



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

Wydział EAIiIB
Katedra Automatyki i Robotyki

AGH Kraków 2019

Energia słoneczna prąźródłem innych źródeł energii



BIOMASA



BIOGAZ ROLNICZY



ROPA I GAZ



HYDROENERGIA



WĘGIEL



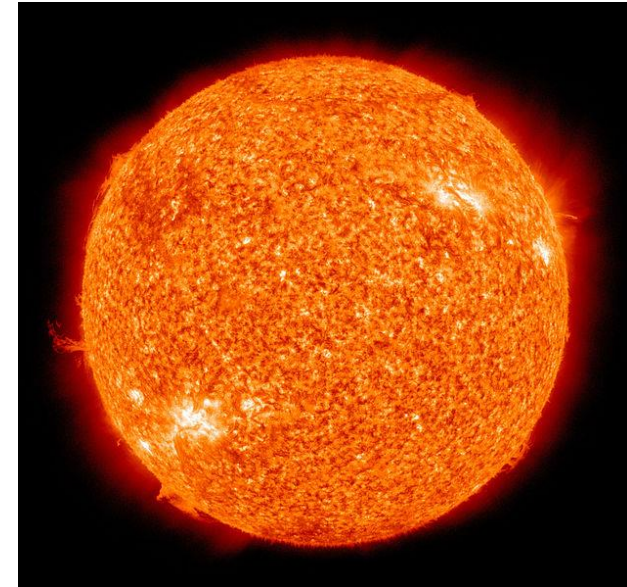
WIATR



Słońce

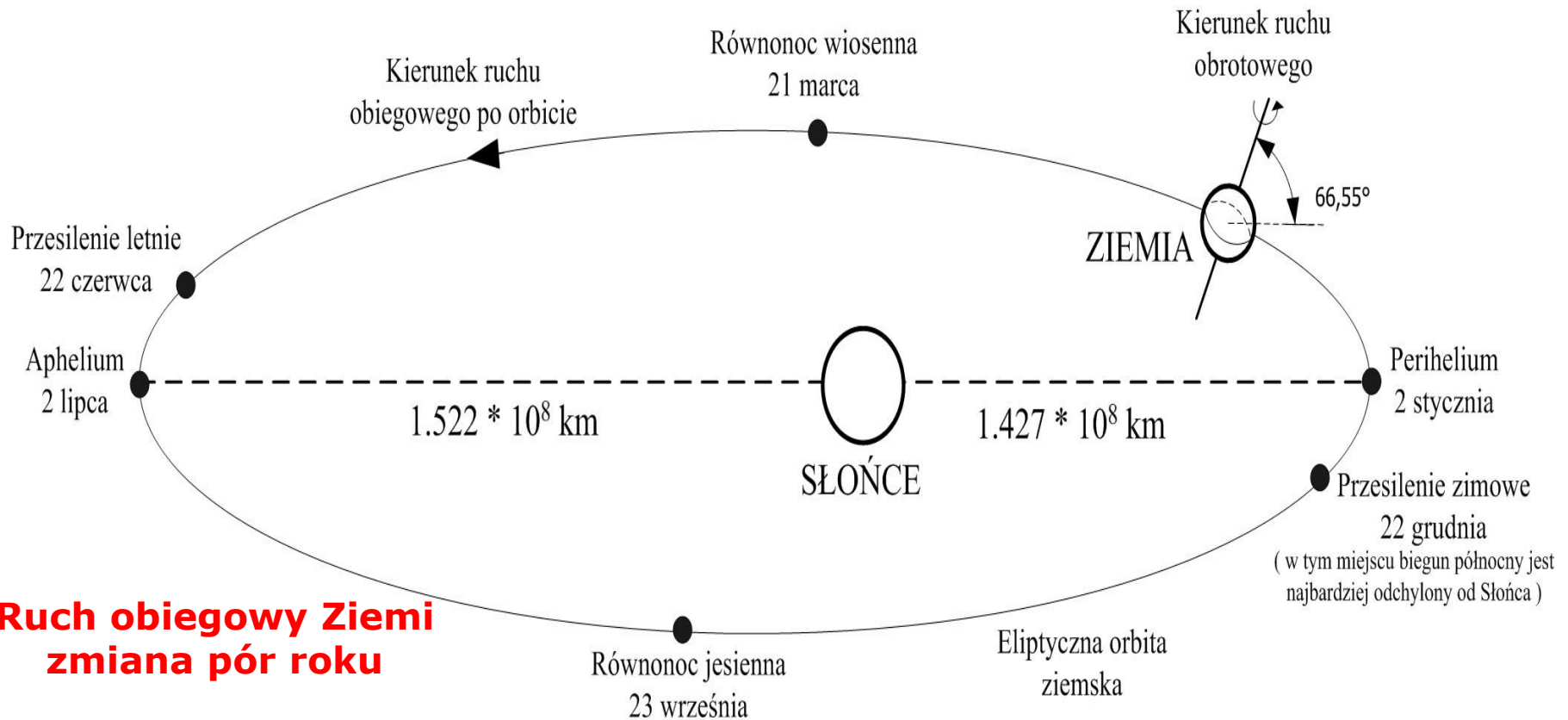
- Centralna gwiazda Układu Słonecznego, najjaśniejszy obiekt na niebie i główne źródło energii docierającej do Ziemi
- Kula zjonizowanego gazu o masie około $1,9891 \times 10^{30}$ kg (333 950 mas Ziemi)
- Średnica $1,392 \times 10^6$ km (109 średnic Ziemi)
- Szacowana temperatura jądra ok. $1,36 \times 10^7$ 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



Geometria słoneczna

Ruch obrotowy Ziemi dzień - noc



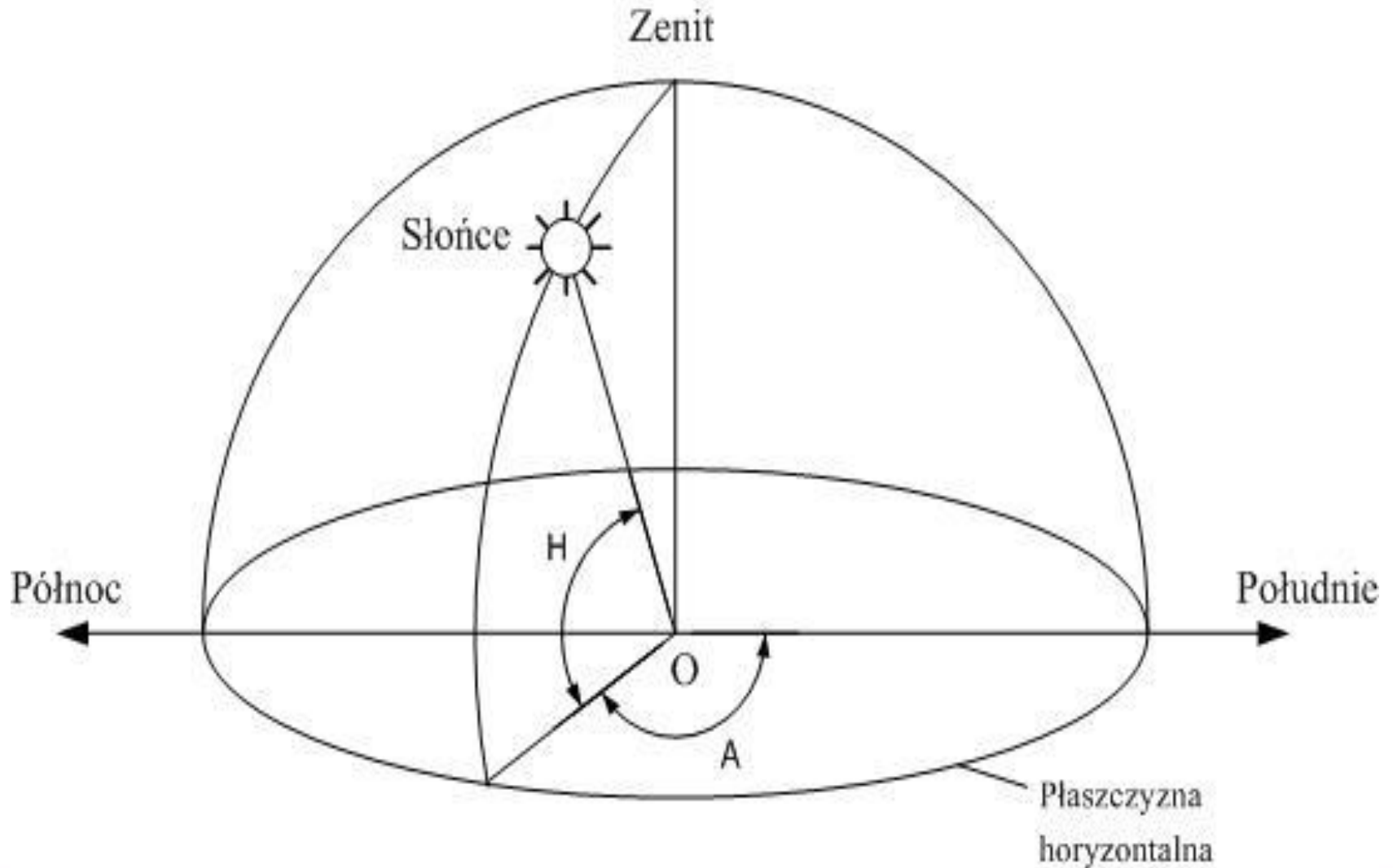
Ruch obiegowy Ziemi zmiana pór roku

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

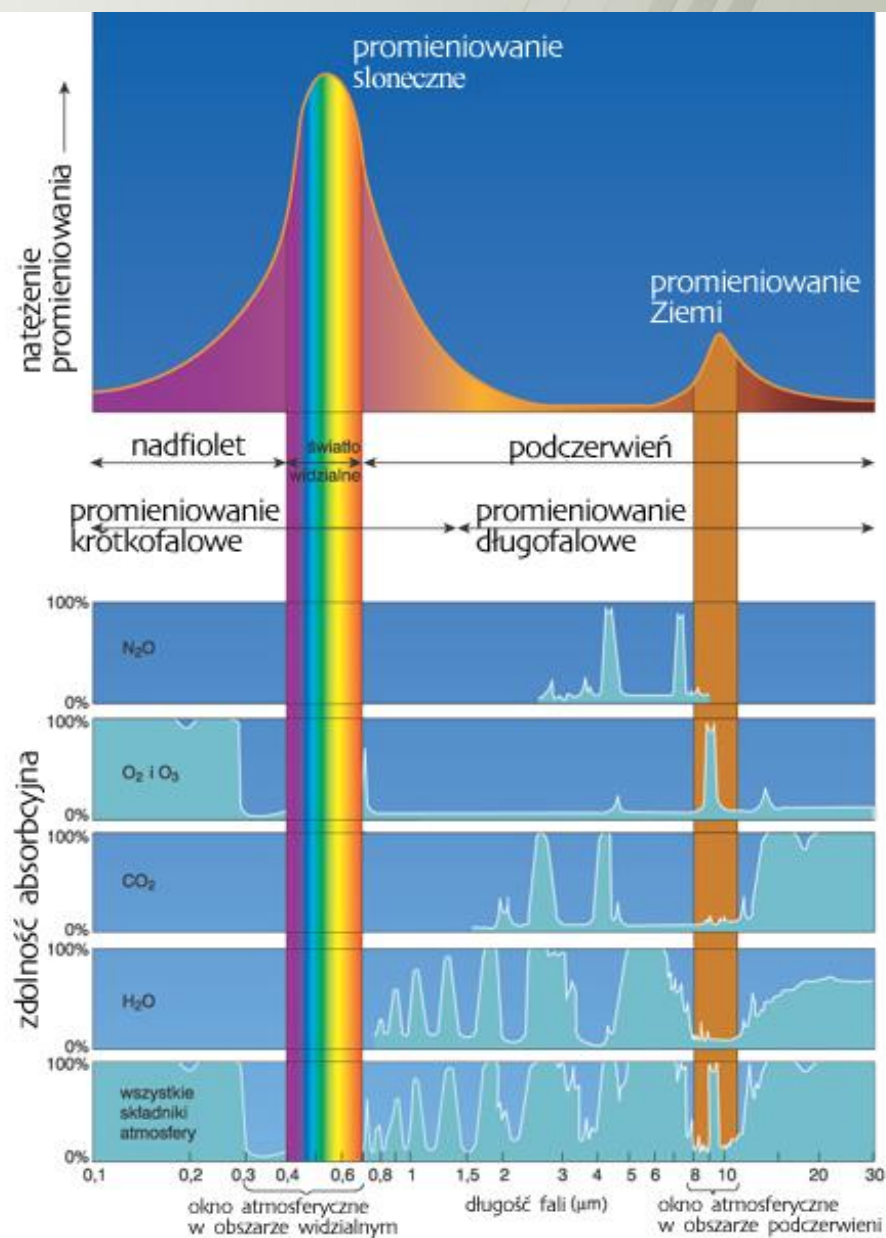
Stała słoneczna

- 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/m²
- 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/m² w cyklu rocznym (ruch obiegowy Ziemi wokół Słońca).

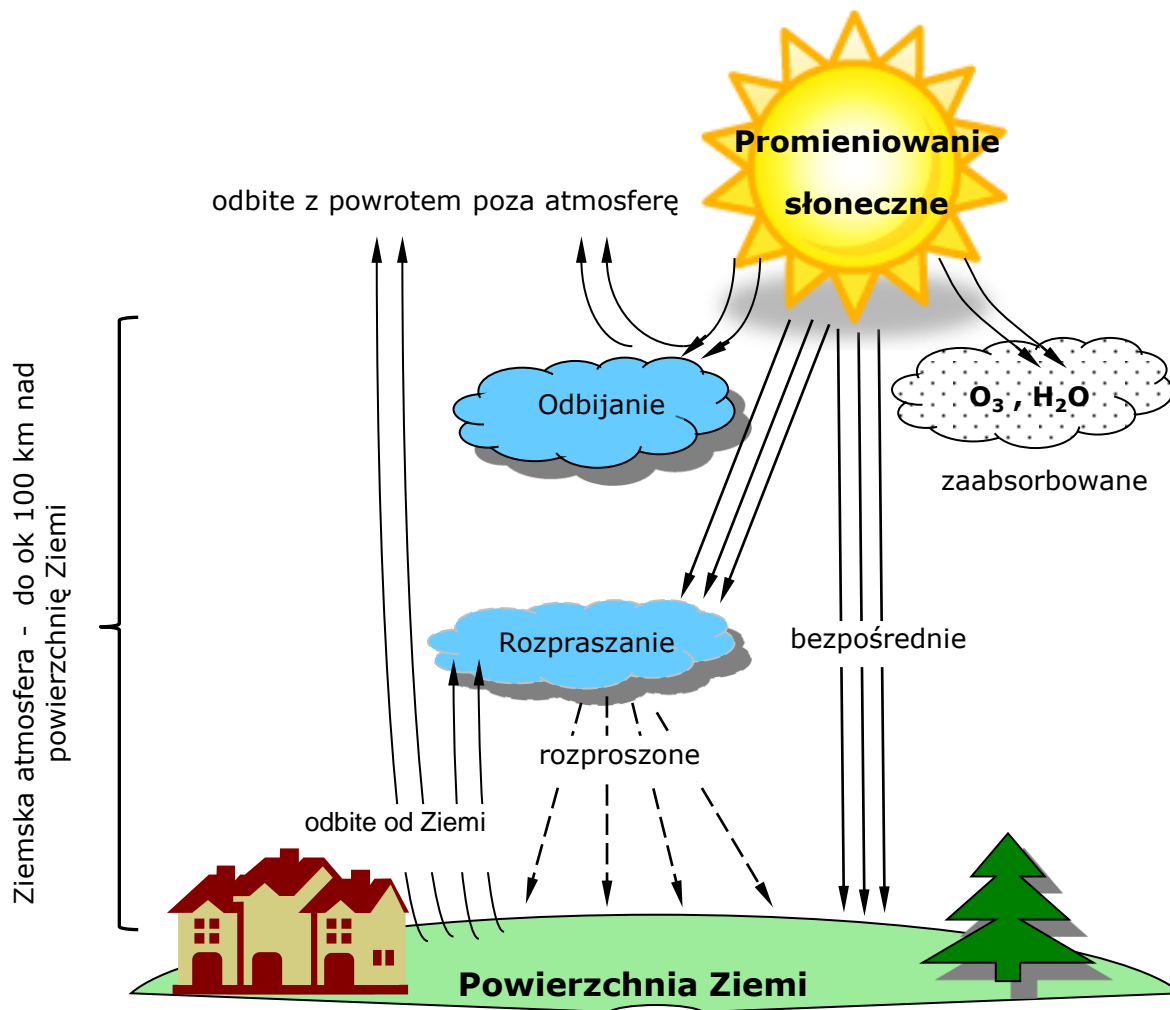
Azymut i elewacja Słońca



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



Droga promieni słonecznych przez atmosferę – współczynnik masy powietrza

AMm

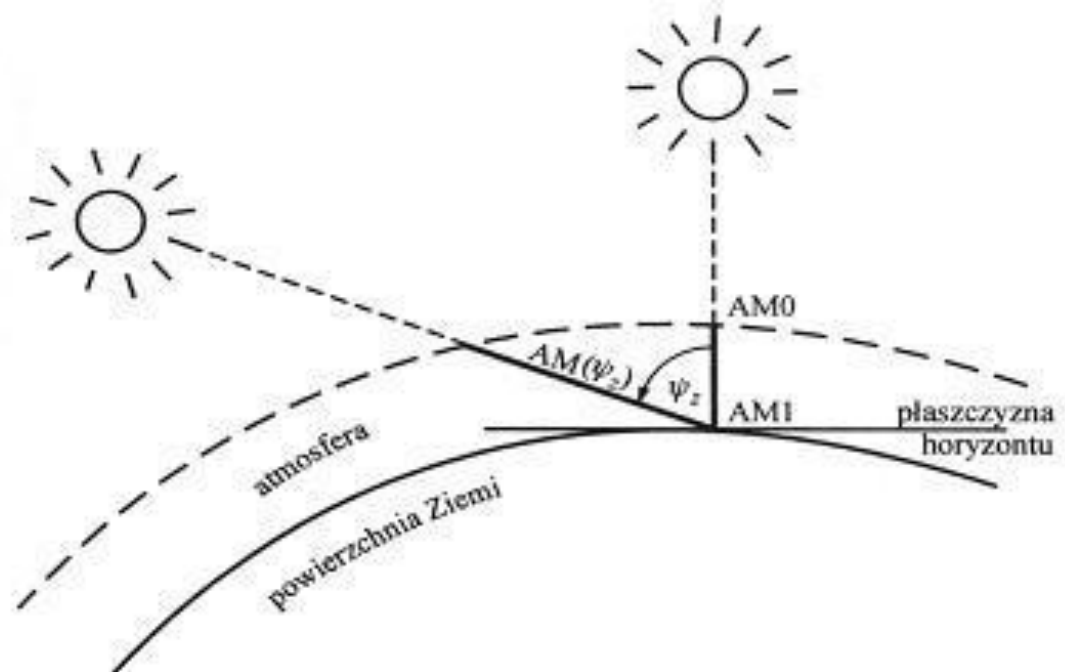
$$m = \frac{1}{\cos \psi} \quad \text{dla } \psi < 70^\circ$$

