

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

3. 12.2021



Czemu Polska potrzebuje energetyki jądrowej?

Prof. NCBJ dr inż. Andrzej Strupczewski

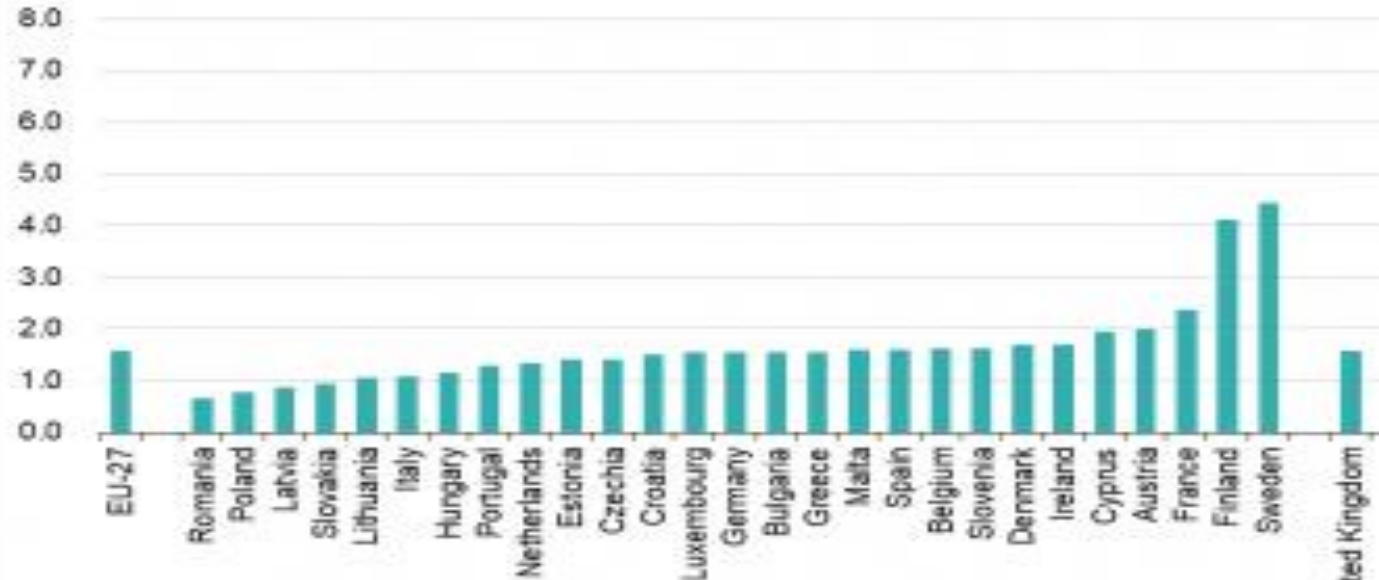
Wiceprezes Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energetyki Nuklearnej
SEREN

Główne problemy omawiane w wykładzie

- **Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce**
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Czy Polska może zmniejszyć zużycie energii elektrycznej na mieszkańca?

(MWh per capita)

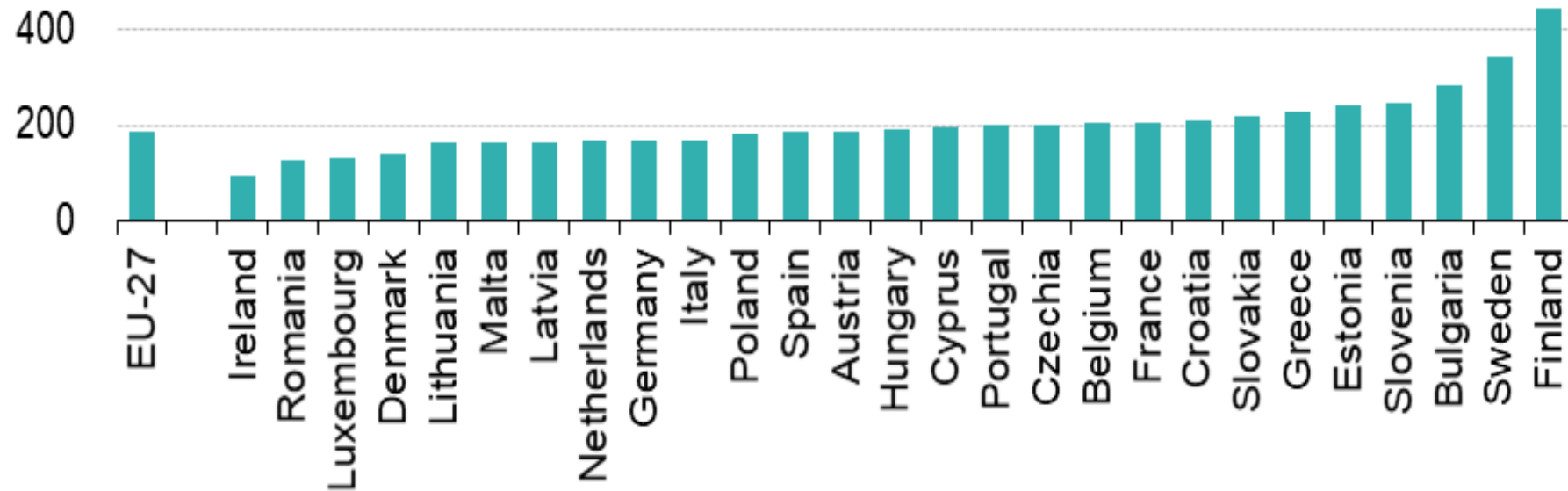


Zużycie energii elektrycznej na osobę w gospodarstwach domowych Unii Europejskiej (MWh per capita)

Source: Eurostat ([nrg_cb_e](#)), ([demo_pjan](#))

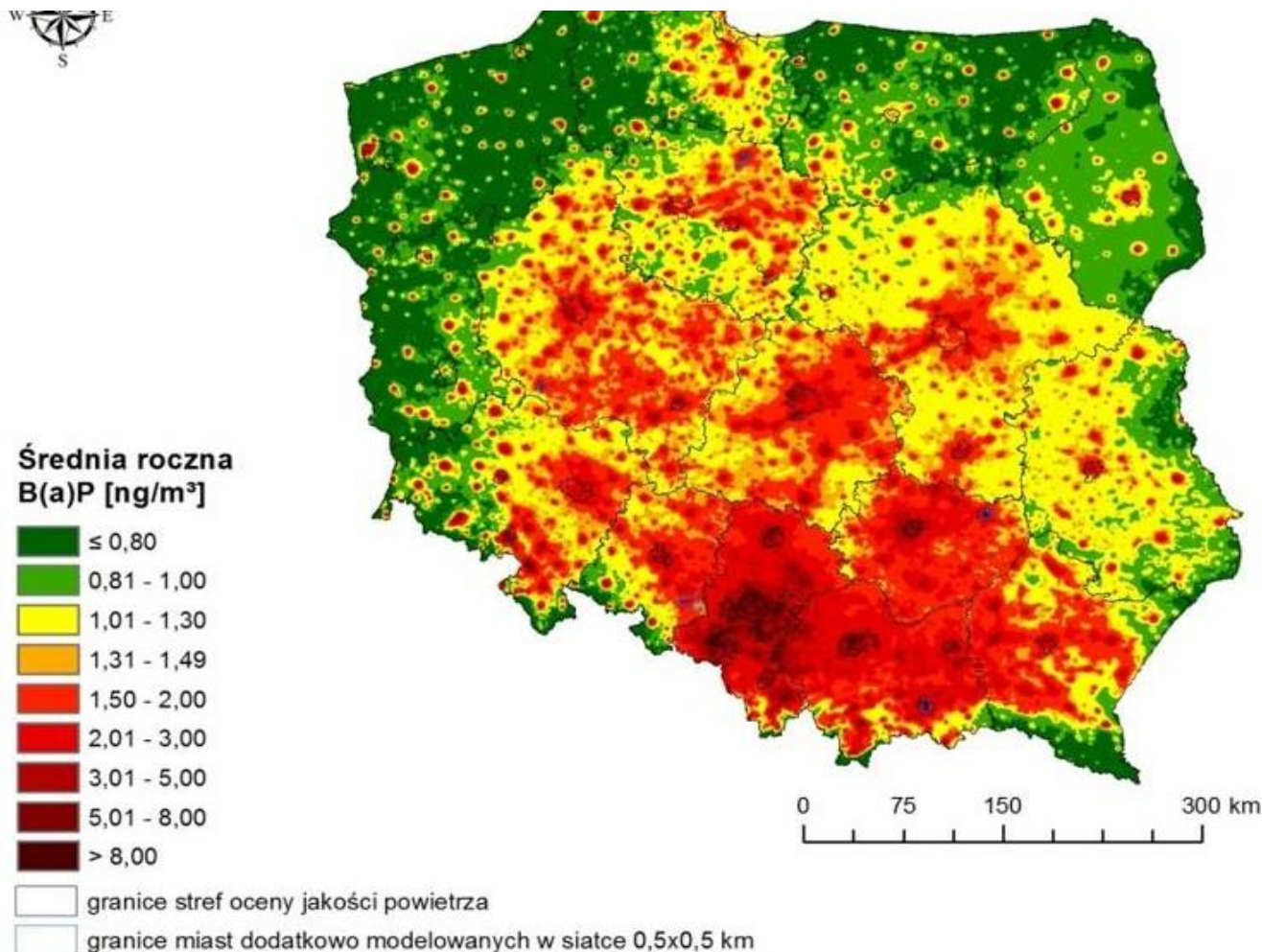
W grupie krajów o wysokim całkowitym krajowym zużyciu energii elektrycznej długość życia wynosi od 83 lat (Szwajcaria, 7091 kWh/os/rok) do 81,8 (Finlandia 14732 kWh/os/rok). Natomiast w krajach europejskich o małym zużyciu energii elektrycznej oczekiwana długość życia wynosi od 74,3 (Litwa 3468 kWh/os/rok) do 75 (Rumunia 2222 kWh/os/rok). W Polsce mamy średnią oczekiwaną długość życia 77,5 roku i zużycie energii elektrycznej 4330 kWh/os/rok.

Zużycie energii elektrycznej na jednostkę PKB mierzonego standardem siły nabywczej, kWh/1000 euro (PPS)



Zużycie energii elektrycznej na jednostkę PKB mierzonego standardem siły nabywczej, kWh/1000 euro (PPS)

Stężenie średnie roczne benzo[a]pirenu w Polsce

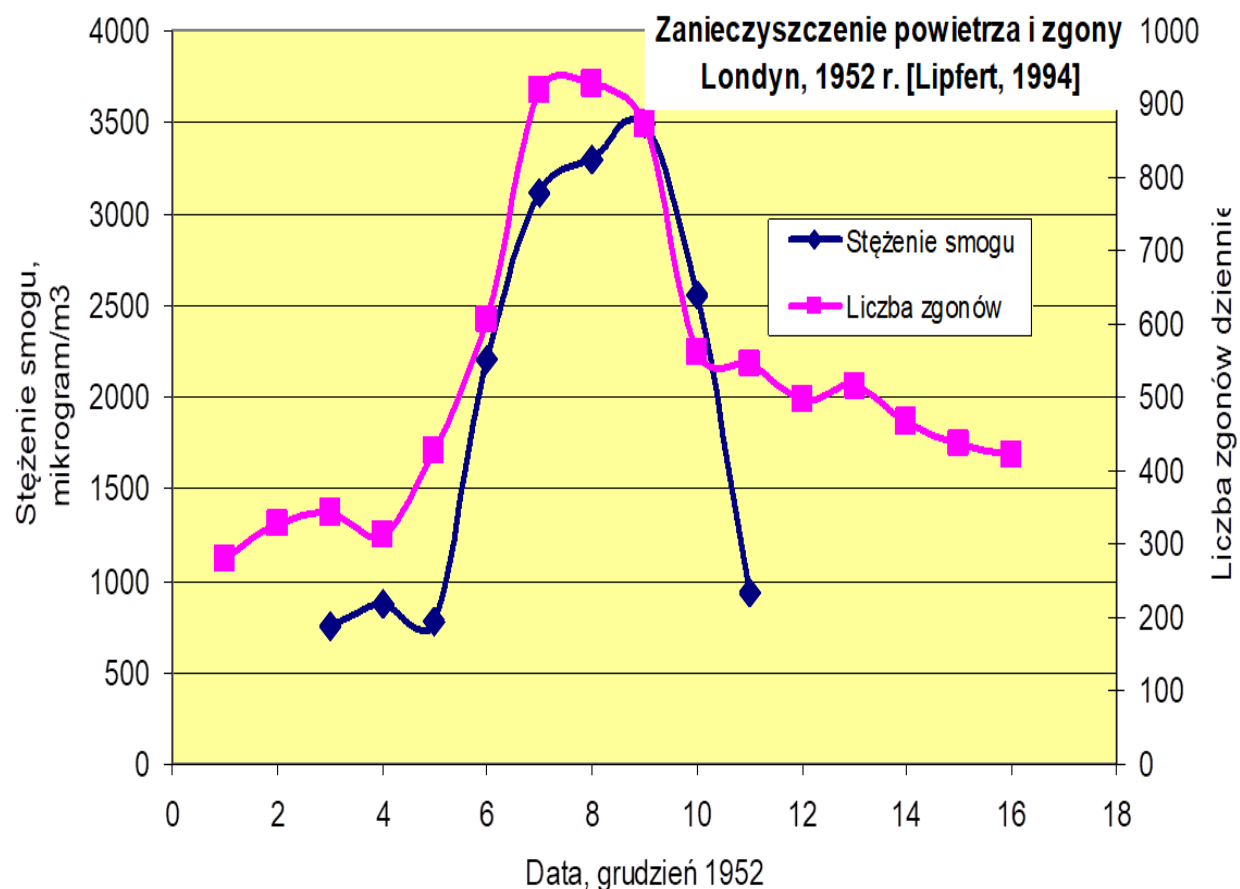


- Benzo[a]piren wchodzi w skład smogu i jako jeden z nielicznych jego składników może prowadzić do śmierci. Tworzy się zaś w wyniku niecałkowitego spalania lub pirolizy materiału organicznego i występuje również w dymie. Benzo[a]piren doprowadza do bezpośrednich [zanieczyszczeń środowiska](#), przenika do roślin oraz tkanki tłuszczowej zwierząt.
- Benzo[a]piren powoduje raka. Międzynarodowa agencja badań nad rakiem (IARC) już w 1987 roku określiła BaP jako główny ludzki kancerogen

Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- **Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery**
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

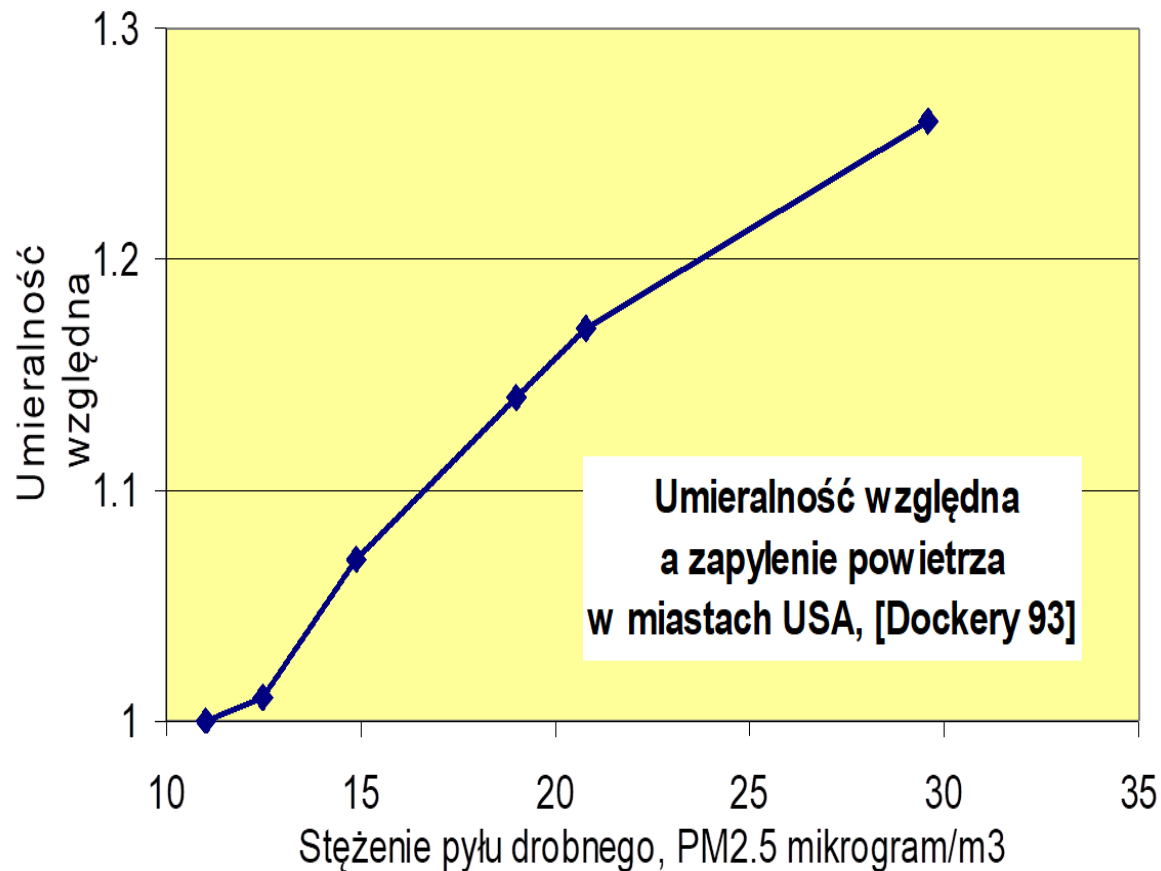
Wpływ zanieczyszczeń powietrza powodowanych przez spalanie węgla na zdrowie



Po „epizodzie” w Londynie w 1952 roku podniesiono alarm.

W okresie zaledwie tygodnia wzrost stężenia pyłu, sadzy i dymu w wilgotnym powietrzu, nazwanych łącznie smogiem (smoke + fog) **spowodował śmierć 4000** osób, a ciężkie powikłania zdrowotne wśród wielu tysięcy

Ciągłe niewielkie zanieczyszczenie powietrza też powoduje wzrost umieralności



Już przy stężeniu drobnego pyłu PM2,5 wynoszącym 20-30 mikrogramów na metr sześcienny występuje wyraźne skrócenie życia mieszkańców.

W Polsce wartość średnia PM2,5 w ciągu roku nie może przekraczać 25 µg/m³.

Niestety w praktyce wartość ta jest przekraczana w wielu rejonach Polski.

Stężenia PM2.5 w krajach Europy w 2017 r.



$\mu\text{g}/\text{m}^3$

- ≤ 10
- 10-20
- 20-25
- 25-30
- > 30

Pył zawieszony składa się z mieszaniny substancji organicznych i nieorganicznych.

Może on zawierać substancje toksyczne takie jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (np. rakotwórczy benzo[a]piren), metale przejściowe i ciężkie oraz ich związki, a także dioksyny i furany.

PM2,5 jest szczególnie szkodliwy dla zdrowia, gdyż ze względu na mały rozmiar, jego cząstki mogą docierać do pęcherzyków płucnych, skąd mogą dalej przenikać do krwiobiegu

Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- **Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?**
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?

Zużycie energii elektrycznej w Polsce jest dwukrotnie niższe niż w Niemczech czy Francji.

Musimy więc nie tylko uzupełnić moce stracone wskutek redukcji wydobywania węgla, ale i powiększyć produkcję energii elektrycznej na mieszkańca.

Źródła nisko-emisyjne to

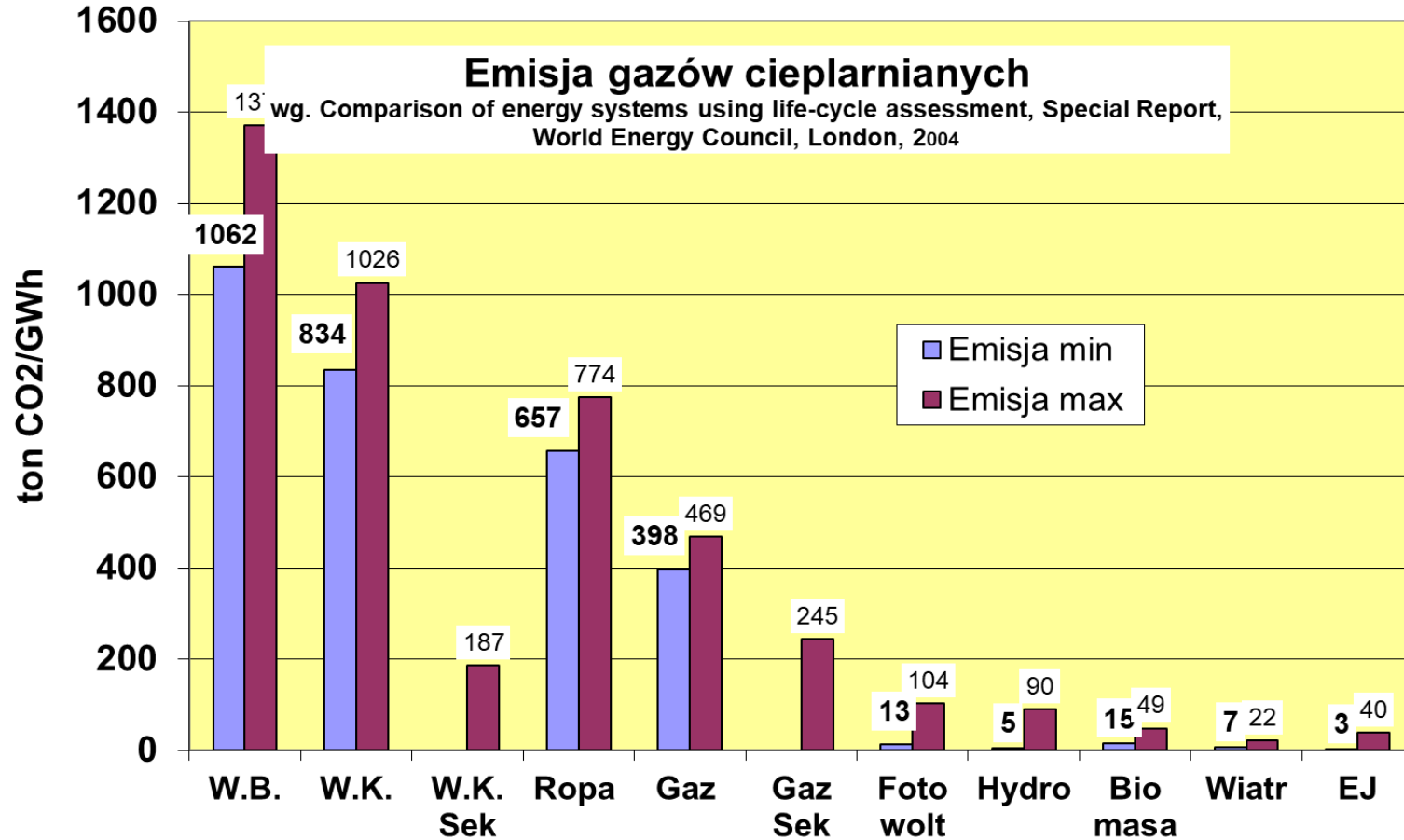
- Energetyka jądrowa (EJ)
- Odnawialne Źródła Energii (OZE)

Które zapewnią **stabilną produkcję** energii elektrycznej?

