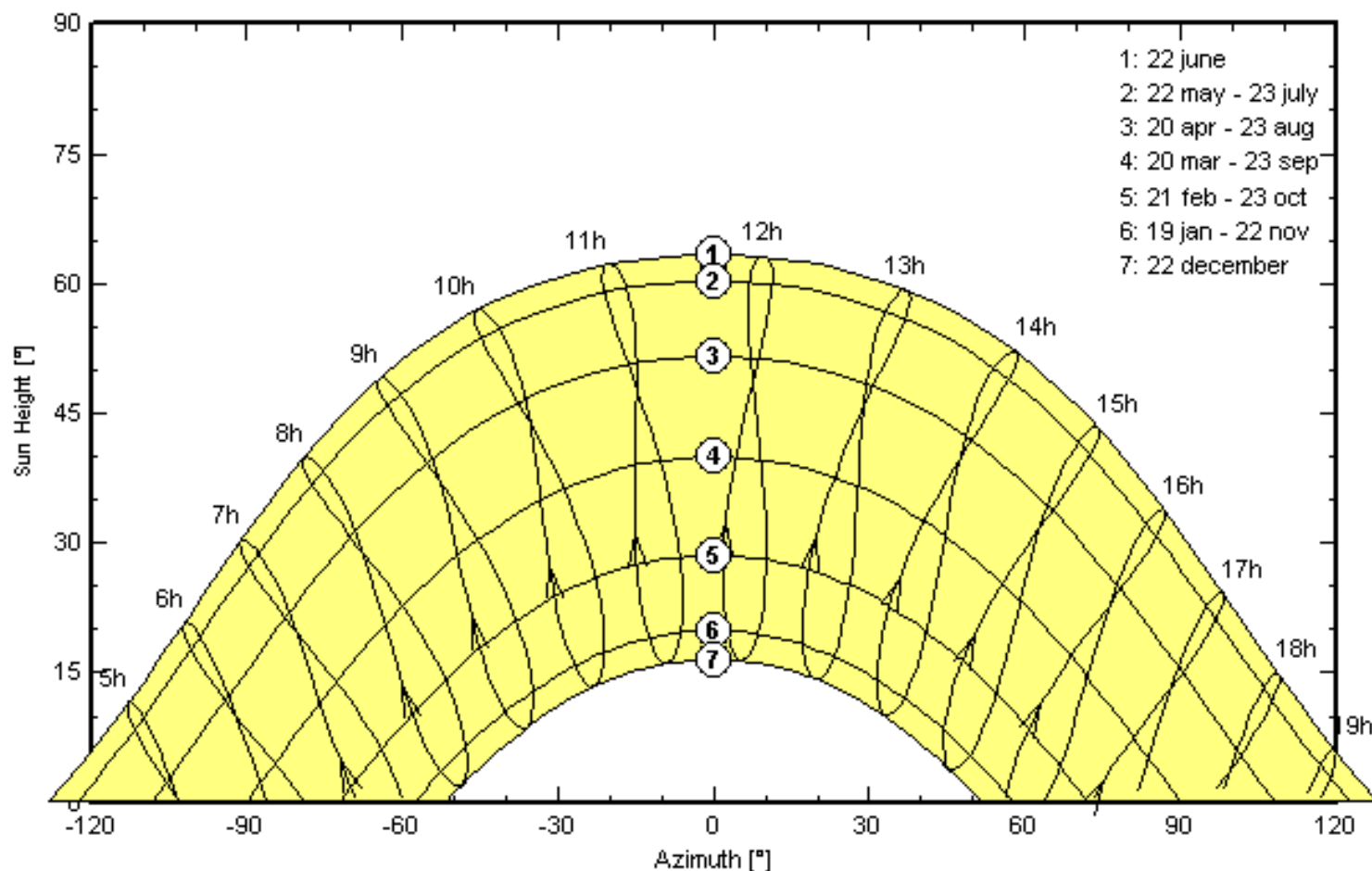
Yearly sum of global irradiation [kWh/m<sup>2</sup>]  
 < 1100 1150 1200 1250 1300 >  
 < 825 863 900 938 975 >  
 Yearly electricity generated by 1kW<sub>peak</sub> system with performance ratio 0.75 [kWh/kW<sub>peak</sub>]

Authors: M. Šúri, T. Cebebauer, T. Huld, E. D. Dunlop  
 PVGIS © European Communities, 2001-2008  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

0 25 50 100 km

# Trajektorie słoneczne widziane z Krakowa

Solar paths at Krakow, (Lat. 50.1°N, long. 20.1°E, alt. 214 m)



# Wpływ montażu paneli PV na dostępność energii słonecznej

## Transposition Factors for Krakow (Poland)

Period : Whole year --- Horizontal Global Irrad. = 1044 kWh/m<sub>2</sub>

Azimuth	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Tilt													
90°	0.61	0.65	0.70	0.73	0.75	0.76	0.76	0.76	0.75	0.73	0.70	0.66	0.61
80°	0.67	0.73	0.78	0.82	0.85	0.86	0.87	0.86	0.85	0.82	0.79	0.74	0.68
70°	0.74	0.80	0.85	0.90	0.93	0.95	0.95	0.95	0.93	0.90	0.86	0.81	0.75
60°	0.80	0.86	0.92	0.96	1.00	1.02	1.03	1.02	1.00	0.97	0.92	0.87	0.81
50°	0.85	0.91	0.97	1.01	1.05	1.07	1.08	1.07	1.05	1.02	0.97	0.92	0.86
40°	0.90	0.96	1.01	1.05	1.08	1.10	1.11	1.10	1.08	1.05	1.01	0.96	0.90
30°	0.94	0.99	1.03	1.06	1.09	1.11	1.11	1.11	1.09	1.07	1.03	0.99	0.94
20°	0.97	1.00	1.03	1.06	1.08	1.09	1.10	1.09	1.08	1.06	1.04	1.01	0.97
10°	0.99	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.06	1.06	1.05	1.04	1.03	1.01	0.99
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

### Tracking planes :

Tracking two axes :

TF = 1.38 ( 124 % of fixed plane's optimum)

East-West horizontal axis :

TF = 1.17 ( 105 % of fixed plane's optimum)