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

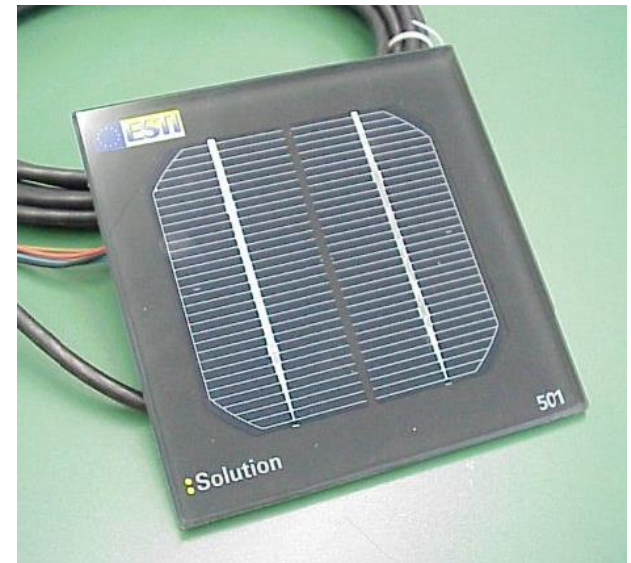
Pyranometr (solarymetr), przyrząd do pomiaru całkowitego promieniowania słonecznego (promieniowanie w atmosferze ziemskiej) w zakresie $0,3-3 \mu\text{m}$, padającego na poziomą płaszczyznę.



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 połowce 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

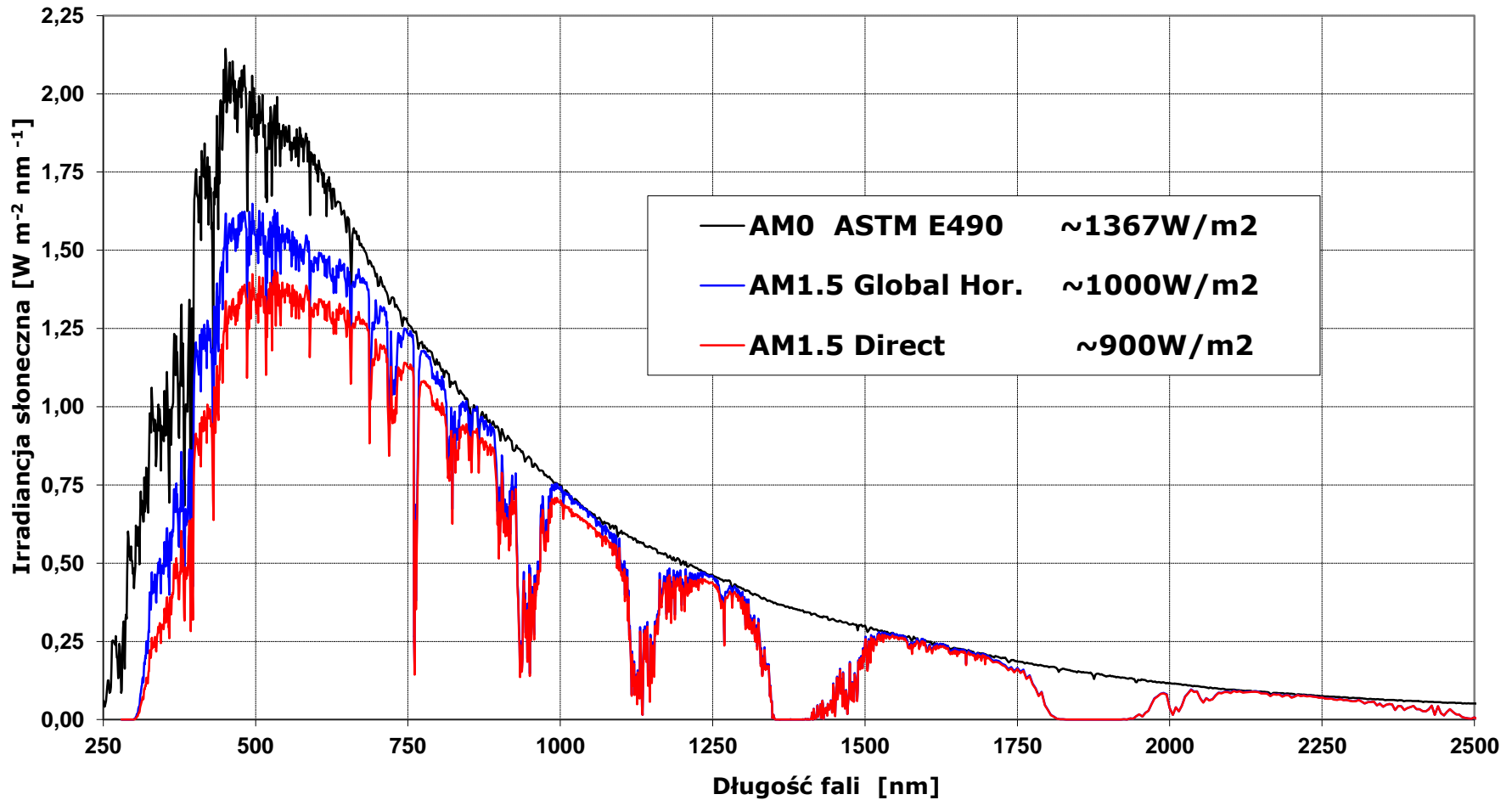
➤ **Optimum**

- 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.



0,018%

1,7%

47%

208%

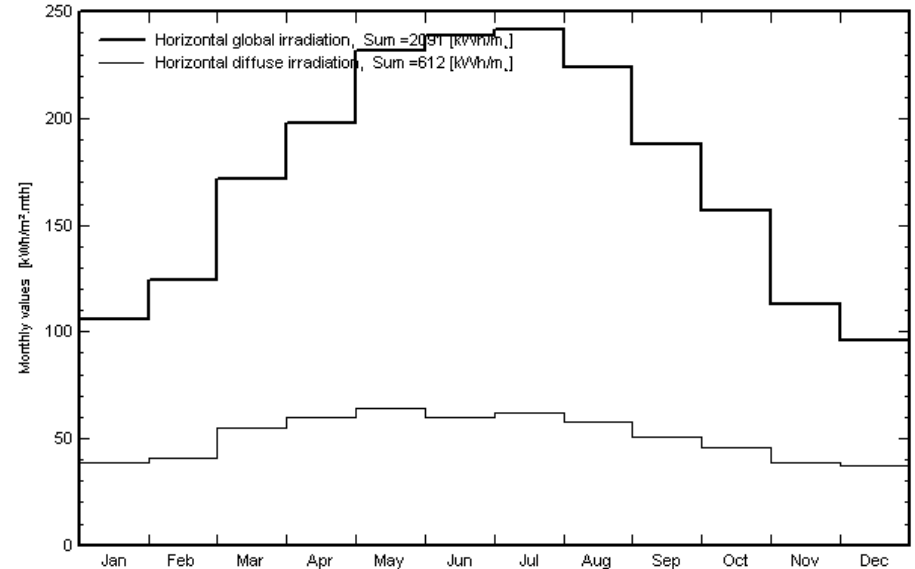
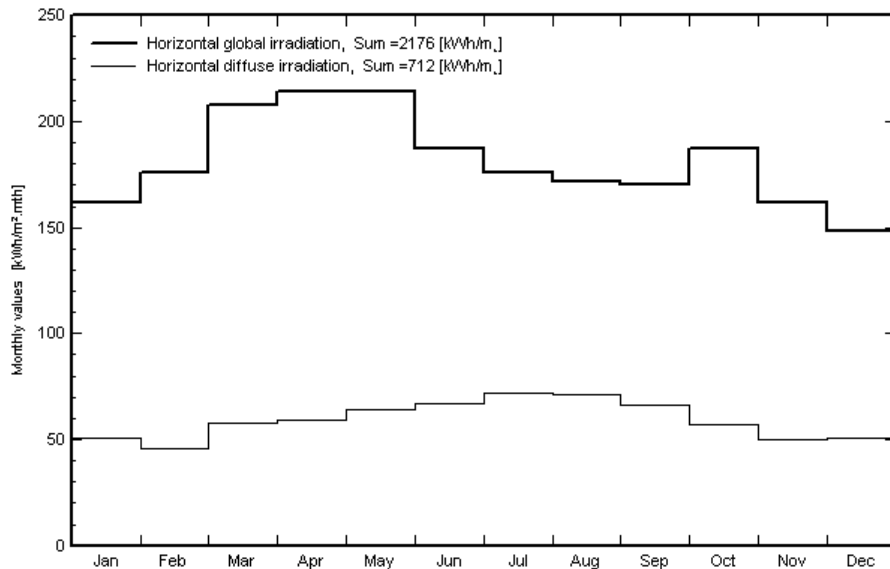
Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