Które spowodują **obniżenie emisji CO₂** z naszej energetyki?

Które dadzą energię elektryczną **tanio, bez subsydiów**?

Drogi do redukcji emisji CO2



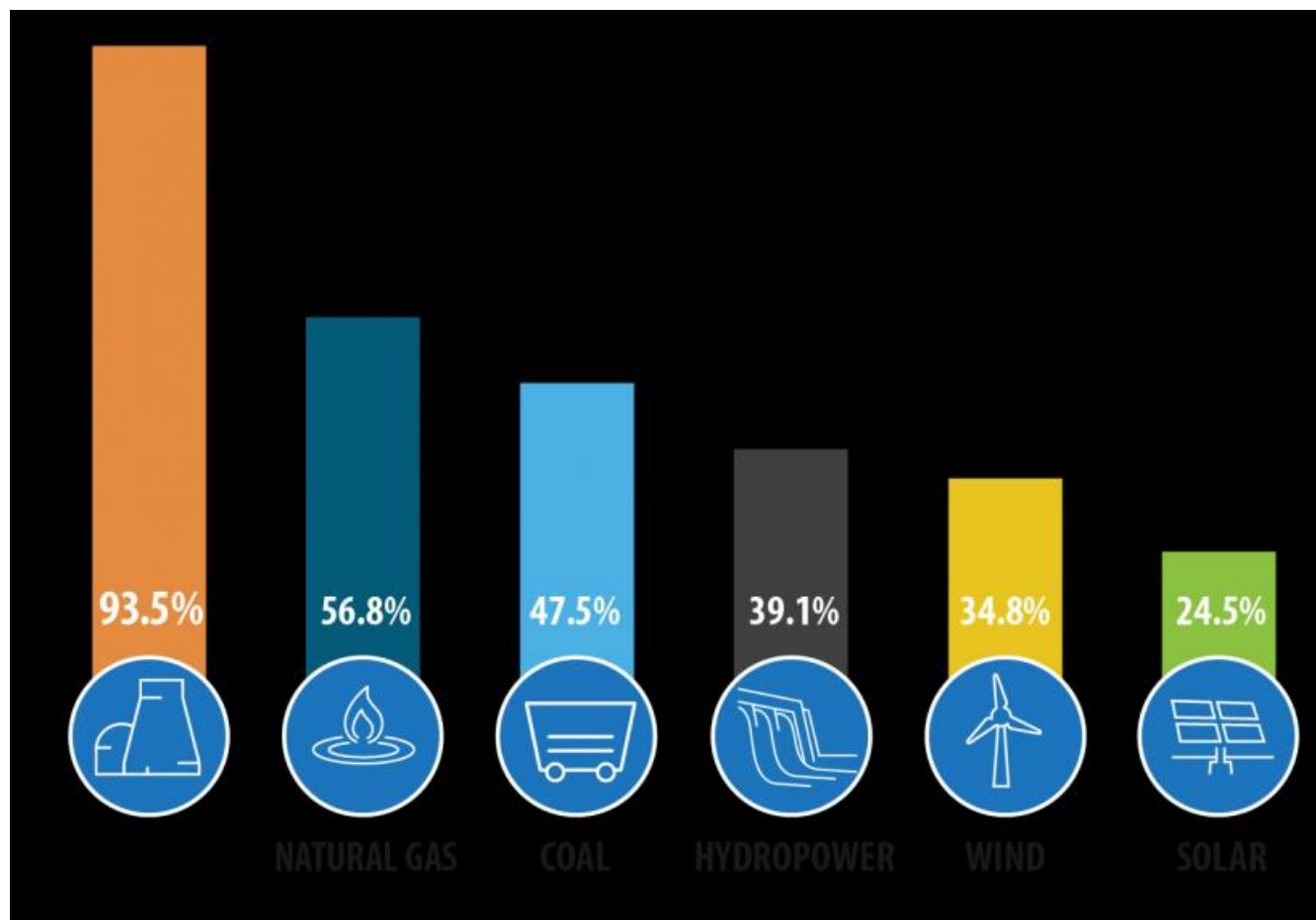
Wielkości emisji podano dla całego cyklu życia, od wydobywania surowców i paliwa do likwidacji elektrowni i unieszkodliwiania odpadów.

Dla energii jądrowej

40 t/GWh odpowiada wzbogacaniu uranu w zakładach dyfuzyjnych,

3 t/GWh – w wirówkach, obecnie już dominujących

Strategia zrównoważonego rozwoju



- Rozwój Odnawialnych Źródeł Energii OZE
- Lub
- Równoległy rozwój OZE i energetyki jądrowej jako niezawodnego źródła energii
- W Niemczech współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej mniejszy: dla wiatru średnio 20%, najlepsze 25%, panele słoneczne 11%
- Na miejsce EJ 1000 MWe potrzeba w Niemczech lub w Polsce wiatraków o mocy 4000 MWe

Główne problemy omawiane w wykładzie

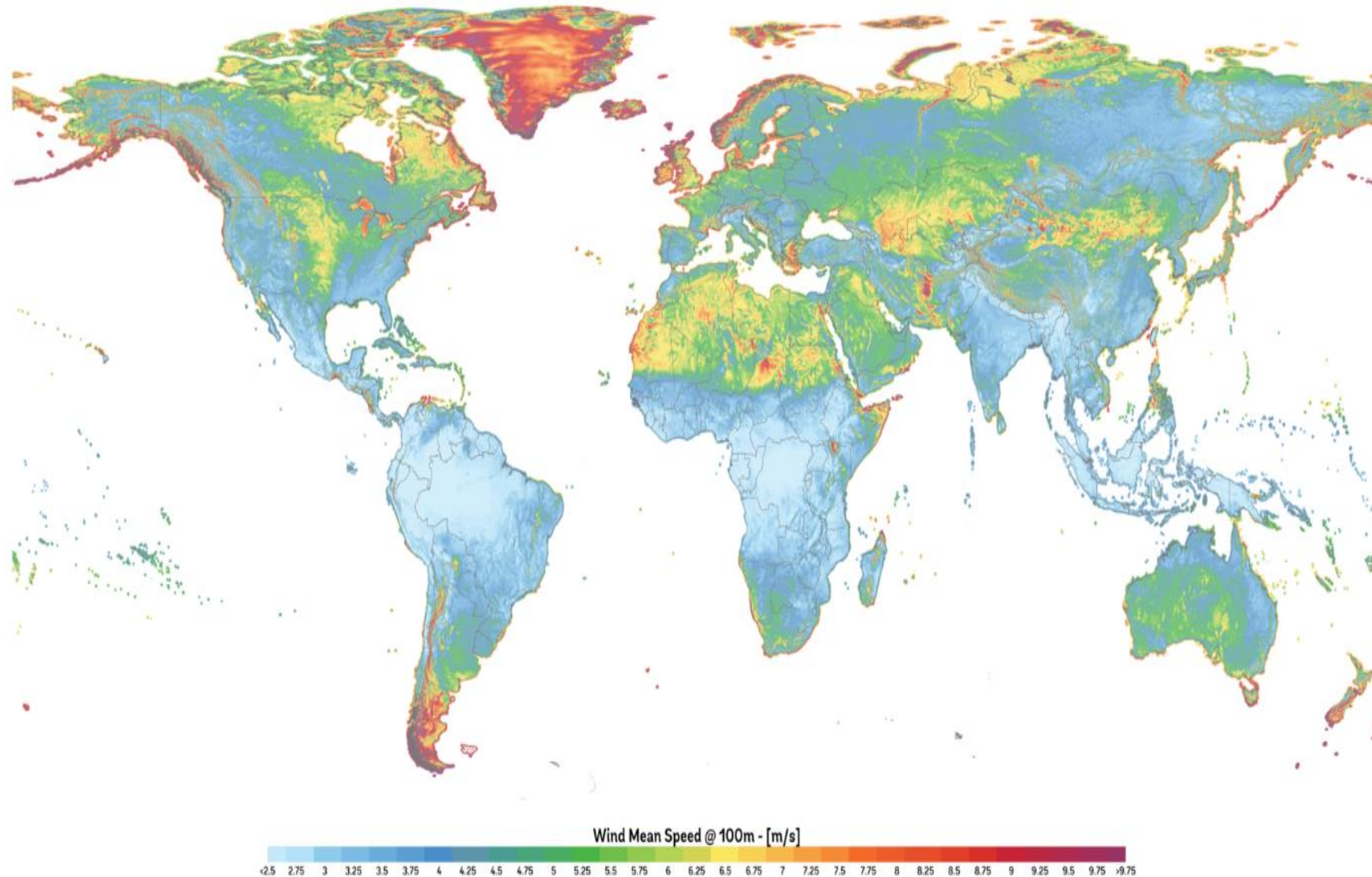
- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- **Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania**
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Moc turbiny wiatrowej proporcjonalna do sześciangu prędkości wiatru

Prędkość wiatru, m/s	poniżej 4	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
moc kW	0	15	105	255	440	675	985	1330

Turbina wiatrowa pracująca w rejonie o średniej prędkości wiatru 6 m/s będzie mieć moc średnią $675/255=2,6$ razy **mniej** niż turbina pracująca w rejonie o średniej prędkości wiatru 8 m/s.

Nie można więc twierdzić, że Polska ma wyjątkowo korzystne warunki dla energetyki wiatrowej. Przeciwnie, ma ponad dwukrotnie gorsze warunki niż kraje takie jak Dania czy Wielka Brytania.



Mapa wiatru na wys. 100 m.

Czy wiatraki w
Polsce będą równie
wydajne jak w W.
Brytanii lub USA?

Polska 5 m/s, Szkocja.

Irlandia 8 -9 m/s,

**USA stany centralne
6,5 m/s**

By Technical University of
Denmark (DTU) -

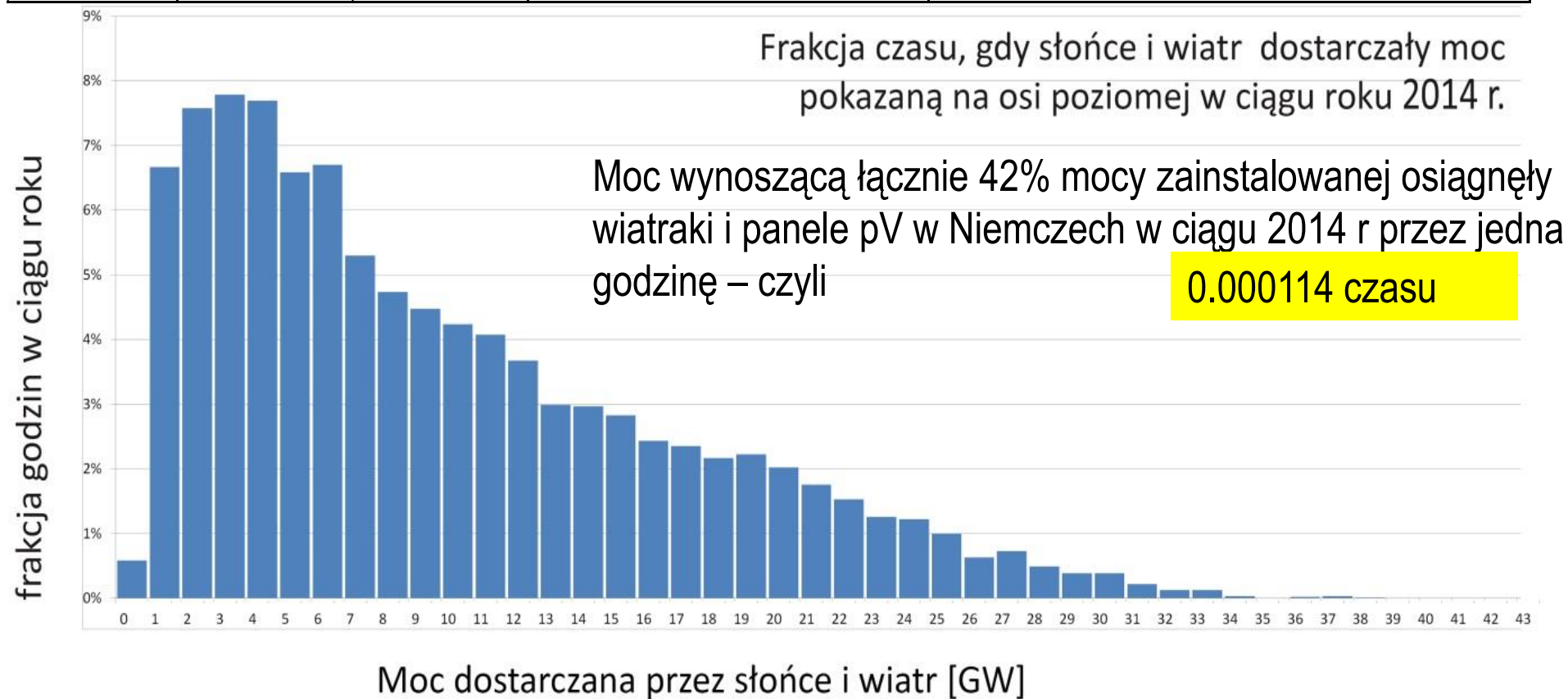
<https://commons.wikimedia.org/wiki/index.php?curid=73041874>

Czy sama rozbudowa wiatraków i paneli fotowoltaicznych daje obniżenie emisji CO₂?

- Niestety nie.
- Sprawdźmy to na przykładzie Niemiec.
- Porównanie wielkości emisji CO₂ podawanych przez urząd statystyczny UE wykazuje, że emisje CO₂ przypadające na jednego mieszkańca są w Niemczech większe (**9.3 t/rok**) niż w Polsce (7,8 t/rok) i dużo większe niż we Francji (5,0 t/rok).
- W stosunku do 2014 r. emisje CO₂ w Niemczech w 2015 r. wzrosły o 1.3%, a **w stosunku do roku 2009 średnie emisje roczne w latach 2010-2015 były o 2% wyższe.**
- Zamknięcie 8 elektrowni jądrowych, które nie emitują CO₂, trudno jest skompensować

Moc OZE w Niemczech – godzin w roku

Źródło	Moc , GWe	Energia TWh	Wykorzystanie mocy zainstalowanej	Równoważna liczba godzin pracy na pełnej mocy
wiatr	50	78	17,8%	1560
pV	40,85	37,5	10,5%	918

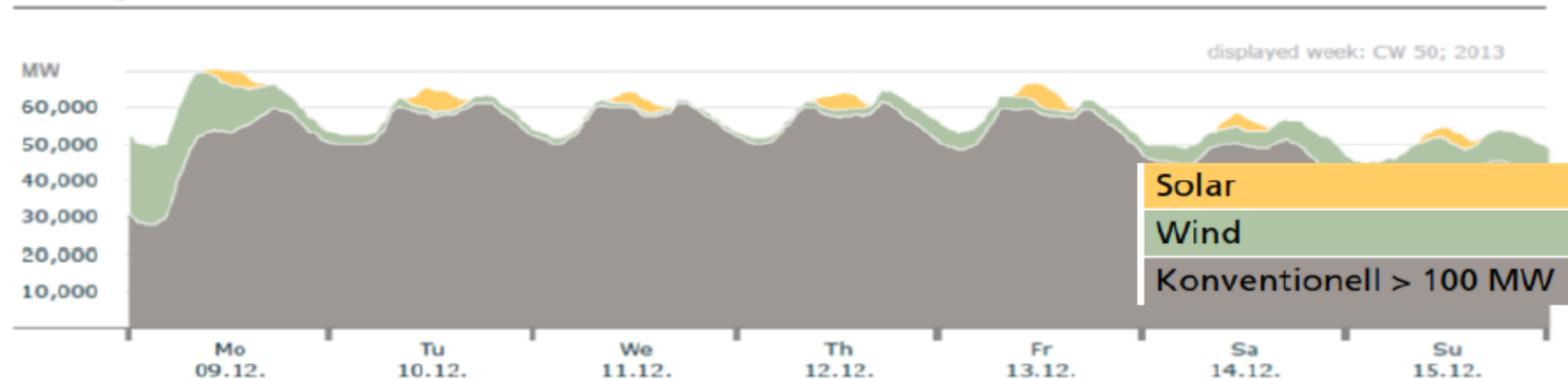


Nierównomierność generacji energii z OZE

Electricity Production in Germany: Calendar Week 50

Institut Fraunhofer für Solar und Wind Energie ISE

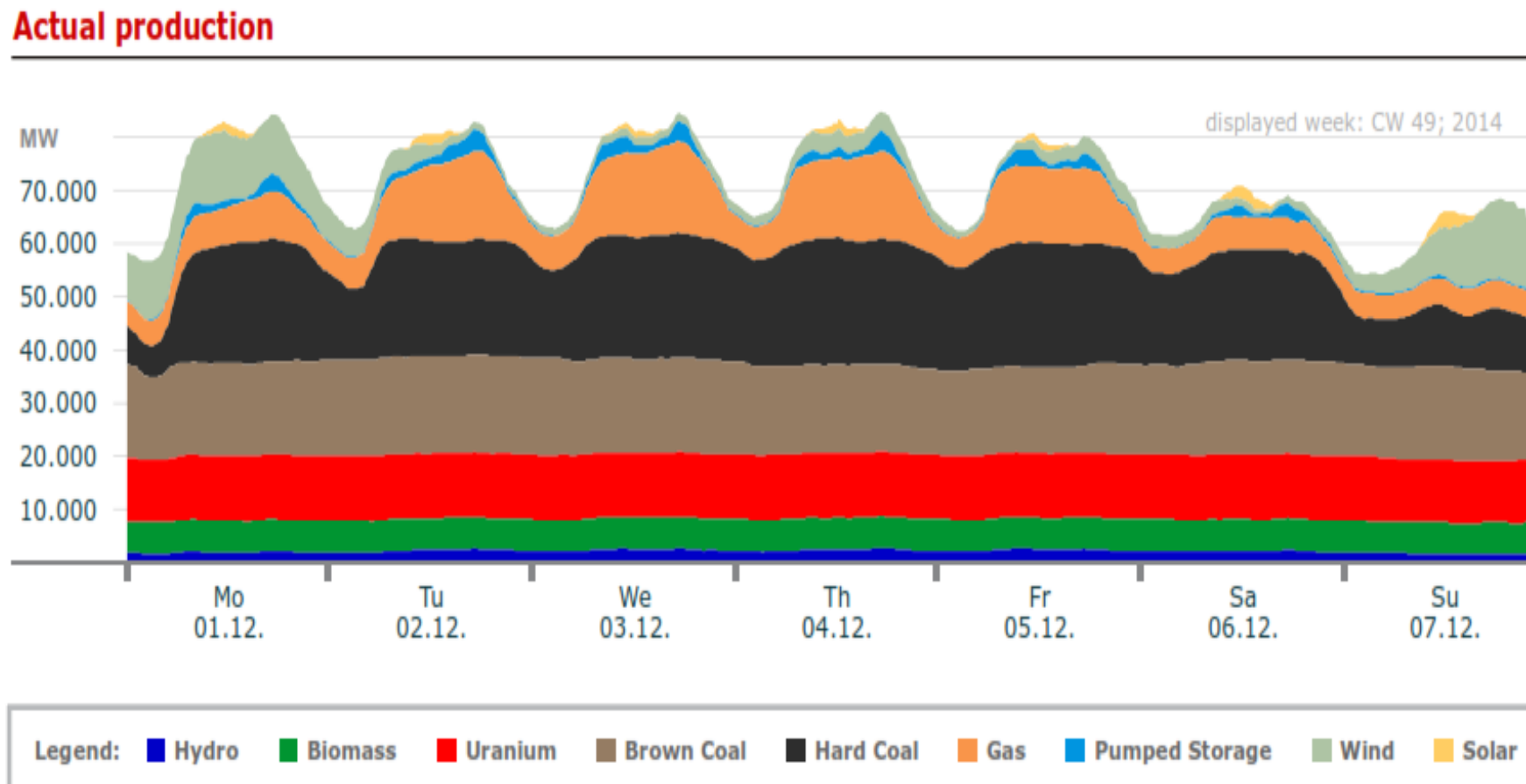
Actual production



Die Welt: „Na początku grudnia 2013 r. produkcja energii z elektrowni wiatrowych i słonecznych niemal kompletnie stanęła. Nie obracało się ponad 23 000 wiatraków. Milion układów fotowoltaicznych niemal całkowicie przerwało wytwarzanie prądu. Przez cały tydzień EW, EJ i gazowe musiały zaspokajać około 95% zapotrzebowania Niemiec

Jeden z wielu przykładów zawodności zasilania wiatraków na lądzie w Niemczech. W Polsce warunki wiatrowe są podobne jak w Niemczech – przerwy w zasilaniu

Produkcja energii elektrycznej w ciągu tygodnia 49 w 2014 r. w Niemczech.