N-S axis, Tilt = Lat. - 10° :

TF = 1.35 ( 121 % of fixed plane's optimum)

N-S axis, Tilt = Latitude :

TF = 1.33 ( 120 % of fixed plane's optimum)

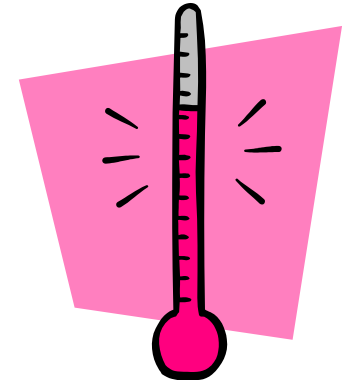


# Sposoby przetwarzania energii słonecznej

Bateria słoneczna (panel fotowoltaiczny)

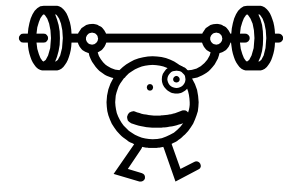


Kolektor słoneczny



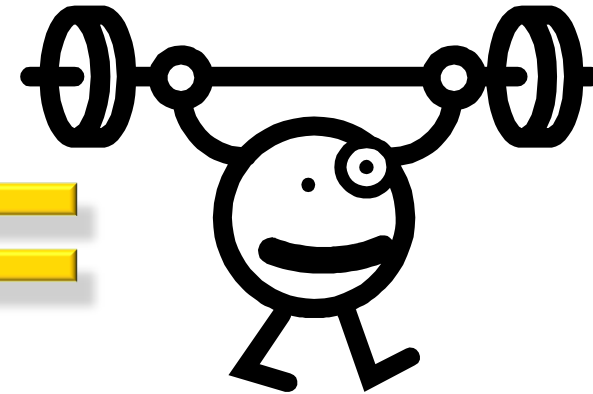
# Sprawność przetwarzania energii słonecznej

Bateria słoneczna (panel fotowoltaiczny)



**~18 %**

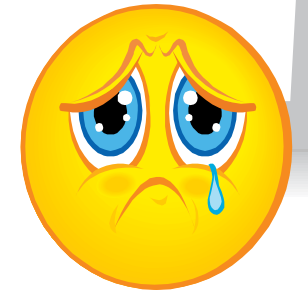
Kolektor słoneczny



**do 80 %**

# Wrażliwość na wzrost temperatury

Bateria słoneczna (panel fotowoltaiczny)

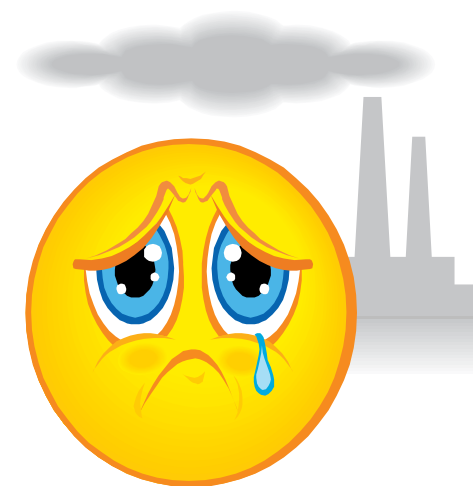
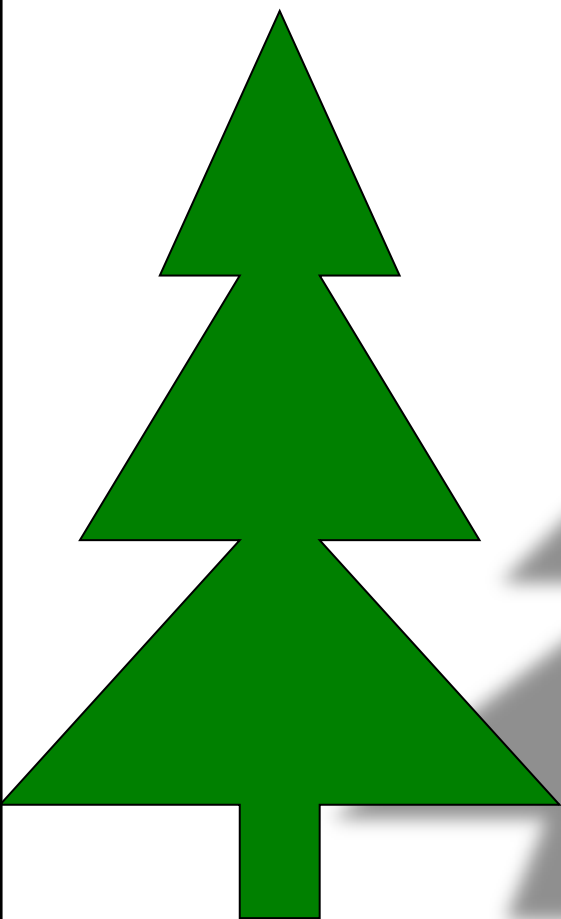


Kolektor słoneczny



# Wrażliwość na zacinienie (nawet częściowe)

Bateria słoneczna  
(panel fotowoltaiczny)



