



Politechnika  
Śląska

**KENER**

**PPTE**  
2050



**PPTE**  
2050



**NACZELNA ORGANIZACJA TECHNICZNA FEDERACJA  
STOWARZYSZEŃ NAUKOWO-TECHNICZNYCH,  
STOWARZYSZENIE ELEKTRYKÓW POLSKICH  
we współpracy z  
POWSZECHNĄ PLATFORMĄ TRANSFORMACYJNĄ ENERGETYKI**

## **Energomiting – transformacja energetyki do elektroprosumeryzmu**

# **Katalog referencyjnych rozwiązań elektroprosumeryzmu dla JST od sołectwa do Warszawy**

**Krzysztof Bodzek**

**Warszawa, 28 października 2020**

**Cztery rynki elektroprosumeryzmu** pozwalające w horyzoncie 2050 osiągnąć neutralność klimatyczną:

### **Rynek wschodzący 1 energii elektrycznej**

rynek czasu rzeczywistego (RCR) – na infrastrukturze sieciowej niskiego i średniego napięcia (nN-SN) oraz 110 kV

### **Rynek bezsieciowy urządzeń elektroprosumeryzmu**

urządzenia domu pasywnego, w tym pompy ciepła, źródła OZE, samochody elektryczne

### **Rynek bezsieciowy usług elektroprosumeryzmu**

termomodernizacja trzeciej generacji, bilansowanie, sprzedaż sąsiedzka energii z kontraktami zawieranymi bezpośrednio np. za pomocą technologii *Blockchain*

### **Rynek offshore**

dla potrzeb korytarza infrastrukturalno-urbanistycznego północ-południe obejmującego największe miasta, autostrady, magistrale kolejowe i przemysł, czyli obszary o dużej gęstości energii

1. Bilansowanie na podstawie 15-minutowych profili
2. Deficyt na poziomie 1 %
3. Energia w jednostkach względnych, % 
$$E^* = \frac{E \cdot 100\%}{\max(E)|_{\sum E_P=0}}$$
4. Moc w jednostkach względnych 
$$P^* = \frac{P}{\max(P)|_{\sum E_P=0}}$$
5. Elektrownie i mikroelektrownie biogazowe wyposażone w zasobniki
6. Kształtowanie profilu za pomocą DSM/DSR z podatnością 15 %
7. DSM/DSR bez dodatkowego wynagrodzenia, tylko reakcja na koszty wytwarzania energii
8. Akumulatory o pojemności dobranej zgodnie ze zależnością:  
1 kW w źródłach PV 1 kWh pojemności akumulatora
9. Koszt energii akumulatora uwzględnia tylko rzeczywiste wykorzystanie

## Równanie bilansu energii

$$E_{OK}|_{t(s,min,h,d,m,r)} = \sum E_P|_{t(s,min,h,d,m,r)} \pm \sum E_M|_{t(s,min,h,d,m,r)} - \sum E_O|_{t(s,min,h,d,m,r)}$$

## Produkcja energii

$$\sum E_P|_t = \sum E_{OZE}|_t + \sum E_{RB}|_t + \sum E_{PK}|_t$$

$E_{OZE}$  - źródła z produkcją wymuszoną

$E_{RB}$  - źródła regulacyjno-bilansujące

$E_{PK}$  - źródła paliw kopalnych

## Magazyny energii

$$\sum E_M|_t = \sum E_{Me}|_t + \sum E_{Mch}|_t + \sum E_{Mc}|_t$$

$E_{Me}$  - magazyny energii elektrycznej

$E_{Mch}$  - magazyny energii chemicznej (power to gas)

$E_{Mc}$  - magazyny ciepła

## Odbiory

$$\sum E_O|_t = \sum E_K|_t + \sum E_{O_{ns}}|_t + \sum E_{O_s}|_t$$

$E_K$  - odbiory krytyczne

$E_{O_{ns}}$  - odbiory niesterowalne

$E_{O_s}$  - odbiory sterowalne

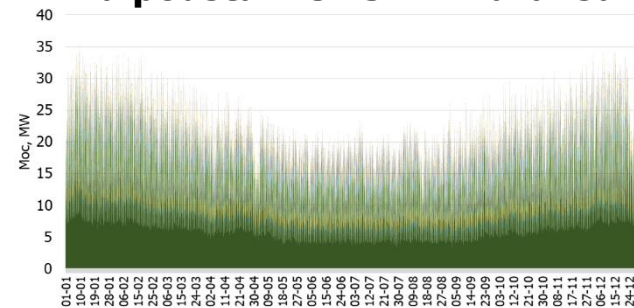
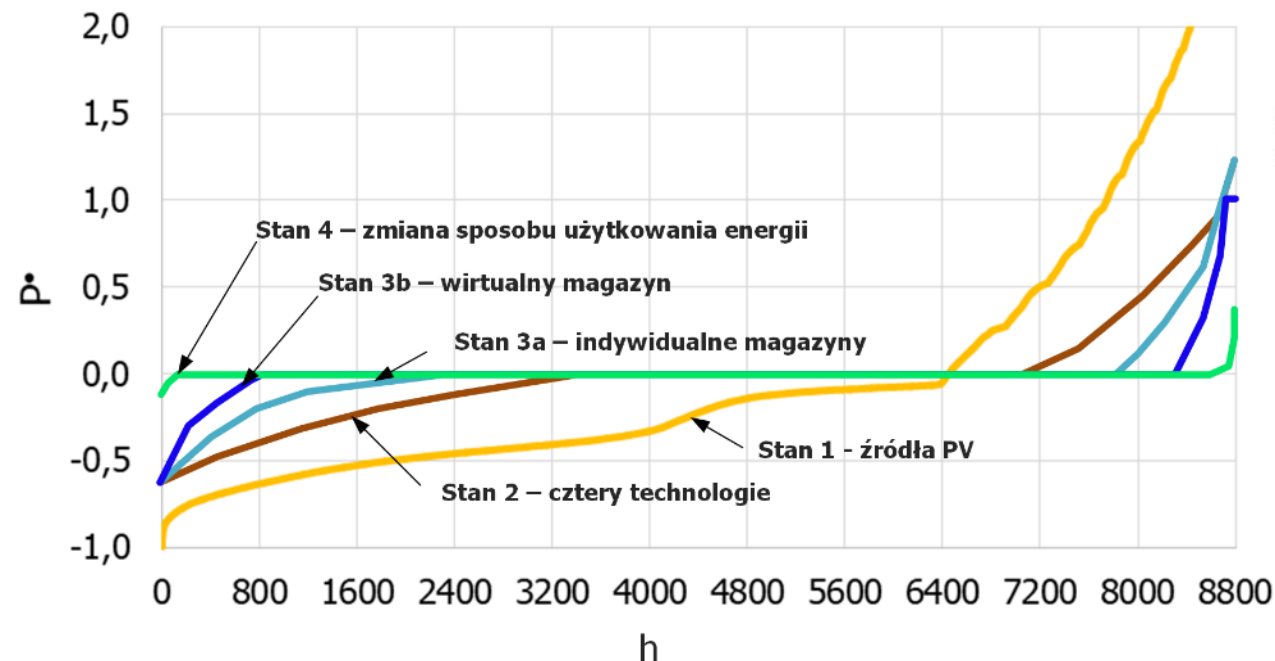
## Bilans energii w systemie(WSE)