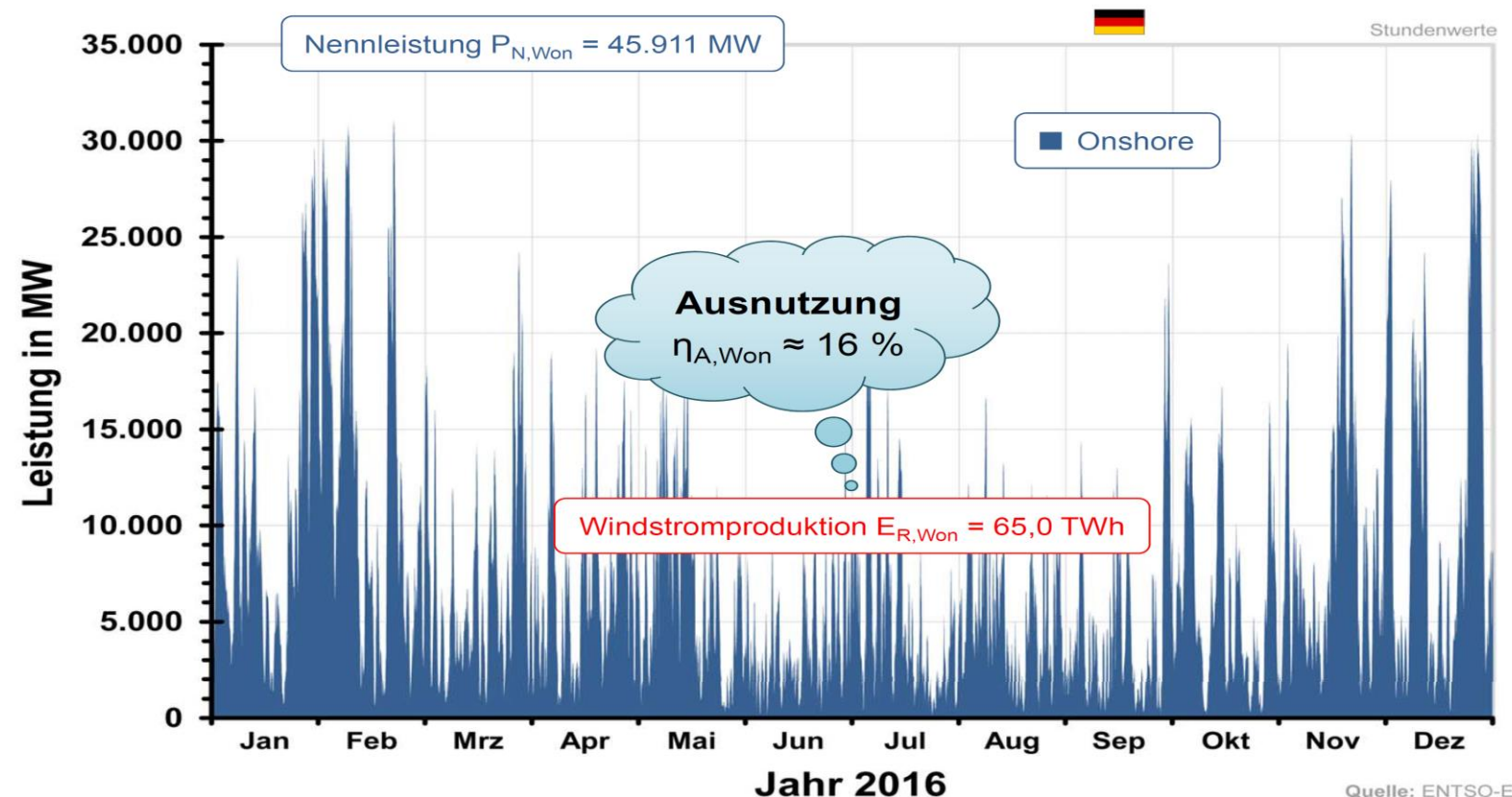


Na osi pionowej moc rzeczywista w MW. Kolorem niebieskim oznaczono moc wiatru, żółtym – paneli pV.

Niemcy: produkcja energii elektrycznej z lądowych farm wiatrowych w 2016 r.

Deutschland: Windstromproduktion im Jahr 2016

VGB
POWERTECH



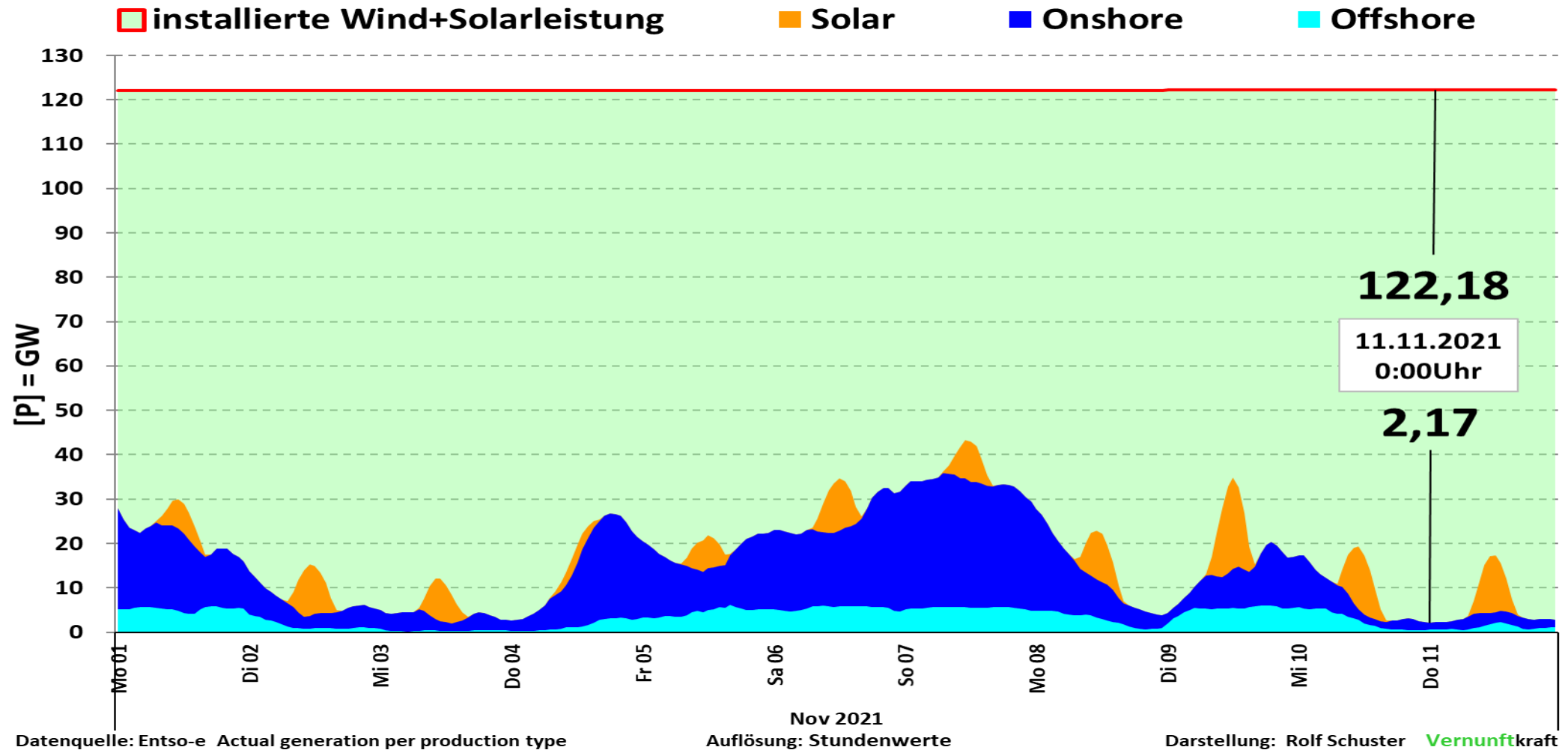
Przy produkcji energii z wiatraków równej 65 TWh i mocy nominalnej 45911 MW średni **wskaźnik wykorzystania mocy wynosił 16%**.

Minimalna moc wyniosła 135 MW, a więc stosunek mocy minimalnej do nominalnej był mniejszy niż 0,3%.

Wytwarzanie mocy (Leistung) elektrycznej ze wszystkich wiatraków na lądzie w Niemczech w 2016 roku, wskaźnik wykorzystania mocy zainstalowanej (**Ausnutzung**) i produkcja energii elektrycznej w wiatrakach (Windstromproduktion) . (źródło T. Linnemann)

Czy okresy braku wiatru były tylko w przeszłości?

Bynajmniej! Np. 11.listopada 2021



Czy wiatraki na morzu zapewnią sterowalne, niezawodne źródła czystej energii?

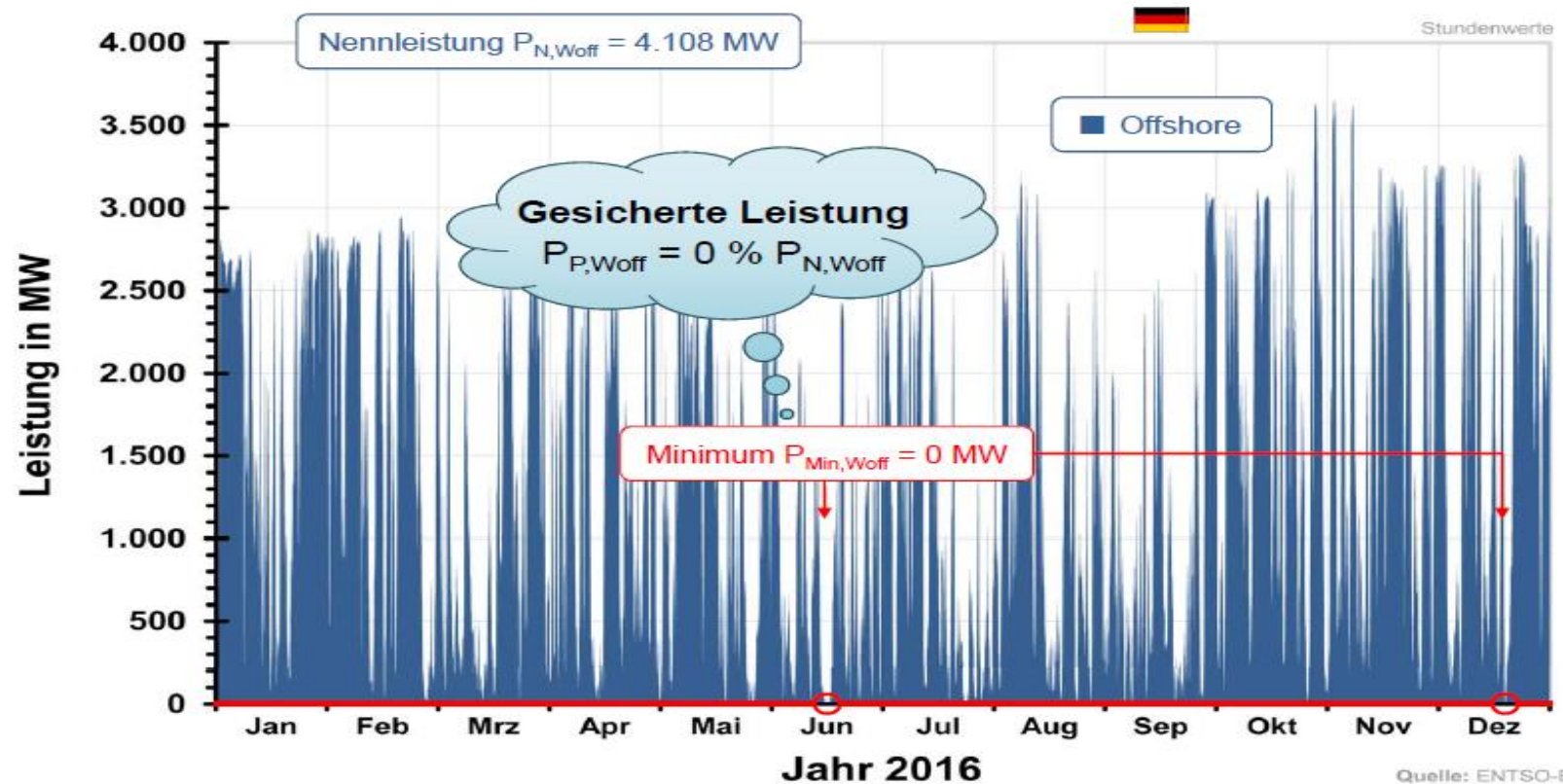


- Przerwy w generacji prądu występują też w morskich farmach wiatrowych. **Moc morskich farm wiatrowych MFW na Bałtyku w maju 2018 roku.** W ciągu okresu ciszy morskiej trwającego 4,5 dni i nocy, średnia moc MFW wynosiła $< 0,6\%$ mocy nominalnej. Z takimi okresami ciszy morskiej musimy się liczyć planując wprowadzanie MFW

Zmiany w generacji energii elektrycznej z Morskich Farm Wiatrowych, Niemcy, 2016

Deutschland: Windstromproduktion im Jahr 2016

VGB
POWERTECH



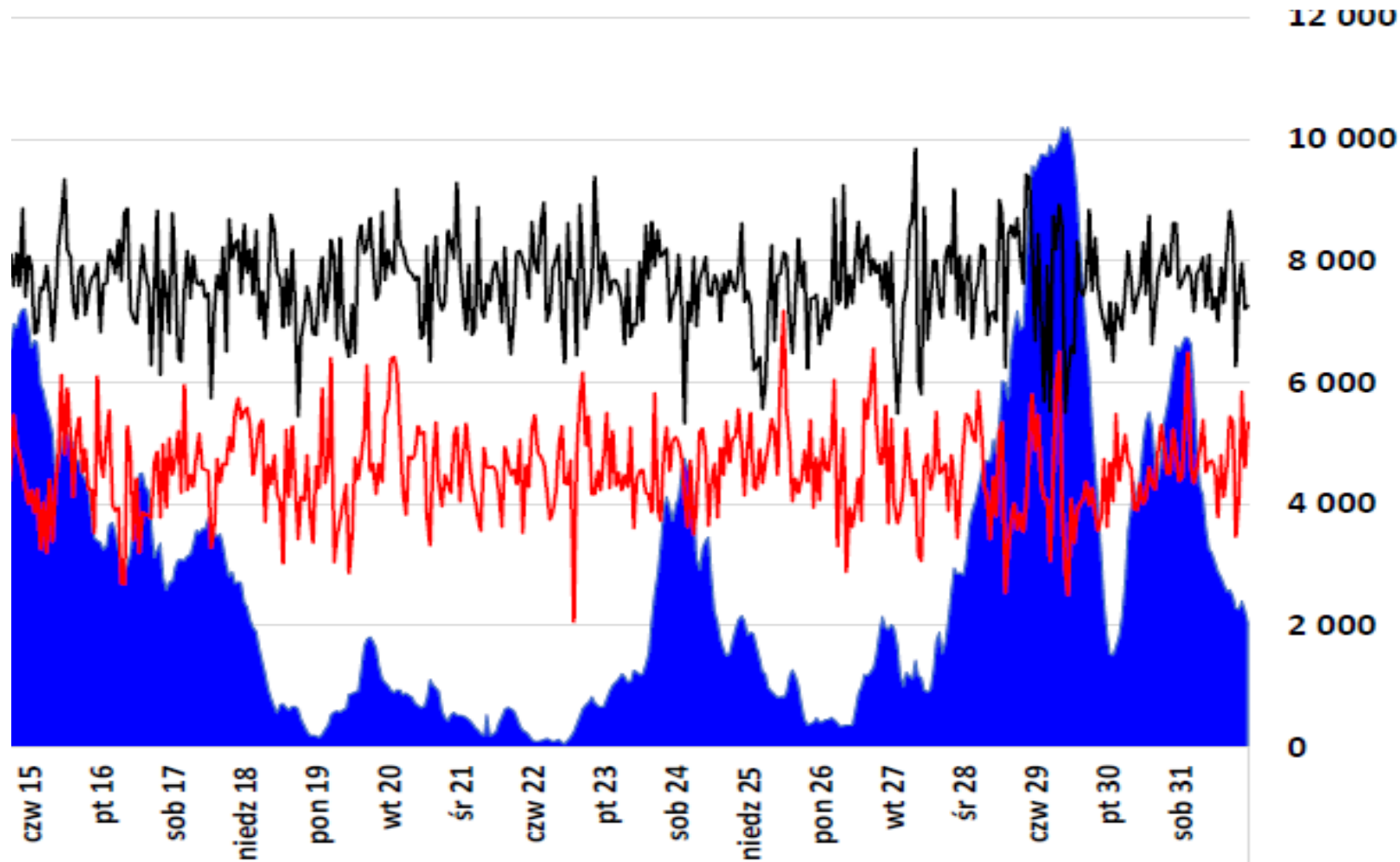
Moc rzeczywista morskich farm wiatrowych na Bałtyku w 2016 r. spadała poniżej 1% mocy nominalnej przez 256 godzin rocznie, czyli trwała blisko 11 dni. źródło

<https://www.vgb.org/studie/windenergie-deutschland-europa-teil1.html>

Czy tylko Niemcy mają problemy z wiatrem? Nie. Wielka Brytania też!

- Wielka Brytania ma idealne położenie z wiatrami wiejącymi z nad Atlantyku - dlatego postawiła na rozwój farm wiatrowych.
- Najnowsze wyniki: Właśnie podczas obrad COP26 w Glasgow, 2.11.2021 wiatr był słaby przez cały dzień i dla ratowania systemu e.e trzeba było wznowić pracę elektrowni węglowych za cenę 4700 euro/MWh, to jest 100 razy wyższą niż normalnie. Koszt jednego dnia wyniósł 45 mln euro.
- A wkrótce potem kolejna cisza wiatrowa 24 .11.2021 spowodowała koszty ratowania systemu e.e. wynoszące 74 mln euro.
- Roczny koszt utrzymania równowagi systemu e.e wzrósł w ciągu 3 lat pięciokrotnie, dochodząc w roku 2020/21 do 2,1 mld euro, głównie na pokrycie zmian siły wiatru
-

Elektrownie wiatrowe w UK , lipiec 2021



Elektrownie wiatrowe w UK o mocy 25 000 MW (nominalnej) dostarczały przez 4 dni od 19 do 23 lipca średnio poniżej 1% mocy nominalnej a w czwartek 22 lipca o godz. 11.35 **tylko 67 MW, to jest 0,27% mocy nominalnej.** [ENTSOE, opr. własne]

lip 2021
Linia czarna i czerwona – częstotliwość sieci, max i min, pole niebieskie – moc farm wiatrowych

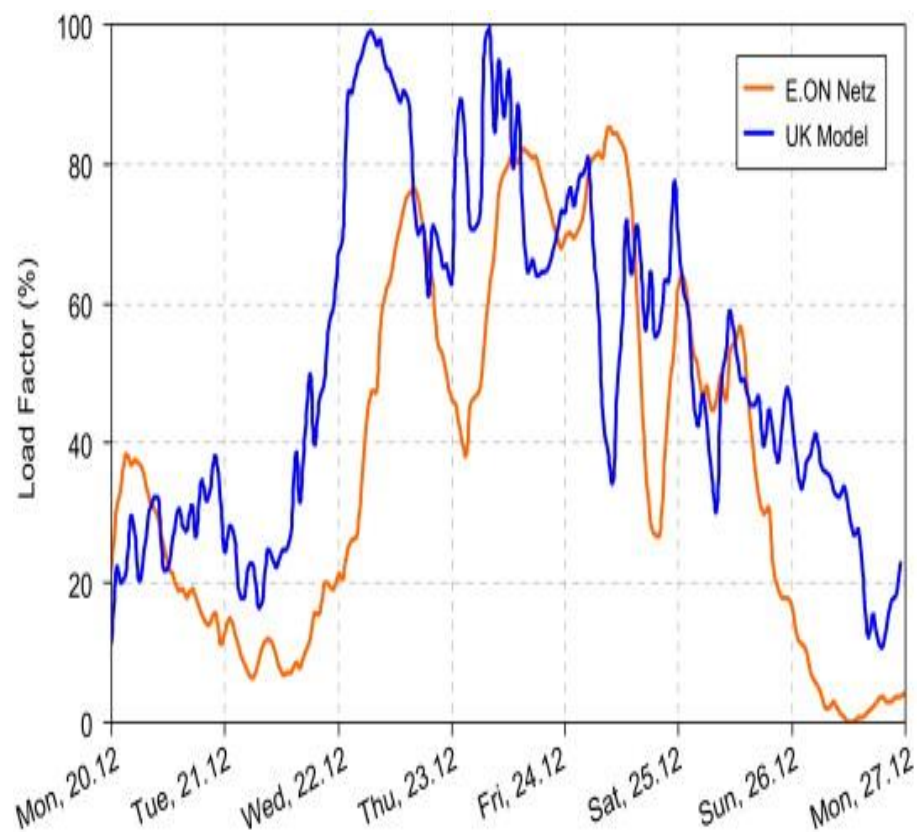
Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- **Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów**
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Twierdzenie OZE: Zawsze gdzieś wieje wiatr

- „ Eine ausreichende räumliche Verteilung leistet einen Beitrag zur besseren Verlässlichkeit und damit zur Versorgungssicherheit” .
- „Wystarczające rozdzielenie przestrzenne farm wiatrowych zapewnia niezawodność i pewność zasilania”
 - Naprawdę?
 - Zobaczmy prawdziwe dane z 2, 9 i 14 krajów Europy
 - Czy odległość od Finlandii do Hiszpanii to już wystarczające rozdzielenie przestrzenne?

Czy lekarstwem jest przesyłanie energii z sąsiednich krajów?



<http://docs.wind-watch.org/oswald-energy-policy-2008.pdf>

Budowa wielkich sieci przesyłowych jest kosztowna i sprzeczna z ideałem energetyki rozproszonej, gdzie każdy wytwarza sam potrzebną mu energię elektryczną.