# Moduł TWIN (PV + Termo)



# Moduł TWIN (PV + Termo)

ODBIORNIK ENERGII  
ELEKTRYCZNEJ



URZĄDZENIE KOGENERACYJNE  
TYPU TWIN



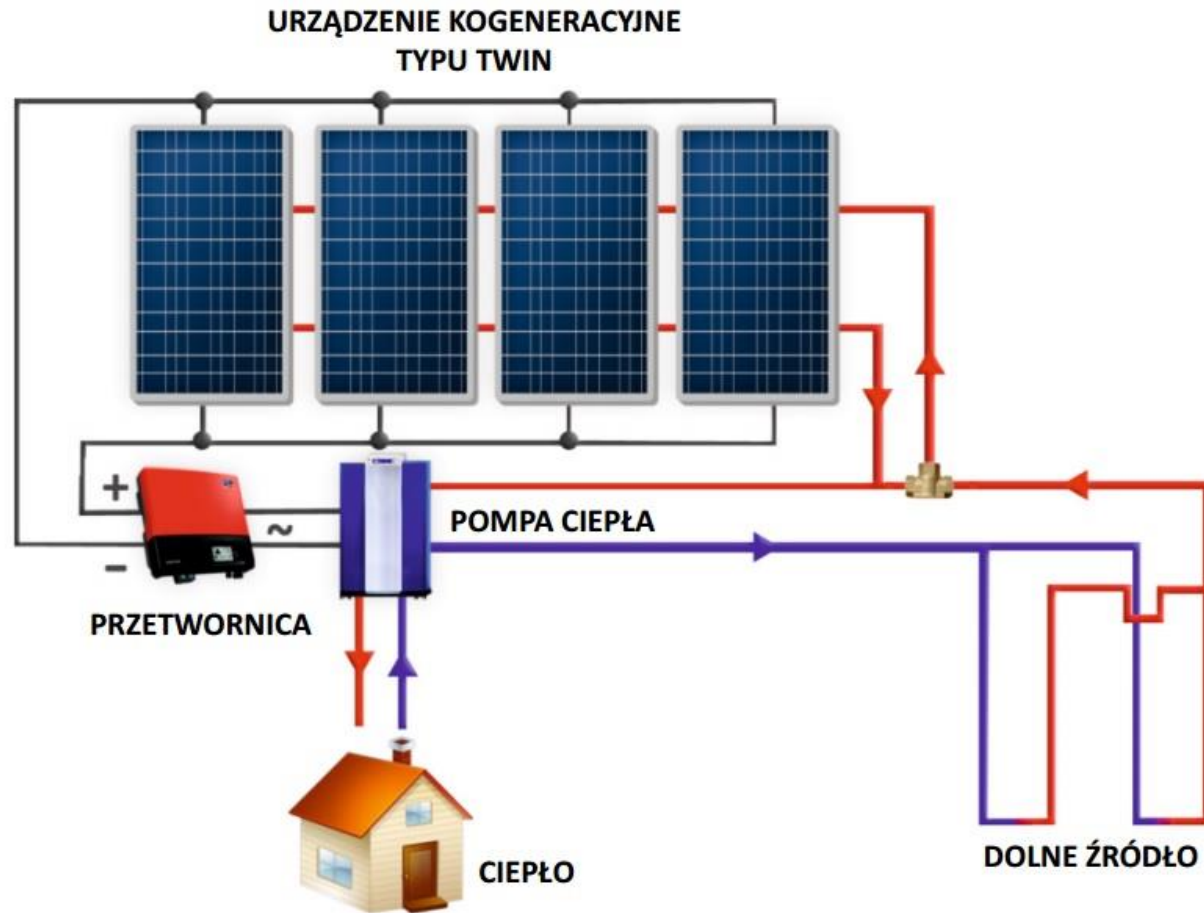
NISKOTEMPERATUROWY  
ODBIORNIK ENERGII  
GRZEWCZEJ

CIEPŁA WODA  
UŻYTKOWA

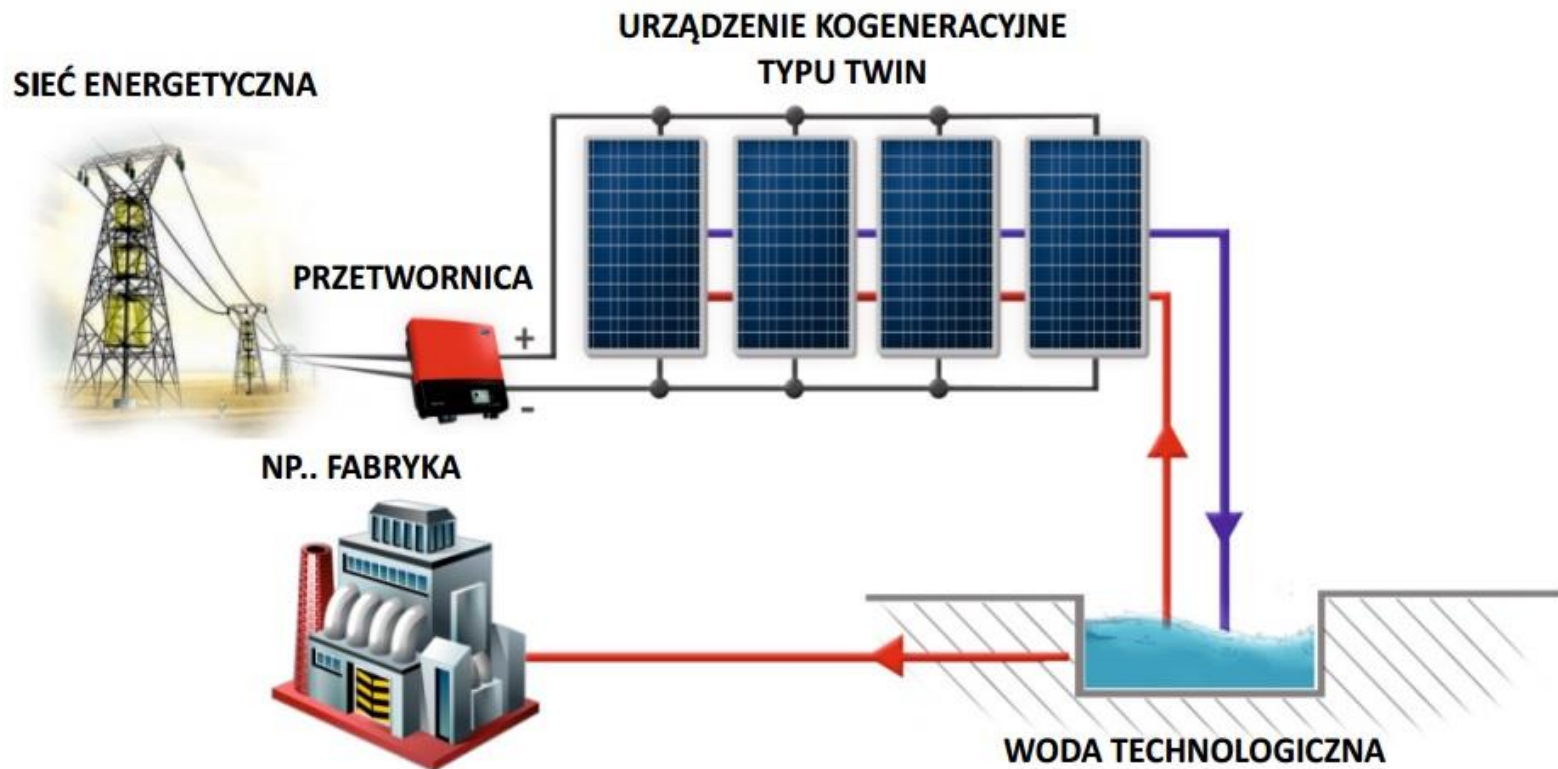
UKŁAD  
POMPOWY



# Moduł TWIN (PV + Termo)

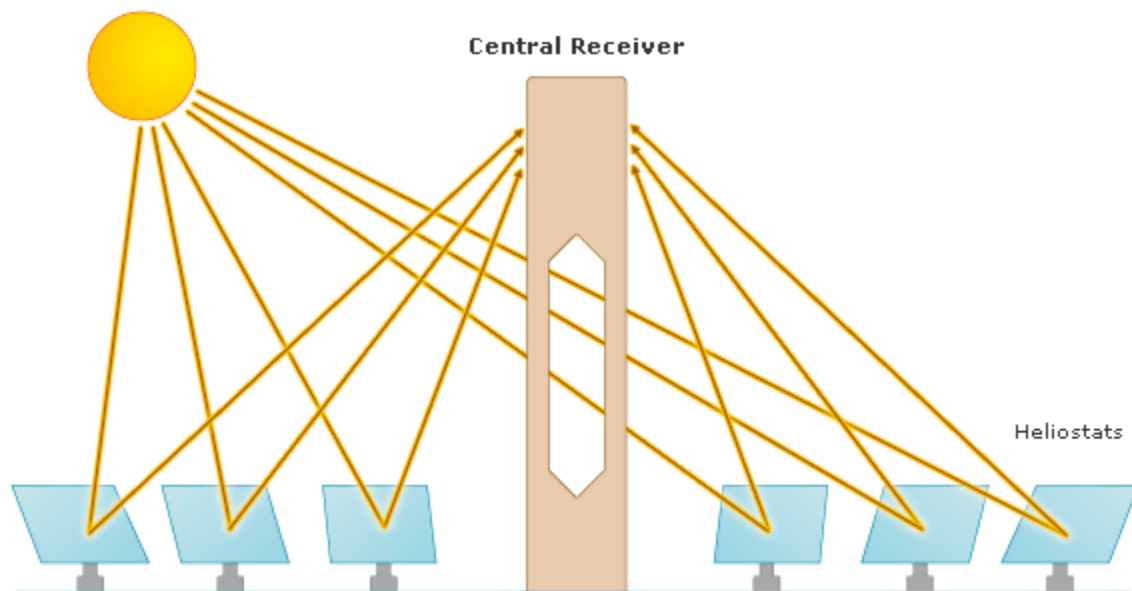