Dakar **2176**

Kair **2091**

Meteo for Dakar, Synthetic data

Meteo for Cairo, Synthetic data

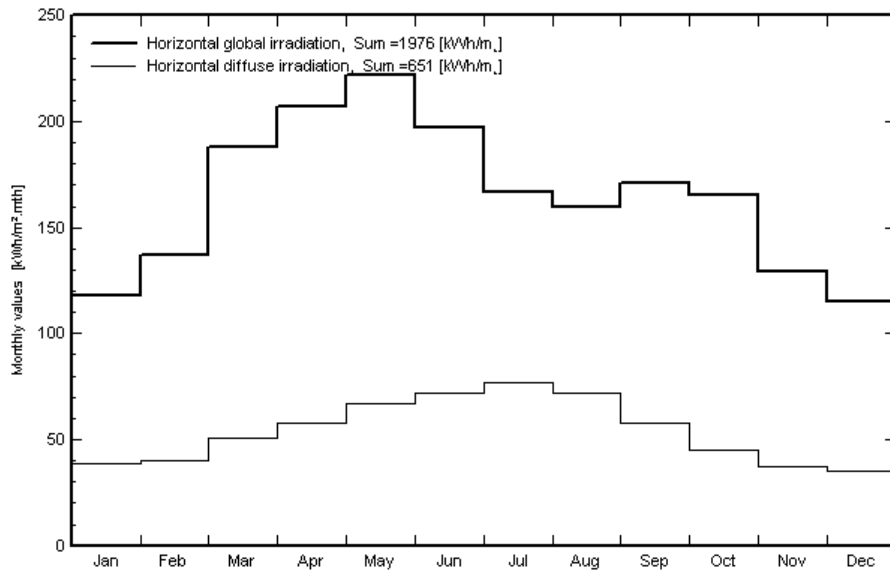


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

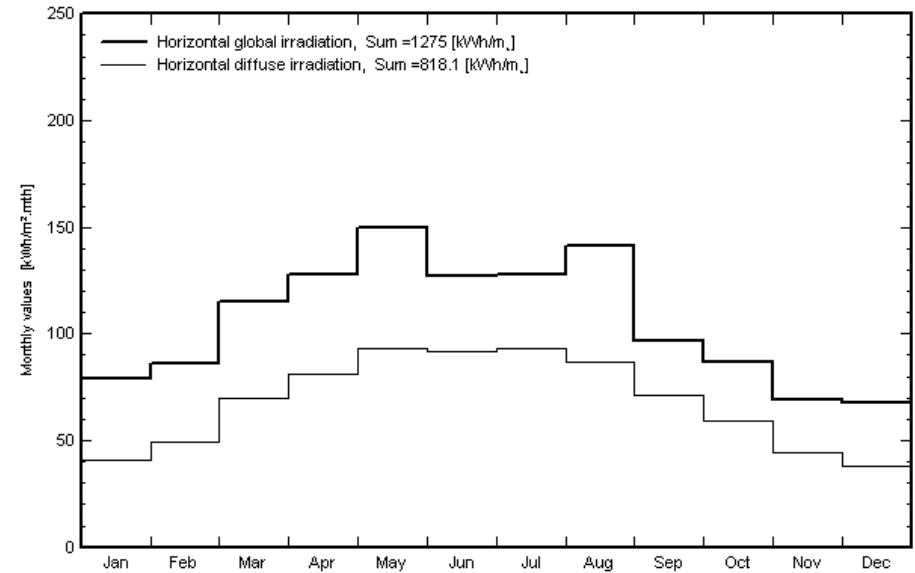
Delhi 1976

Meteo for Delhi, Synthetic data



Tokyo 1275

Meteo for Tokyo, Synthetic data

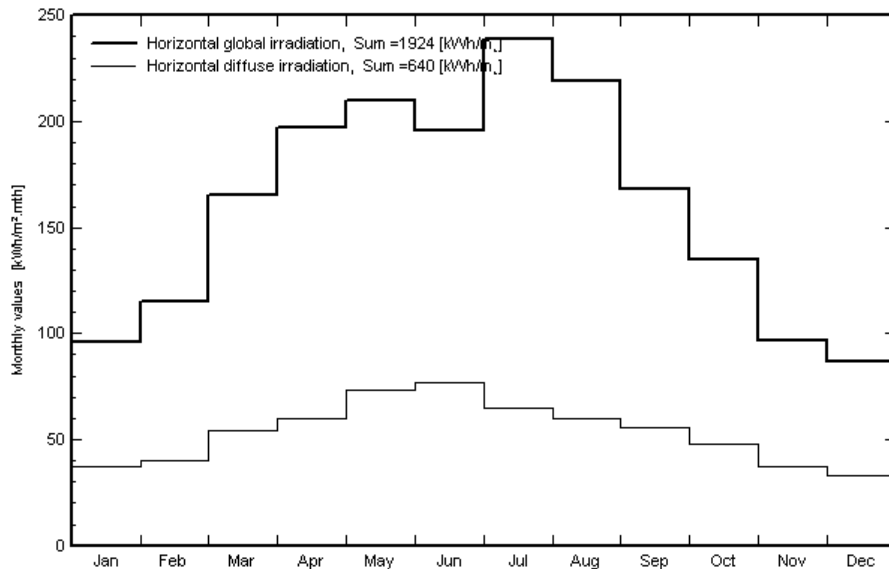


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

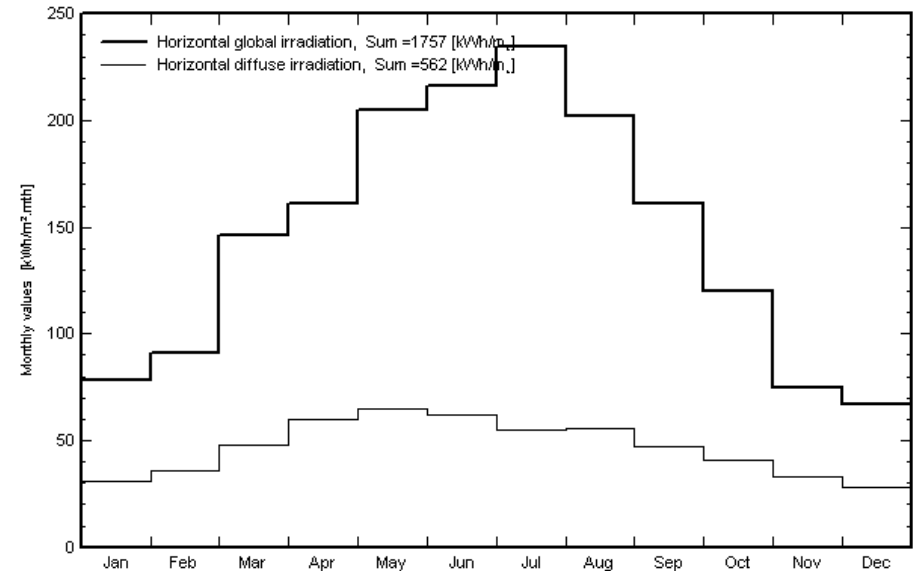
Los Angeles **1924**

Meteo for Los Angeles, Synthetic data



Sevilla **1757**

Meteo for Sevilla, Synthetic data

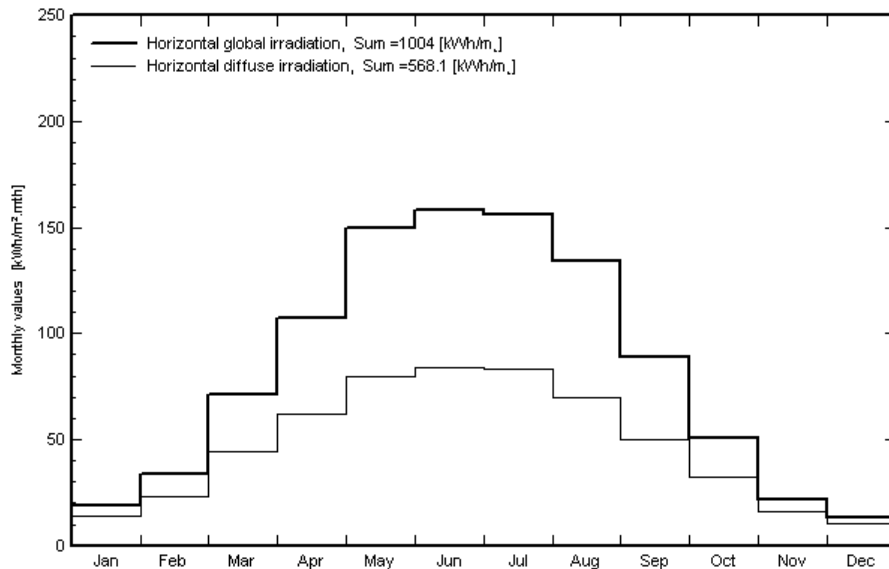


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

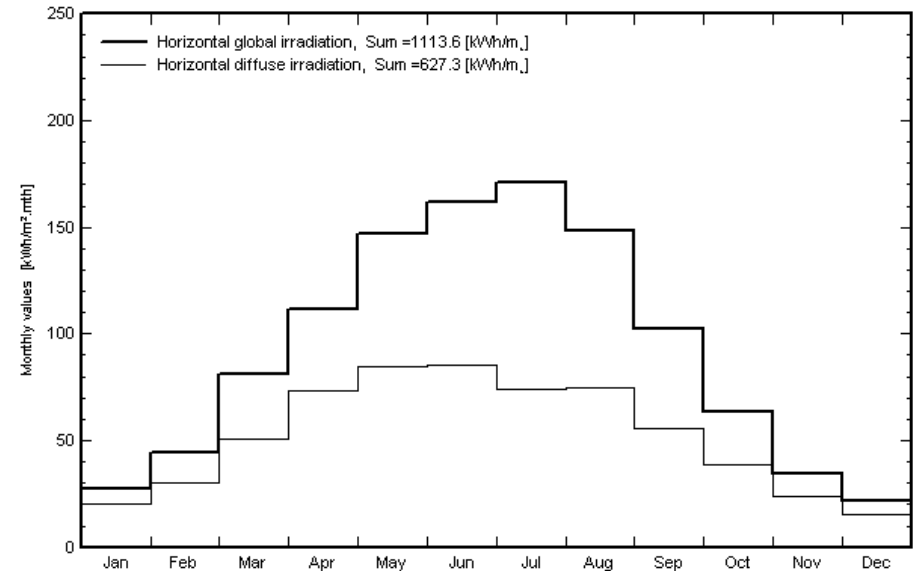
Berlin **1004**

Meteo for Berlin, Synthetic data



Freiburg **1113**

Meteo for Freiburg, Synthetic data

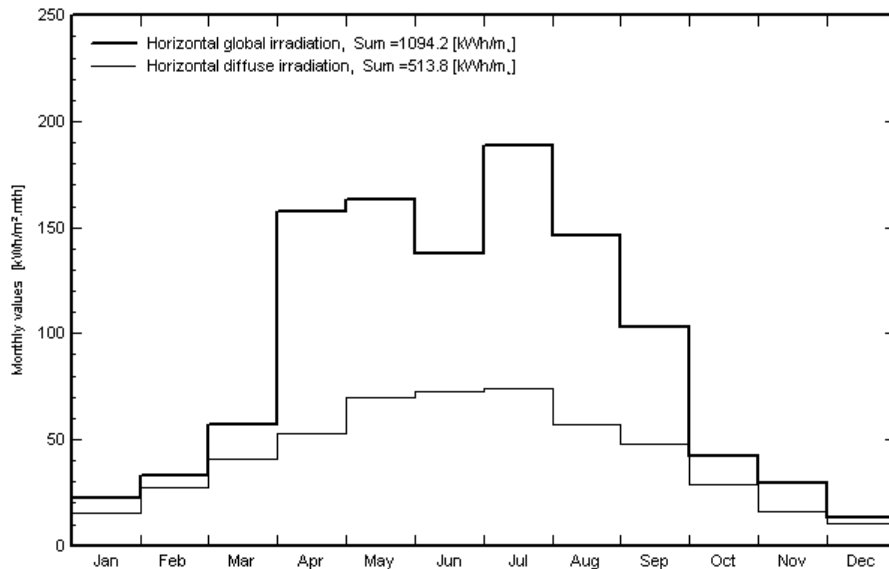


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

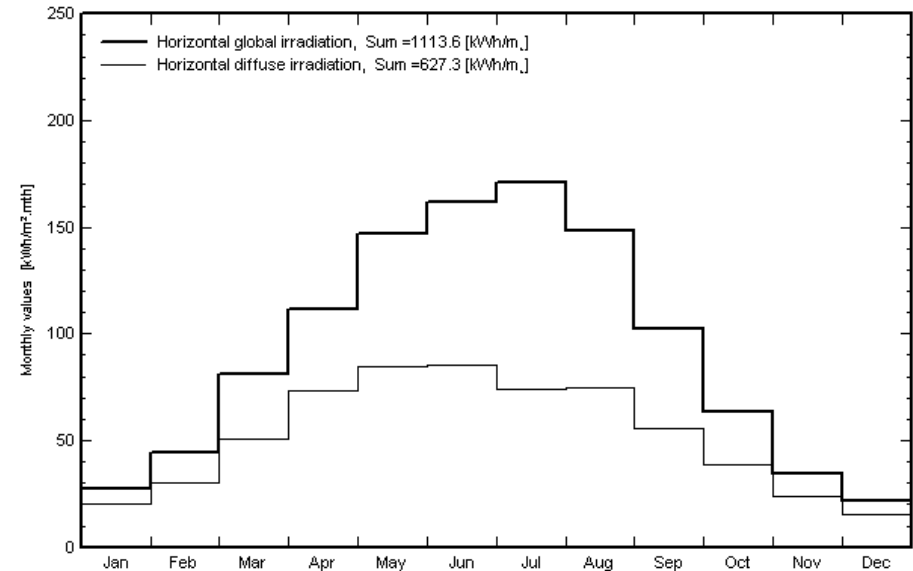
Kraków **1094**

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



Freiburg **1113**

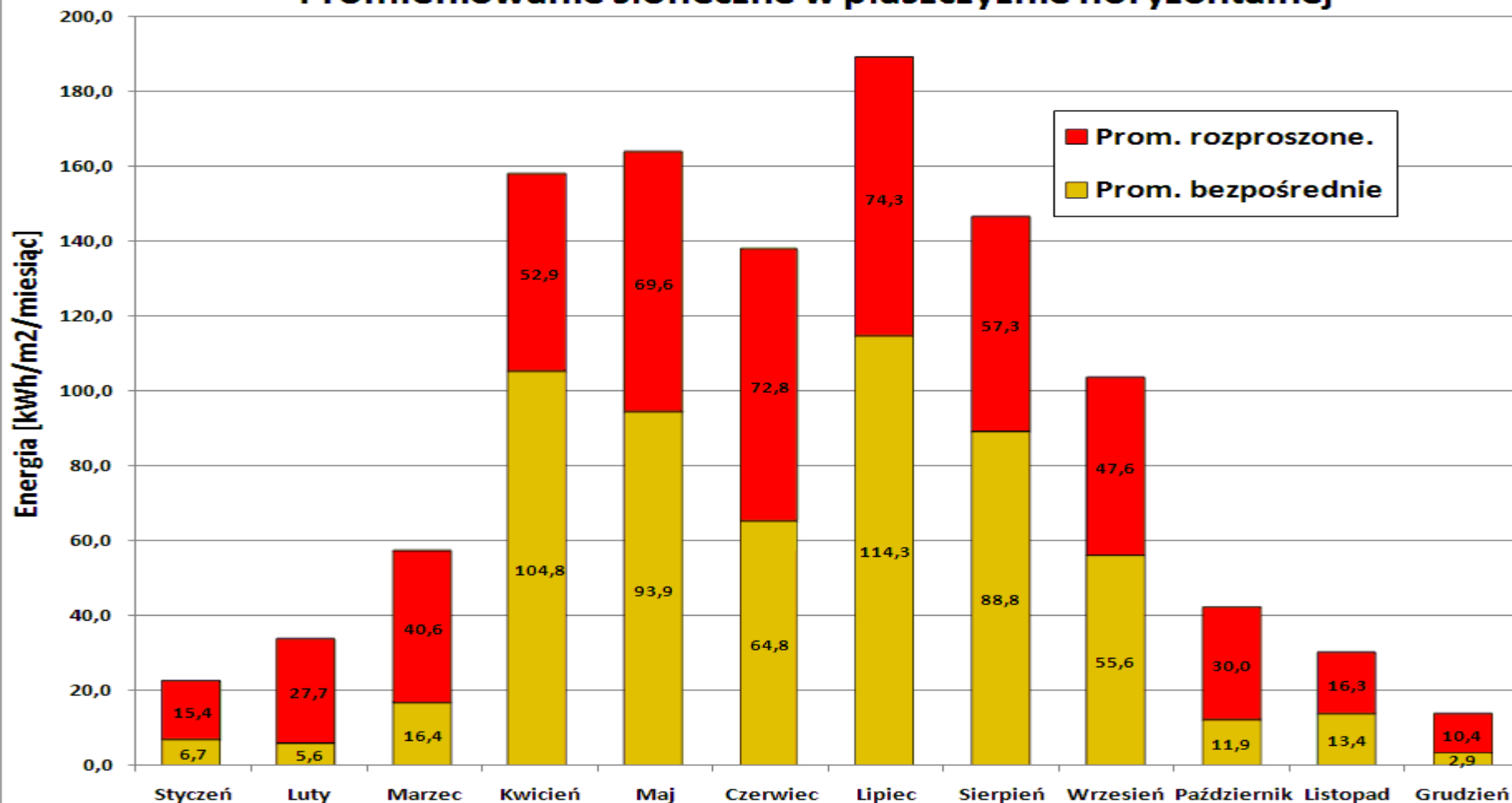
Meteo for Freiburg, Synthetic data



Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Struktura promieniowania słonecznego - pomiary

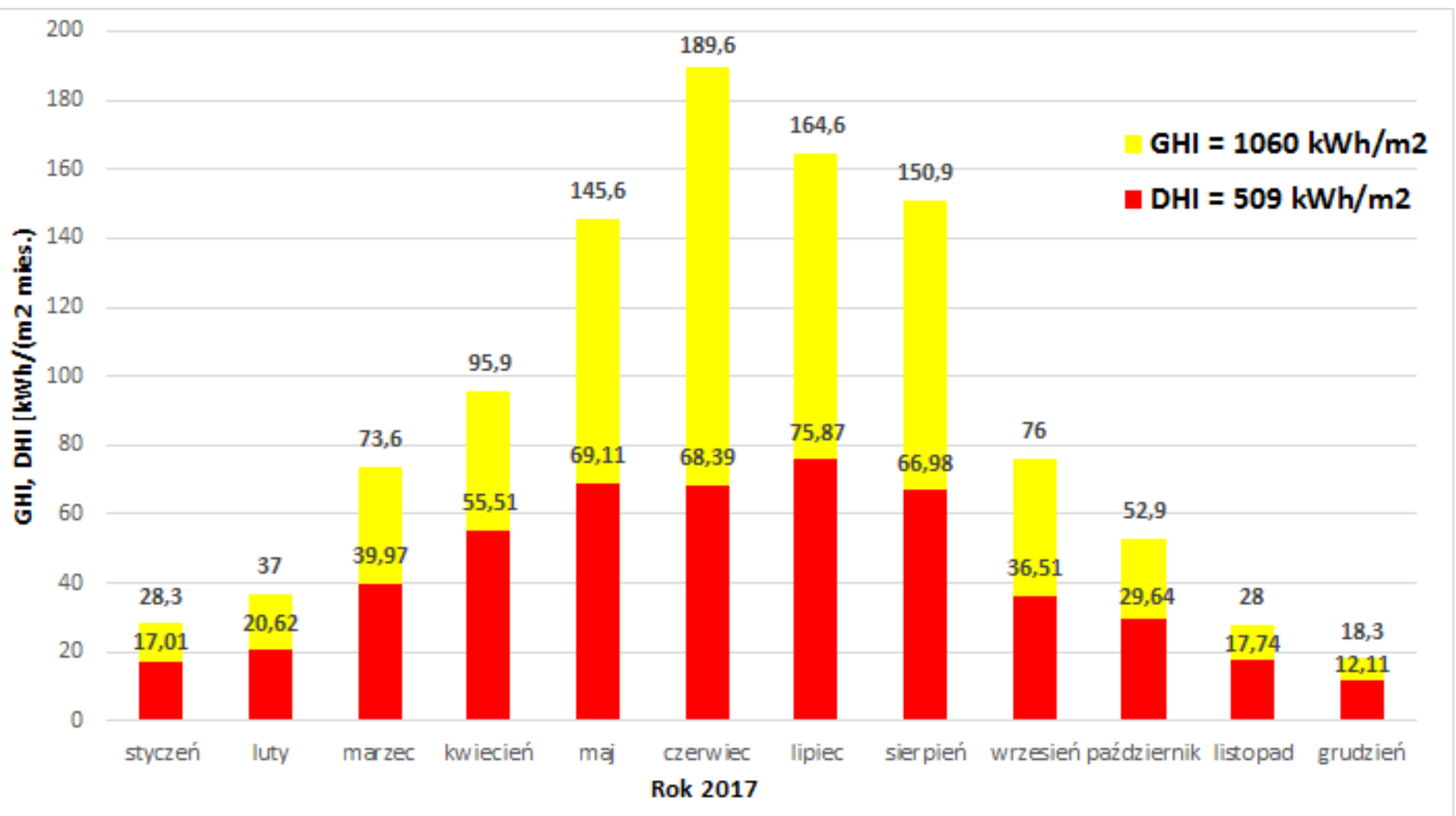
Promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horizontalnej



Struktura promieniowania słonecznego - Kraków rok 2009

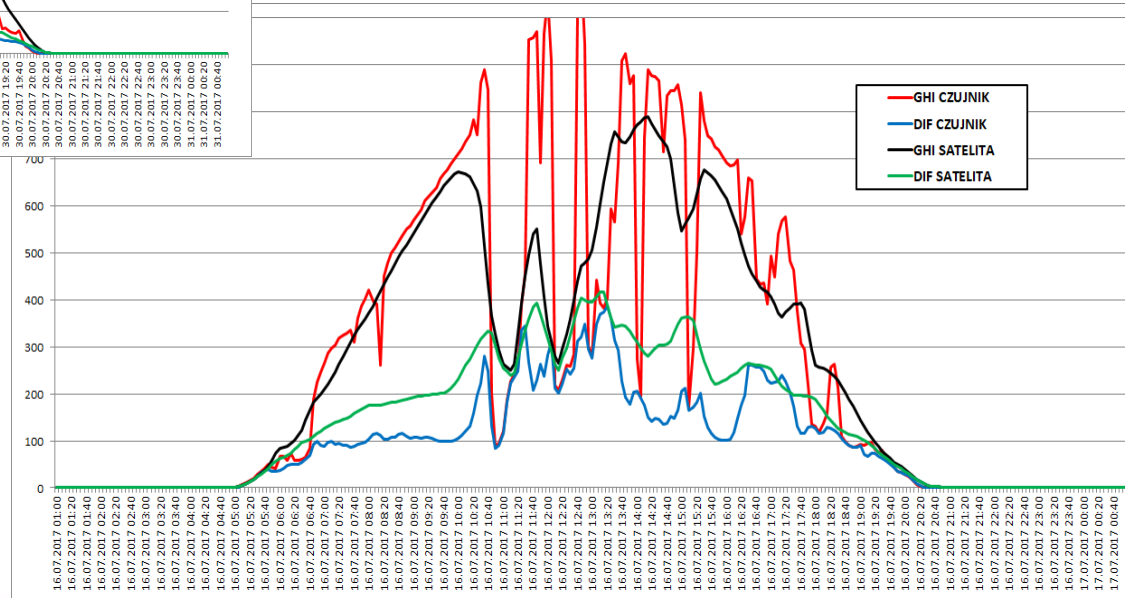
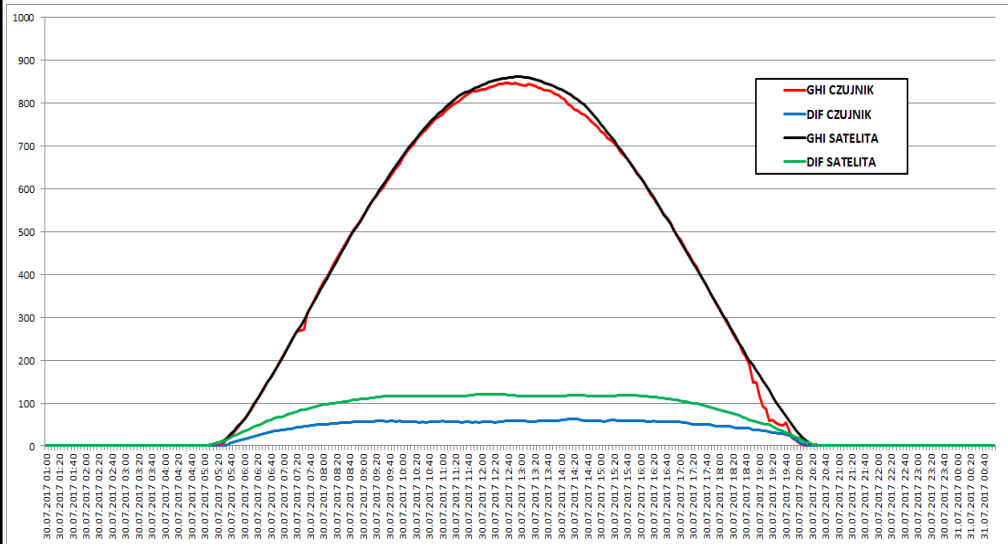
Promieniowanie słoneczne 2017