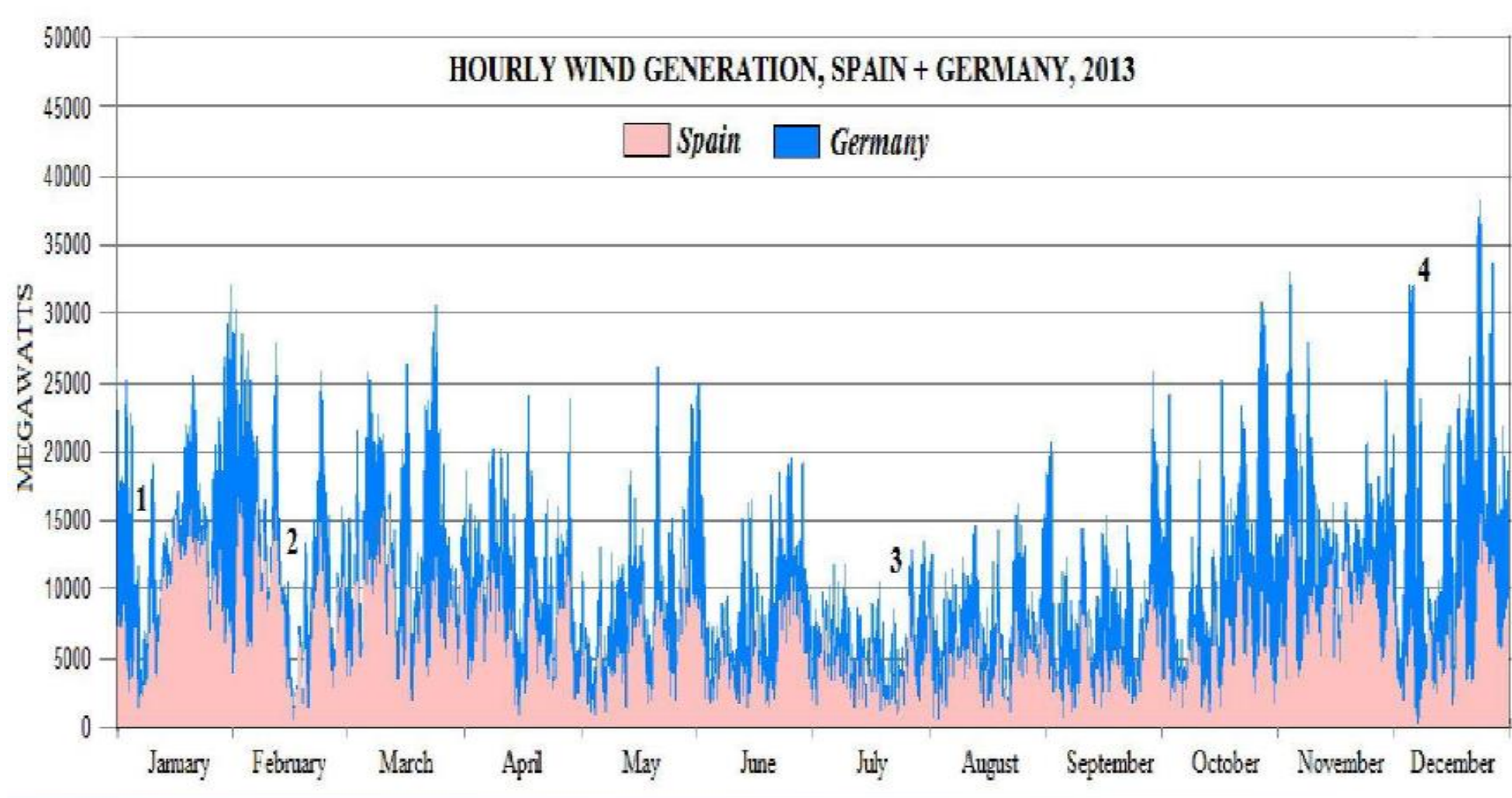
Co więcej, nie jest to wystarczające.

Zmiany mocy wiatru występują na dużych obszarach jednocześnie.

Przykład – moc wiatru w Wielkiej Brytanii i w Niemczech. (Oswald 2008)

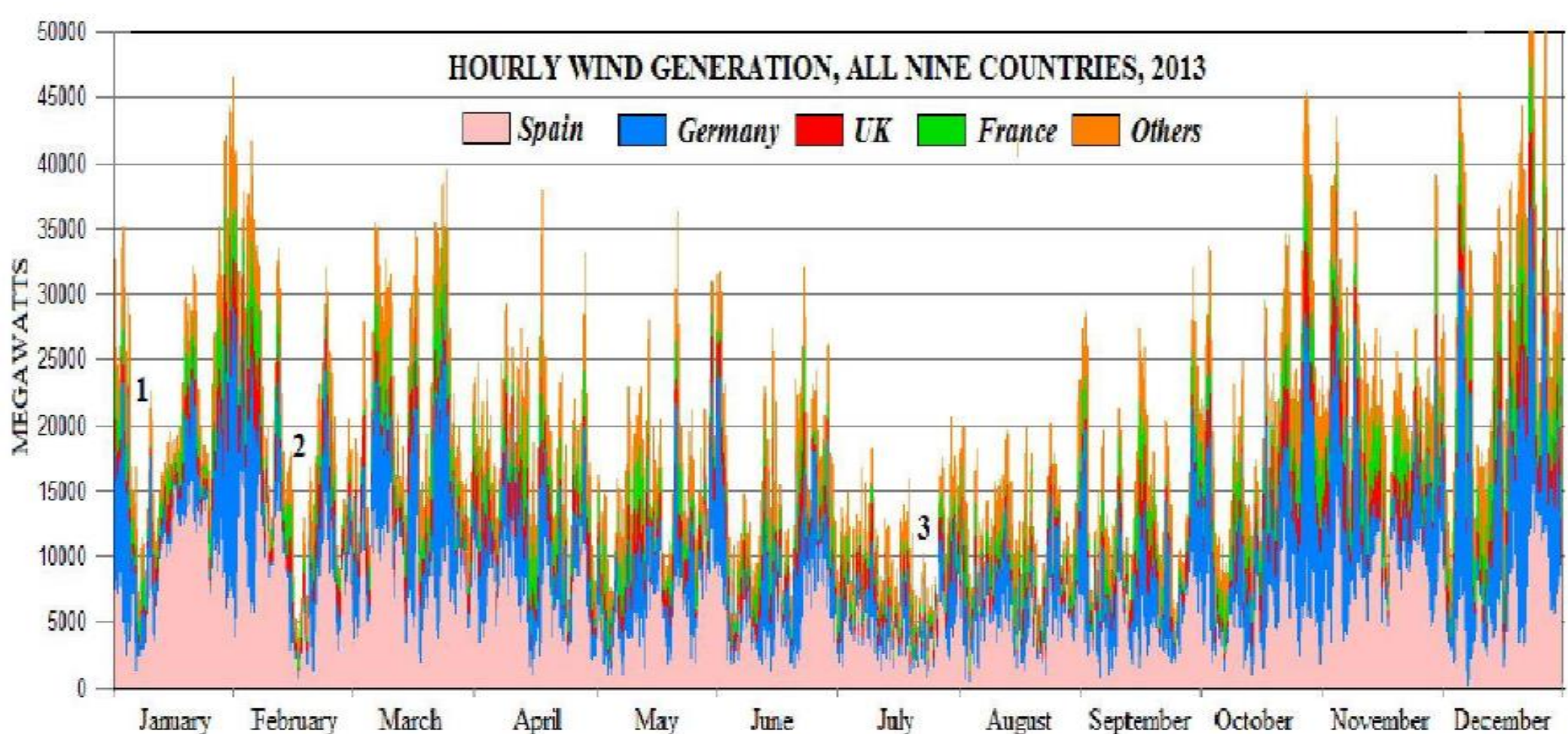
Wzrost i spadki mocy od 100% do 10% i od 85% do 0% występują jednocześnie w obu obszarach

Wykres roczny dla 2 krajów Niemcy Hiszpania



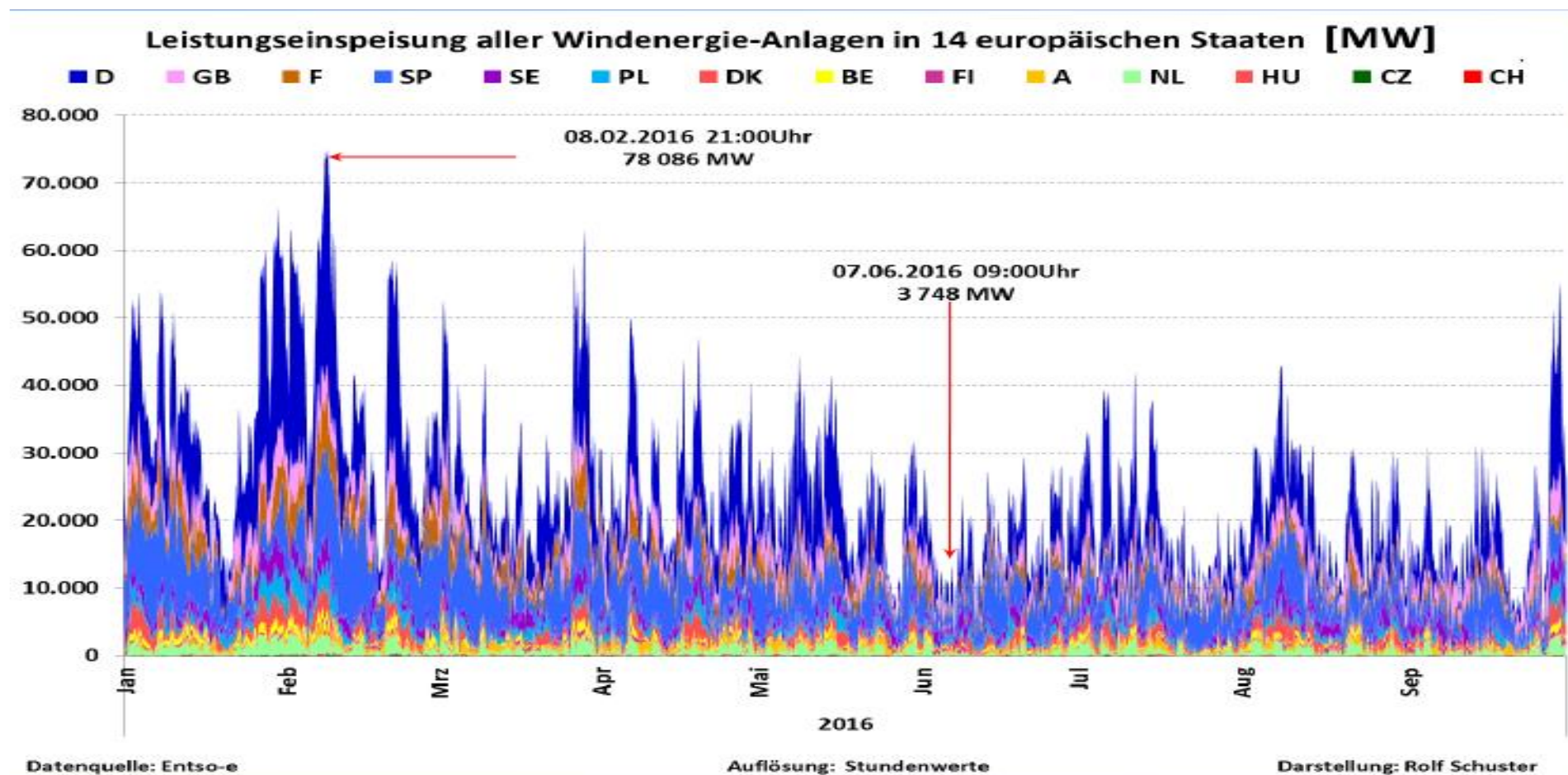
Dane przedstawione przez R. Schustera, NGO Vernunftkraft

Wykres roczny dla 9 krajów w Europie



Dane przedstawione przez R. Schustera, NGO Vernunftkraft

Wykres roczny dla 14 krajów od Finlandii do Hiszpanii



Zwiększanie liczby krajów nie daje wyrównania wykresu generacji mocy wiatraków.
Wahania są olbrzymie - od 3,7 GW do 78 GW.

W razie ciszy wiatrowej w Polsce, na ile starczą zapasy energii w hydroelektrowniach?

Wg PEP 2040 energia generowana rocznie z MFW w 2040 r. ma wynosić 40 TWh.

Oznacza to moc MFW średnio 4,56 GW , a moc nominalną $4,56/0,43 = 10$ GWe.

Brak wiatru na morzu przez 130 h oznaczać będzie lukę energetyczną 593 GWh

Maksymalna energia zgromadzona w elektrowniach szczytowo- pompowych to 7,8 GWh - czas ich pracy do opróżnienia to 1,7 h **A co potem?**

Czy wystarczyłaby energia elektryczna z akumulatorów aut elektrycznych?

Założmy że w Polsce będzie milion aut z napędem elektrycznym, każde z akumulatorem o pojemności 85 kWh.

Założmy, że w godzinach szczytu 10% tych samochodów będzie dostarczało prąd do sieci. Mamy więc w skali kraju rezerwę energetyczną 8,5 GWh.

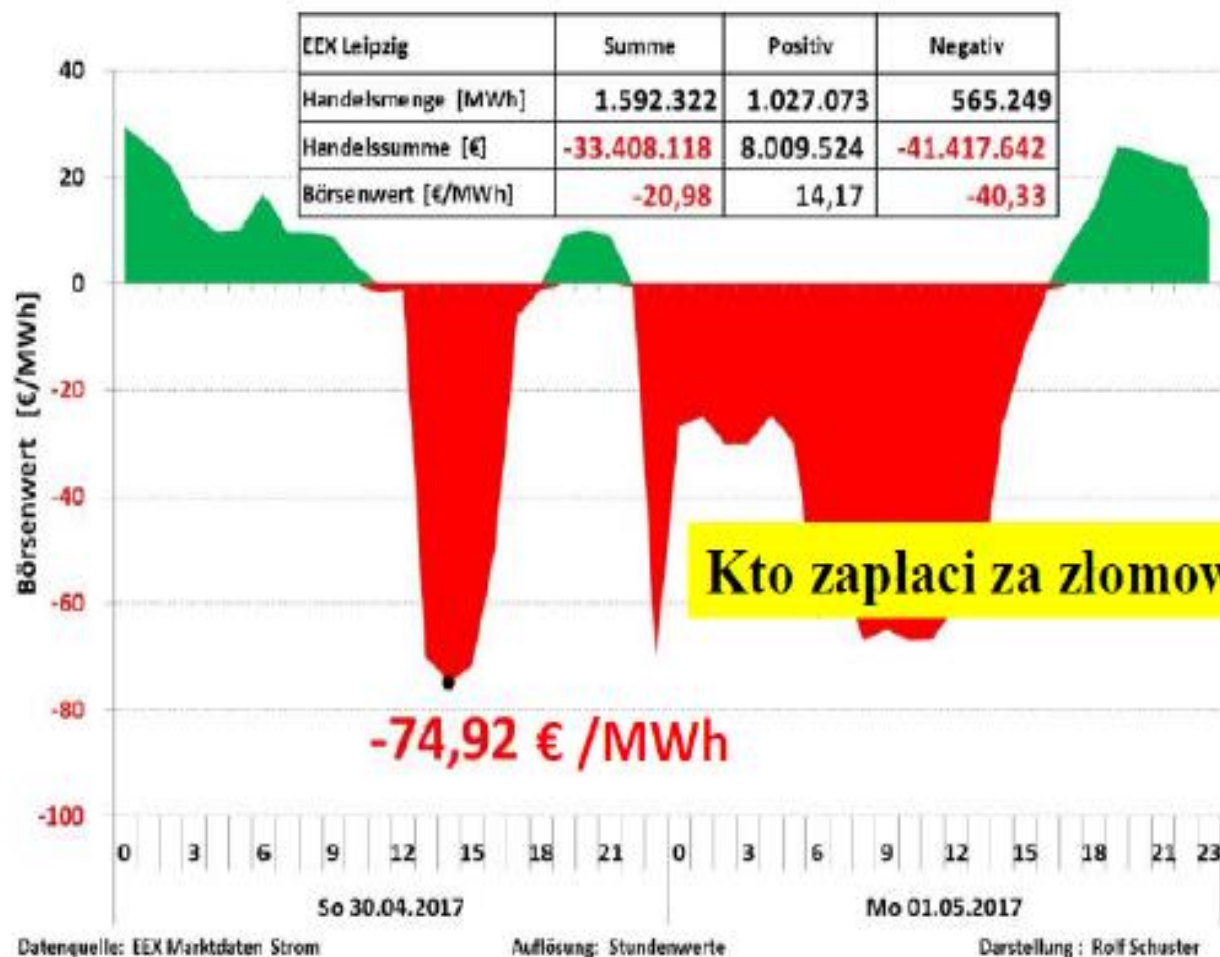
Rezerwa z akumulatorów samochodowych pokryłaby lukę energetyczną przez 2 godziny.

Gdyby 50% właścicieli aut zgodziło się **by nimi nie jeździć** i tylko zasilać sieć (!), to wystarczyłoby to na 10 h. **A co potem?**

Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- **Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej**
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Gdy wieje silny wiatr – nadmiar energii trzeba eksportować i dopłacać do eksportu



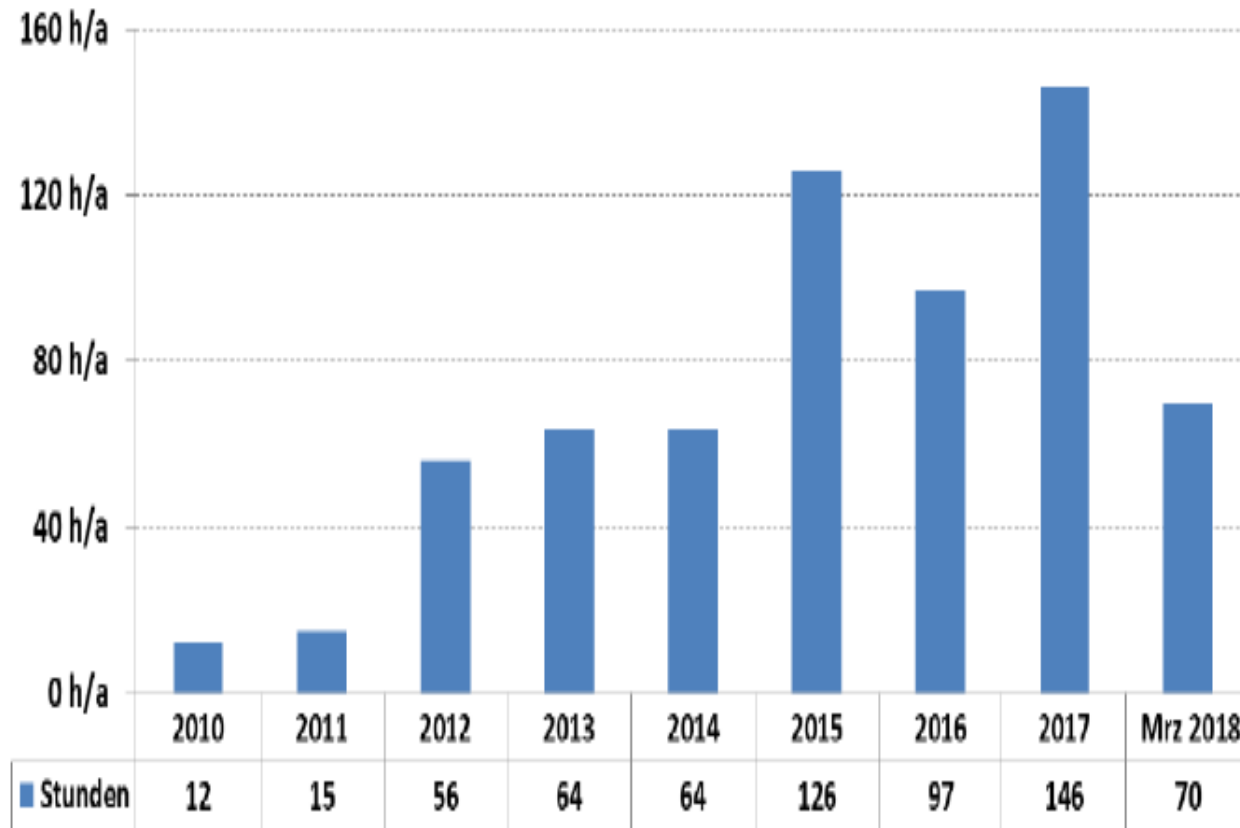
Przykład eksportu z Niemiec w 2017 r.

Aby inne kraje chciały odebrać niepotrzebną im energię Niemcy musiały dopłacać do 74 euro/MWh.

Płacą za to odbiorcy prądu w Niemczech.