Wielkości względne (skalowanie):

$$E^* = \frac{E}{\max(E)|_{\sum E_P=0}}; P^* = \frac{P}{\max(P)|_{\sum E_P=0}}$$

Względne, uporządkowane profile niezbilansowania klastra dla czterech stanów

Na podstawie 15-min bilansu



**Stan 1** - Wykorzystanie źródeł PV

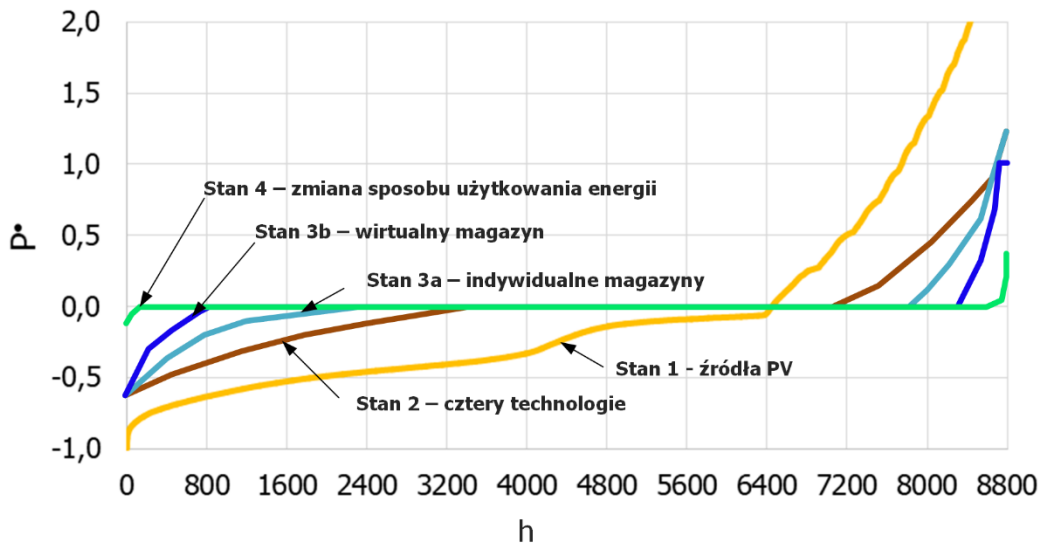
**Stan 2** - Struktura wytwórcza charakterystyczna dla obszarów miejsko-wiejskich i obejmująca technologie OZE takie jak źródła PV, elektrownie wiatrowe (pojedyncze) oraz mikro elektrownie i elektrownie biogazowe.

**Stan 3a** - Wykorzystanie magazynów energii (akumulatorów) - praca indywidualna

**Stan 3b** - Wykorzystanie magazynów energii (akumulatorów) - wirtualny magazyn

**Stan 4** - Zmiana sposobu użytkowania energii (reakcja na sygnał cenowy).

# Bilans energii w systemie(WSE)



**Stan 1** - Wykorzystanie źródeł PV

**Stan 2** - Struktura wytwórcza charakterystyczna dla obszarów miejsko-wiejskich i obejmująca technologie OZE takie jak źródła PV, elektrownie wiatrowe (pojedyncze) oraz mikro elektrownie i elektrownie biogazowe.

**Stan 3a** - Wykorzystanie magazynów energii (akumulatorów) - praca indywidualna

**Stan 3b** - Wykorzystanie magazynów energii (akumulatorów) - wirtualny magazyn

**Stan 4** - Zmiana sposobu użytkowania energii (reakcja na sygnał cenowy).

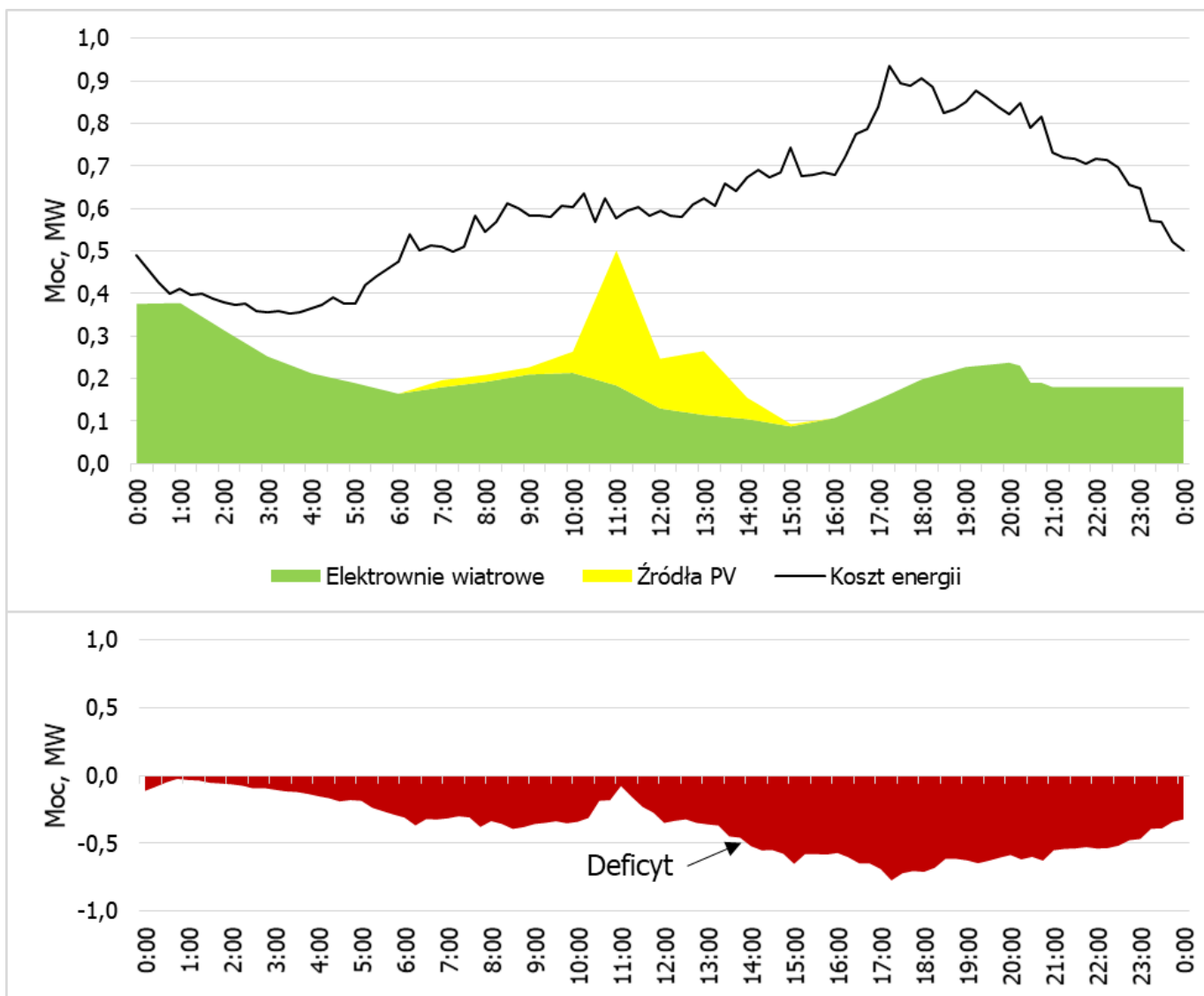
## Względna struktura energii w podziale na źródła oraz bilans energetyczny dla czterech analizowanych stanów