Kraków AGH, dach pawilonu C-3



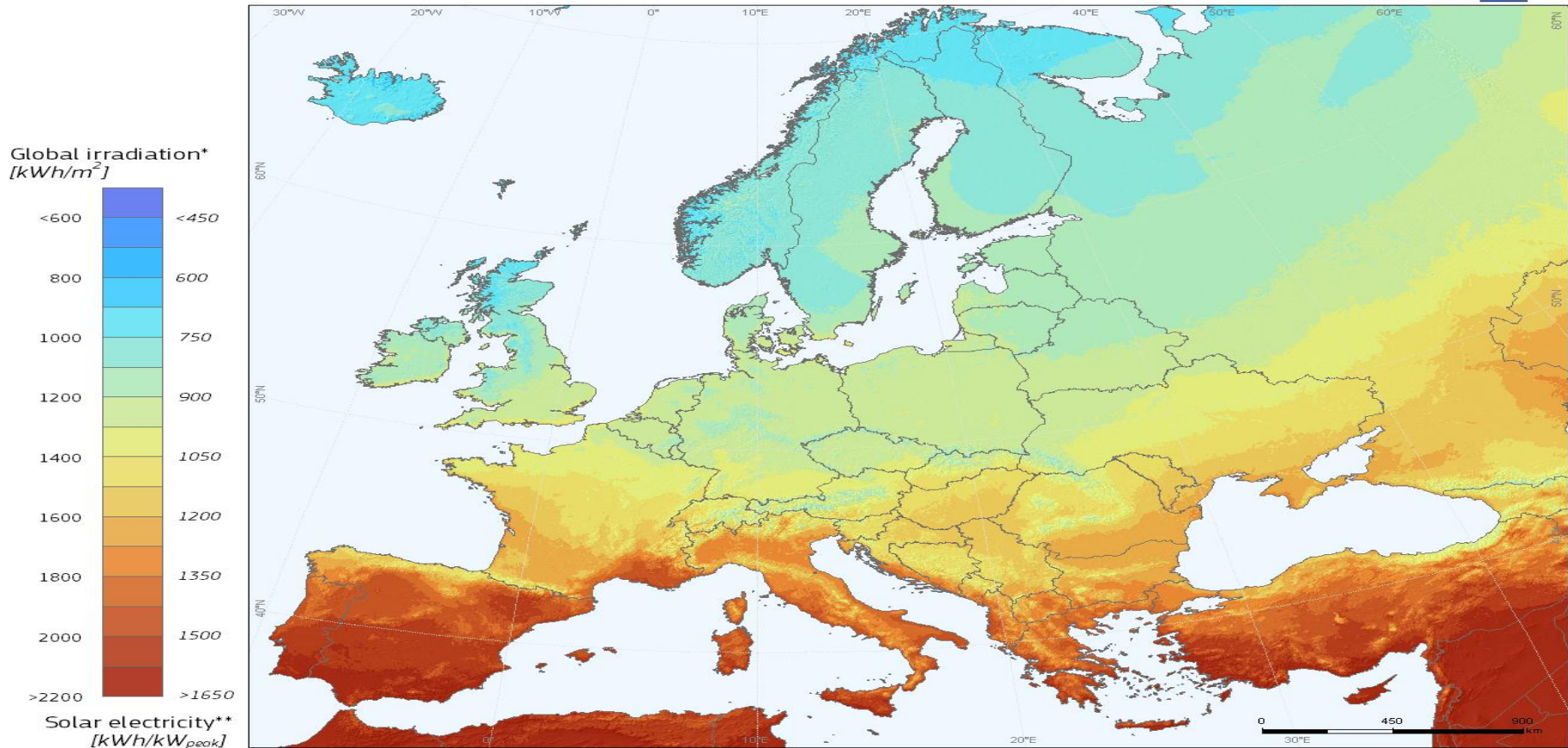
Źródła danych o promieniowaniu słonecznym

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_p system with a performance ratio of 0.75

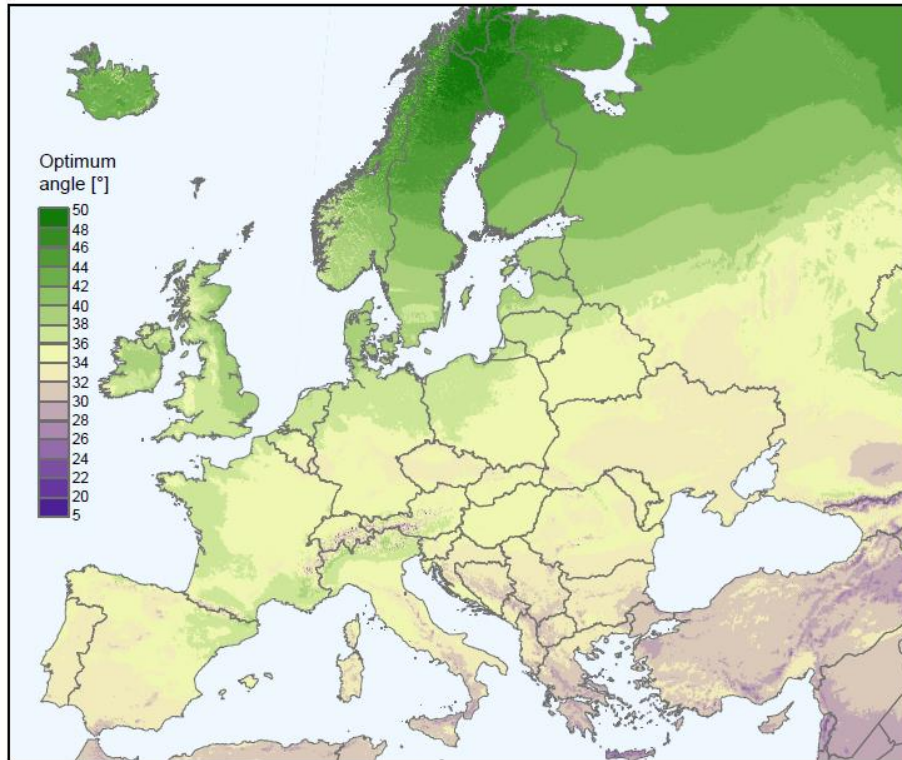
© European Union, 2012
PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
EC - Joint Research Centre
In collaboration with: CM SAF, www.cmsafe.eu

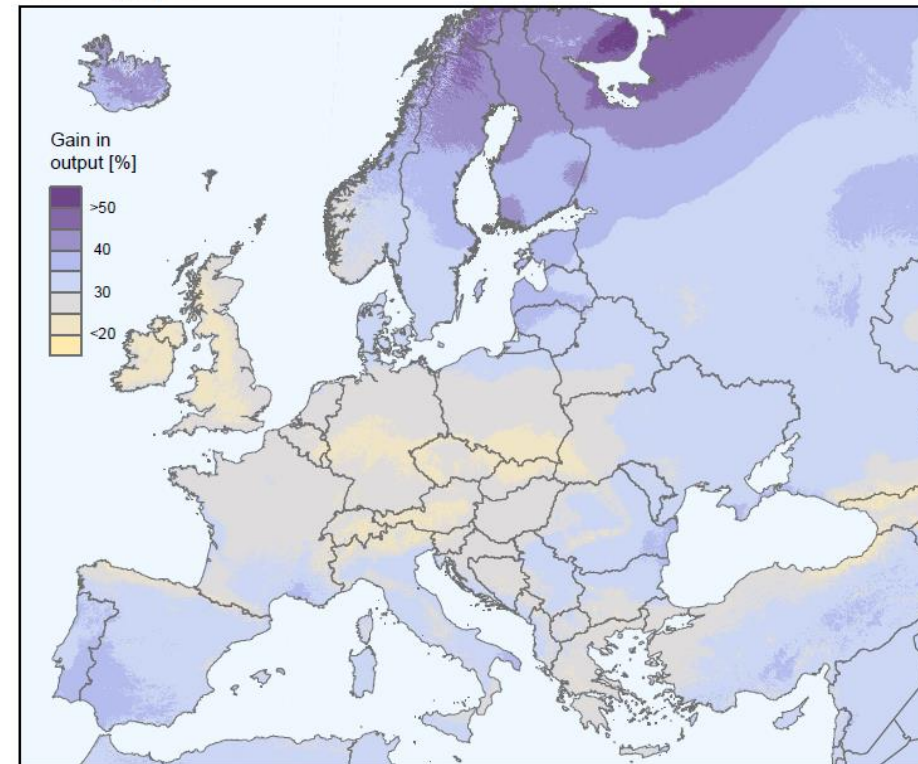
Legal notice: Neither the European Commission nor any person acting on behalf of the Commission is responsible for the use which might be made of this publication.

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/>

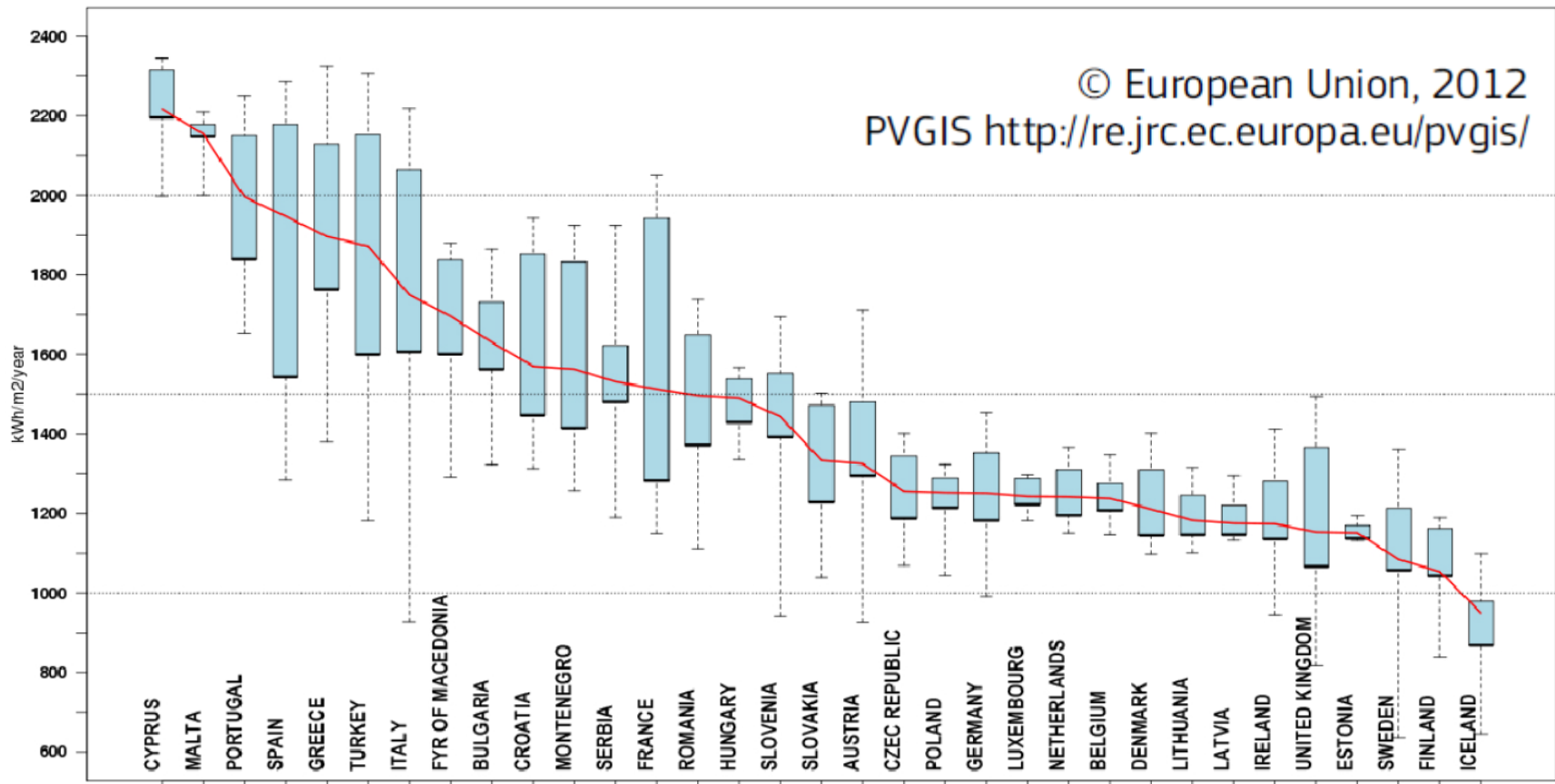
Authors:

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:

 **CM SAF**
 Climate Monitoring
www.cmsaf.eu

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), 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:

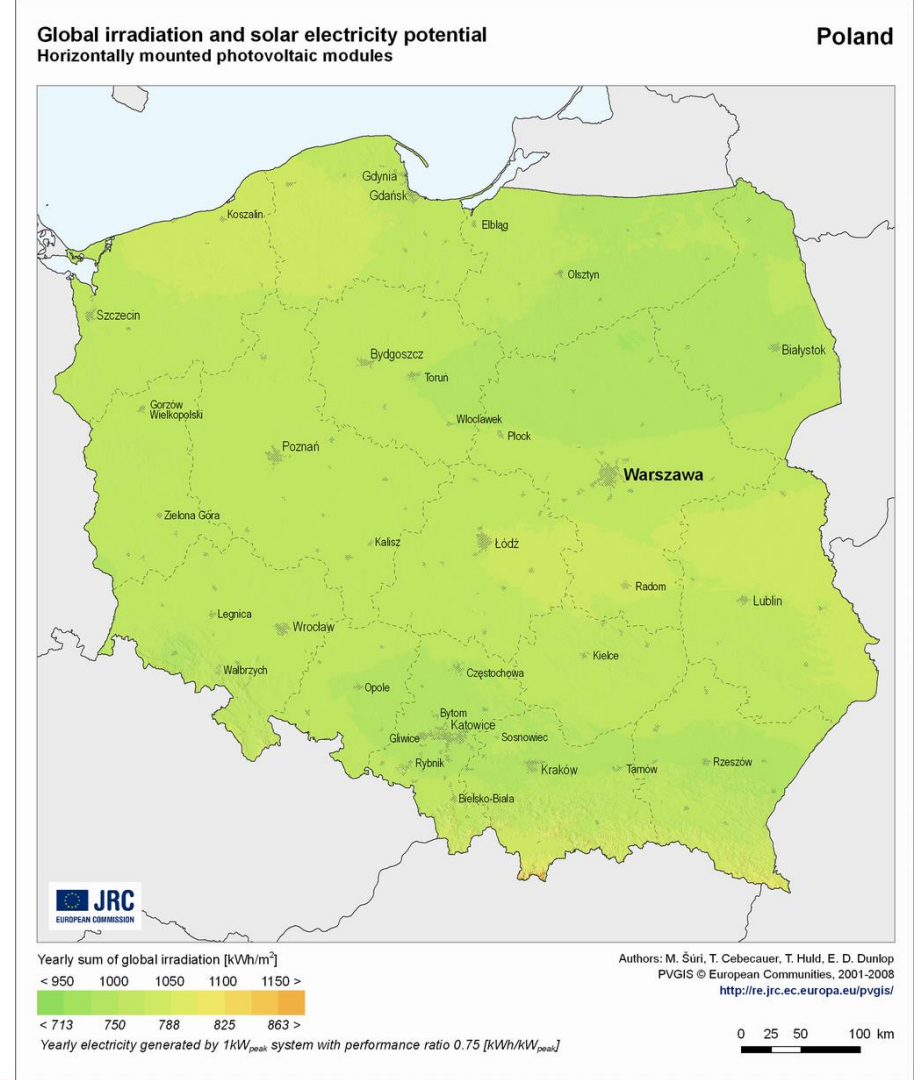
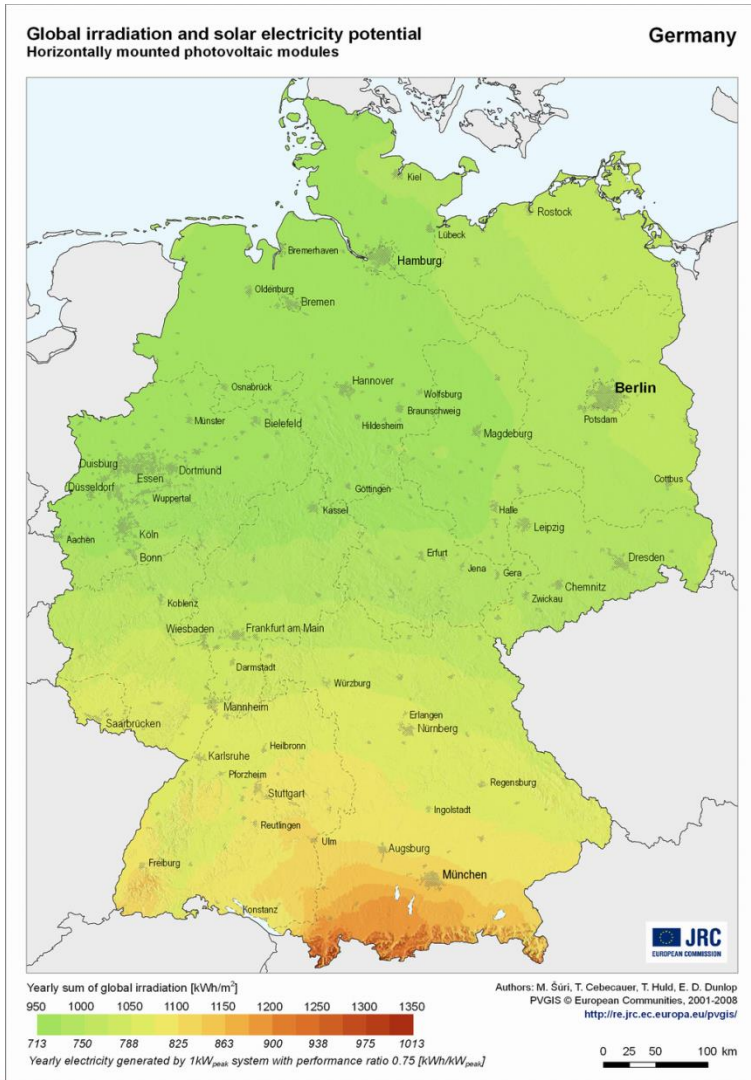
Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
European Commission • Joint Research Centre
Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit
TP 450 I-21027 Ispra (VA) Italy