W miarę wzrostu mocy OZE w Niemczech rośnie liczba godzin, gdy trzeba dopłacać do eksportu energii

- Czas trwania cen zaniżonych przy eksporcie energii elektrycznej z Niemiec . (źródło danych EEX Markdaten Strom, opracowanie graficzne Rolf Schuster)



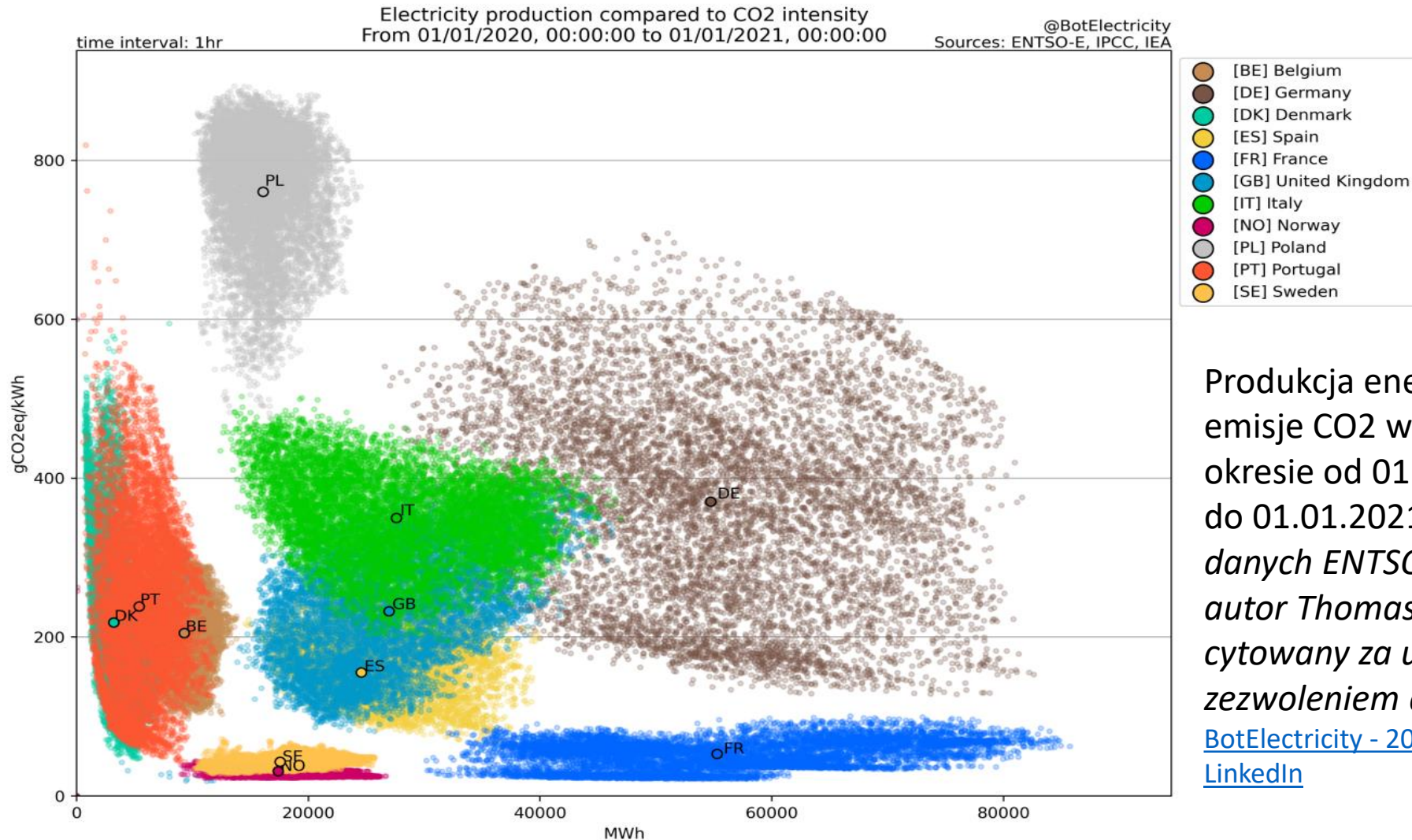
Datenquelle: EEX Leipzig

Darstellung: Rolf Schuster

Główne problemy omawiane w wykładzie

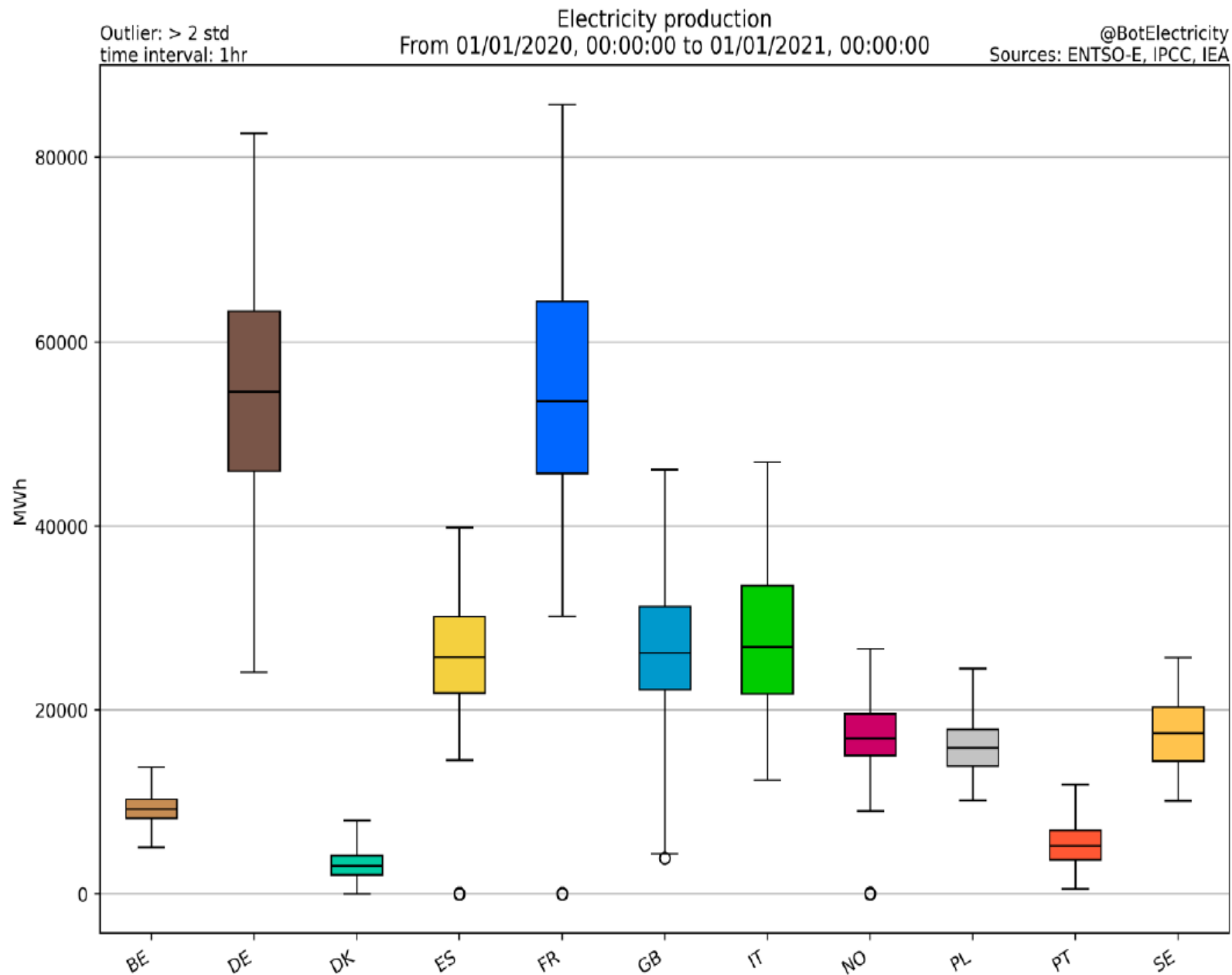
- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- **Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂**
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

OZE czy EJ? Emisje w praktyce

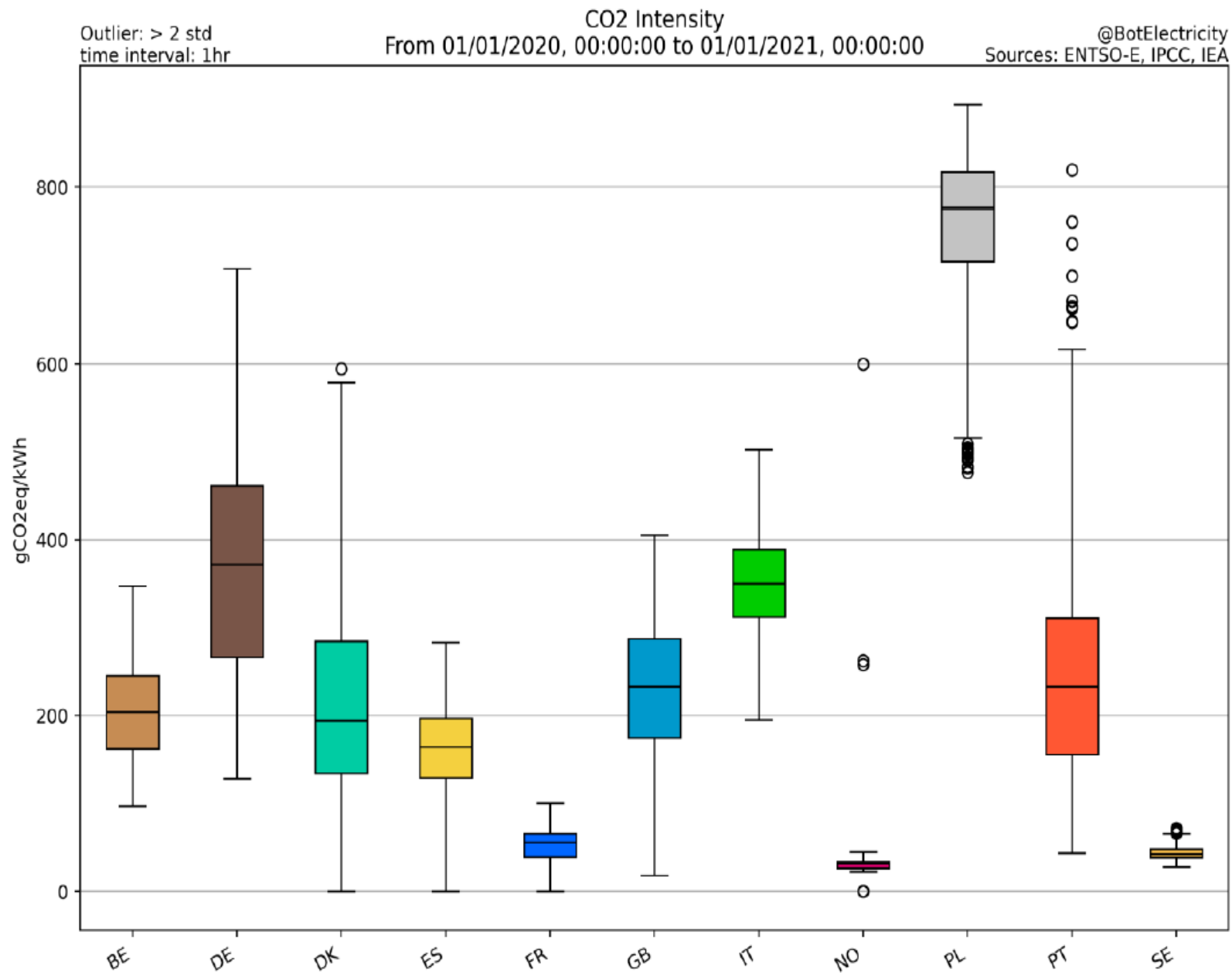


Produkcja energii i odpowiednie emisje CO2 w krajach Europy, w okresie od 01.01.2020 00.00.00 do 01.01.2021 00.00.00. Źródło danych ENTSO-E, IPCC 2014, autor Thomas-Auriel rysunek cytowany za uprzejmym zezwoleniem autora [\(12\)](#)

[BotElectricity - 2020 electricity insight | LinkedIn](#)



**Łączna
produkcja
roczna energii
elektrycznej
dla krajów
pokazanych na
rys. powyżej**
***Źródło danych
ENTSO-E,
IPCC 2014,
autor Thomas-
Auriel***



**Natężenie
emisji gazów
cieplarnianych
na jednostkę
wytwarzanej
energii
elektrycznej,
dane średnie
dla całego
roku 2020.
Źródło danych
ENTSO-E,
IPCC 2014,
autor Thomas-
Auriel**

Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- **Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE**
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Porównania zespołu Politechniki w Szczecinie

- Do porównań zespołu Politechniki w Szczecinie przyjęto, że elektrownia jądrowa pracuje przy współczynniku wykorzystania mocy równym **0,88** co daje 7700 godzin pracy na pełnej mocy rocznie, a
- w elektrowniach wiatrowych zainstalowane są elektrownie wiatrowe o mocy szczytowej 2,5 MWe, o wysokości 60 m i średnicy śmigła 80 m, pracujące ze współczynnikami wykorzystania **mocy 0,34 na lądzie** (co daje 3000 h rocznie) a **0,45 na morzu** (4000 h rocznie).
- Są to założenia bardzo korzystne dla turbin wiatrowych, osiągalne przy bardzo dobrych warunkach wiatrowych w Danii zachodniej, ale z pewnością **nieosiągalne w Polsce**, gdzie realne wykorzystanie mocy może sięgać 0,25 – 0.30.
- Jako wielkość odniesienia przyjęto **całkowitą ilość energii wytworzonej** w ciągu życia elektrowni, ocenianego na 40 lat dla elektrowni jądrowej i 20 lat dla elektrowni wiatrowej. Po przeliczeniu na jednostkę energii elektrycznej charakterystyczne wskaźniki dla obu typów elektrowni określone przez Politechnikę w Szczecinie przedstawiają się następująco:

Ilości stali i betonu potrzebne dla elektrowni wiatrowych

- Obrazy pokazywane przez przemysł wiatrowy pokazują smukłe wieże lśniące jasno na tle krajobrazu lub prześwitujące w odległych mgłach, pięknie otoczone białymi obłokami.
 - Ale typowa turbina wiatrowa o mocy 1.5 MW pracująca w USA ma wieżę o wysokości 80 m, waga wirnika ze skrzydłami i osią wynosi 22 t., a w betonie zbrojonym użytym na budowę wieży jest dalsze 26 t. stali zbrojeniowej oraz 190 m³ betonu.
 - Średnica podstawy mierzy 15 m i ma w centrum 2,4 m grubości.
 - Razem potrzeba 100 t stali by wytworzyć moc **nominalną** 1,5 MW, a przy współczynniku wykorzystania mocy zainstalowanej 0,34 (osiągalnym tylko w wyjątkowo korzystnych lokalizacjach) rzeczywistą moc średnią w ciągu roku 0,5 MW.
 - Oznacza to **200 ton stali na MW mocy średniej**.
 - W elektrowni jądrowej z reaktorem EPR o mocy 1600 MWe potrzeba 71 tys. ton stali i żelaza, a więc 44,4 tony stali i żelaza na MW mocy nominalnej albo $44,4/0.9 = 49,3$ **tony/MW mocy średniej w ciągu roku**.
 - Wg danych amerykańskich, fundamenty farmy wiatrowej Buffalo Mountain w stanie Tennessee mają 9 m głębokości i zawierają 3500 m sześciennych betonu. A pamiętajmy, że produkcja cementu jest jednym z poważnych źródeł emisji CO₂.. W elektrowni jądrowej z reaktorem EPR potrzeba 285 000 m³ betonu, o wadze średnio 2,5 t/m³ a więc 712,5 tys. ton, czyli 445 ton/MW.
-
- <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40566.pdf>
 - Per F. Peterson, Haihua Zhao, and Robert Petroski Metal And Concrete Inputs For Several Nuclear Power Plants Report UCBTH-05-001 February 4, 2005, Table 5.
 - Eric Rosenbloom: A Problem With Wind Power, September 5, 2006 www.aweo.org/
 - List e-mail od Zbigniewa Wiegnera, kierownika budowy EJ Olkiluoto 3, 28.03., 2011 9:19 AM

Zapotrzebowanie powierzchni na MW mocy nominalnej

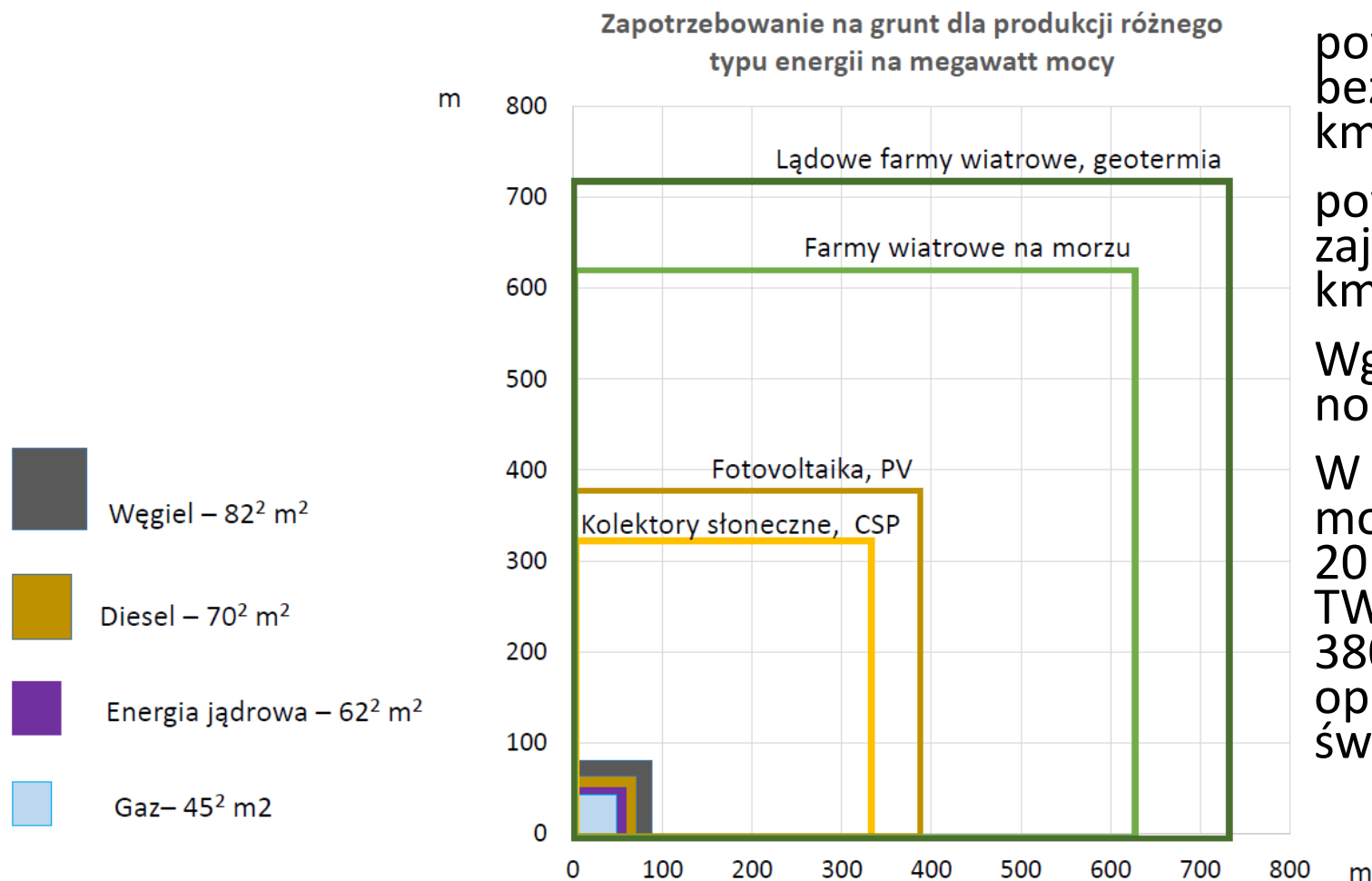
Wg analiz NREL dla USA, dla farm wiatrowych na lądzie potrzeba średnio

powierzchni zajętej bezpośrednio 0,035 km²/MW mocy nominalnej i

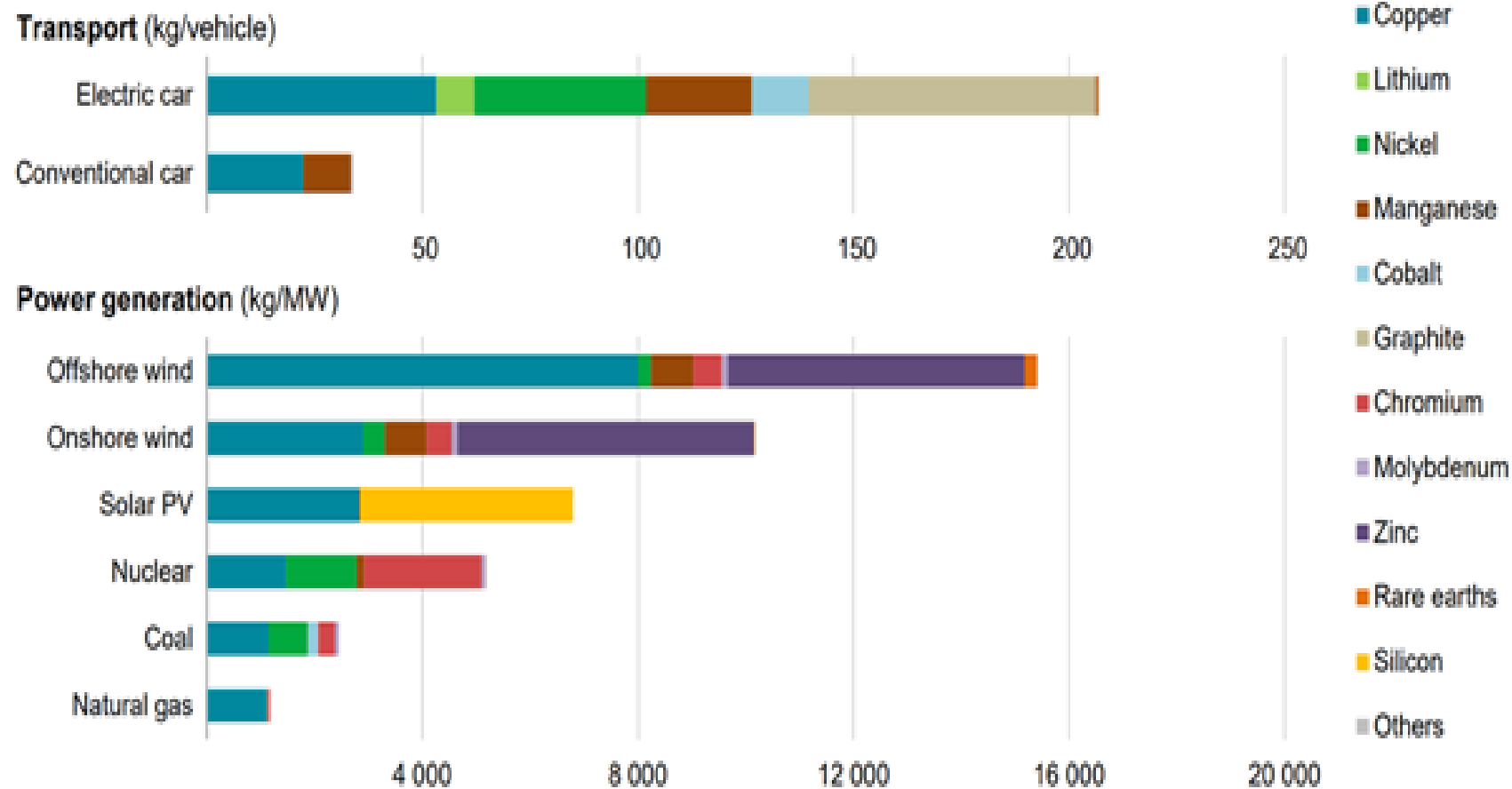
pow. całkowitej terenu zajętego przez wiatraki 0,3 km²/MW.