	Stan				
	1	2	3a	3b	4
źródła PV	1,00	0,32	0,32	0,32	0,32
elektrownie wiatrowe	0,00	0,38	0,38	0,38	0,38
elektrownie i mikro elektrownie biogazowe	0,00	0,30	0,30	0,30	0,30
Suma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Bilans energetyczny</b>					
Saldo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nadwyżka	0,70	0,22	0,12	0,06	0,01
Deficyt	-0,70	0,22	0,12	0,06	0,01

$$E^* = \frac{E}{\max(E)|_{\Sigma E_P=0}}; P^* = \frac{P}{\max(P)|_{\Sigma E_P=0}}$$

## 18 stycznia

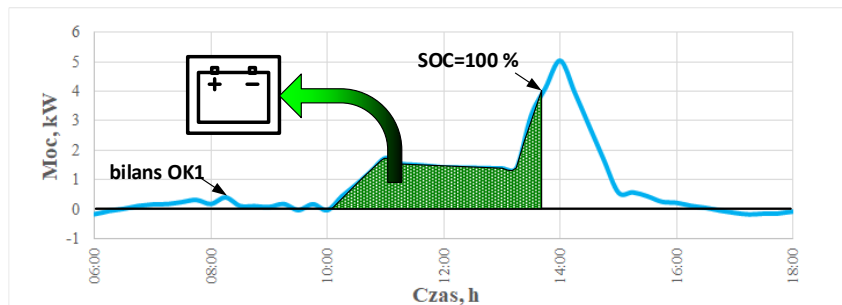
- źródła PV
- elektrownie wiatrowe



# Akumulator - strategie sterowania pracą akumulatora

## Maksymalizacja wykorzystania produkcji źródła PV

$$WG_{\max} = 170 \%$$



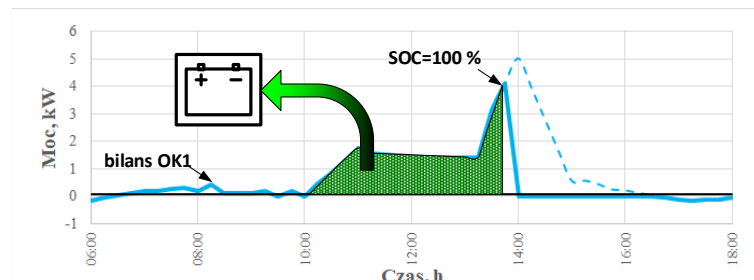
$$WG = \left| \frac{P_{zw_{max}}}{P_{pob_{max}}} \right| \cdot 100\%$$

$P_{zw_{max}}$  – maksymalna moc zwracana do KSE przez OK2 (transformator SN/nN)  
 $P_{pob_{max}}$  – maksymalna moc pobierana do KSE przez OK2 (transformator SN/nN)

**zapotrzebowanie 36 MWh, produkcja PV: 36 MWh**

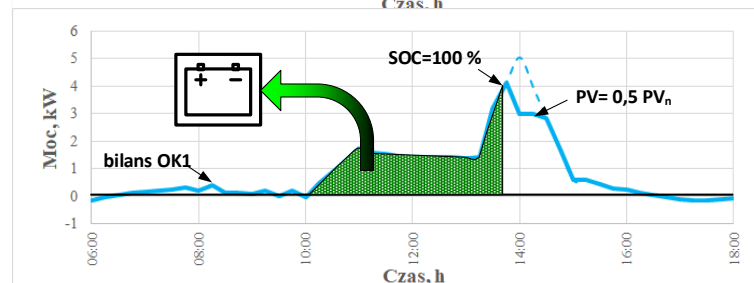
**Produkcja tylko na potrzeby własne** – brak zwrotu energii do sieci nN (współczynnik *netmeteringu* = 0)

$$WG_{\max} = 100 \%$$



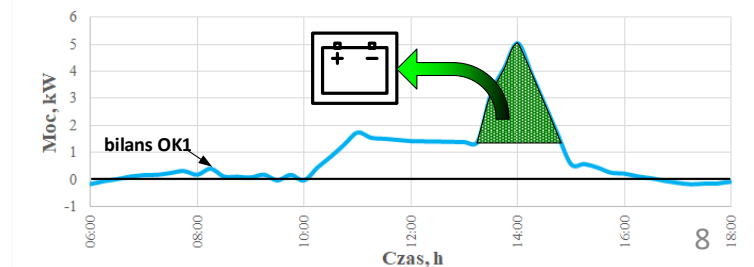
**Zwrot do sieci z mocą mniejszą od 0,5 P (PV)**