In collaboration with:



Climate Monitoring
www.cmsaf.eu

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

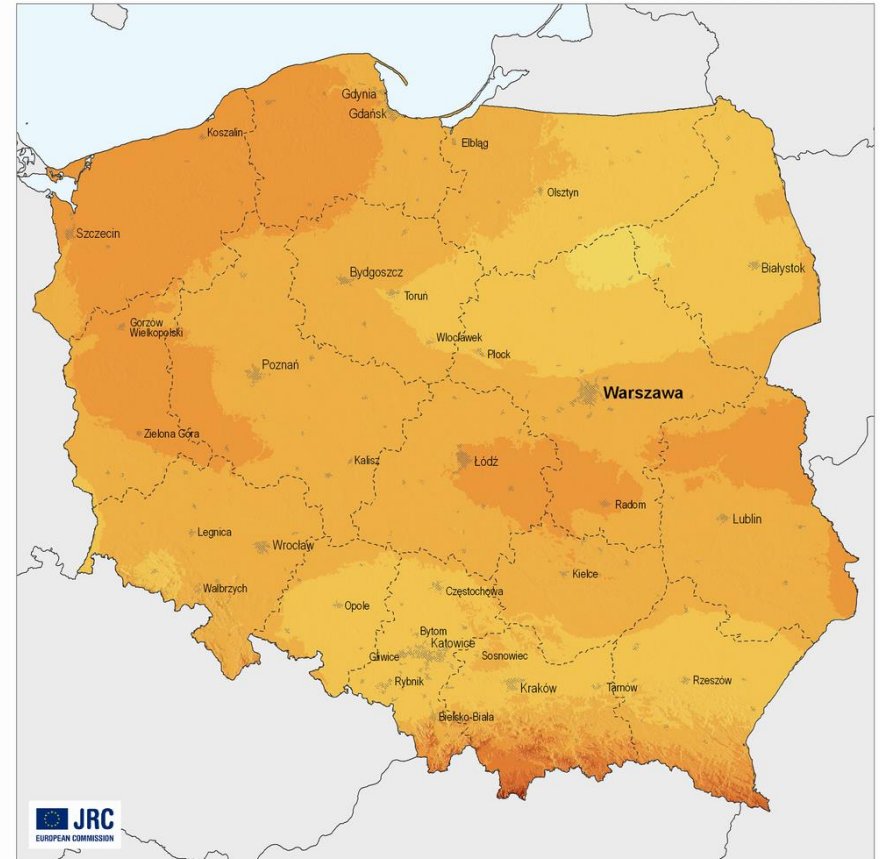


Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]
 < 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 >
 < 825 863 900 938 975 1013 1050 >
 Yearly electricity generated by 1kW_{peak} system with performance ratio 0.75 [kWh/kW_{peak}]

Authors: M. Šúri, T. Cebeauer, 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



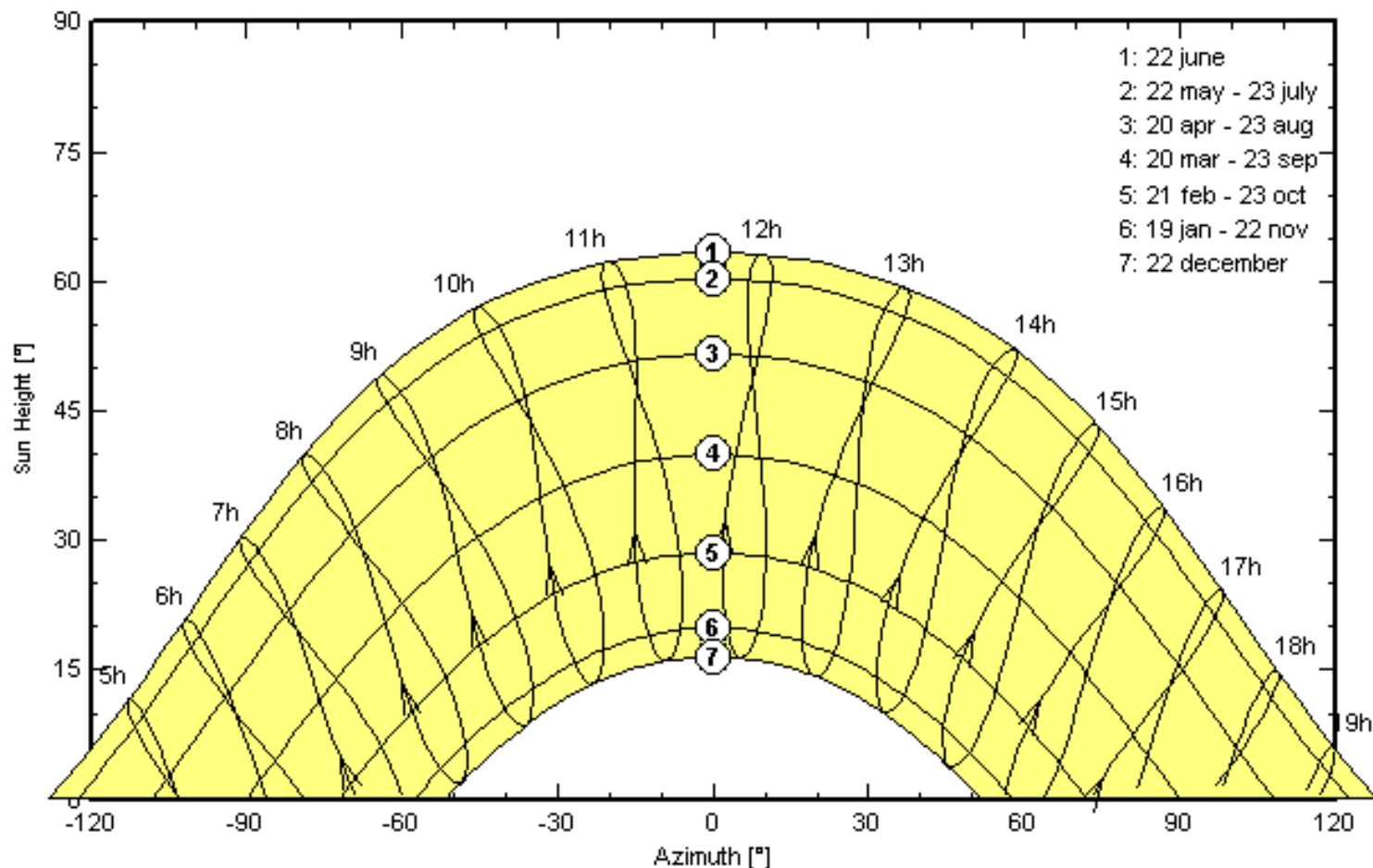
Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]
 < 1100 1150 1200 1250 1300 >
 < 825 863 900 938 975 >
 Yearly electricity generated by 1kW_{peak} system with performance ratio 0.75 [kWh/kW_{peak}]

Authors: M. Šúri, T. Cebeauer, 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/m₂

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 :

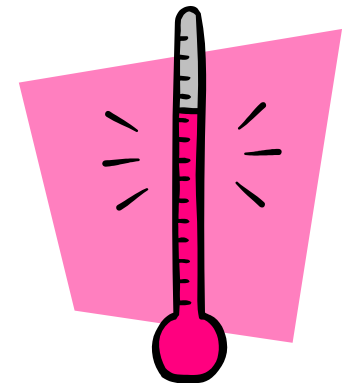
TF = 1.33 (120 % of fixed plane's optimum)

Sposoby przetwarzania energii słonecznej

Bateria słoneczna (panel fotowoltaiczny)

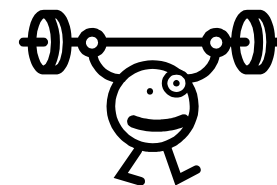


Kolektor słoneczny



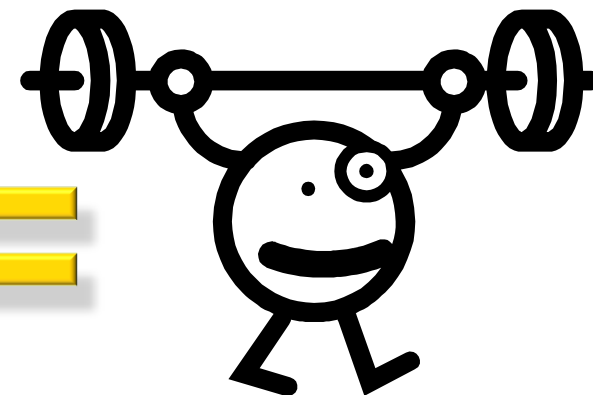
Sprawność przetwarzania energii słonecznej

Bateria słoneczna (panel fotowoltaiczny)



~18 %

Kolektor słoneczny



do 80 %

Wrażliwość na wzrost temperatury

Bateria słoneczna (panel fotowoltaiczny)

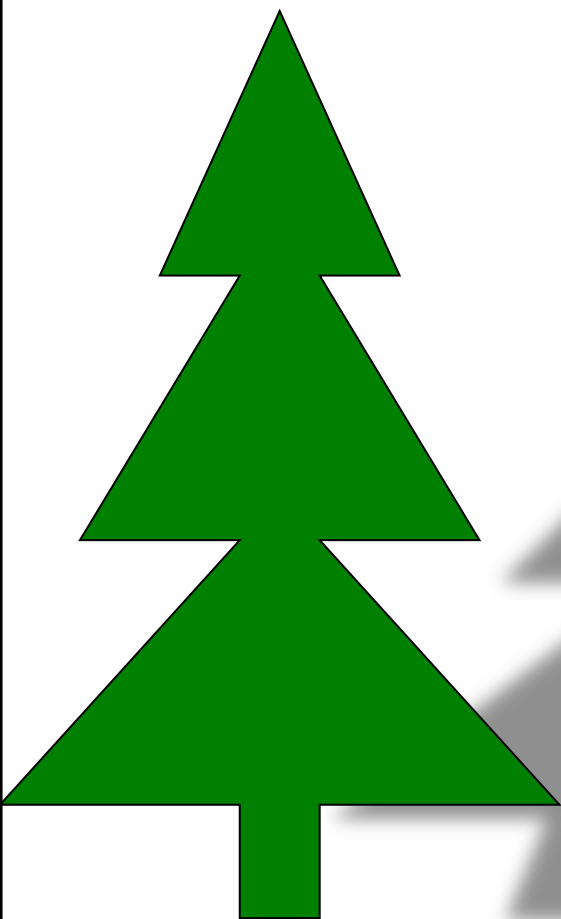


Kolektor słoneczny



Wrażliwość na zacinienie (nawet częściowe)

Bateria słoneczna
(panel fotowoltaiczny)



Moduł TWIN (PV + Termo)

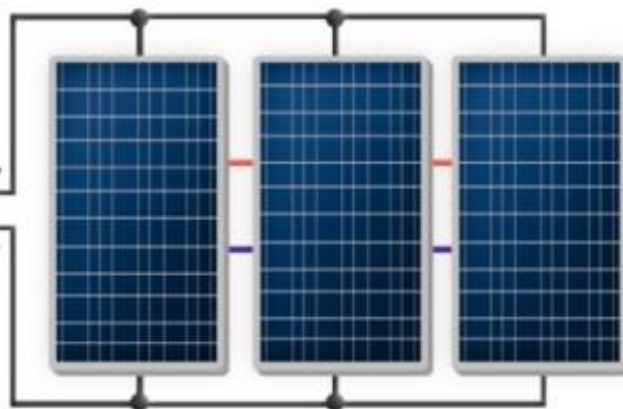


Moduł TWIN (PV + Termo)