# Moduł TWIN (PV + Termo)

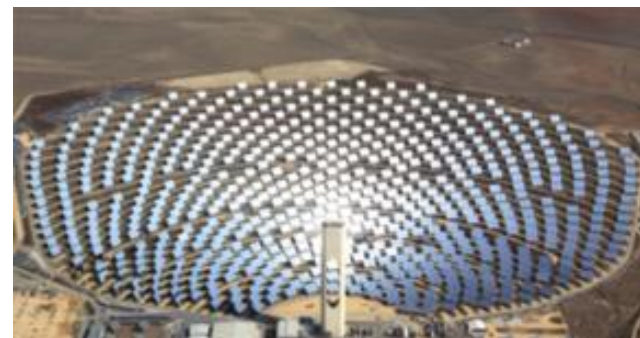




# Solarna elektrownia termiczna



**PS10 (11 MWe)**  
**Solucar – Sevilla, Hiszpania**  
**624 heliostaty po 120m<sup>2</sup> każdy**  
**wieża 115 m**

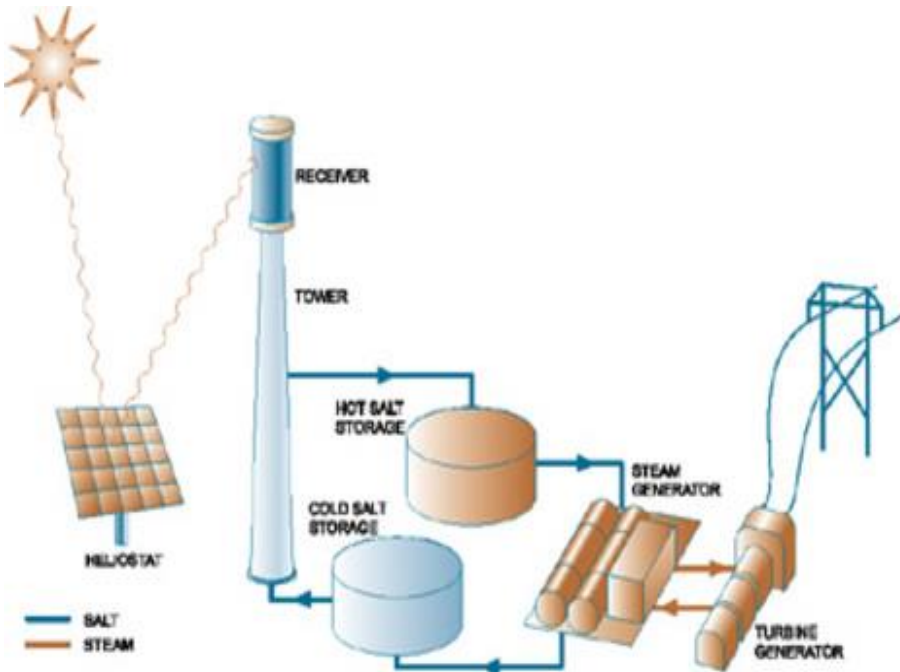
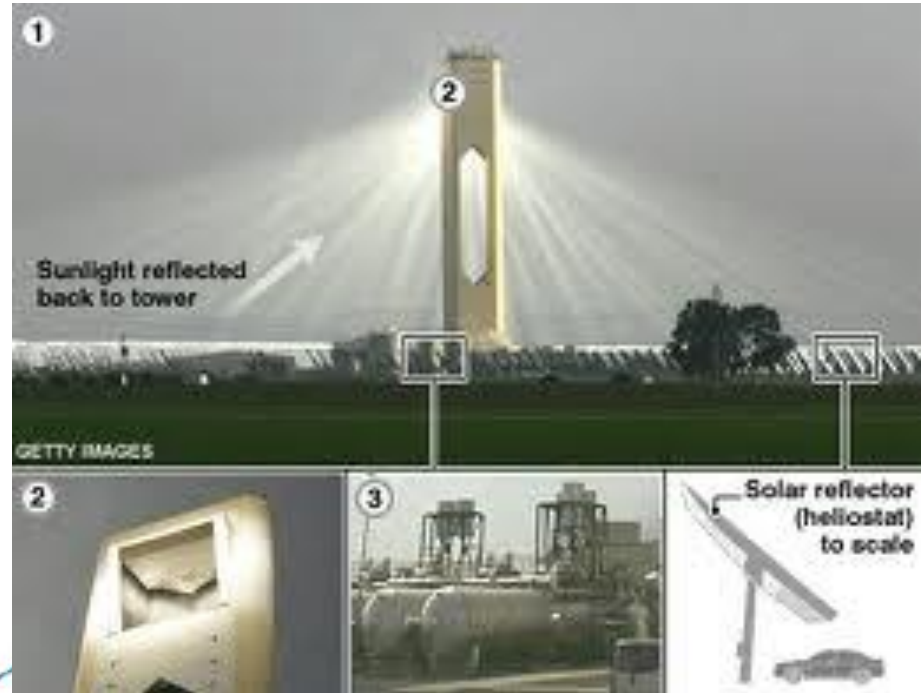