$$WG_{\max} = 100 \%$$



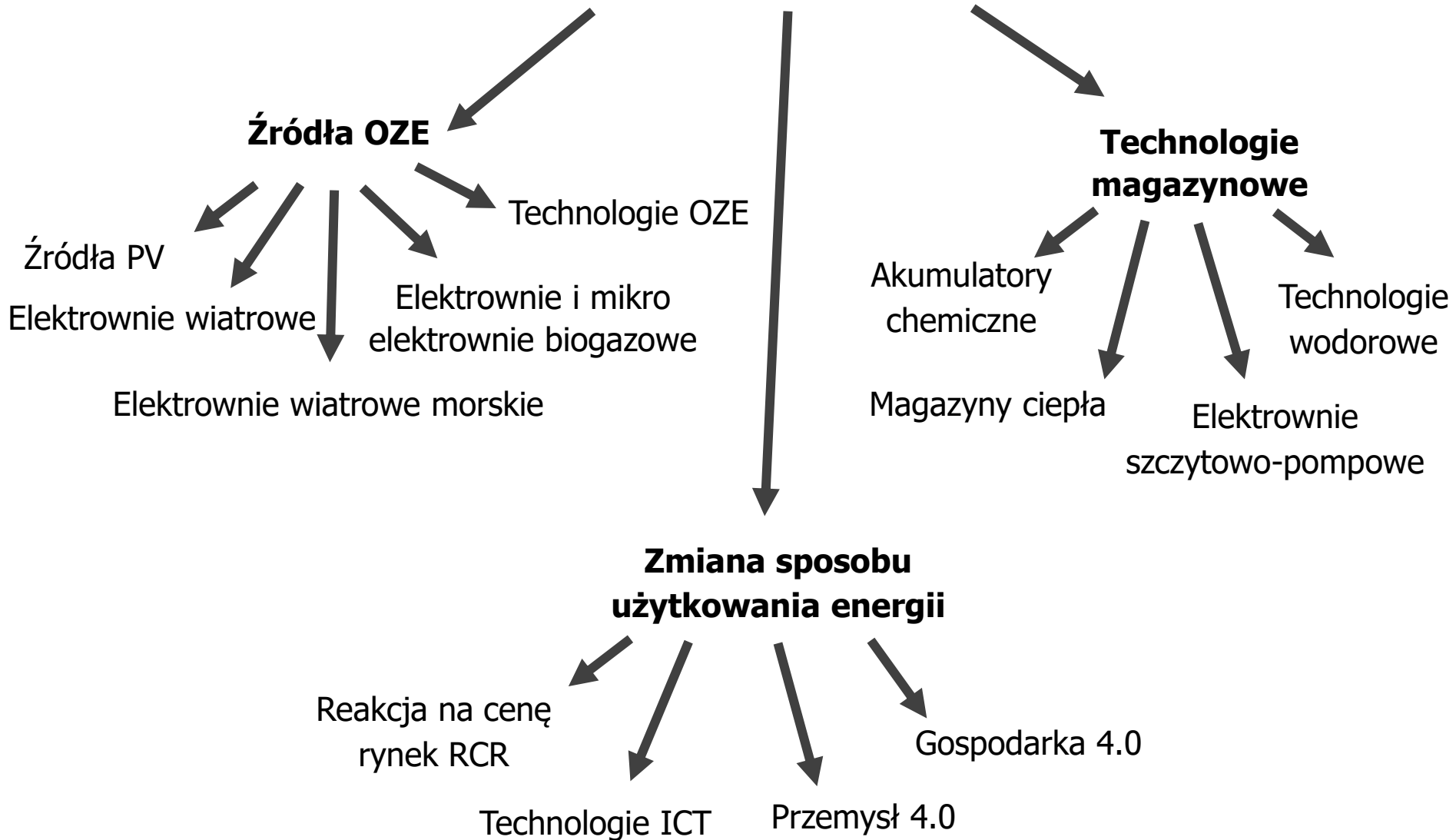
**Wirtualny magazyn - STD**

$$WG_{\max} = 100 \%$$



# Pokrycie potrzeb energetycznych w elektroprosumeryzmie

## Technologie elektroprosumeryzmu



## Pobór energii w każdej godzinie

$$E_O \Big|_h = [E_O^1, E_O^2, \dots, E_O^{24}] \quad E_{O|h} - \text{wektor godzinowy energii}$$

## Całkowity pobór energii w horyzoncie 24h

$$E_O^{T_h} = \sum_{h=1}^{T_h} O_i^{(h)} \quad E_O^{T_h} - \text{całkowity pobór energii w horyzoncie 24h przez odbiór } i \text{ (sterowany)}$$

## Wektor horyzontu czasu

$$T_h = [1, 2, \dots, 24]$$

## Całkowity pobór energii w okresie dnia

$$E_d = \sum_{t=1}^{T_h} \sum_{i=1}^n (t, O_i)$$

## Minimalizacja kosztów użytkowania energii przy maksymalizacji komfortu użytkowania

$$K = \sum_{h=1}^{24} K_h$$

## Minimalizacja opóźnienie załączenia

$$OZ_i = \frac{|t_z - t_{zr}|}{v} \quad \begin{array}{l} t_z - \text{czas oczekiwanego załączenia} \\ t_{zr} - \text{czas załączenia} \\ v - \text{współczynnik komfortu} \end{array}$$

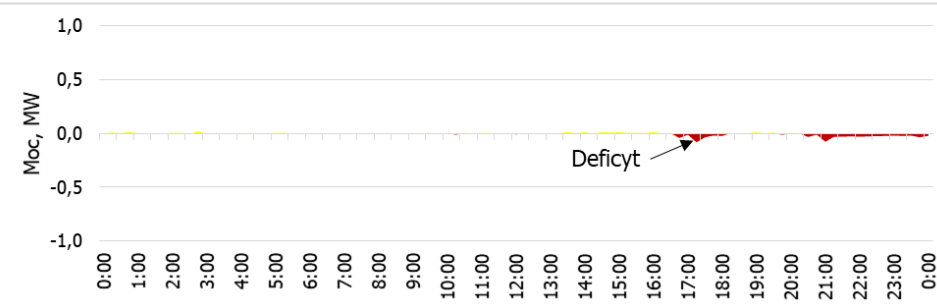
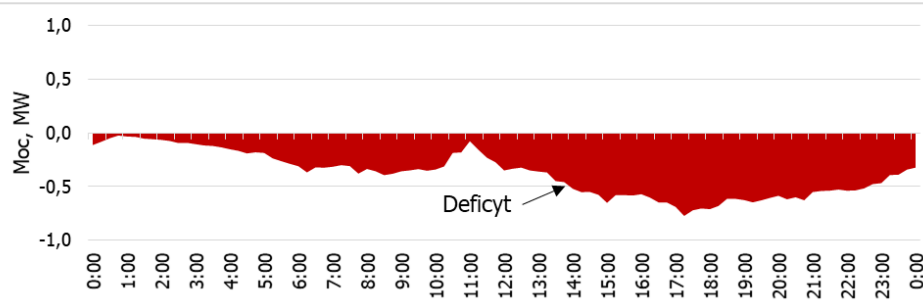
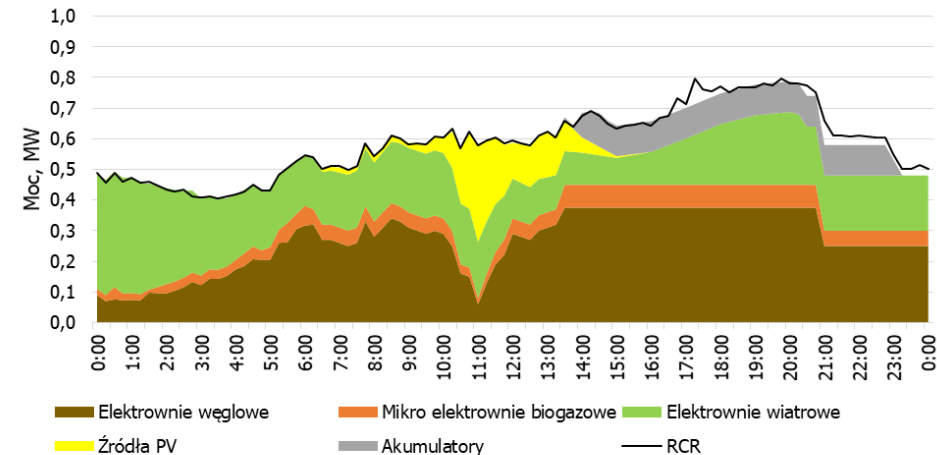
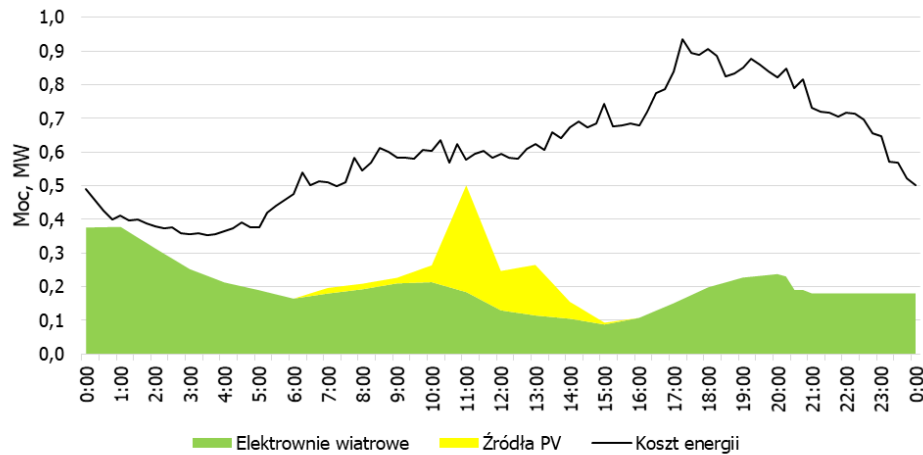
## Funkcja celu