ODBIORNIK ENERGII
ELEKTRYCZNEJ



URZĄDZENIE KOGENERACYJNE
TYPU TWIN



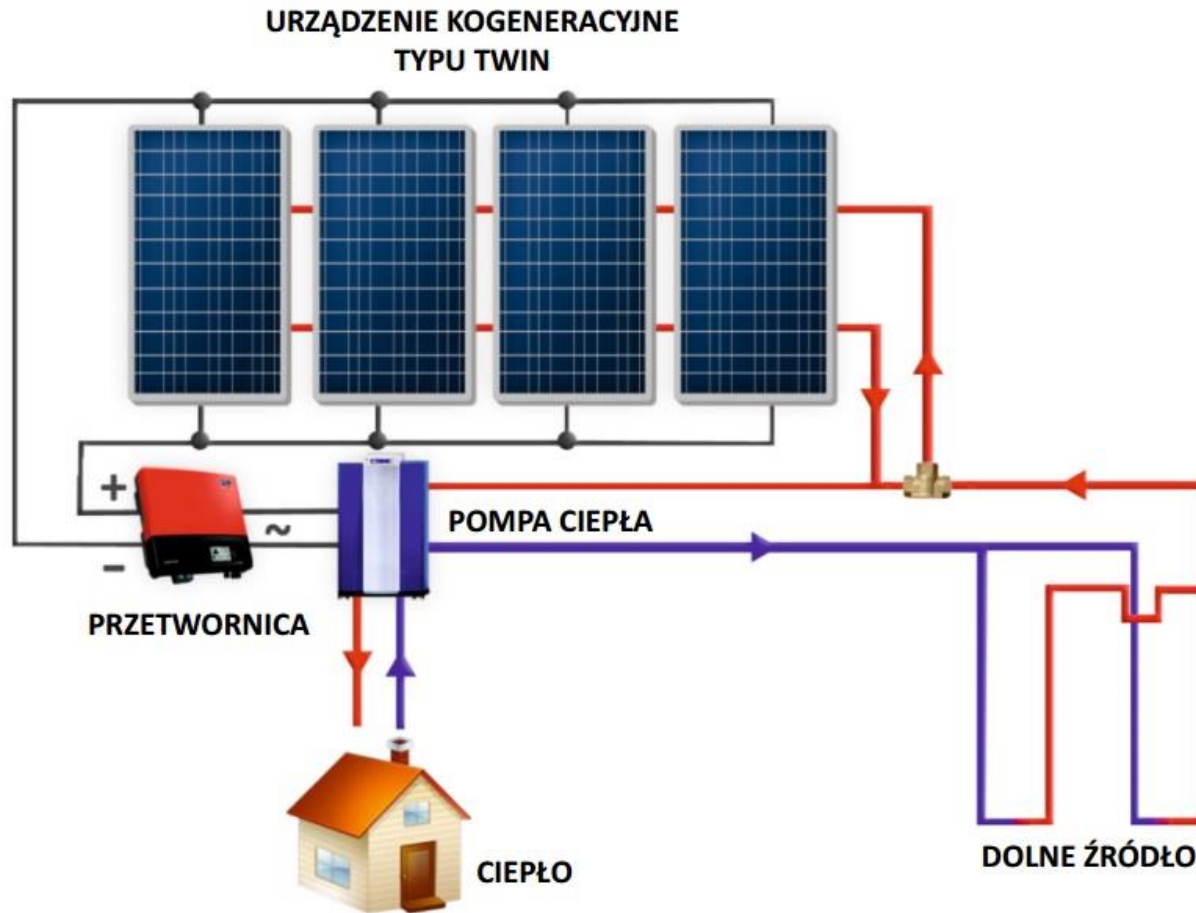
NISKOTEMPERATUROWY
ODBIORNIK ENERGII
GRZEWCZEJ

CIEPŁA WODA
UŻYTKOWA

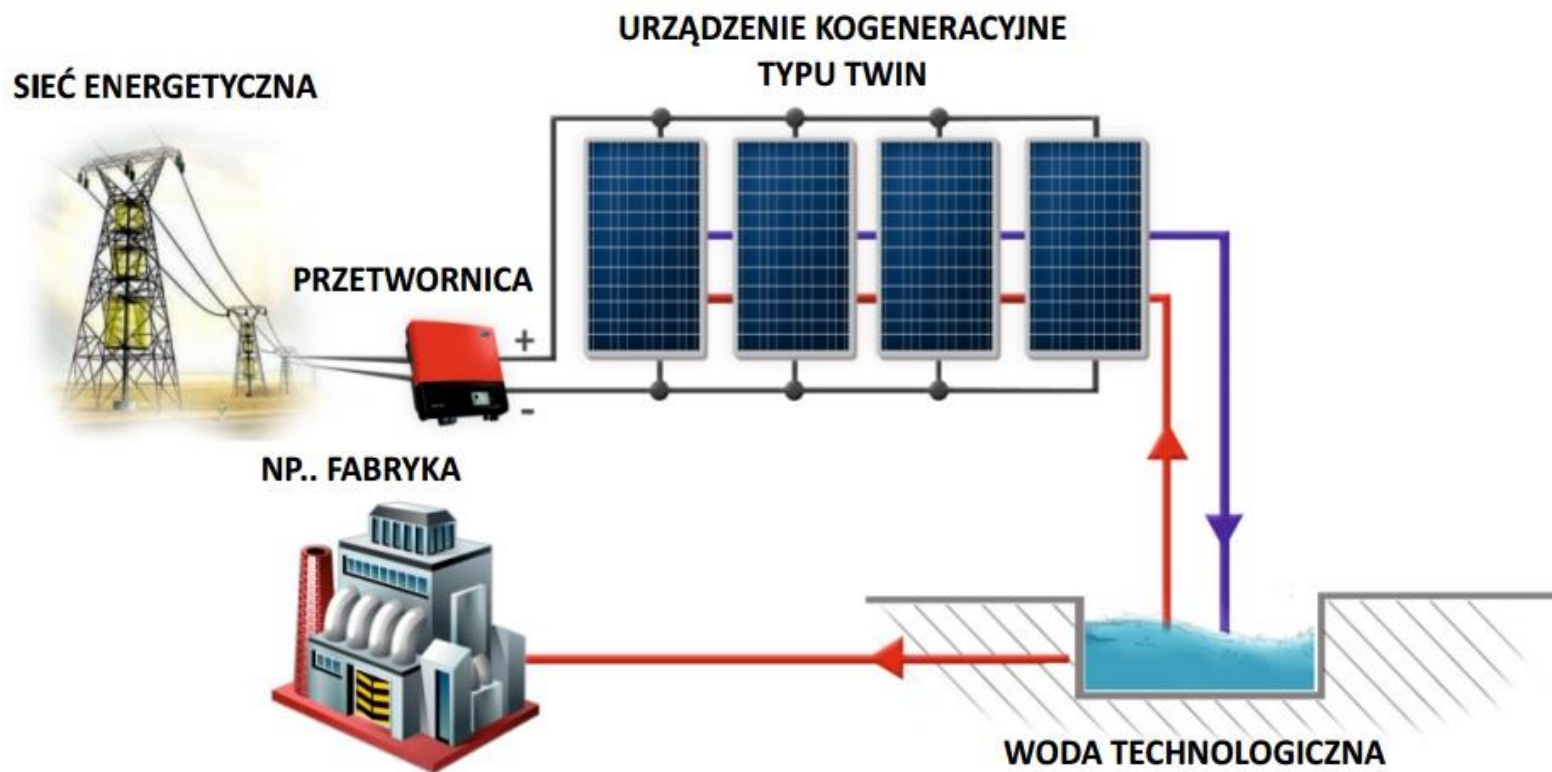
UKŁAD
POMPOWY



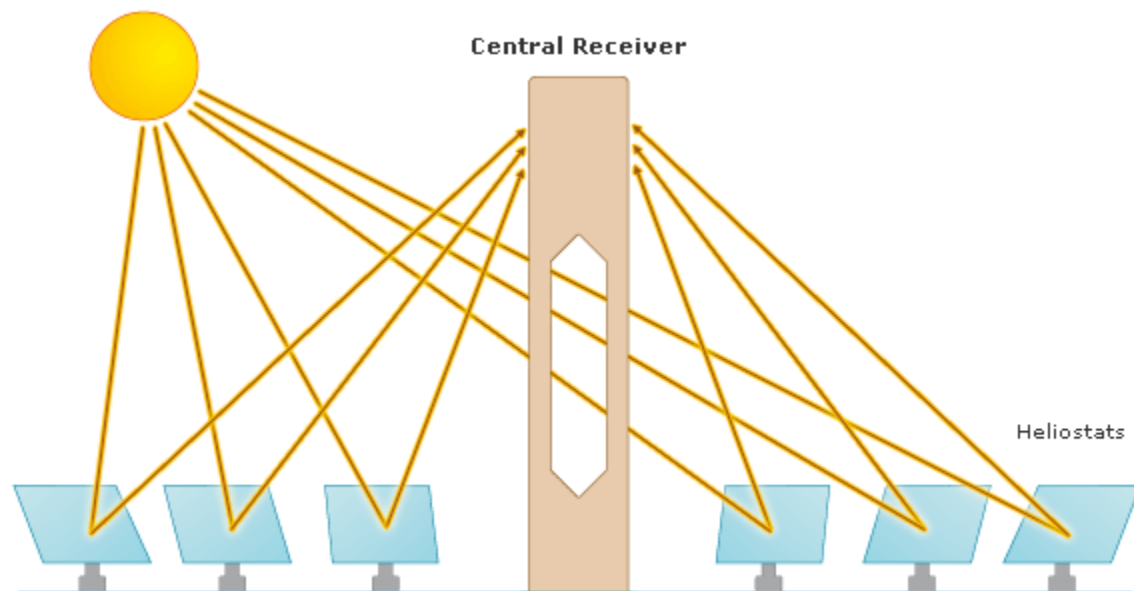
Moduł TWIN (PV + Termo)



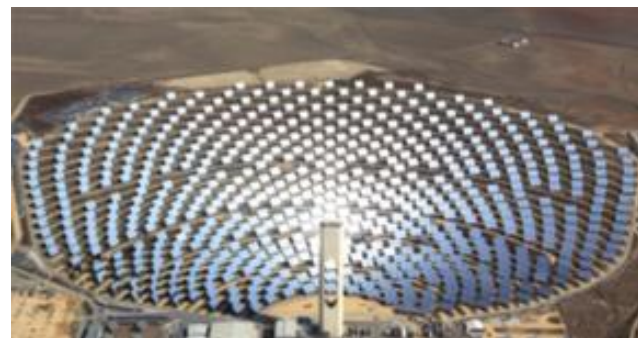
Moduł TWIN (PV + Termo)



Solarna elektrownia termiczna



PS10 (11 MWe)
Solucar – Sevilla, Hiszpania
624 heliostaty po 120m² każdy
wieża 115 m

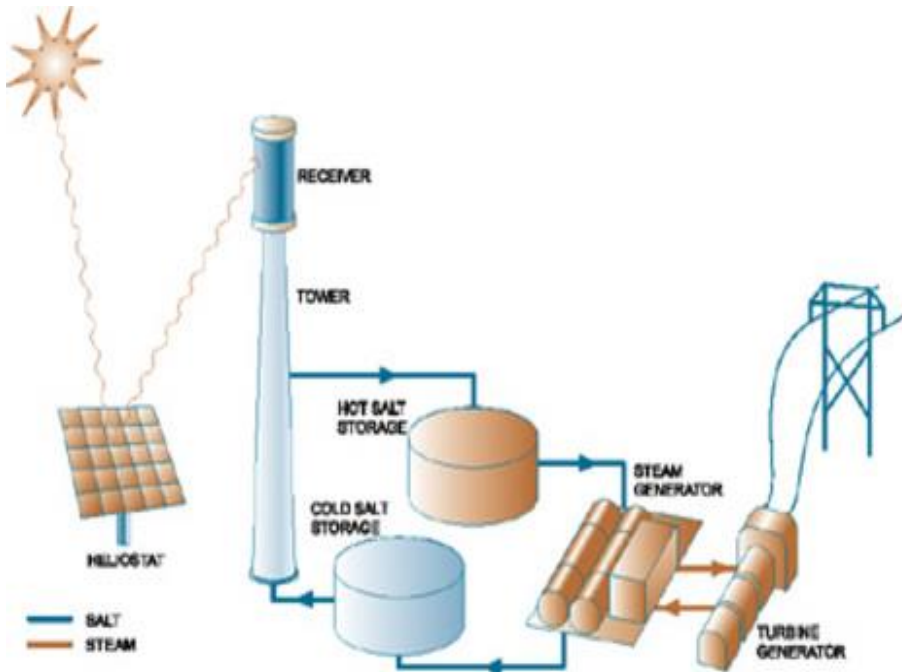
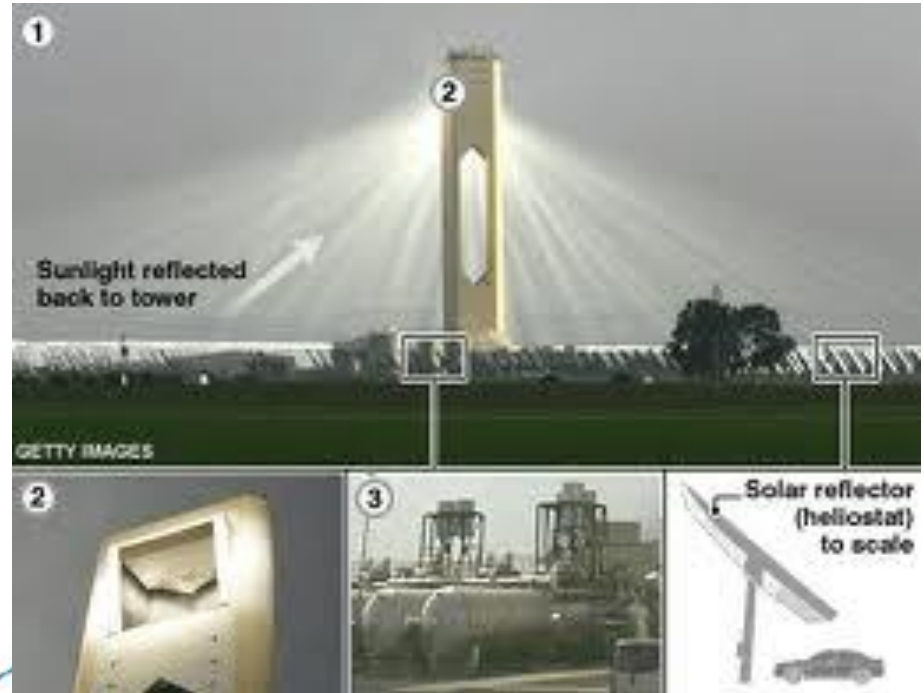


PS20 (20 MWe)
Solucar – Sevilla, Hiszpania
1255 heliostatów po 120m² każdy
wieża 165 m

Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

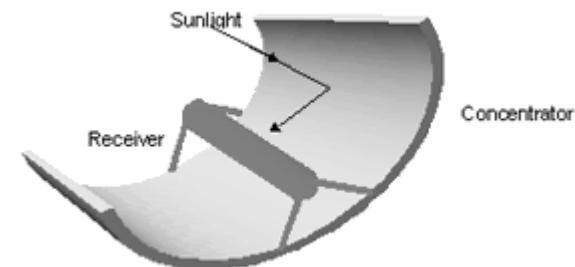
Solarna elektrownia termiczna (schemat)

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

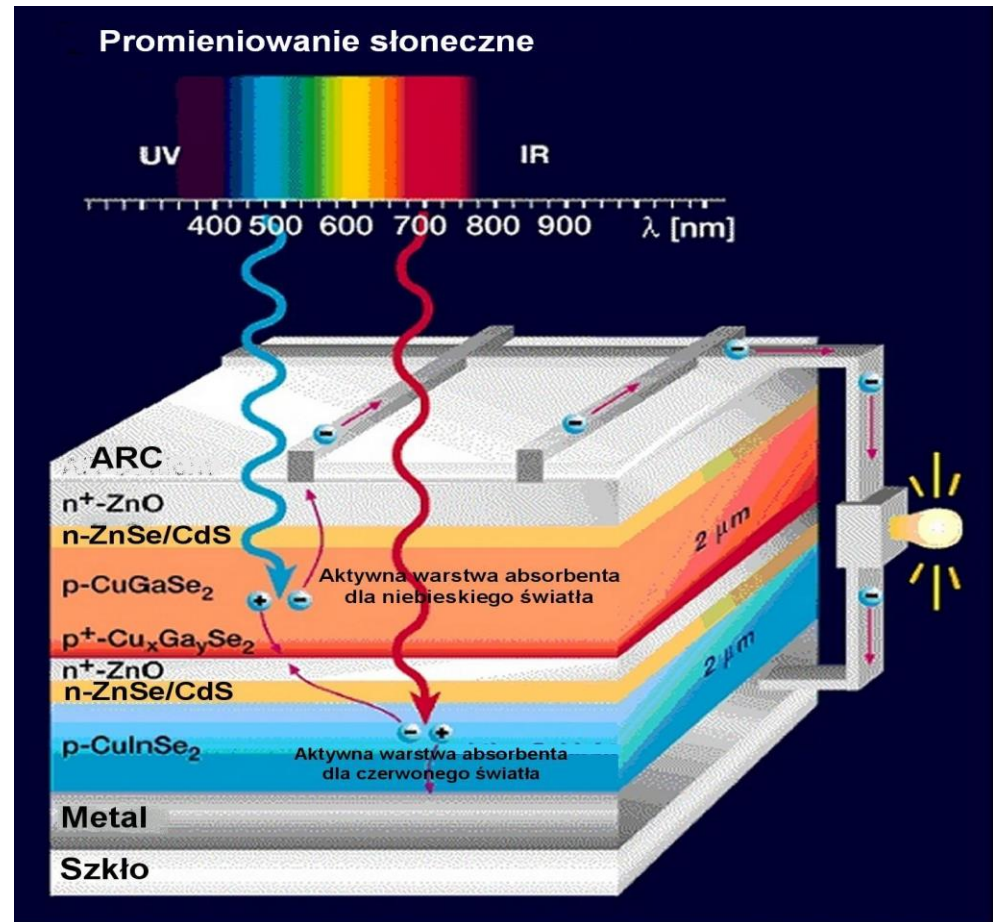
Antoni C. **Becquerel**
(1839)



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)
- $\lambda_{\max} = hc/W_g$



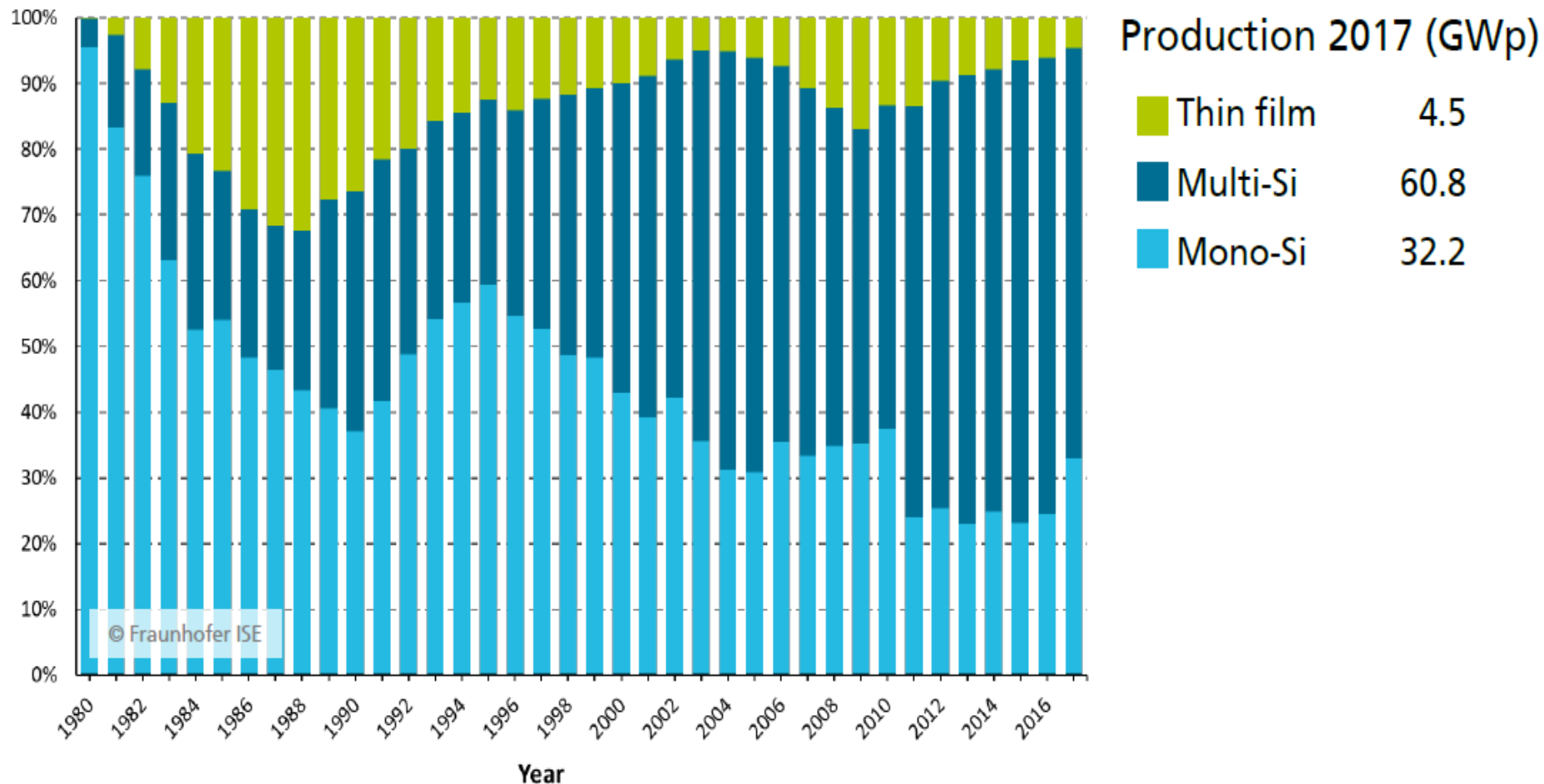
Ogniwo fotowoltaiczne materiały

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

Si polikrystaliczny	62%
Si monokrystaliczny	33%
CdTe	2,4%
CuInSe₂ i pochodne	2%
Si amorficzny	0,3%
GaAs i inne III-V	0,3%