Wg rysunku – 0,51 km²/MW nom.

W Polsce przy wsp. wyk. mocy 0,22 jak w Niemczech, 2019 dla wytworzenia 40 TWh/rok potrzeba byłoby 10 380 km² – tyle co całe woj. opolskie (9 412 km²) lub świętokrzyskie (11 710 km²)



Dużo więcej materiałów potrzeba na farmy wiatrowe i panele słoneczne niż na EJ



Źródło: raport
International
Energy Agency,
**The Role of Critical
Minerals in Clean
Energy Transitions**
Part of [World
Energy Outlook](https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions)

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

Nakłady inwestycyjne na MFW

- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE główny ośrodek naukowego wspierania OZE w Niemczech: MFW budowane są przy nakładach inwestycyjnych na moc szczytową będących w granicach od 3940 do 5960 euro/kW
- Instytut Gospodarki Energetycznej I Racjonalnych Zastosowań Energii Politechniki w Stuttgarcie, nakłady inwestycyjne dla MFW w Niemczech przyjmuje się w wysokości 3750 euro/kW
- Dodatkowo koszty podłączeń MFW do systemu energetycznego w Niemczech wynoszą około 1700 euro/kW.
- Współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej 0,42.
- Nakłady na moc średnią $5450/0,42 = 12\,976$ euro/kW.

SOLAR RESOURCE MAP

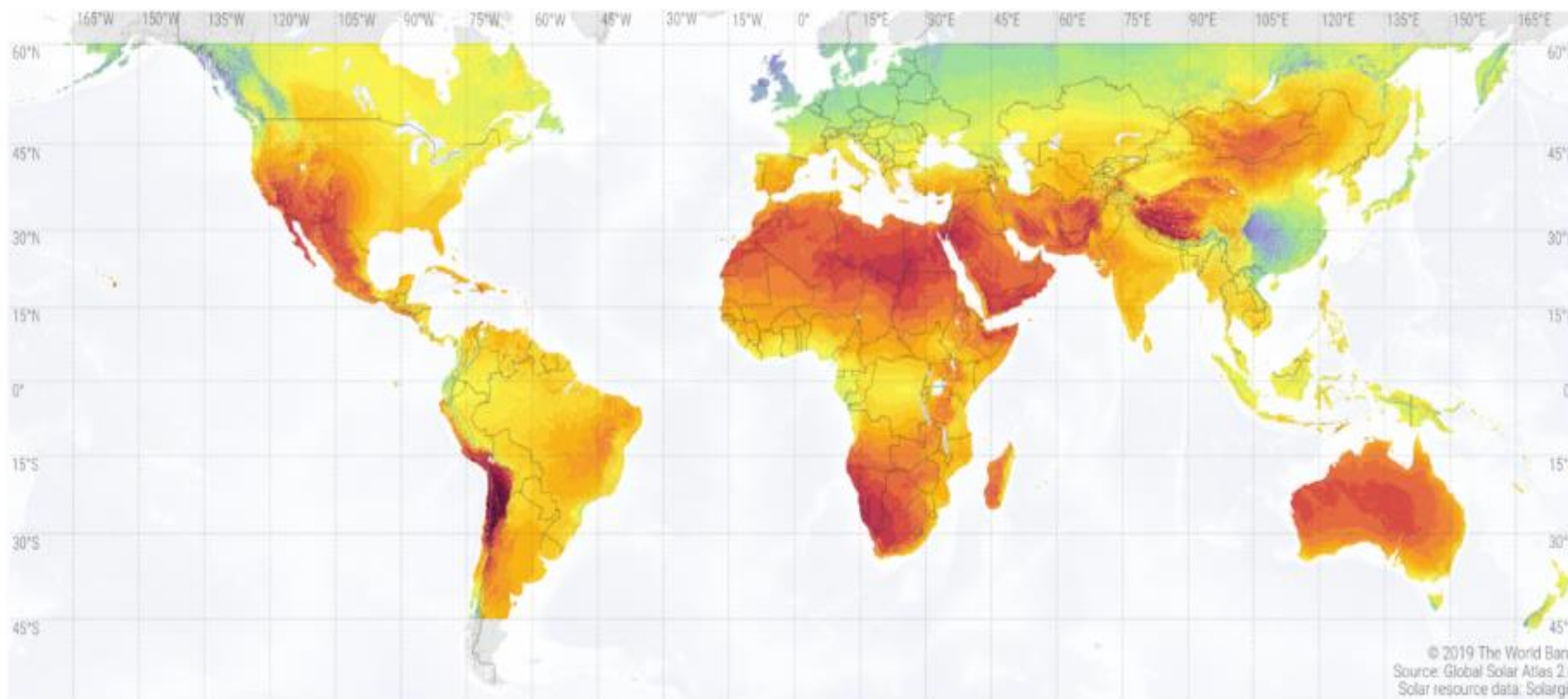
PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL



WORLD BANK GROUP

ESMAP

SOLARGIS



Long-term average of photovoltaic power potential (PVOU)



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

Potencjał paneli fotowoltaicznych

Czy w Polsce ogniwa pV są tak opłacalne jak w Hiszpanii?

Rocznie Polska 1000 kWh/kW_{peak}

Hiszpania 1600-1700 kWh/kW_{peak}

USA do 2000 kWh/kW_{peak}

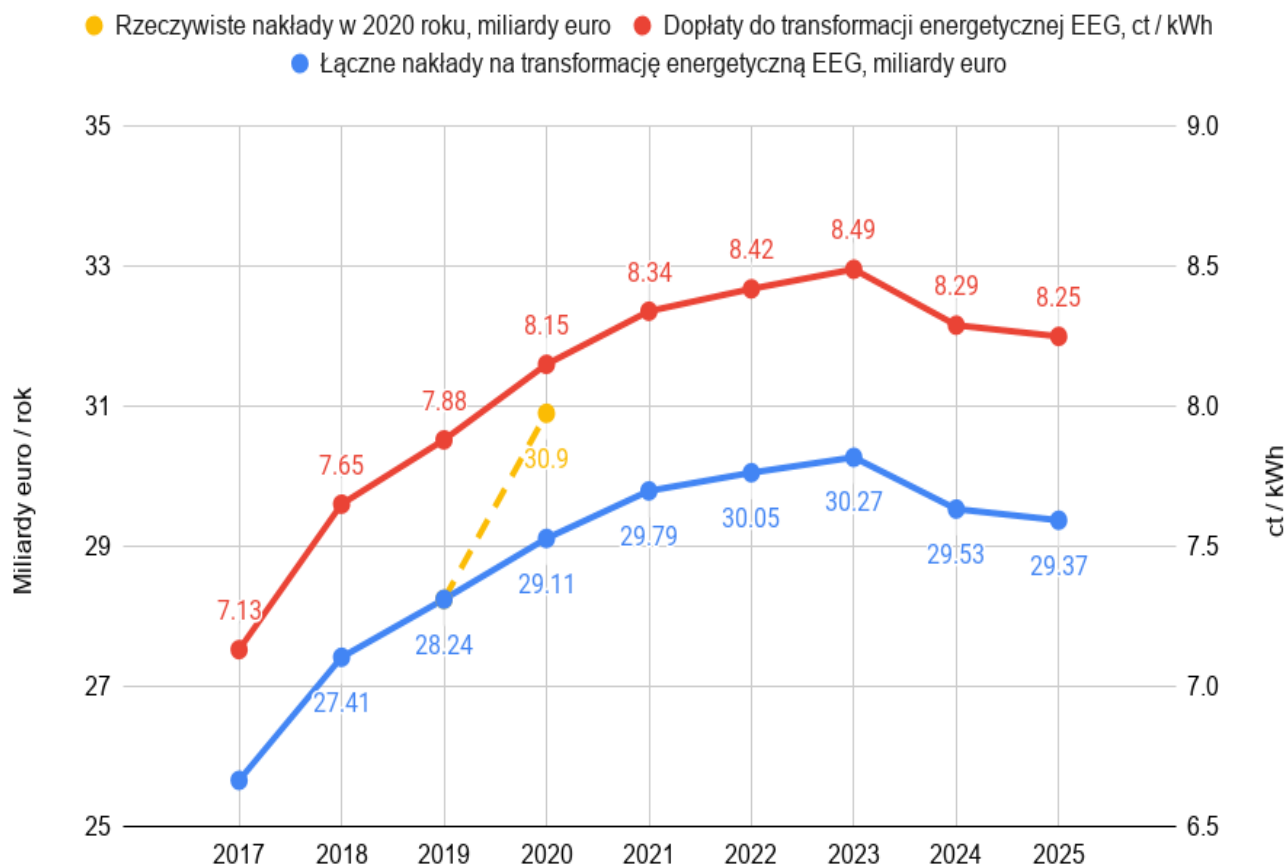
Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- **Koszty wprowadzania OZE**
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Niemcy- subsydia dla OZE w 2013 r. wzrosły do 20 mld euro rocznie, w 2016 – 26 mld.

- Rodzina 3-osobowa w **2000 r.** płaciła miesięcznie **40.60** euro za elektryczność, a w listopadzie **2012** już **75.08** Euros. To wzrost dużo szybszy od inflacji.
- A w **2013** r. nastąpił dalszy wzrost – dopłaty do zielonej energii wzrosły z 36 euro/MWh w 2012 r. do **55 euro/MWh** zielonej energii w 2013 r.
- Minister środowiska Niemiec ostrzegł, że jeśli rząd nie ograniczy subwencji, to do 2022 r. łączne dopłaty do zielonej energii dojdą do 680 miliardów euro. (Reuters)
- Obecnie Niemcy wydają średnio 34% dochodów na opłaty za czynsz i energię. 800 000 rodzin nie może zapłacić rachunków za energię (Welt Sonntag)

Efekty konieczności kompensacji nierównomierności generacji OZE



Moc zainstalowana większa niż potrzebna
Konieczność wzmocnienia sieci przesyłowej tak by mogła odebrać moc maksymalną większą niż średnia
Konieczność utrzymania rezerwowych źródeł energii – węgiel brunatny!
Subsydia dla OZE 30 mld euro /rok, przy 80 mln ludzi na 4 osobową rodzinę **1500 euro/rok**

Niemcy – zwolennicy wiatraków twierdzą, że są one przyjazne dla ludzi i środowiska

FREITAG, DEN 9. DEZEMBER 2011

THEMA

OSTFRIESEN-ZEITUNG, SEITE 10



Emden zeigt: Es gibt keine Stromlücke

Das Gaskraftwerk im Hafen wird kaum noch gebraucht. Die zu schwachen Netze Richtung Süden sind das Hauptproblem der deutschen Energieerzeugung. Nötig sind nicht unbedingt neue Kraftwerke, sondern leistungsfähige Stromleitungen.

Die erneuerbaren Energien – das Bild zeigt den Blick vom Emdener Hafen auf die Windparks im Wybelsumer Polder – erzeugen bereits jetzt so viel Strom, dass das Emdener Gaskraftwerk kaum noch einspringen muss.

BILD: DOOREN

- Keine Stromlücke?
- W rzeczywistości mnóstwo przerw w generacji energii wiatrowej w ciągu roku, w Niemczech i w innych krajach.
- A natłok wiatraków przytłacza.
- Efekt – protesty obrońców przyrody i ludzi.

Opór społeczeństwa wobec budowy farm wiatrowych w pobliżu osiedli ludzkich.

Francuska Akademia Medyczna – słyszalny hałas turbin i drgania powodowane przez ruch skrzydeł są szkodliwe dla zdrowia, zalecana odległość 1500 m.

Opór społeczny – setki organizacji protestujących przeciw budowie farm wiatrowych.

Bawaria – wprowadzono prawo 10H – odległość od wiatraka do najbliższego domu musi być $>$ niż 10 H (wysokość wieży z wirnikiem)

Polska – obowiązuje reguła 10H, ale deweloperzy wiatraków walczą by ją odwołać.

Powody rosnących kosztów sieciowych przy wzroście udziału OZE

Koszty profilowania- rosnąca wymagana elastyczność elektrowni systemowych, co powoduje usuwanie bloków pracujących na obciążeniu podstawowym i wzrost bloków dla generacji mocy szczytowej (droższej) i malejąca wartość mocy z OZE

Koszty bilansowania uwzględniają stratę jednego bloku elektrowni systemowej, ale w przypadku wiatru muszą uwzględniać utratę wszystkich elektrowni wiatrowych jednocześnie.

Koszty sieci - tj. transmisji i dystrybucji, większe dla OZE bo linie muszą wystarczać dla przenoszenie mocy szczytowej, która jest 5 razy (wiatr) lub 10 razy (pV) większa od mocy średniej

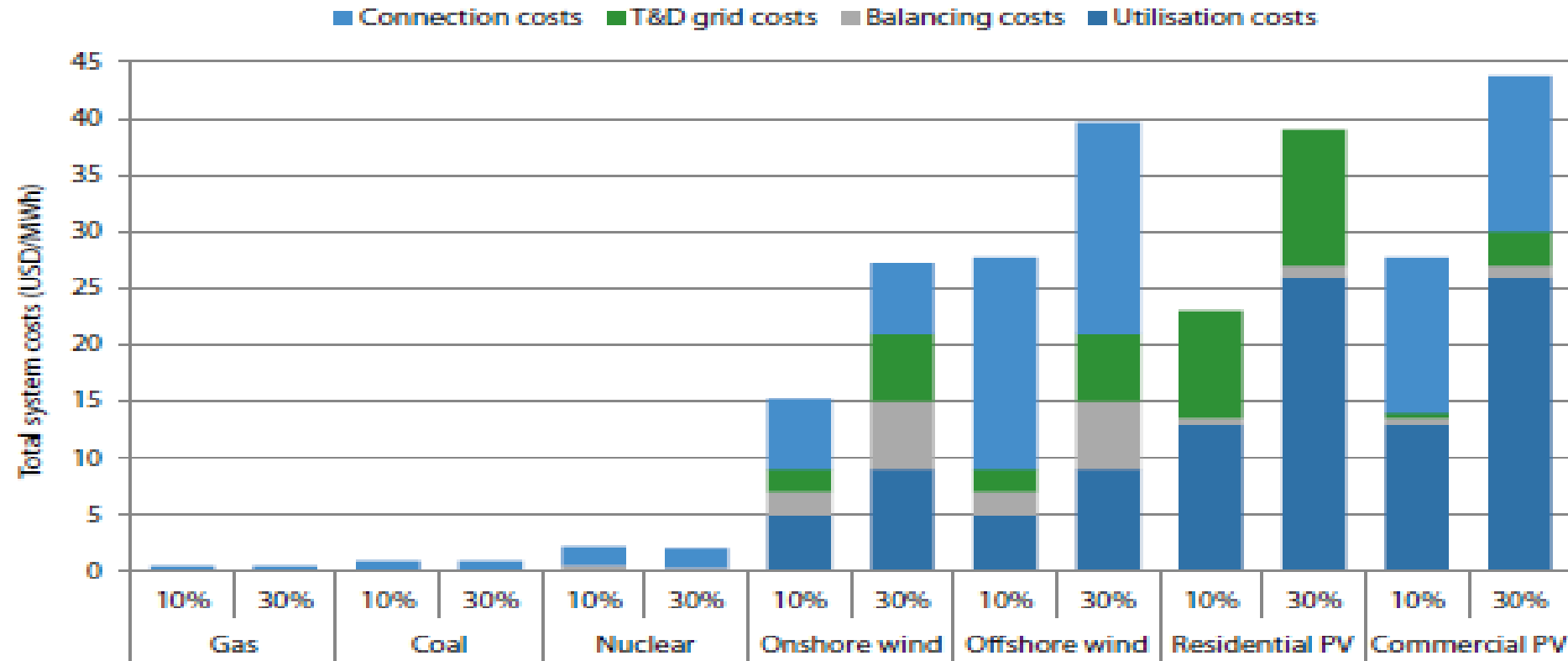
Koszty podłączenia elektrowni do sieci – większe dla OZE z uwagi na lokalizacje daleko od centrów zapotrzebowania i niższe współczynniki wykorzystania mocy

Dodatkowe koszty systemowe dla EJ i OZE w systemie energetycznym Niemiec, euro/MWh

Technologia	EJ	Wiatr na lądzie	MFW	pV
Udział	30%	30%	30%	30%
Koszty profilowania systemu	0	6,55	6,55	14,6
Koszty bilansowania	0,26	4,75	4,75	4,75
Podłączenie do sieci	1,4	4,72	11,64	7,0
Wzmocnienie sieci	0	16,47	8,81	35,1
Łączne koszty na poziomie systemu euro/MWh	1,67	32,48	31,7	61,4

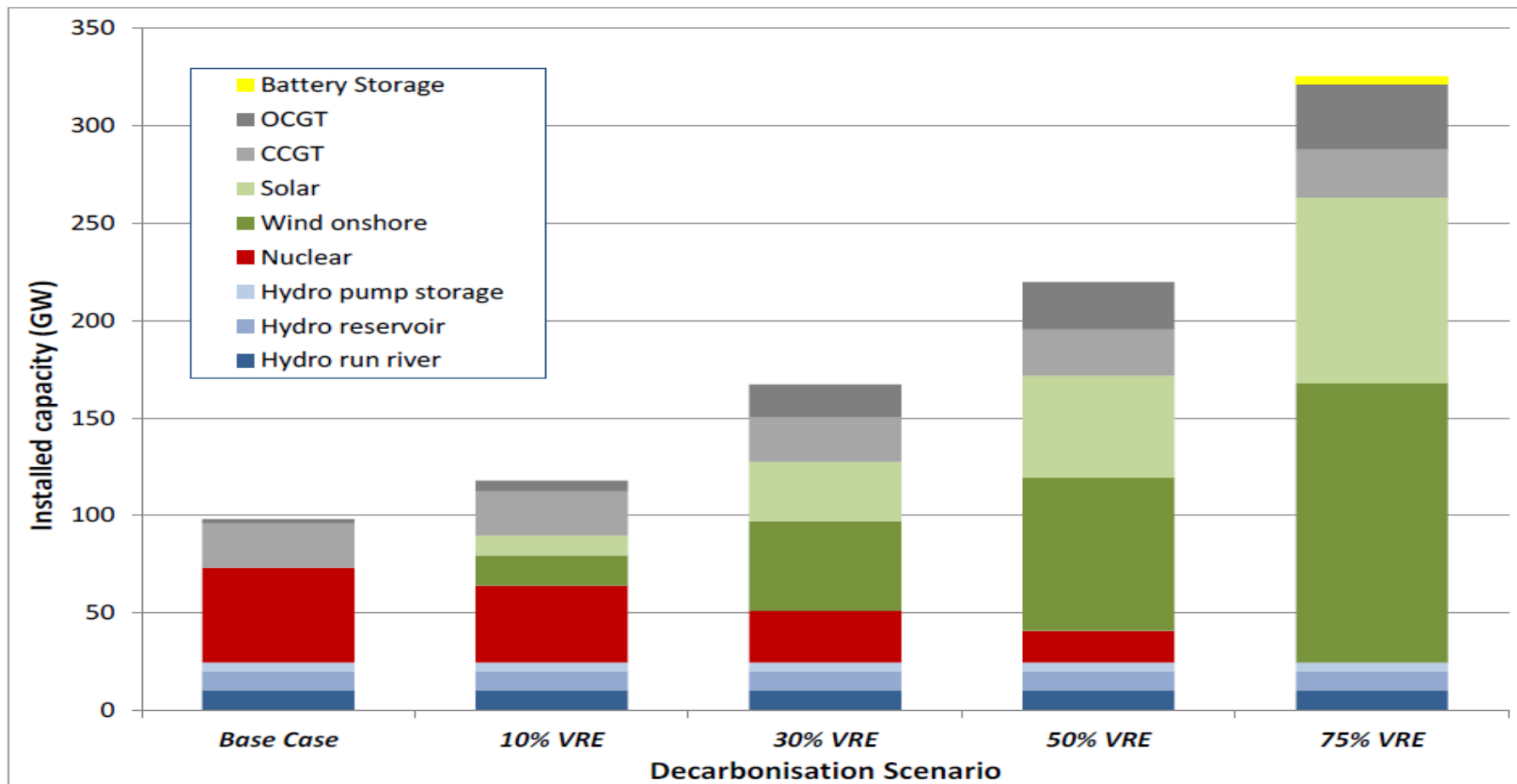
Potrzeby sieciowe dla OZE są znacznie większe niż dla EJ. Wprowadzanie OZE wymaga wielkich subsydiów płaconych przez wszystkich odbiorców energii, zarówno na same instalacje jak i na rozbudowę sieci, znacznie większą niż byłaby potrzebna w systemie opartym na stabilnych źródłach energii.