$$f(E_d) = f(t, O_i) = \min(K, OZ_i)$$

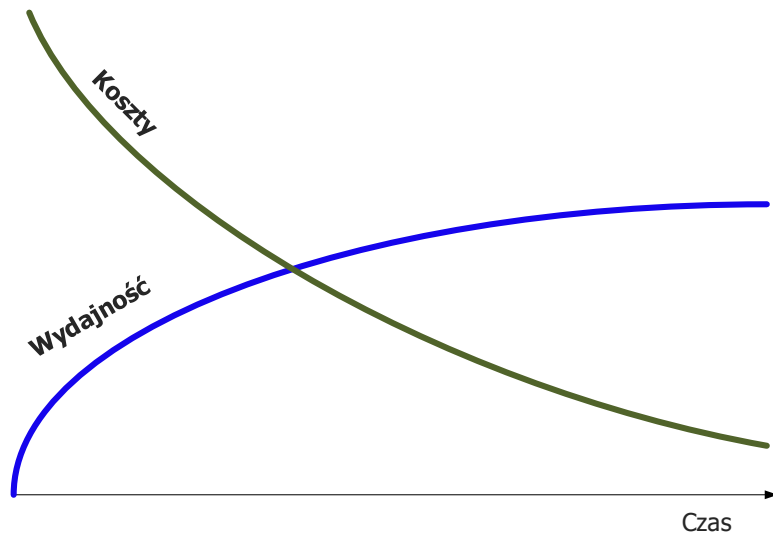
## 18 stycznia

- źródła PV
- elektrownie wiatrowe

- źródła PV
- elektrownie wiatrowe
- mikroelektrownie biogazowe
- elektrownie biogazowe
- akumulatory
- kształtowanie profili (RCR)



## Ewolucja przyrostowa technologii



„Wydostanie” się z krzywej przyrostowej wymaga innowacji przełomowej

2010 → 2019

Panele PV

spadek o 85 %

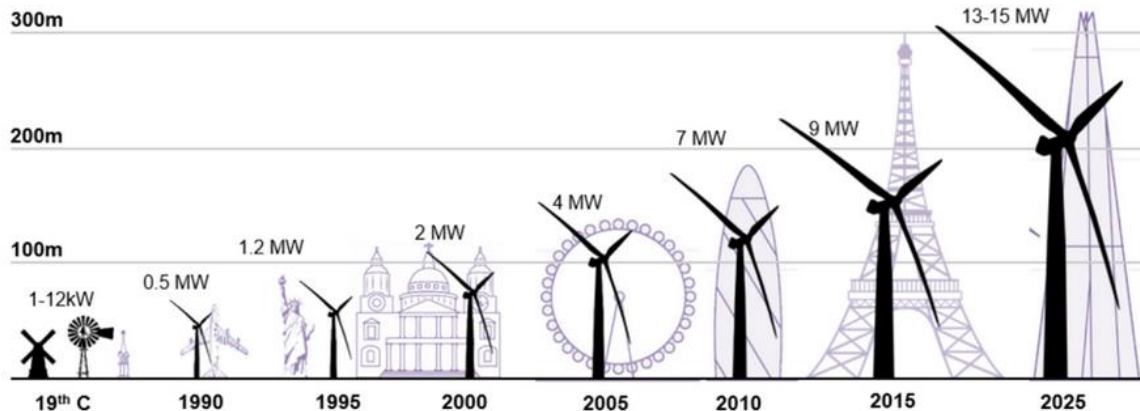
Elektrownie wiatrowe

spadek o 49 %

Akumulatory

spadek o 85 %

## Ewolucja energetyki wiatrowej



Sources: Various; Bloomberg New Energy Finance

- Regulacja U i Q (możliwa nadrzędna)
- Regulacja P i f (rzadko stosowana)
- Jakość energii (przekształtniki)
- Sterowana sztuczna inercja (przekształtniki)

## Struktura źródeł wytwórczych dla wybranych osłon OK(JST)

**OK(JST1)** - wieś zasilana ze stacji transformatorowej SN/nN

**OK(JST2)** - gmina (wiejska, miejsko-wiejska), miasto 20-50 tys. mieszkańców

**OK(JST3)** - miasto 50-100 tys. wraz z powiatem (jeśli jest)

**OK(JST6)** - Warszawa, GZM

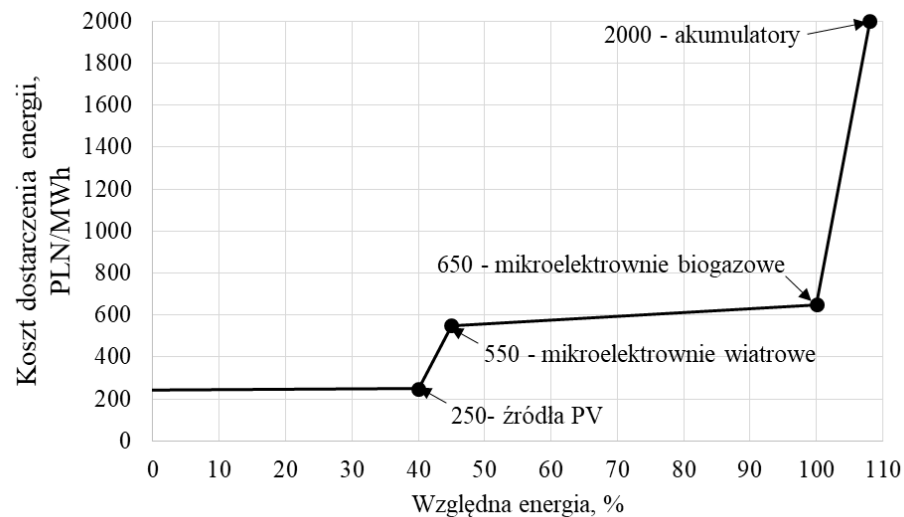
	<b>Ośłona Kontrolna</b>		
	OK(JST1)	OK(JST2)	OK(JST3)
	<b>Względna produkcja energii <math>E^*</math>, %</b>		
źródła PV	40	40	32
mikroelektrownie wiatrowe	5	5	0
elektrownie wiatrowe	0	25	38
mikroelektrownie biogazowe	55	10	5
elektrownie biogazowe	0	20	25
mineralizacja (GOZ)	0	0	0
elektrownie wiatrowe offshore	0	0	0
gazowe źródła kogeneracyjne	0	0	0
agregaty prądotwórcze (UGZ)	0	0	0
<b>Kształtowanie profili</b>			
usługi DSM/DSR, %	15	15	15
akumulatory, %	8	8	6
<b>Bilans energetyczny</b>			
Saldo, %	5	2	0
Nadwyżka, %	6	3	1
Deficyt, %	1	1	1