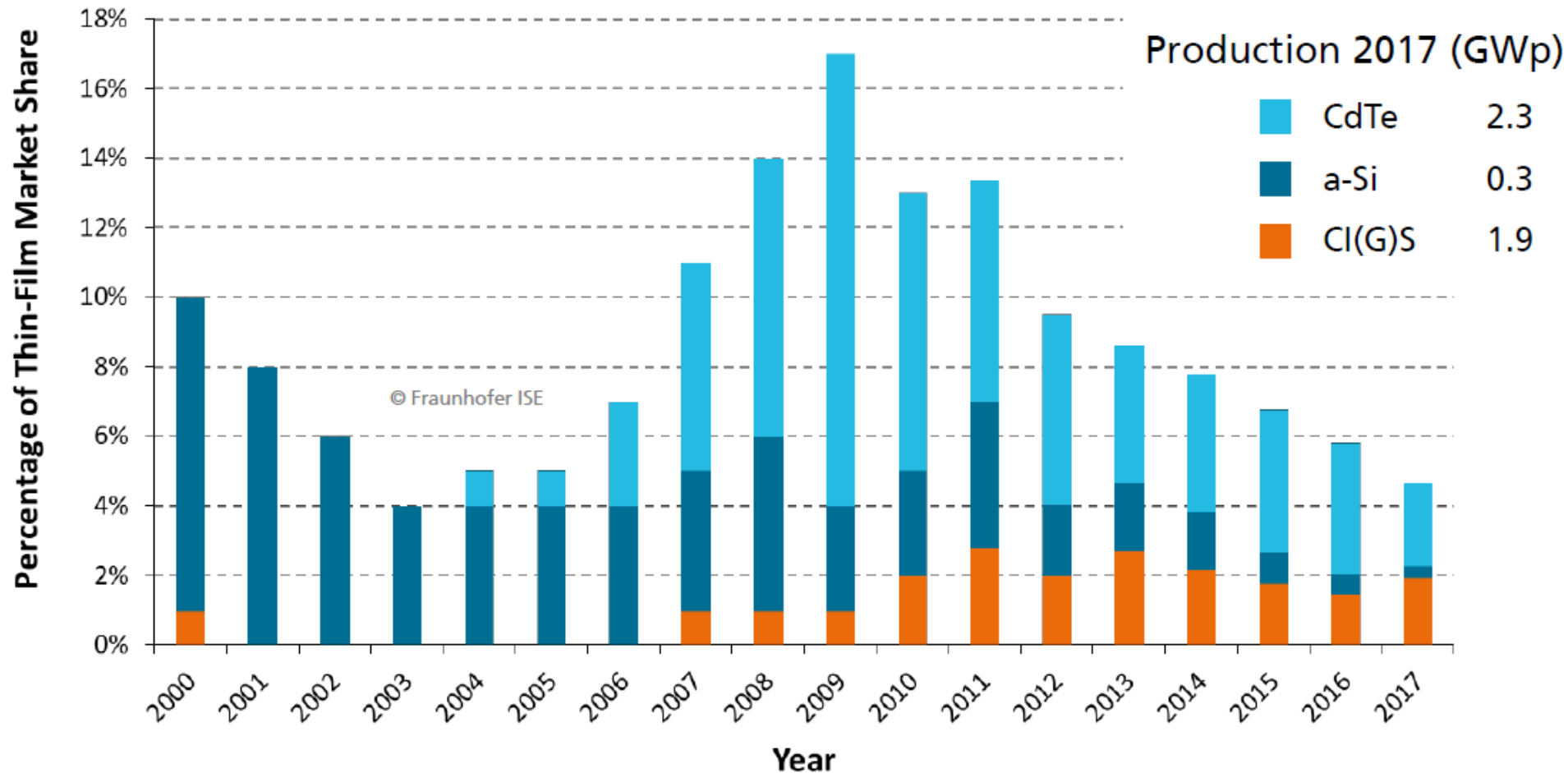
Materiał	E _g [eV]	η [%]
C-Si	1,15	25/23
A-Si:H	1,4-2,0	13,2
GaAs	1,4	27
Cu(In,Ga)Se₂	1,11	21,7/16
CdTe	1,50	22,1/16

Podział rynku PV na różne technologie



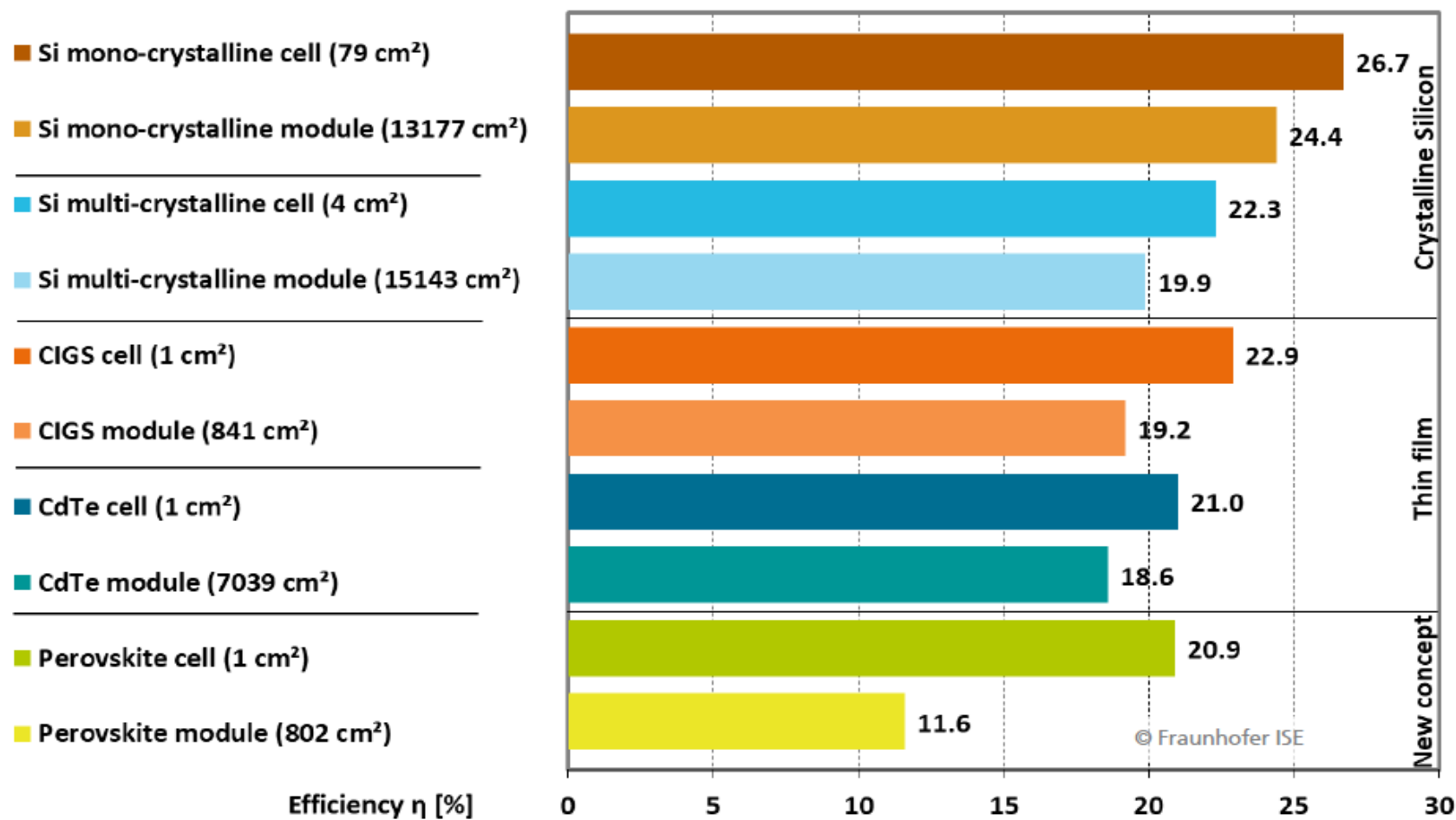
źródło: Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE, 2018

Udział w rynku PV różnych technologii cienkowarstwowych



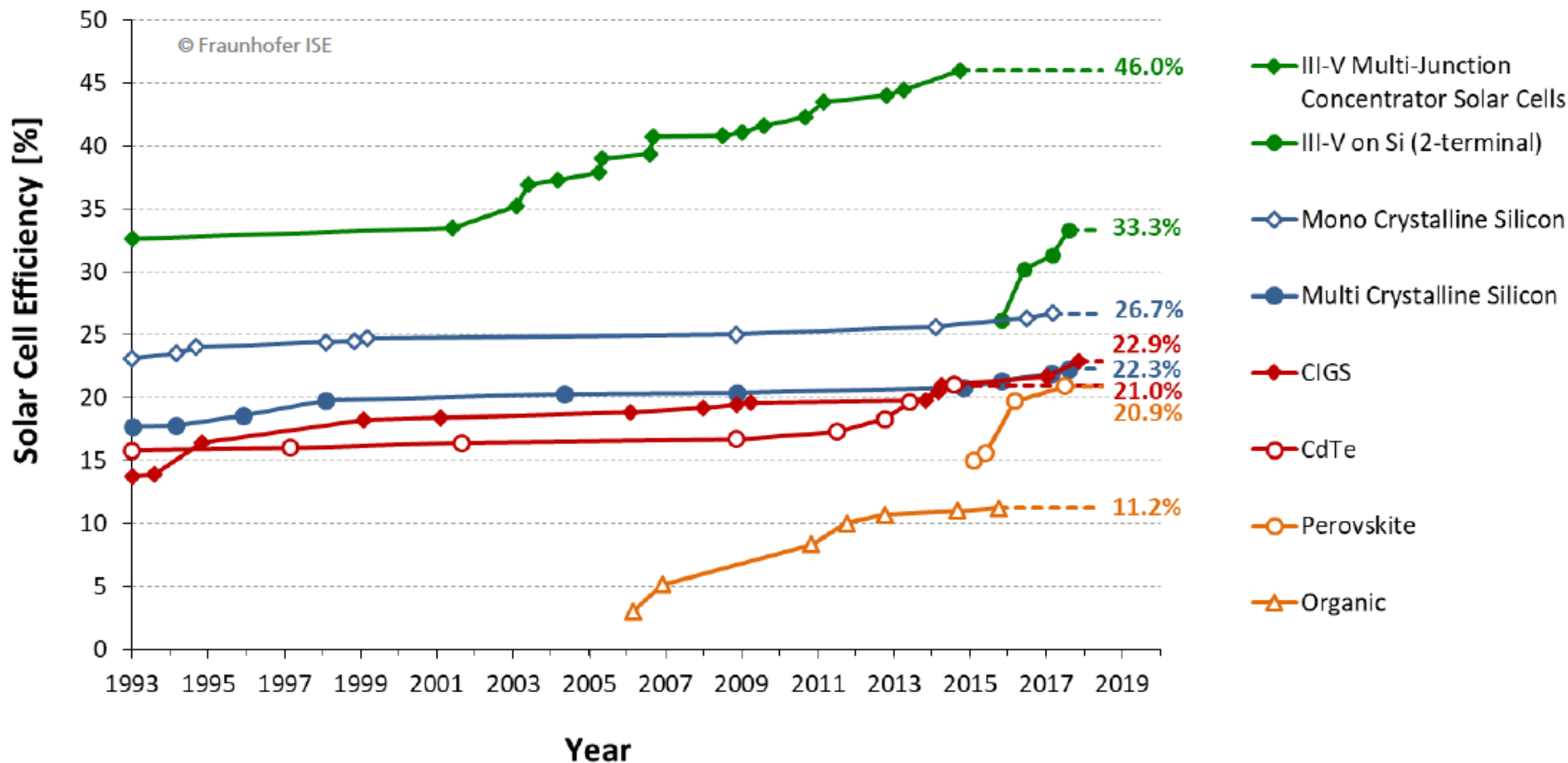
źródło: Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE, 2018

PV – sprawność laboratoryjna i produkcyjna (ogniwo-moduł)



źródło: Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE, 2018

Historyczny rozwój sprawności w poszczególnych technologiach

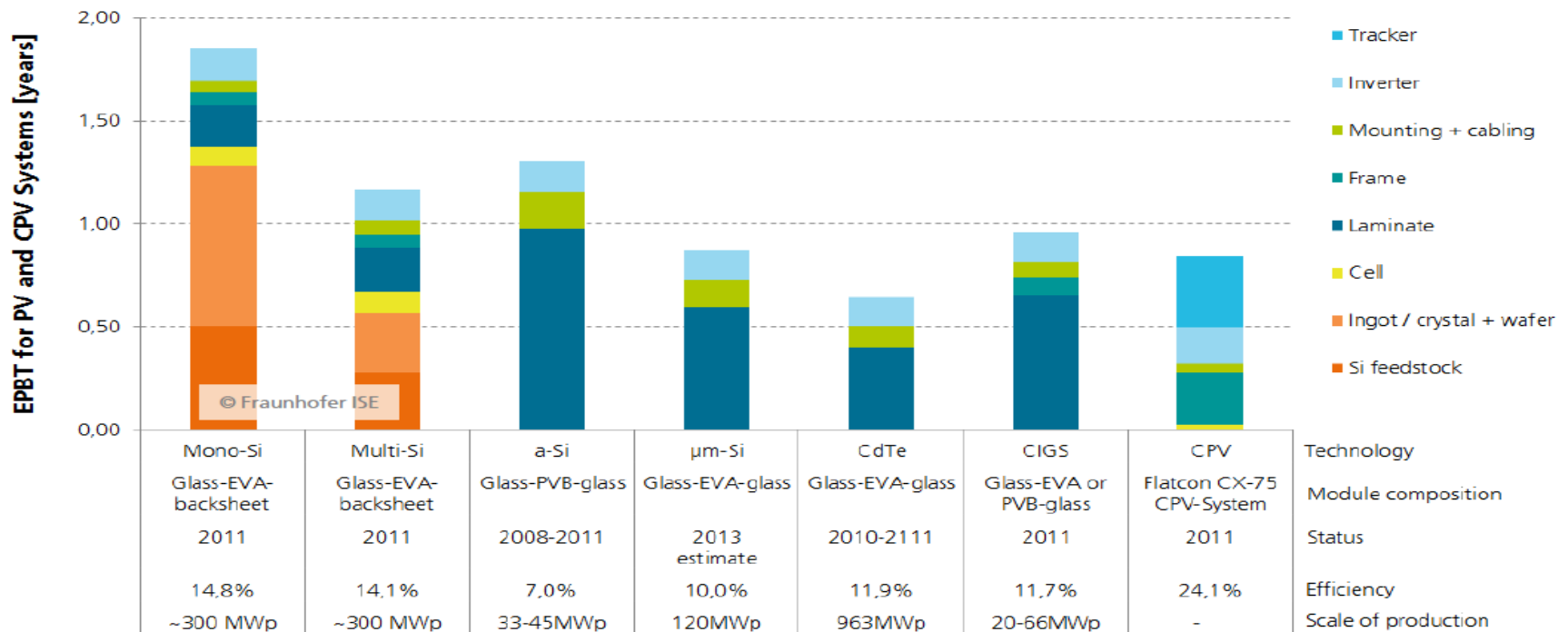


źródło: Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE, 2018

Okres zwrotu energii (EPBT)

Energy Pay-Back Time for PV and CPV Systems Different Technologies located in Catania, Sicily, Italy

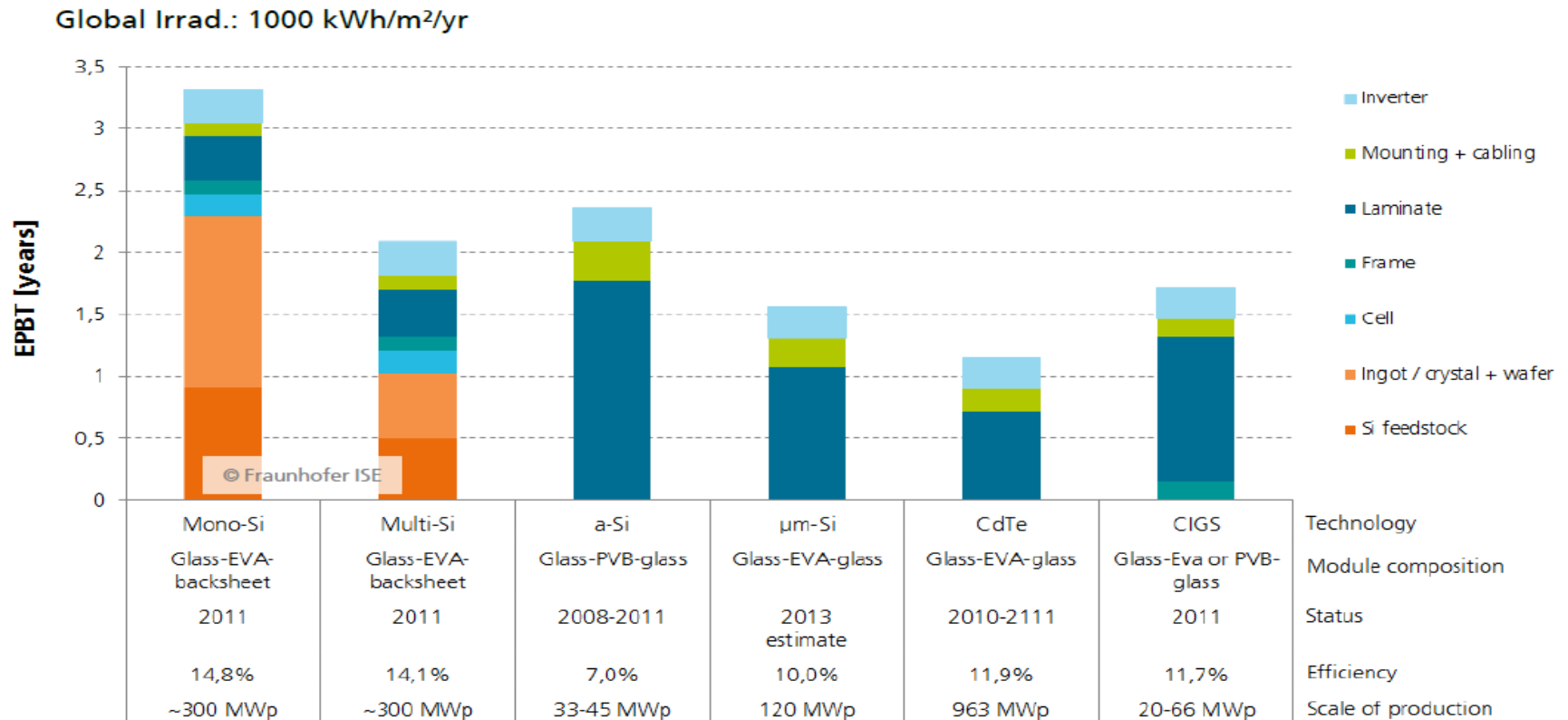
Global Irrad.: 1925 kWh/m²/yr, Direct Normal Irrad.: 1794 kWh/m²/yr