Koszty systemowe przy udziale 10% i 30% różnych źródeł energii

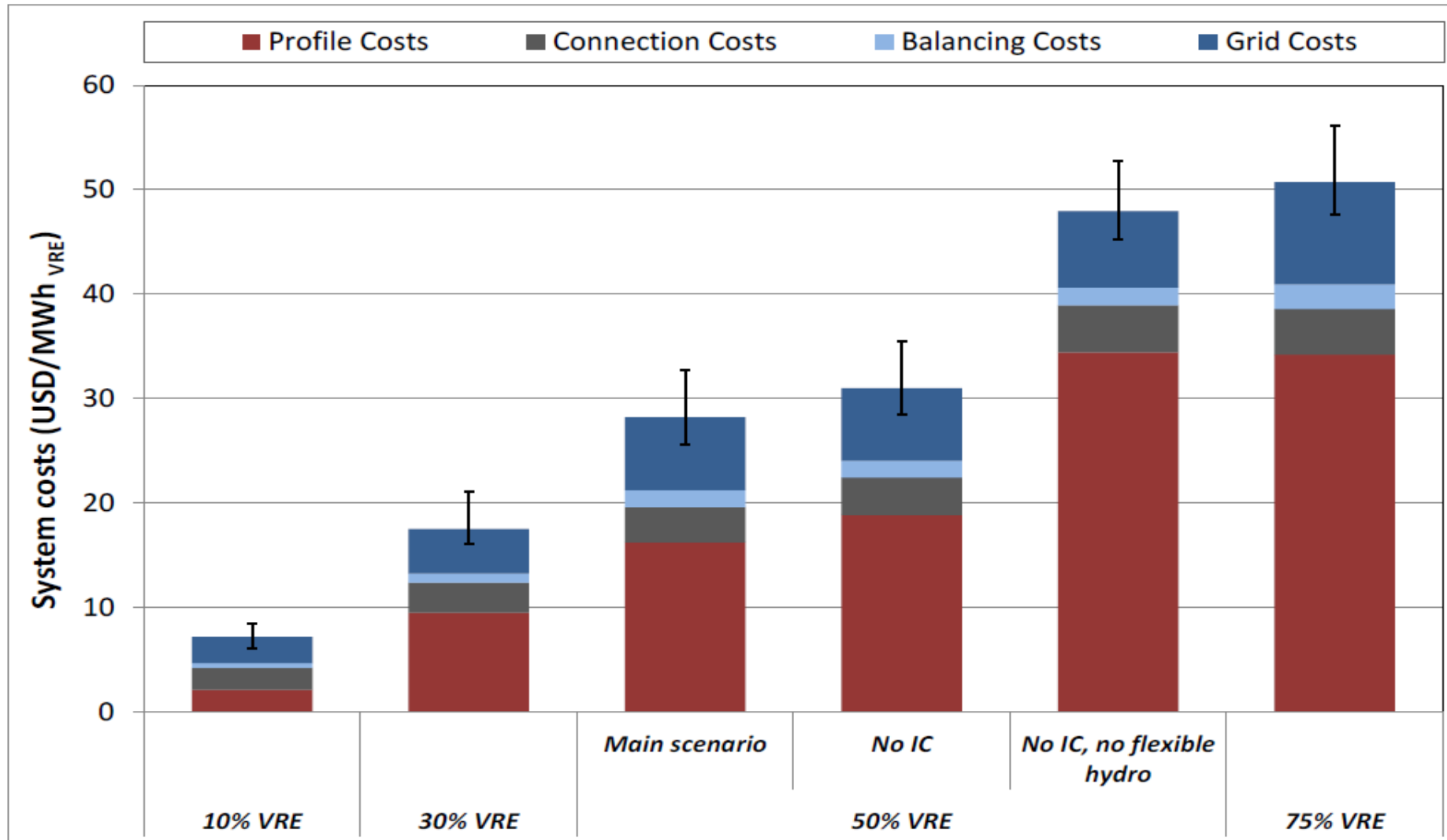


Koszty podłączenia, koszty profilowania, koszty bilansowania, koszty dystrybucji

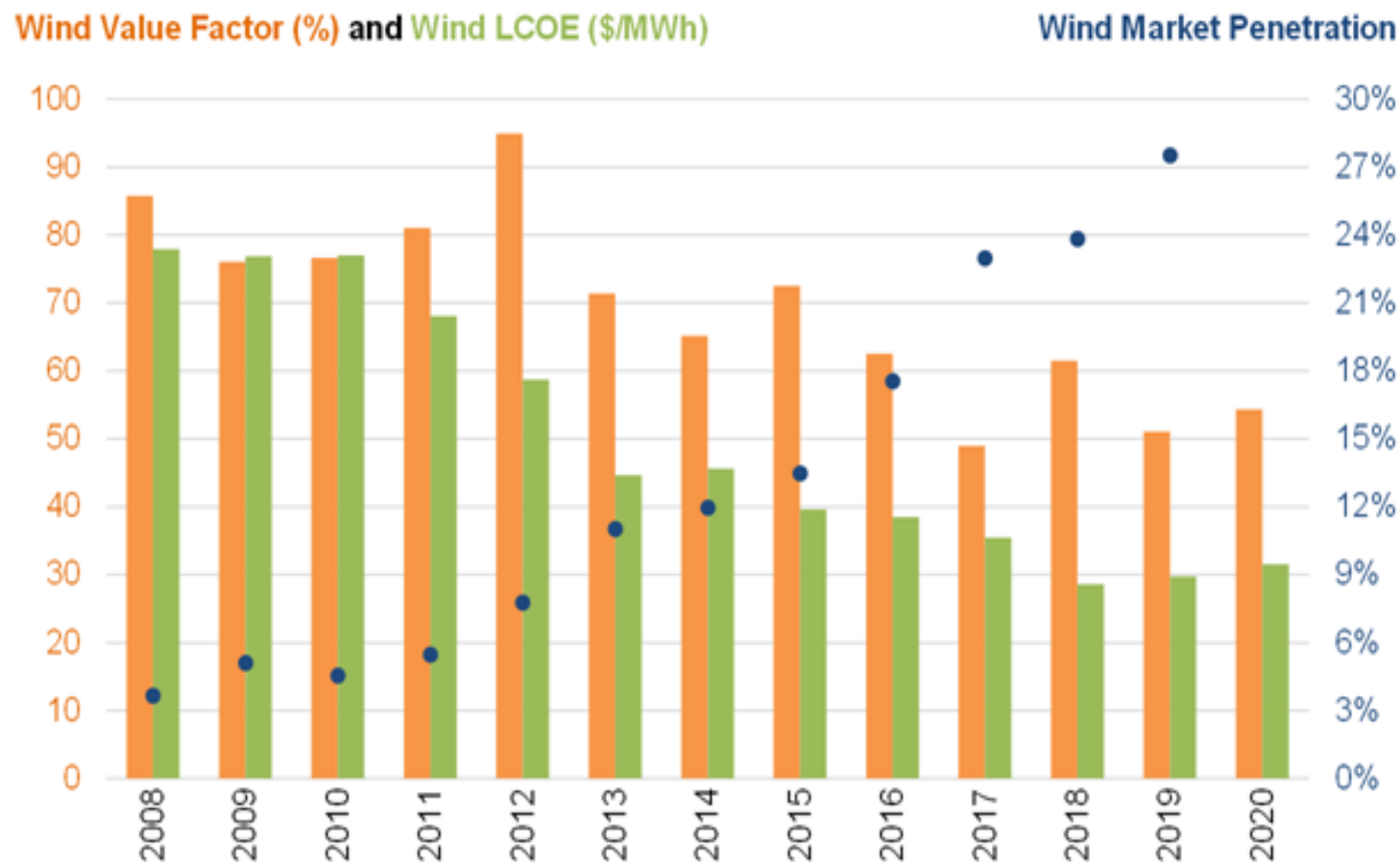
Konieczna moc systemu rośnie gwałtownie ze wzrostem udziału OZE (VRE)



Koszty systemowe w zależności od udziału OZE



Koszt wiatraków maleje ze wzrostem ich mocy – ale ich wartość LCOE maleje także!



Przy udziale wiatru w wytwarzaniu energii elektrycznej w centralnych stanach USA około 30%

koszty LCOE spadły do **33 USD/MWh**, ale

współczynnik wartości energii wiatrowej spadł również – **z 85% do 50%**

Budowa nowych farm wiatrowych powoduje spadek wartości energii z farm już istniejących!

Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- **Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie ,
Generacja III+**
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

Czy można 31 miliardów USD lepiej wykorzystać?

Nakłady inwestycyjne bezpośrednie na EJ to 5 mld USD/1000 MWe

Za 31 mld USD można zbudować EJ o mocy 6 000 MWe, a więc tyle ile przewidziano w PPEJ (6000 MWe)

Ich średnia moc w skali rocznej to $6000 \times 0,85 = 5100$ MWe

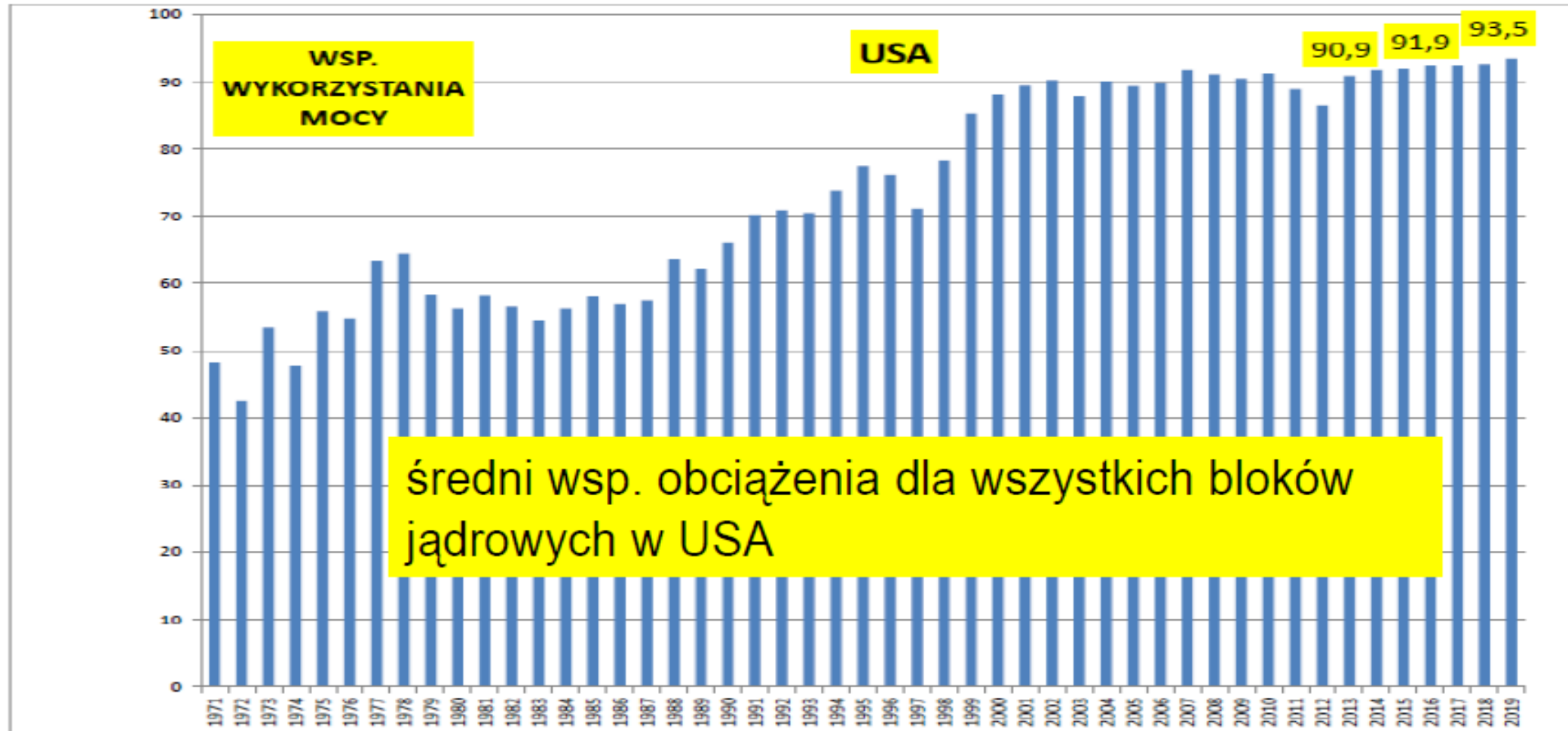
Wystarczyłoby, aby zastąpić wiatraki o mocy szczytowej

$5100/0,24 = 21250$ MWe - dając tani prąd i stabilną generację przez cały rok i całą dobę.

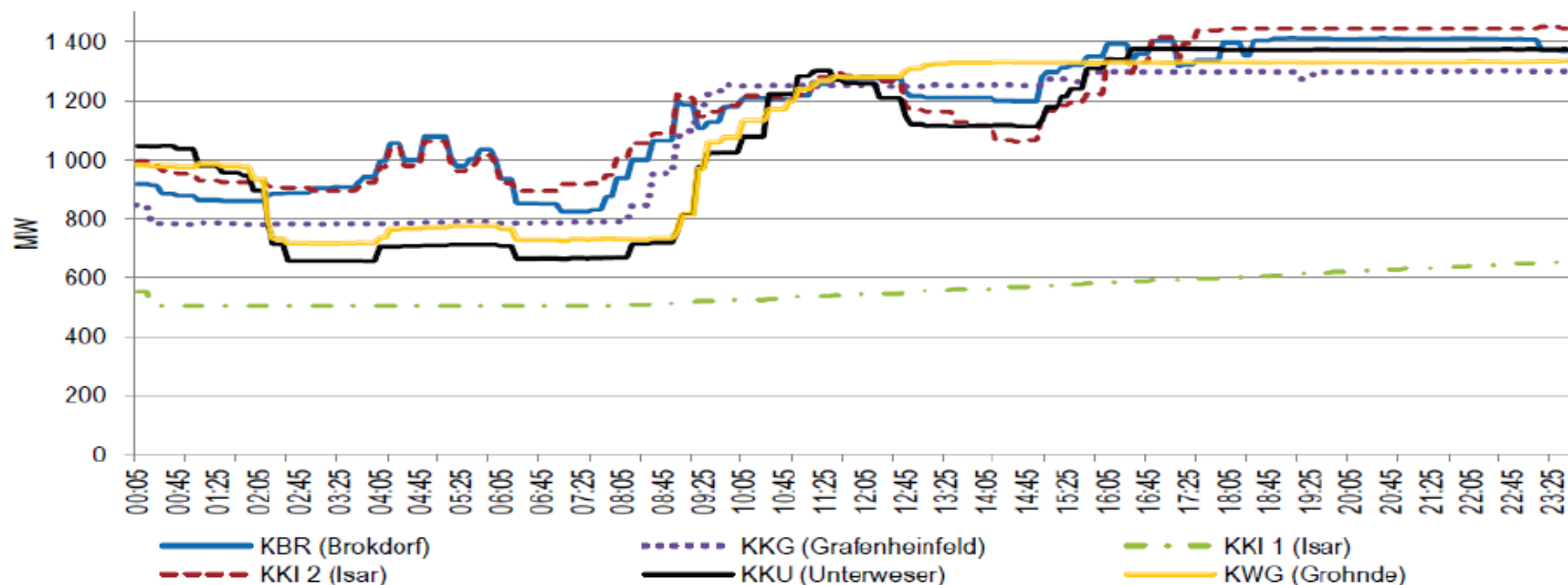
A prąd z elektrowni jądrowych jest najtańszy – świadczą o tym statystyki Eurostatu.

Zamiast budować drogie wiatraki i źródła rezerwowe, budujmy EJ!

Wsp wykorzystania mocy zainstalowanej w EJ b. wysoki

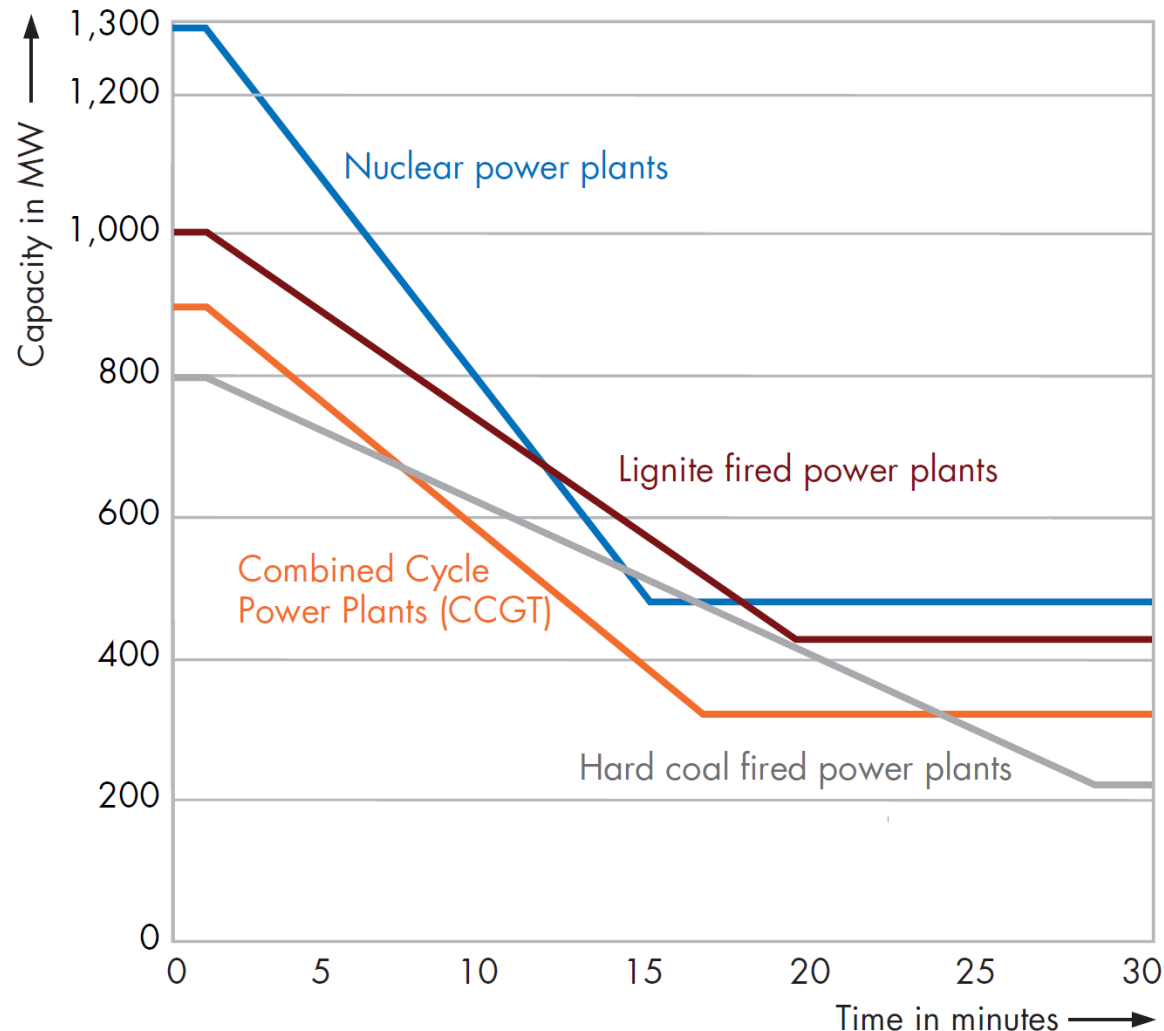


EJ mogą pracować w systemie nadążania za obciążeniem ... i pracują!



Zmiany mocy w funkcji obciążenia w niemieckich EJ w ciągu 24 h. Francuskie EJ pracują podobnie. A reaktory UK EPR zaprojektowano do **cyklicznych zmian mocy w granicach 25%- 100%**

Szybkość zmian mocy dla EJ i opalanych WK, WB i gazem (CCGT).

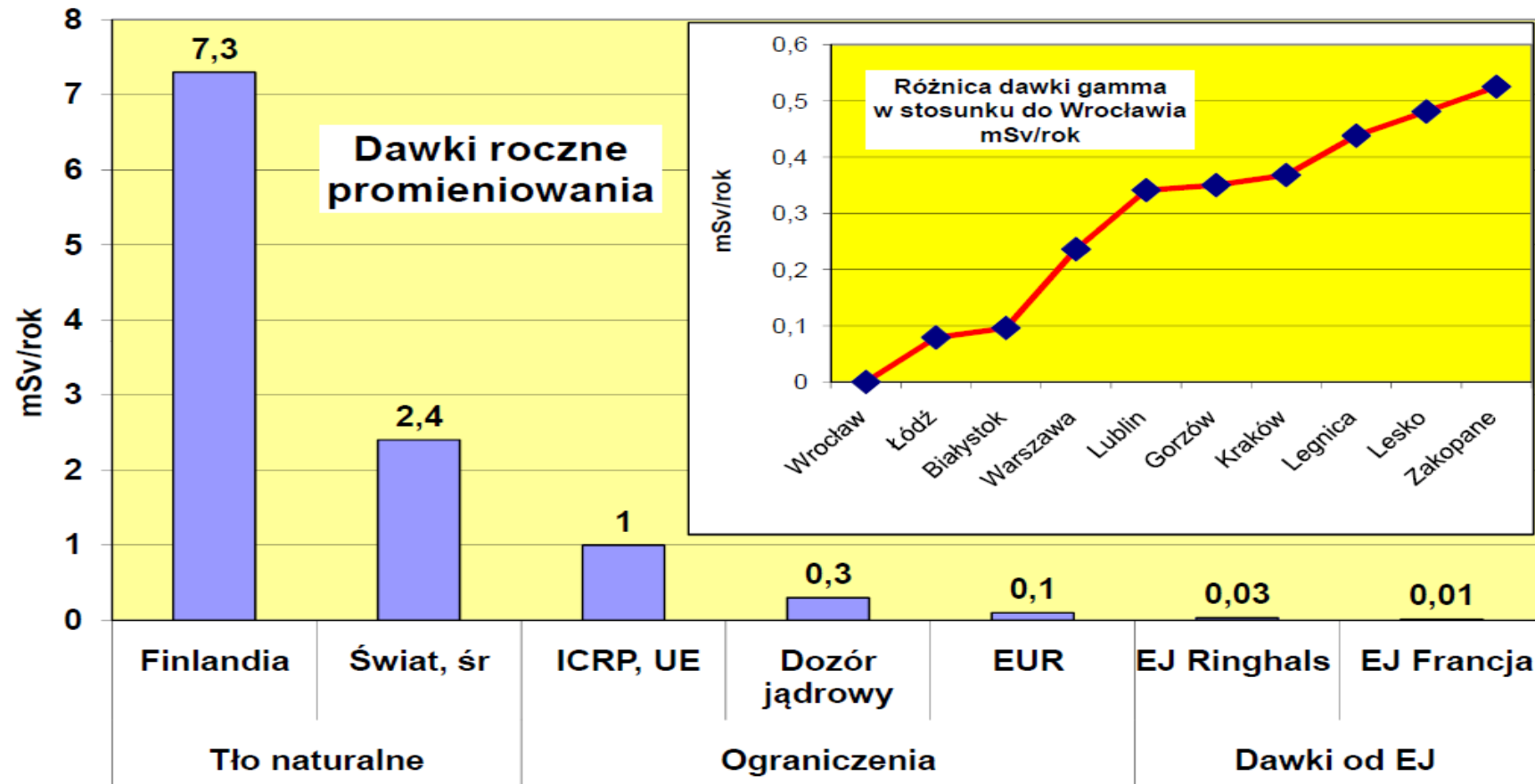


- EJ generacji III np. EPR są zaprojektowane tak, by mogły zmieniać swą moc od 100% do 30% w ciągu 15 minut – a więc szybciej niż elektrownie opalane węglem lub gazem.
- Dostarczają energię elektryczną wtedy kiedy jej potrzeba
- I tyle ile jej potrzeba!