$$E^* = \frac{E}{\max(E)|_{\sum E_p=0}} \cdot 100\% \quad 13$$

# Koszty krańcowe dostaw energii elektrycznej w OK(JST)

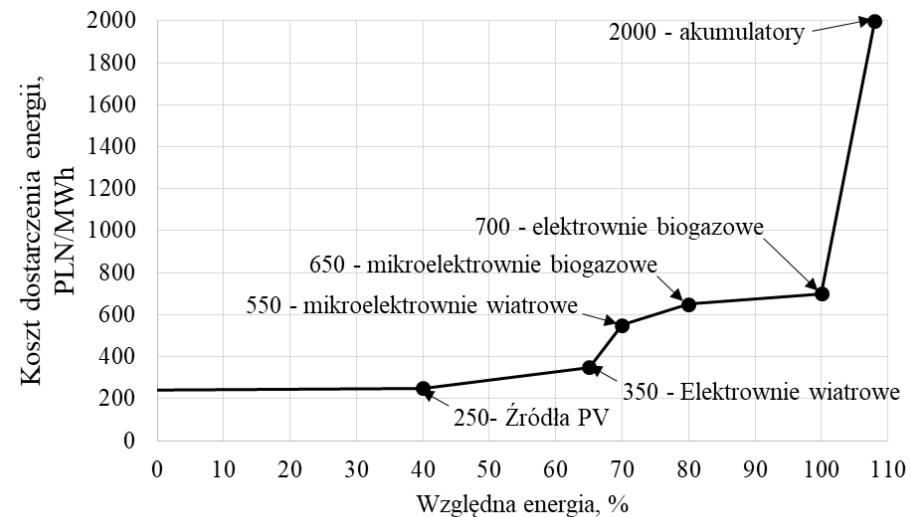
## OK(JST1)

średnioroczny koszt: 485 PLN/MWh



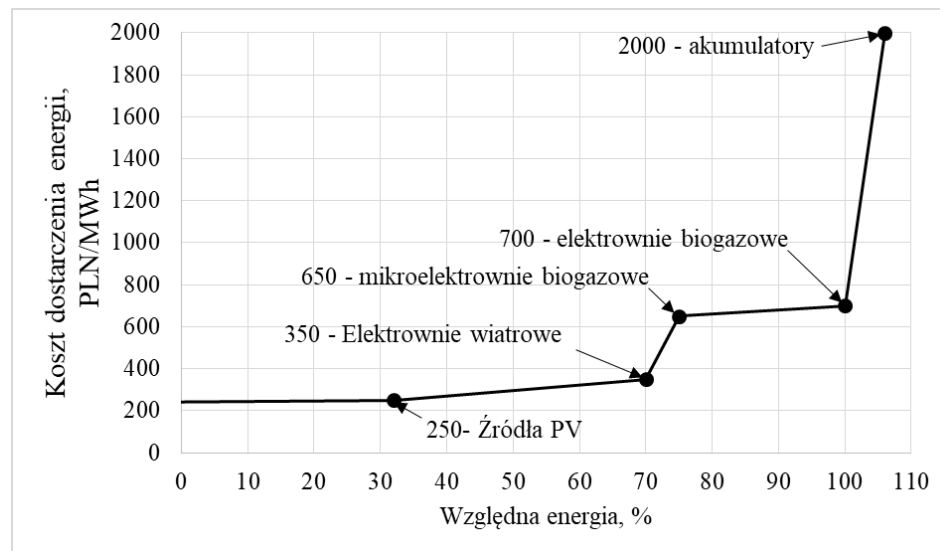
## OK(JST2)

średnioroczny koszt: 420 PLN/MWh



## OK(JST3)

średnioroczny koszt: 421 PLN/MWh



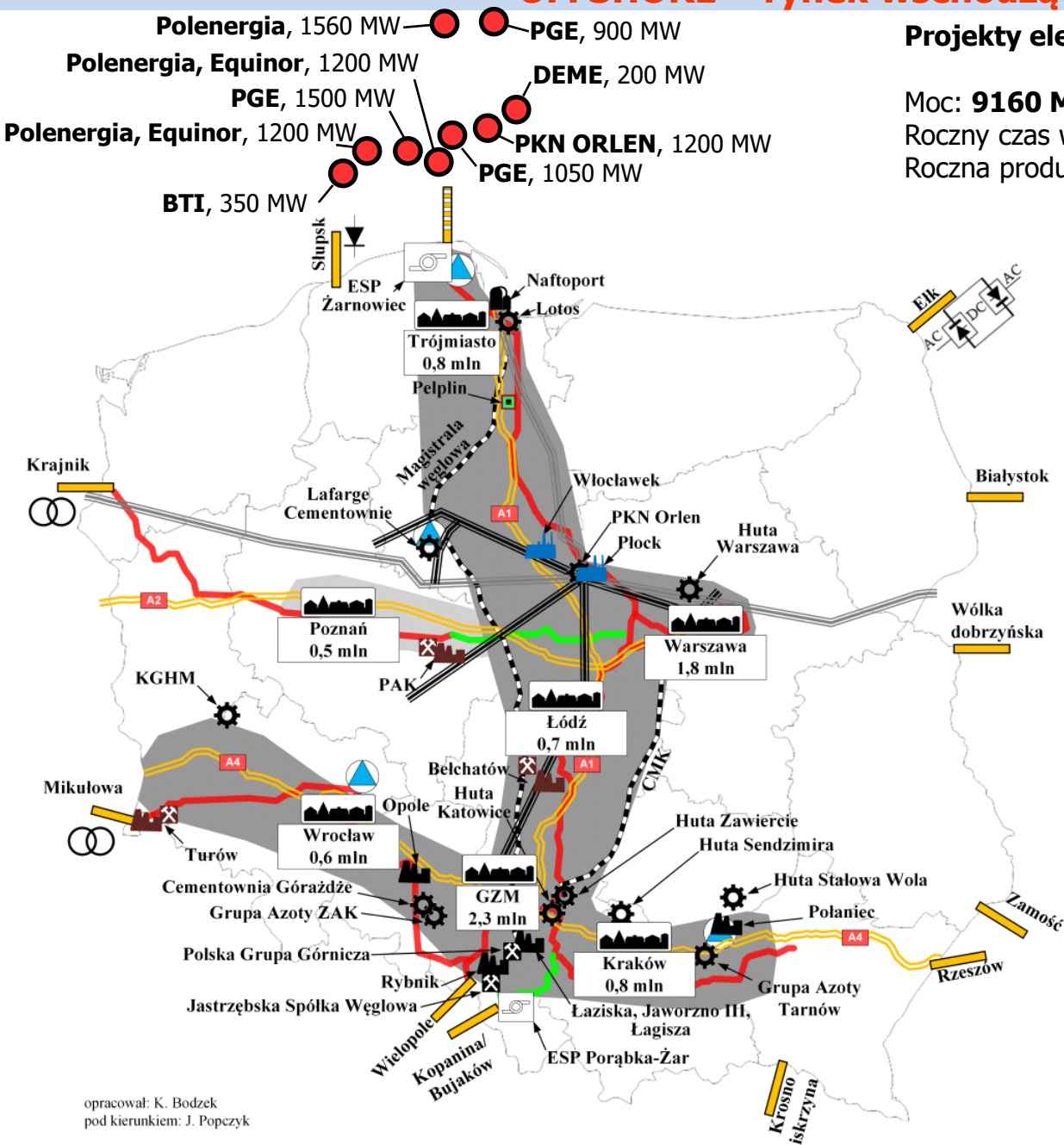
# Korytarz „Kotwica” z uwzględnieniem istniejących projektów elektrowni wiatrowych OFFSHORE – rynek wschodzący 2