**PS20 (20 MWe)**  
**Solucar – Sevilla, Hiszpania**  
**1255 heliostatów po 120m<sup>2</sup> każdy**  
**wieża 165 m**

Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

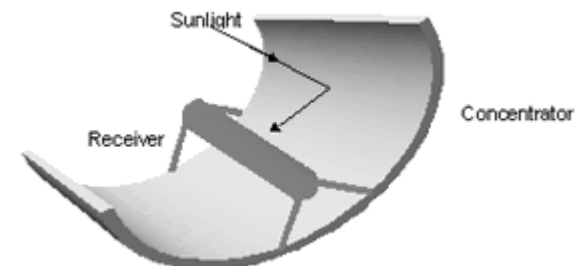
# Solarna elektrownia termiczna (schemat)

Zdolność magazynowania pary wodnej na 30 minut pracy elektrowni



Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

# Solarna elektrownia termiczna



Źródło: <http://www.abengosolar.es>

# Solarna elektrownia termiczna + PV



**Pustynia Atacama  
Comuna de María Elena,  
Antofagasta Region, Chile**

**Atacama 1 – w trakcie budowy  
110 MWe – wieża + heliostaty  
100 MW - fotowoltaika**

**Magazyn energii na 17,5 godziny**

# Fotowoltaika – co to jest?



**Zjawisko fotowoltaiczne**  
(wewnętrzny efekt  
fotowoltaiczny) to wytwarzanie w  
ciele stałym **siły**  
**elektromotorycznej** (napięcia)  
pod wpływem **promieniowania**  
**światlnego**

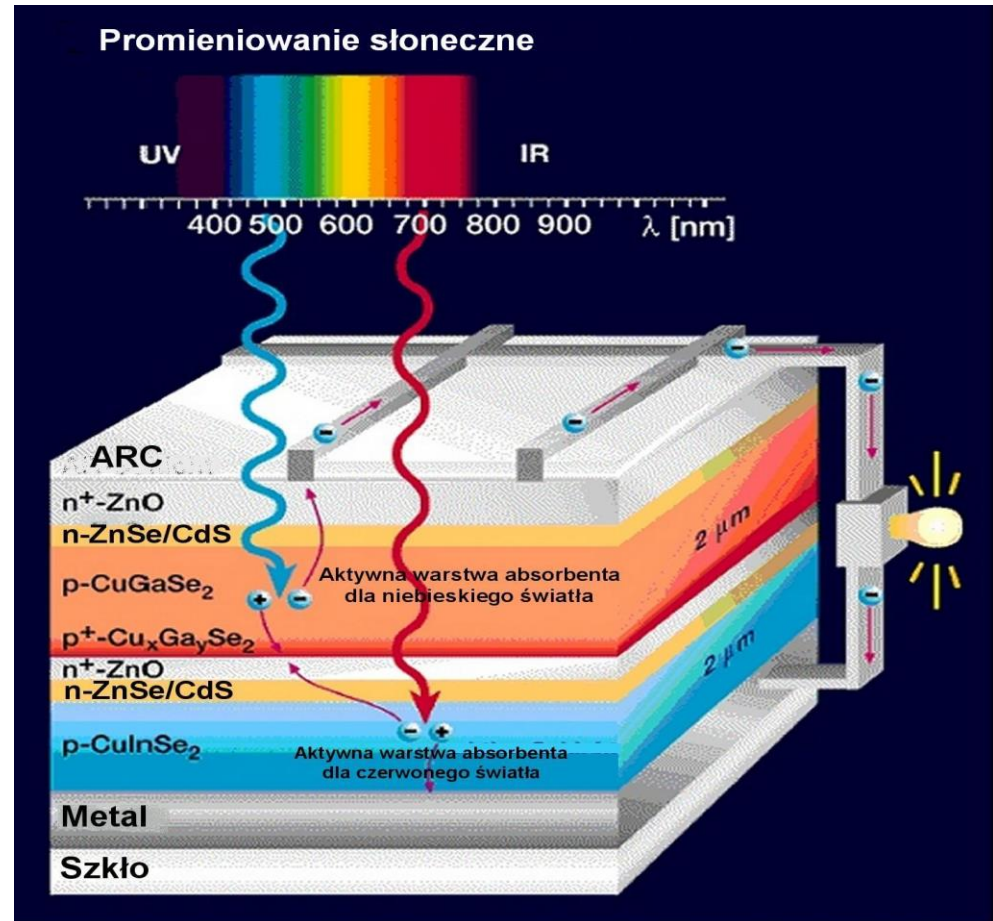
Antoni C. **Becquerel**  
(1839)