źródło: Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE, 2018

Okres zwrotu energii (EPBT)

Energy Pay-Back Time of Rooftop PV Systems Different Technologies located in Germany

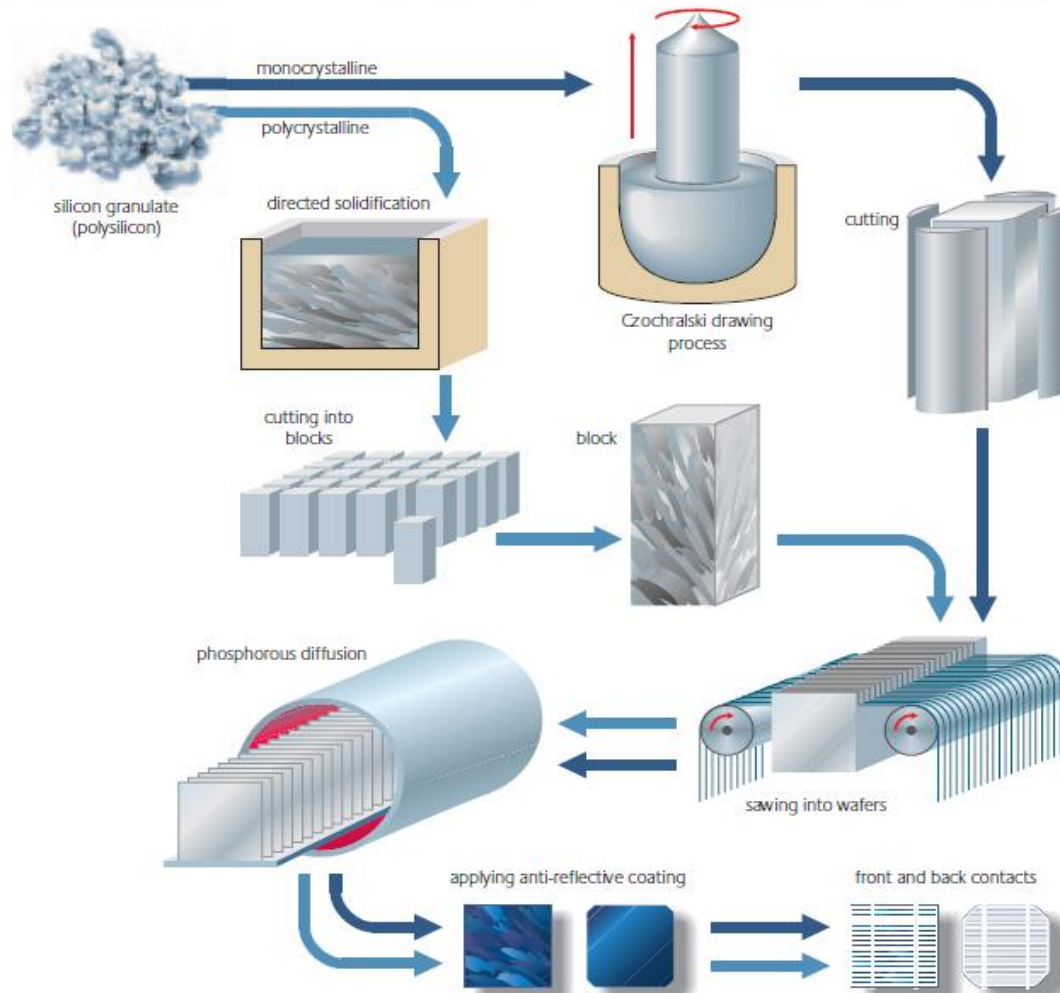


źródło: Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE, 2018

Produkcja monokrystalicznego fotoogniwa słonecznego

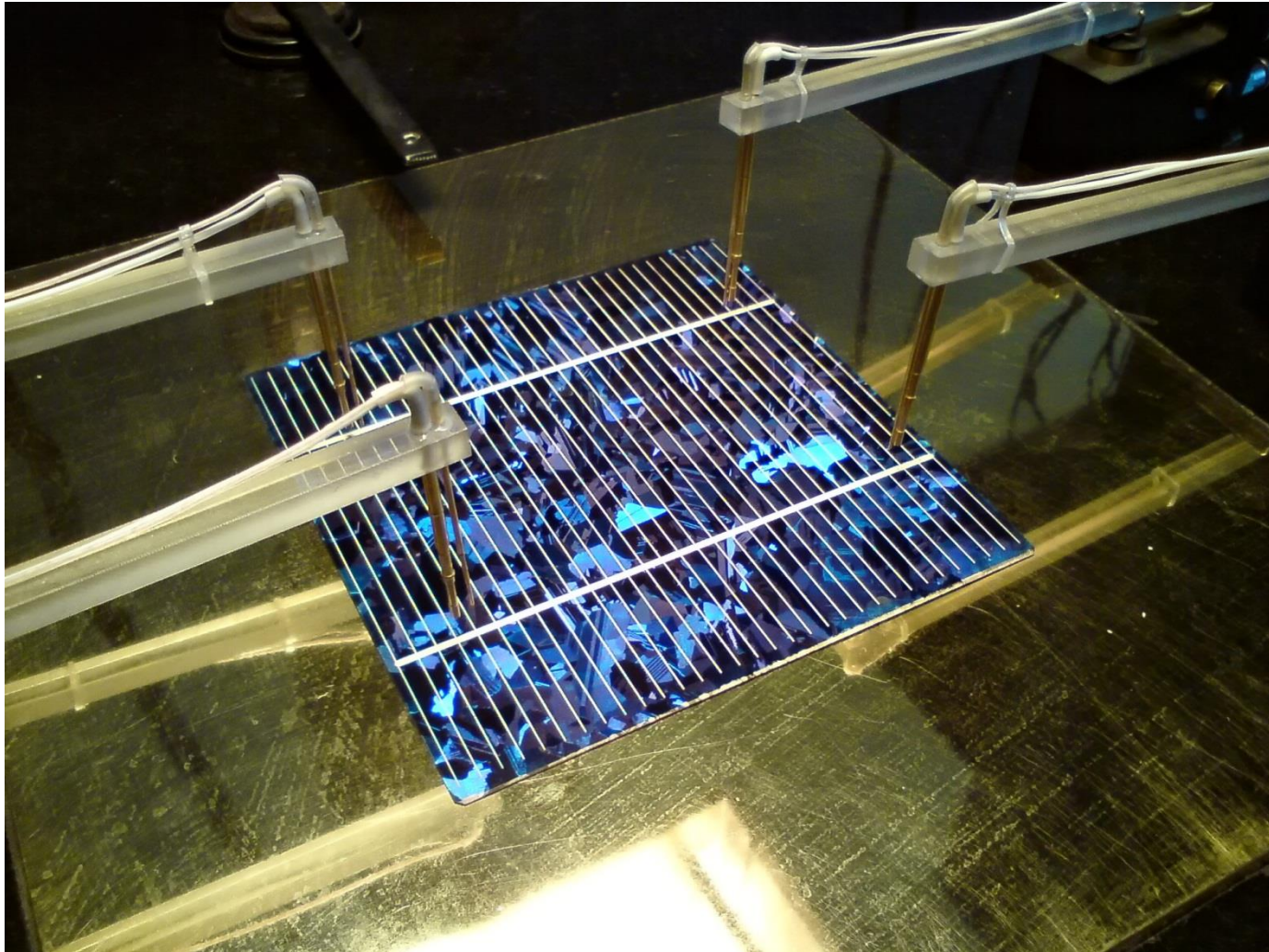
- Krzem metalurgiczny (polikryształ)
- Wyciąganie monokryształów
- Wycinanie z walca prostopadłościanu
- Cięcie na płytki 0.2 do 0.5mm
- Teksturyzacja powierzchni
- Dyfuzja fosforu
- Nanoszenie kontaktów i warstwy antyodblaskowej

Fazy procesu produkcyjnego fotoogniwa słonecznego

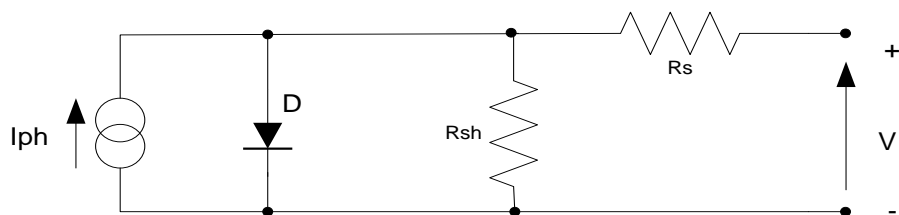


źródło : Marek Butkowski „Rynek technologii Słonecznych w Polsce”, prezentacja

Testowanie krzemowego polikrystalicznego ogniw fotowoltaicznego na symulatorze Słońca



Model fizyczny ogniwa fotowoltaicznego



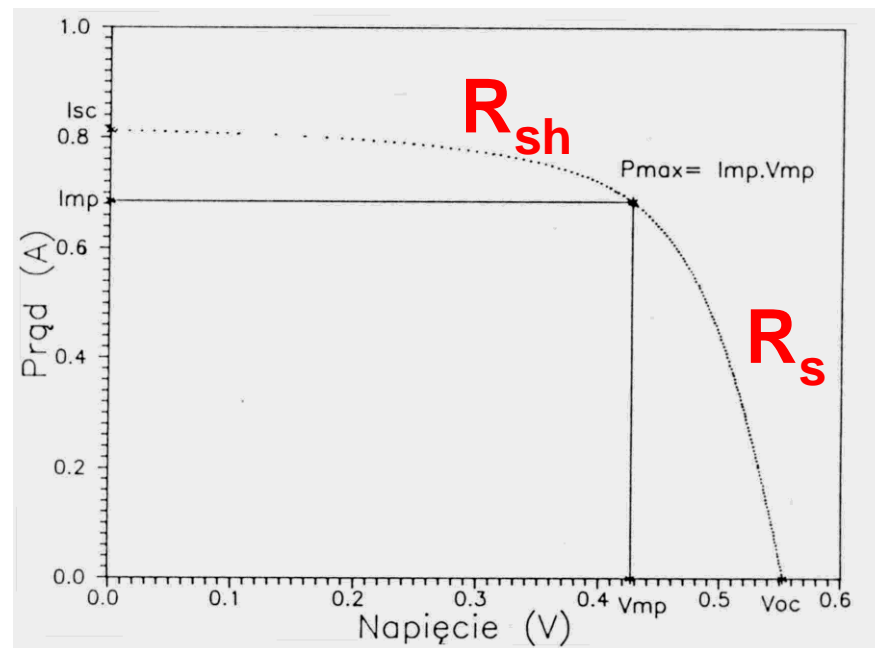
Gdzie:

D – symbolizuje złącze półprzewodnikowe

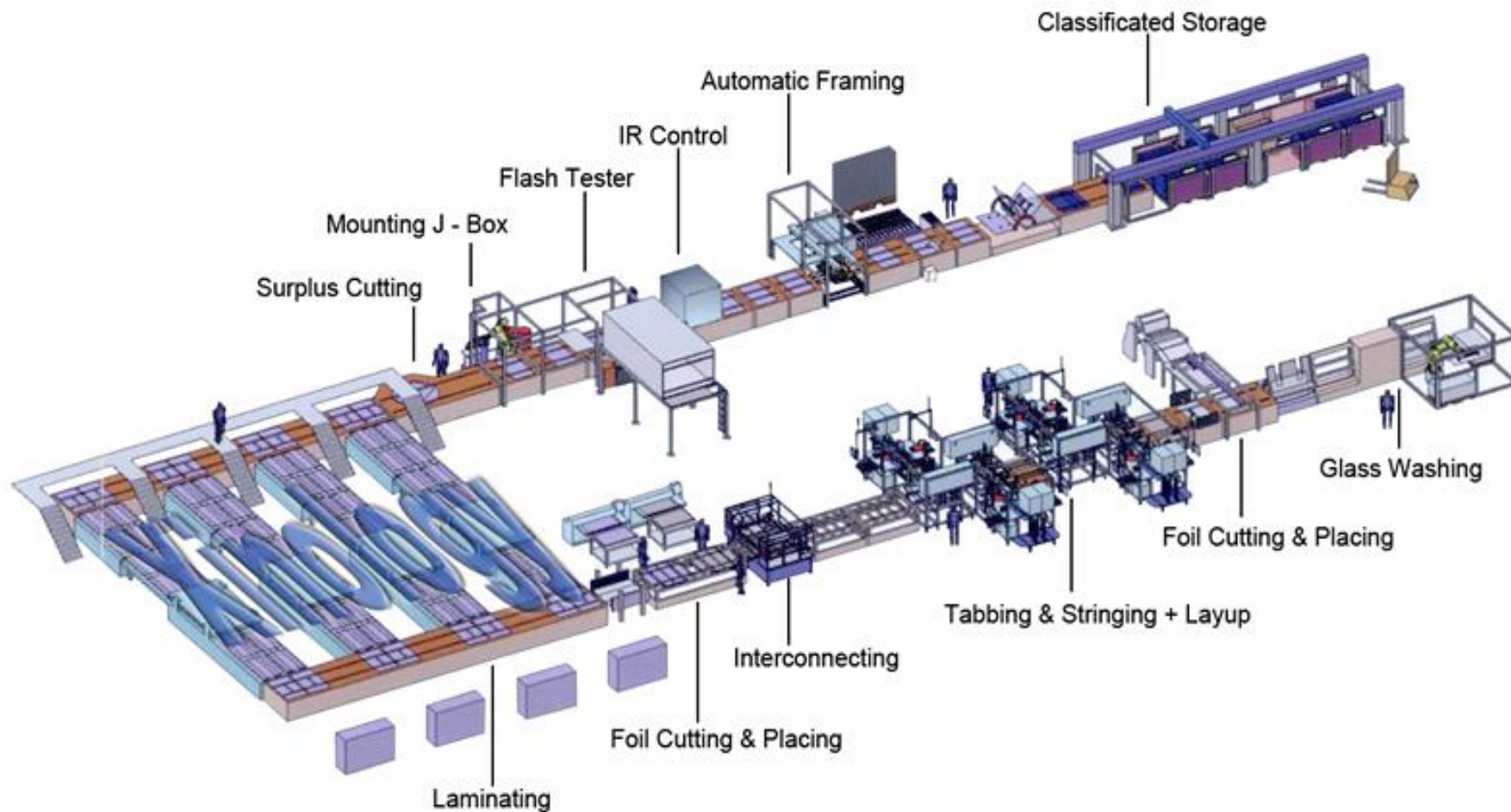
I_{ph} – oznacza fotoprąd generowany w złączu

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)



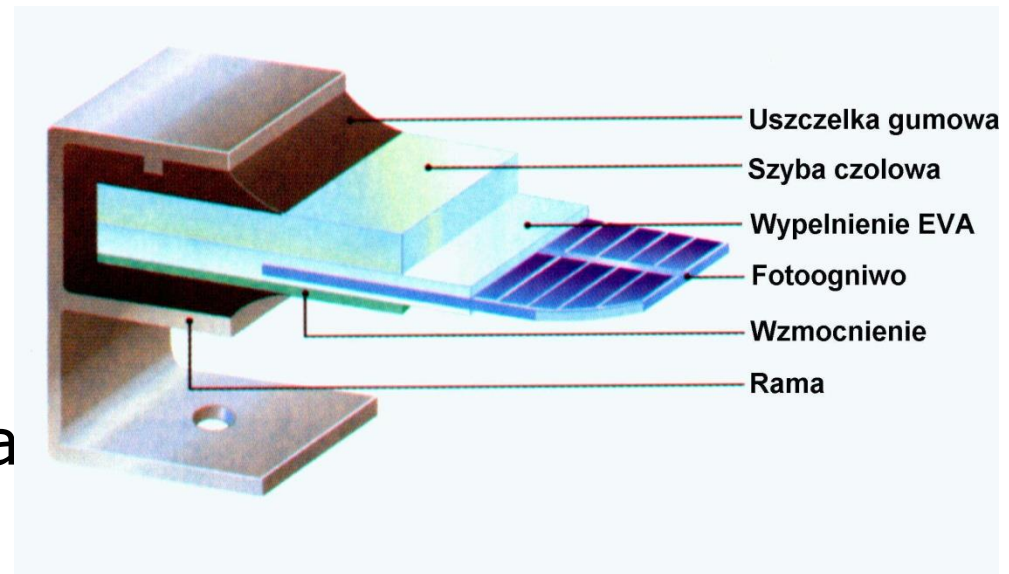
Schemat linii produkcyjnej



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...**