## Projekty elektrowni wiatrowych OFFSHORE

Moc: **9160 MW**

Roczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej: **4500 h**

Roczna produkcja: **41 TWh**



- Korytarz I-U
- Elektrownia węgla na węgiel brunatny
- Elektrownia węgla na węgiel kamienny
- Elektrownia gazowa
- Elektrownia szczytowo-pompowa
- Kopalnia węgla brunatnego
- Kopalnia węgla kamiennego
- Naftoport
- Magazyn gazu
- Magazyn paliwa
- Rurociąg surowcowy
- Rurociąg produktowy
- Stacja 400/220/110 kV
- Linia 400 kV
- Linia 220 kV
- Linia 110 kV
- Linia transgraniczna
- Autostrada
- Magistrała kolejowa

## Struktura źródeł wytwórczych dla wybranych osłon OK(JST)

OK(JST3) – w strukturze duży udział mają elektrownie wiatrowe. Możliwe jest wykorzystanie technologii mineralizacji odpadów, ze względu na wystarczającą ilość ścieków i odpadów

	<b>Ośłona Kontrolna</b>			
	OK(JST1)	OK(JST2)	OK(JST3)	OK(JST6)
	<b>Względna produkcja energii <math>E^*</math>, %</b>			
źródła PV	40	40	<b>32</b>	20
mikroelektrownie wiatrowe	5	5	<b>0</b>	2
elektrownie wiatrowe	0	25	<b>38</b>	18
mikroelektrownie biogazowe	55	10	<b>5</b>	0
elektrownie biogazowe	0	20	<b>25</b>	5
mineralizacja (GOZ)	0	0	<b>0</b>	5
elektrownie wiatrowe offshore	0	0	<b>0</b>	38
gazowe źródła kogeneracyjne	0	0	<b>0</b>	9 <sup>1</sup>
agregaty prądotwórcze (UGZ)	0	0	<b>0</b>	4 <sup>1</sup>
<b>Kształtowanie profili</b>				
usługi DSM/DSR, %	15	15	<b>15</b>	15
akumulatory, %	8	8	<b>6</b>	4
<b>Bilans energetyczny</b>				
Saldo, %	5	2	<b>0</b>	-1
Nadwyżka, %	6	3	<b>1</b>	0
Deficyt, %	1	1	<b>1</b>	1

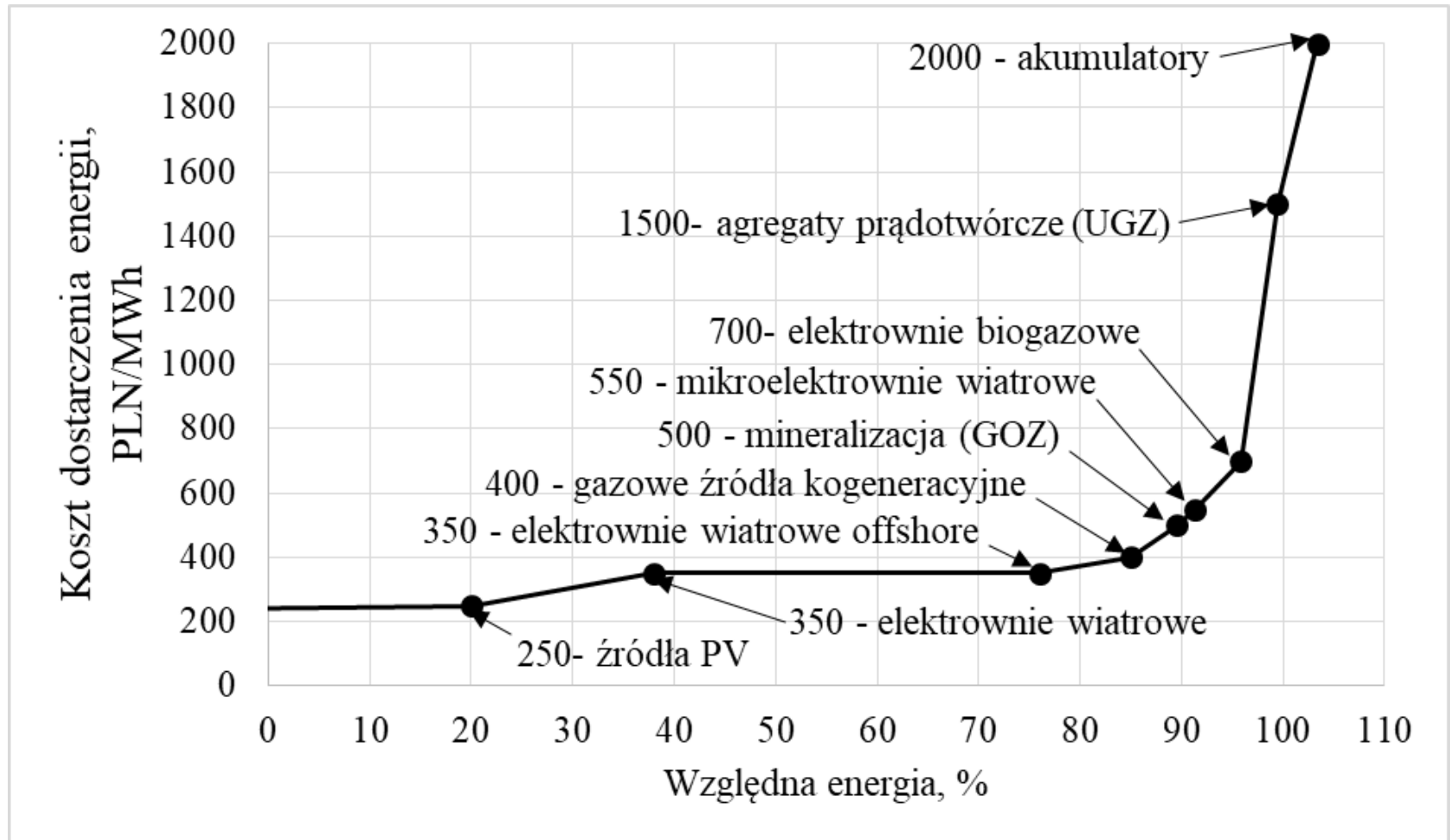
<sup>1</sup> potencjalne zastosowanie technologii wodorowych

$$E^* = \frac{E}{\max(E)|_{\sum E_P=0}} \cdot 100\% \quad 16$$

OK(JST1) - wieś zasilana ze stacji transformatorowej SN/nN  
 OK(JST2) - gmina (wiejska, miejsko-wiejska), miasto 20-50 tys. mieszkańców  
 OK(JST3) - miasto 50-100 tys. wraz z powiatem (jeśli jest)  
 OK(JST6) - Warszawa, GZM