źródło: wikipedia

# Ogniwo fotowoltaiczne

- Oświetlone złącze półprzewodnikowe
- generujące energię w oparciu o wewnętrzne zjawisko fotowoltaiczne
- (generacja pary elektron-dziura gdy energia fotonu jest większa od szerokości pasma zabronionego)
- $\lambda_{\max} = hc/W_g$



# Ogniwo fotowoltaiczne materiały

- Krzem
  - Monokrystaliczny
  - Multikrystaliczny
  - Cienkowarstwowy (amorficzny)
- Inne:
  - Arsenek galu  
GaAs
  - Tellurek kadmu  
CdTe

**Si** krystaliczny (c-Si i mc-Si) 90%  
**Si** amorficzny 9%  
**GaAs** i inne III-V  
**CuInSe<sub>2</sub>** i pochodne 1%  
**CdTe**

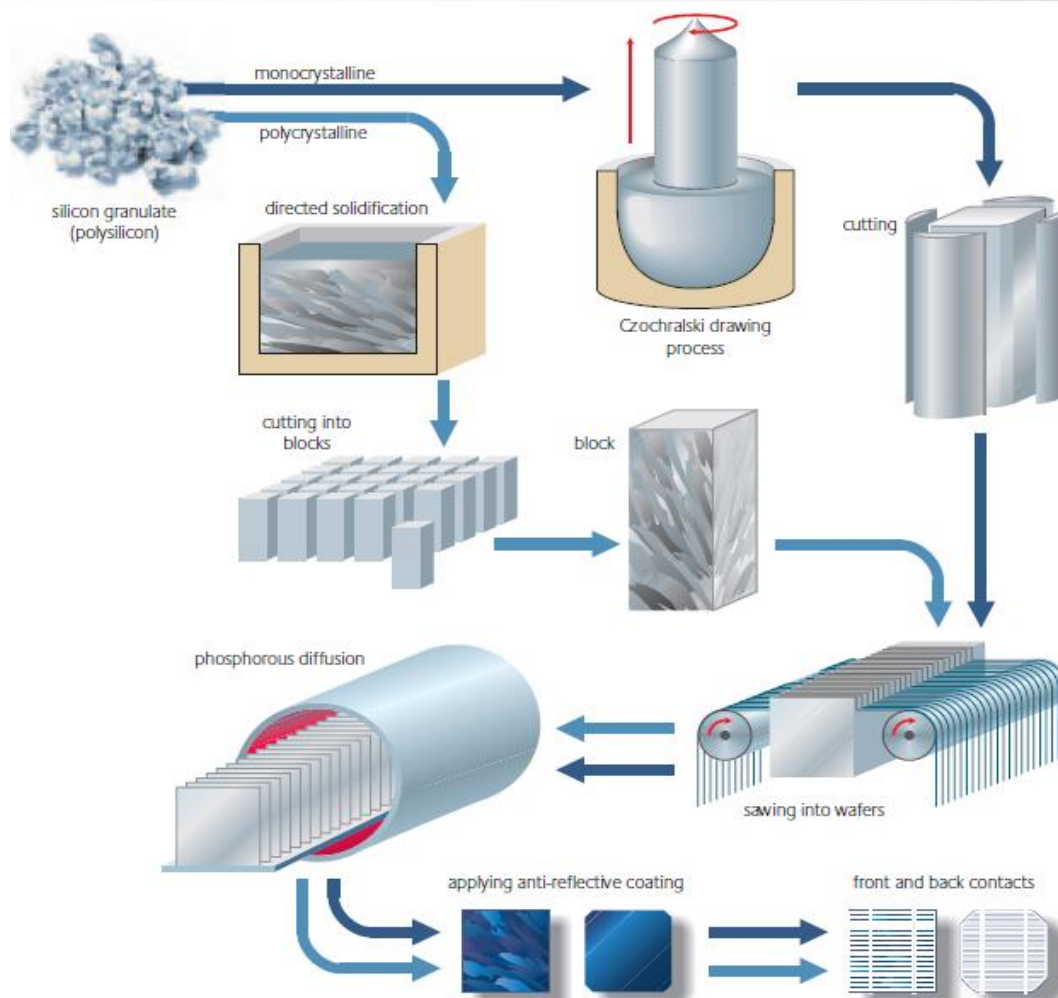
Materiał	E <sub>g</sub> [eV]	η [%]
C-Si	1,15	26/24
A-Si:H	1,4-2,0	13,2
GaAs	1,4	27
Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub>	1,11	21,7/16
CdTe	1,50	22,1/16

# Produkcja monokrystalicznego fotoogniwa słonecznego

- Krzem metalurgiczny (polikryształ)
- Wyciąganie monokryształów
- Wycinanie z walca prostopadłościanu
- Cięcie na płytki 0.2 do 0.5mm
- Teksturyzacja powierzchni
- Dyfuzja fosforu
- Nanoszenie kontaktów i warstwy antyodblaskowej

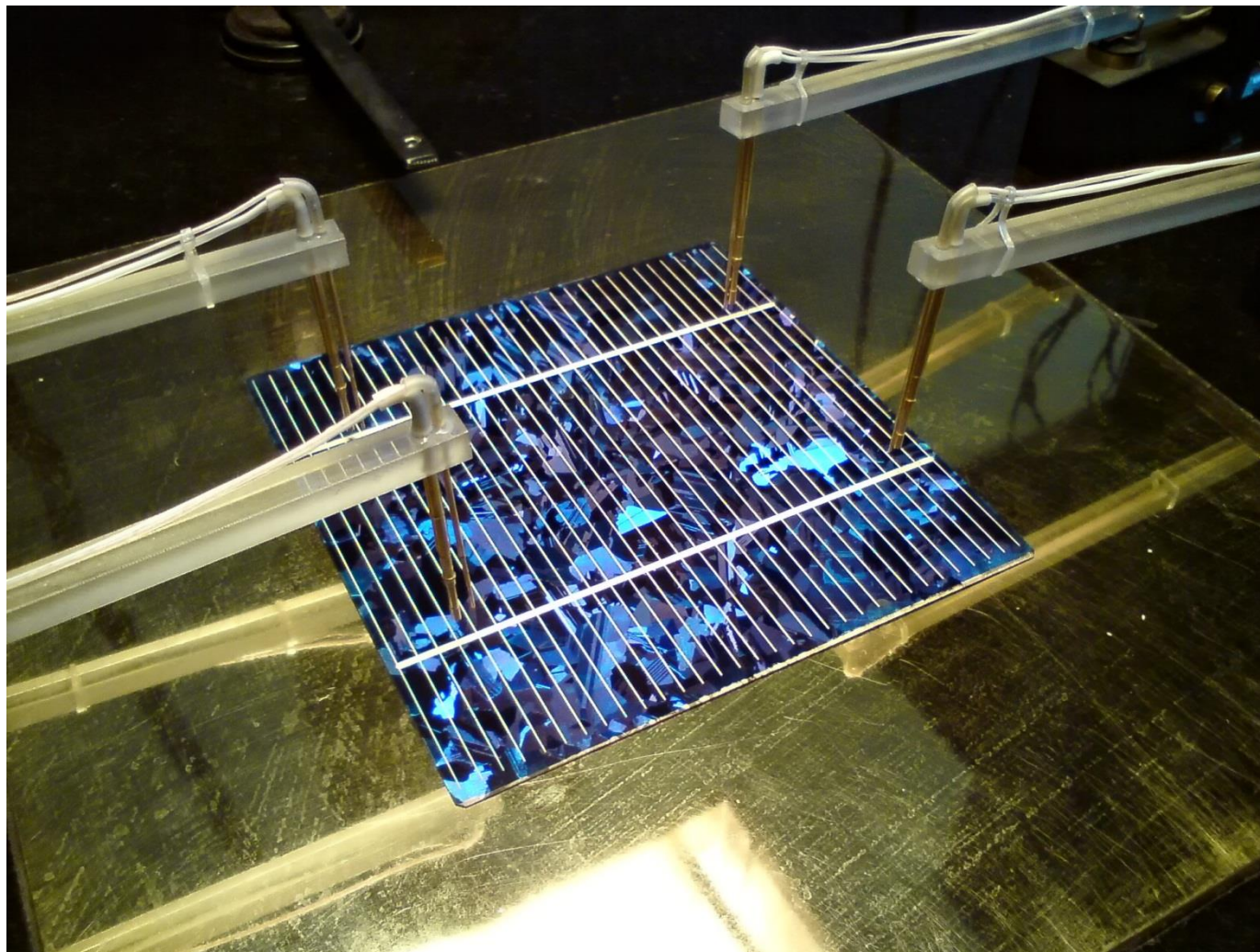


# Fazy procesu produkcyjnego fotoogniwa słonecznego

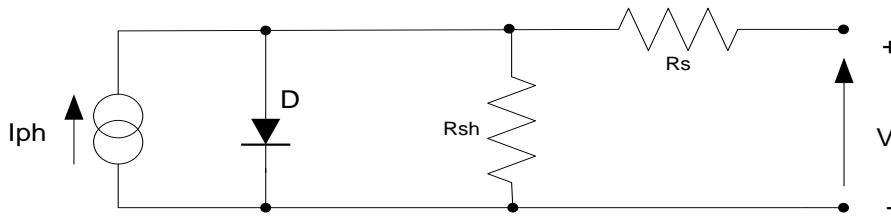


źródło : Marek Butkowski „Rynek technologii Słonecznych w Polsce”, prezentacja

# Testowanie krzemowego polikrystalicznego ogniw fotowoltaicznego na symulatorze Słońca



# Model fizyczny ogniwa fotowoltaicznego



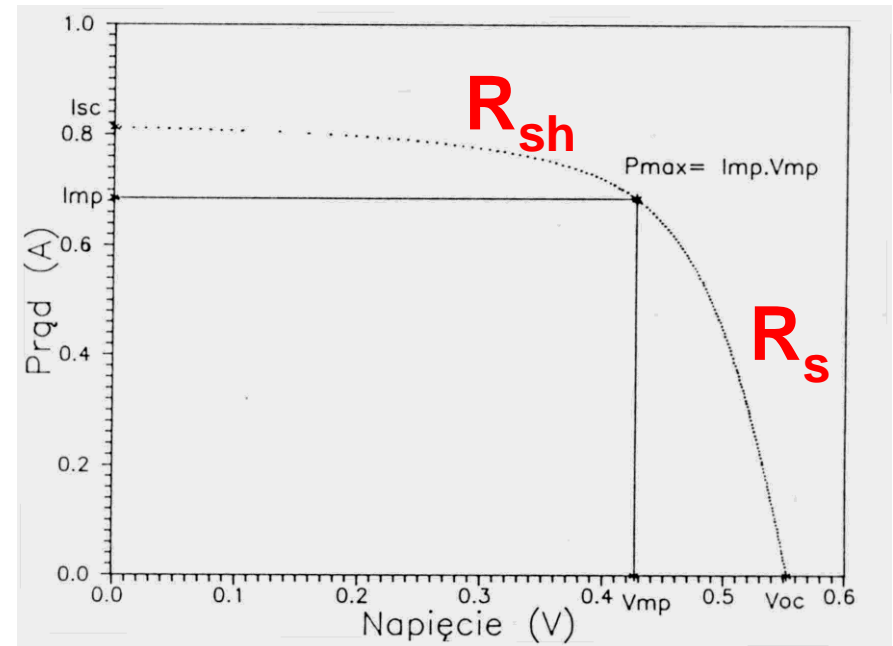
Gdzie:

D – symbolizuje złącze półprzewodnikowe

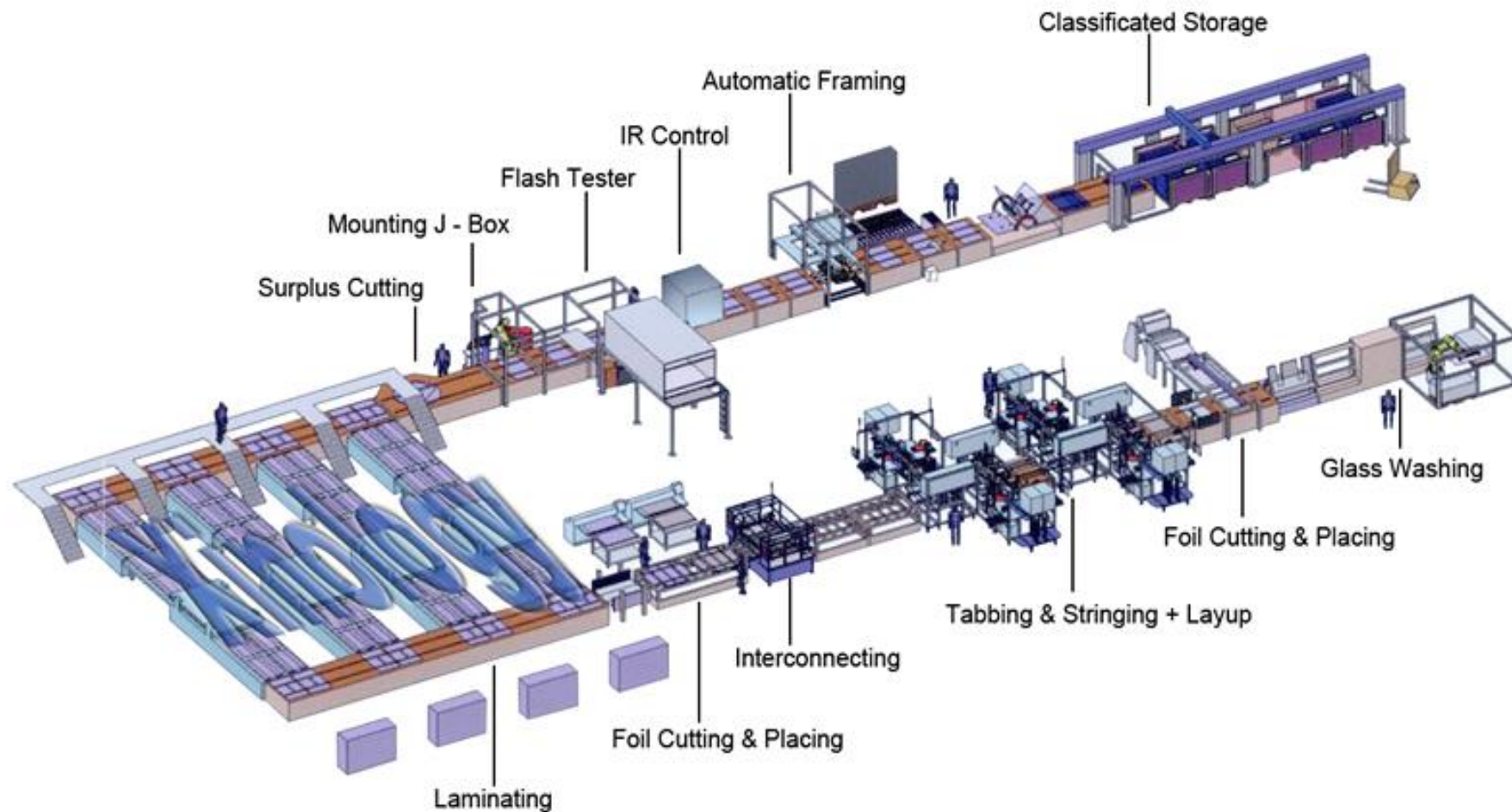
$I_{ph}$  – oznacza fotoprąd generowany w złączu

$R_{sh}$  – oznacza rezystancję upływności między elektrodami złącza (powinna mieć jak największą wartość)

$R_s$  – oznacza rezystancję szeregową – czyli właściwie rezystancję kontaktów (powinna mieć jak najmniejszą wartość)



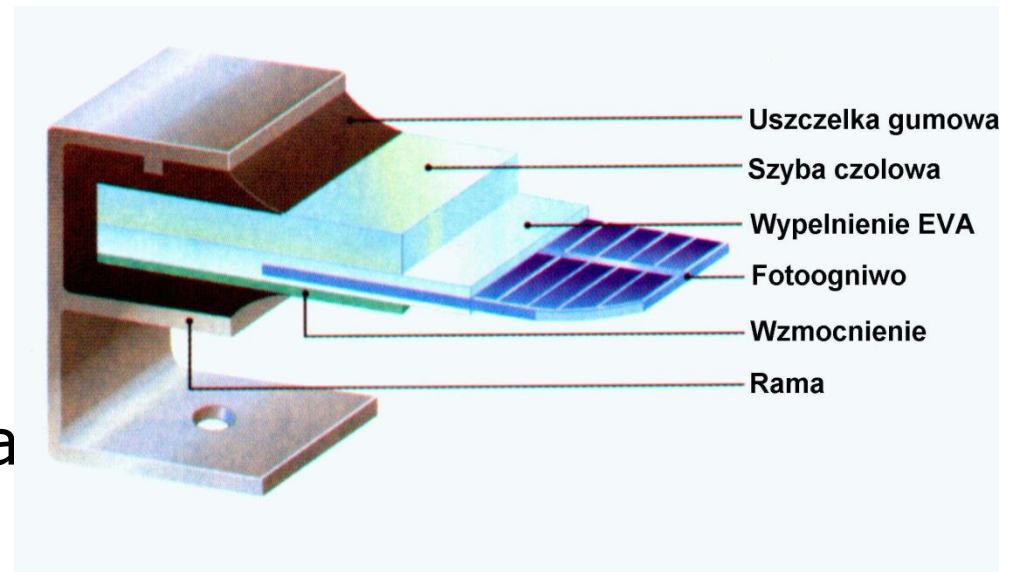
# Schemat linii produkcyjnej



Źródło: <http://xinology.com>

# Przekrój modułu fotowoltaicznego

- Odpowiednie połączenie pojedynczych komórek fotowoltaicznych w szeregi
- Masa wypełniająca
- Szyba przednia
- Tworzywo tylne
- Rama wzmacniająca





**Dziękuję za uwagę !!!**

**To już jest koniec  
Bo nie ma już nic  
Jesteście wolni  
Możecie iść...**