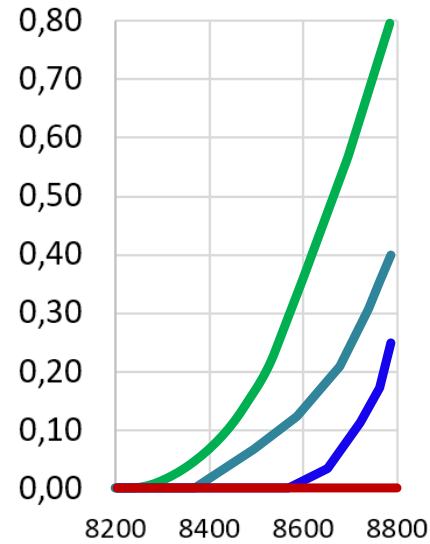
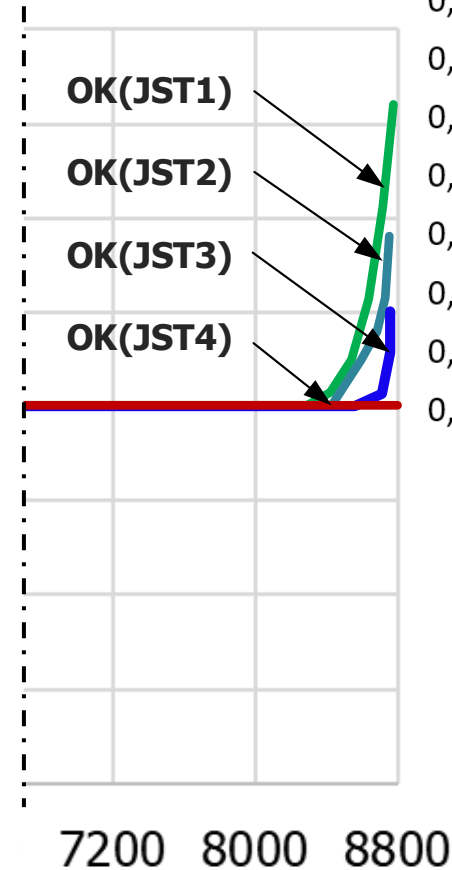
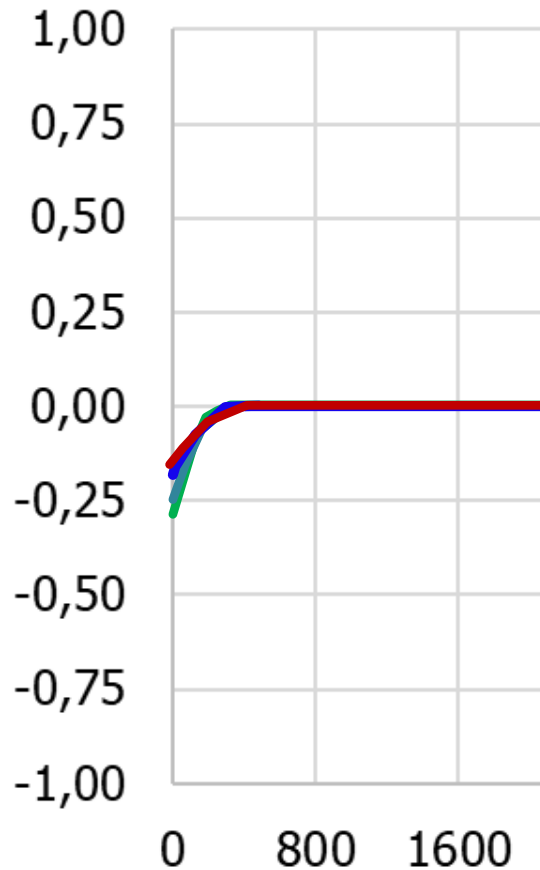
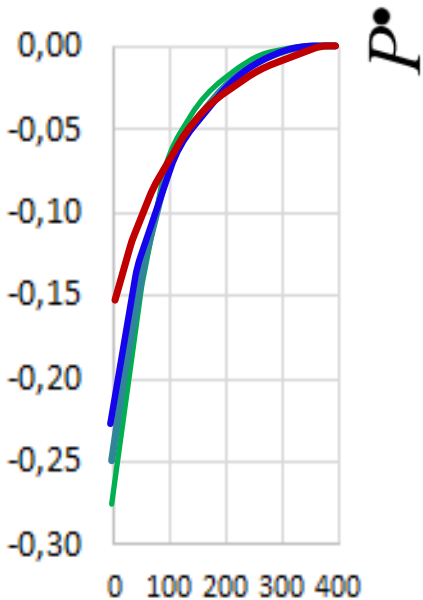
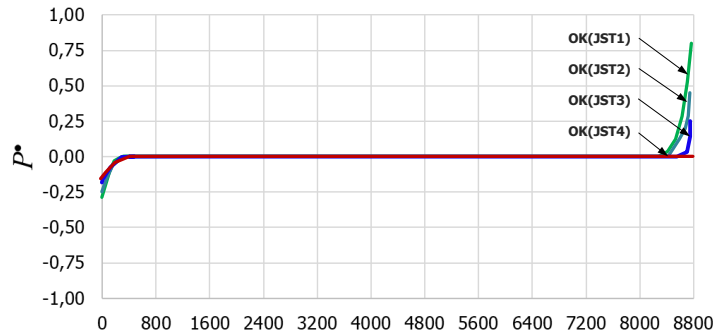
OK(JST6)

średnioroczny koszt: 400 PLN/MWh



# Uporządkowany profil niezbilansowania potrzeb energetycznych

$$P^{\bullet} = \frac{P}{\max(P)|_{\Sigma E_P=0}}$$



## Taka sama produkcja energii – **ale niemożliwe pełne bilansowanie**

9000 elektrowni wiatrowych lądowych (6 MW, 3500 h/rok)

4000 elektrowni wiatrowych morskich (12 MW, 4500 h/rok)

<https://www.siemensgamesa.com>



<https://www.windpowerengineering.com>

Odkrywki węgla brunatnego,  
kopalnie węgla kamiennego



Elektrownia Węglowe

Linie 220, 400 kV



14,5 tys. km

Stacje NN i WN



107

Linie 110 kV



35 tys. km

Linie nN



wiejskie – 260 tys. km

Stacje SN/nN



wiejskie – 160 tys.  
miejskie – 100 tys.

Linie SN



wiejskie – 200 tys. km  
miejskie – 100 tys. km

GPZ  
(stacje 110 kV/SN)



1400

Produkcja energii z elektrowni wiatrowych w Niemczech w 2019 r. – 170 TWh  
na powierzchni niewiele większej od Polski