Normalna praca EJ – dawki mniejsze niż powodowane przez tło naturalne

Promieniowa nie z EJ powoduje mniejsze dawki wokoło elektrowni niż wahania tła naturalnego.

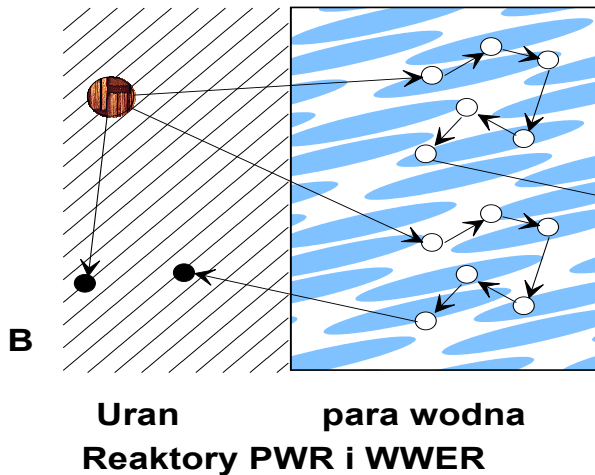
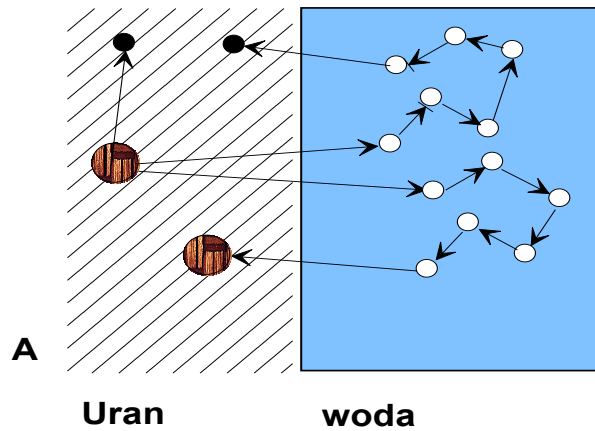
Dawka na płocie EJ < różnicy dawek między Warszawą a Wrocławiem



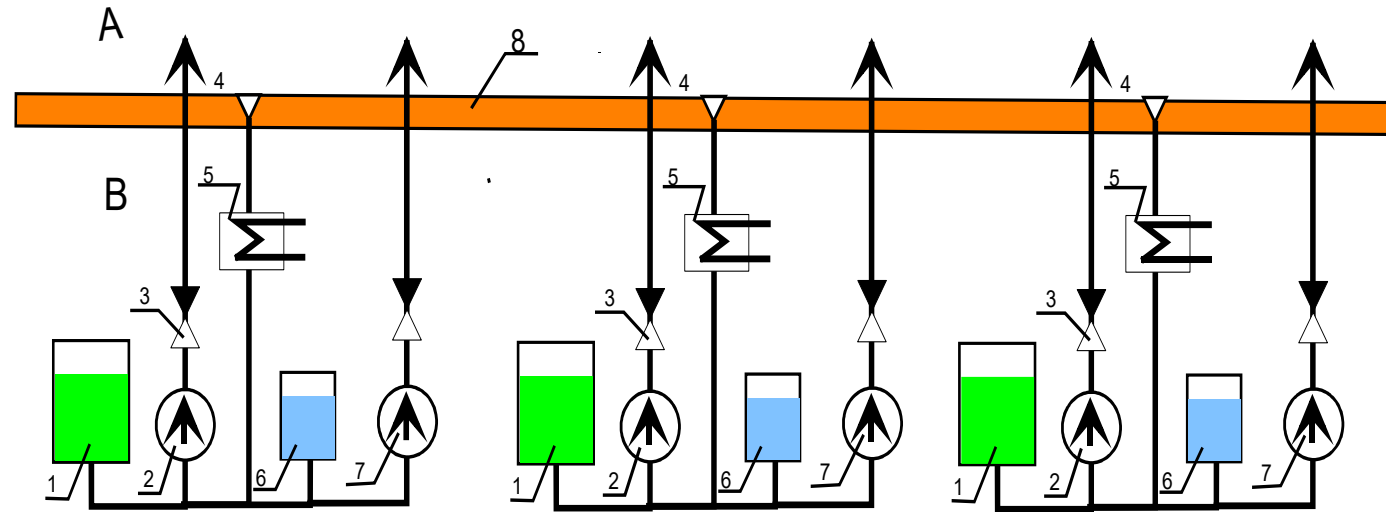
Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ

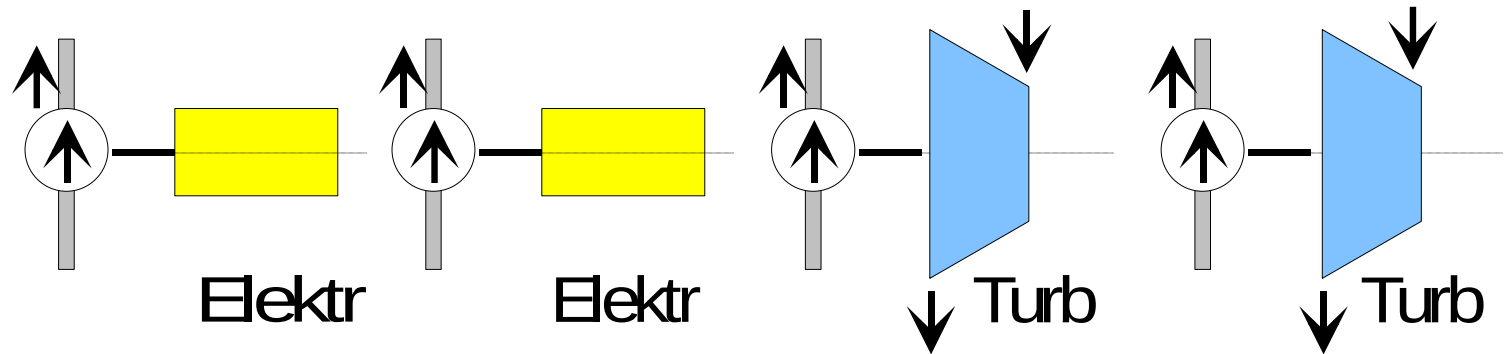
EJ odporne na zakłócenia i awarie



Temp rośnie – moc maleje

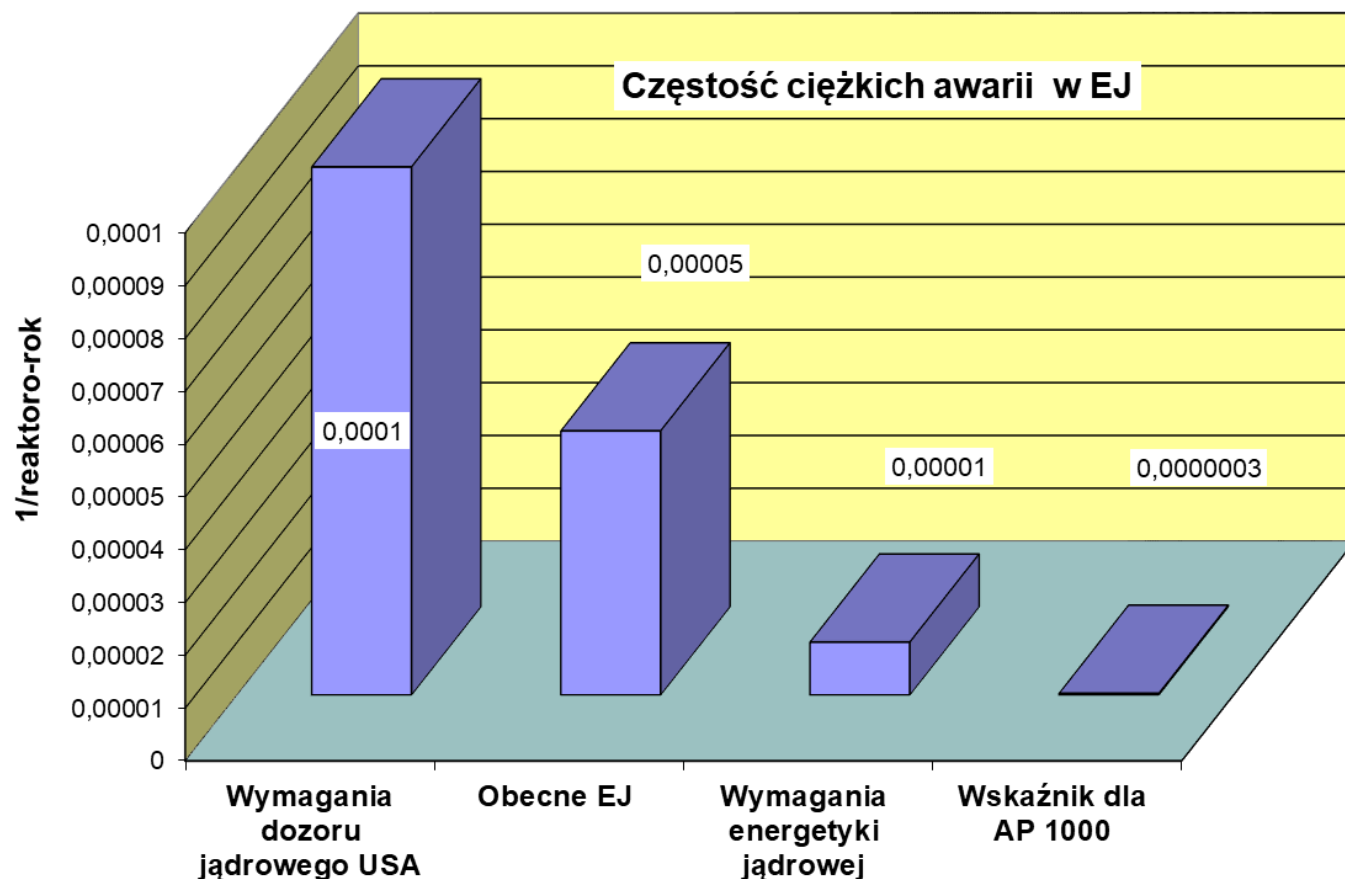


Chłodzenie awaryjne – wielokrotnie rezerwowane



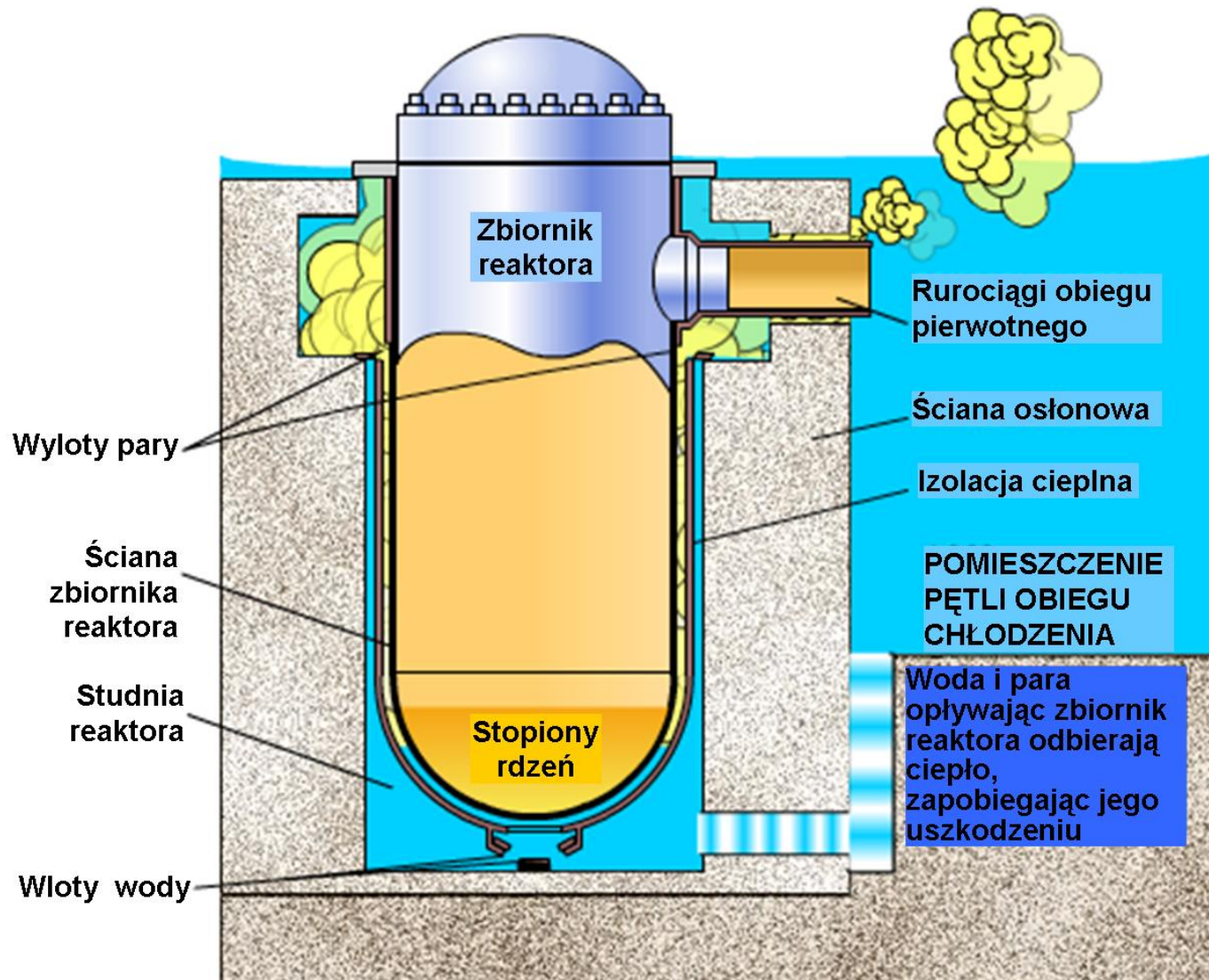
Napędy pomp – zróżnicowane i rezerwowane

Wspólna cecha EJ III generacji- odporność na ciężkie awarie



- Po awariach w TMI-2 i w Czarnobylu zaprojektowano reaktory III generacji.
- Przy budowie EJ II generacji przyjmowano, że awarie zdarzające się niesłychanie rzadko – np. raz na 100 000 lat – można pominąć, bo powodują one małe ryzyko w porównaniu z wojnami czy kataklizmami naturalnymi.
- Natomiast przy projektowaniu EJ III generacji **zakładamy, że mimo wszystkich środków bezpieczeństwa dojdzie jednak do takiej niesłychanie rzadkiej awarii** – i wymagamy, by nawet wówczas reaktor nie powodował zagrożenia ludności.
- **AP1000 częstość 3/10 000 000 lat**

AP1000: nawet po stopieniu rdzenia – pasywne chłodzenie



Woda z sąsiedniego basenu zalewa szyb reaktora.

Odbiera ciepło stopionego rdzenia poprzez zbiornik.

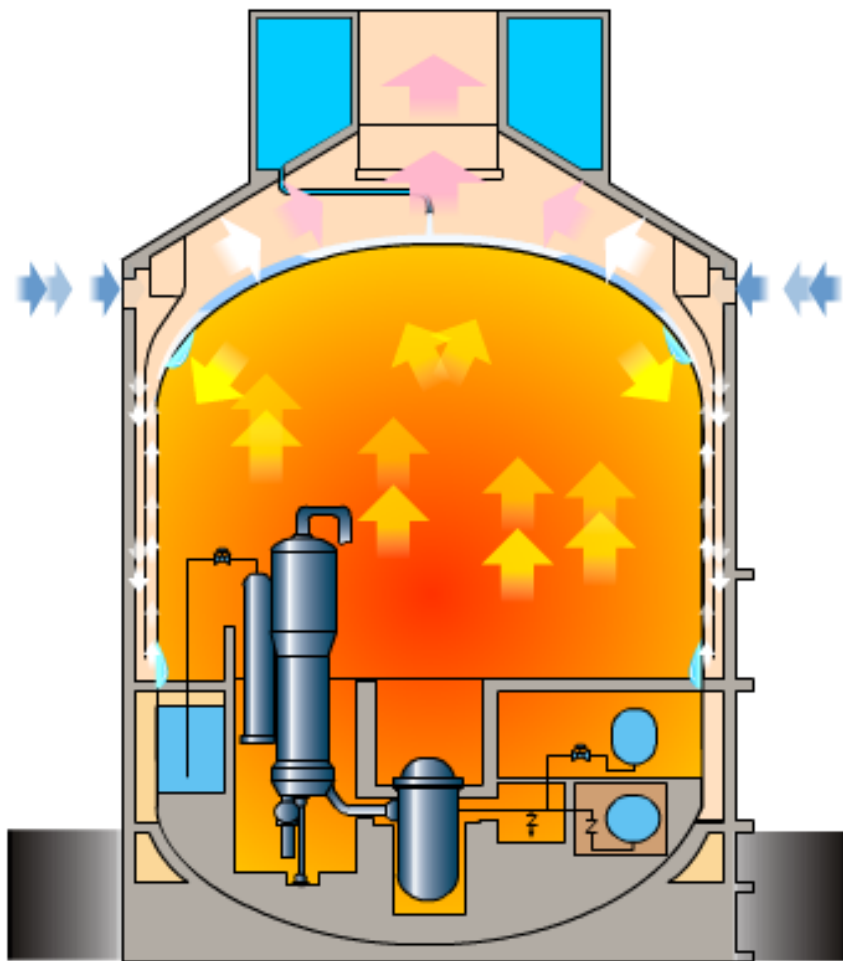
Produkty rozszczepienia pozostają w zbiorniku.

Nie ma zagrożenia radiologicznego.

Para wydostaje się szczeliną wokół zbiornika do hali reaktora

A jak odebrać ciepło unoszone z parą?

AP1000 przez 3 dni nie potrzebuje energii elektrycznej



Woda chłodząca zbiornik odparowuje, i skrapla się na wewnętrznej powierzchni stalowej obudowy bezpieczeństwa.

Najpierw ciepło odbiera woda spływająca w dół na zewnątrz stalowej obudowy

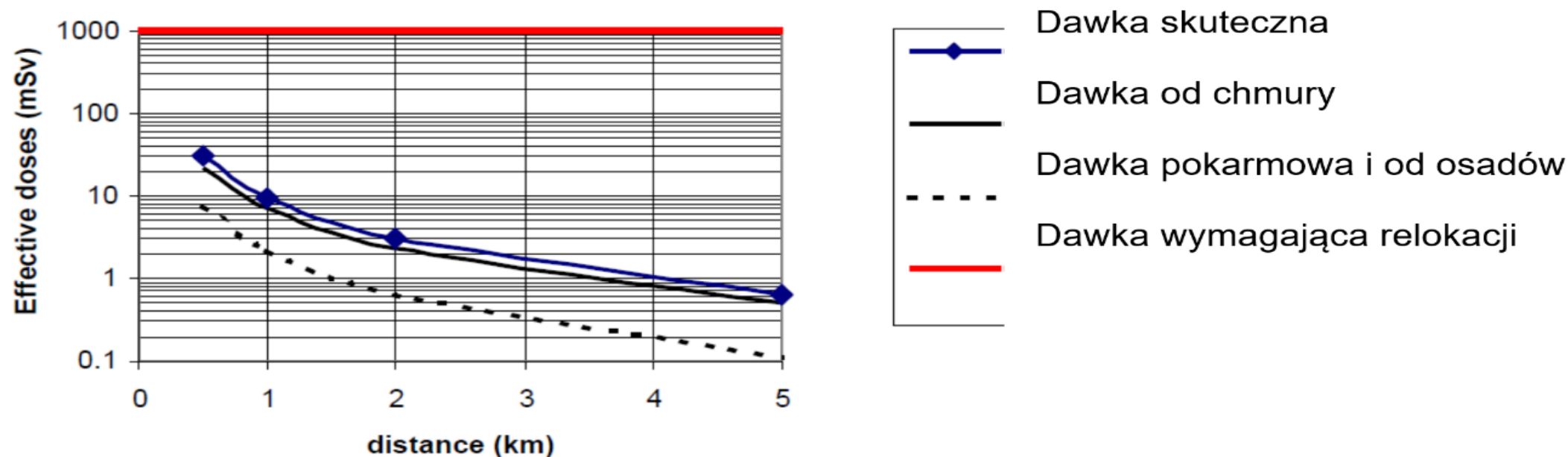
Potem ciepło odbiera powietrze w układzie konwekcji naturalnej

Nie potrzeba energii elektrycznej przez 72 godziny.

Wady –po 72 godzinach zasilanie elektryczne jednak jest potrzebne

Obudowa pojedyncza- warstwa zewnętrzna nie daje szczelności

Nawet po awarii ze stopieniem rdzenia EPR zagrożenie małe, nie wymaga ewakuacji



Analizy sprawdzone przez brytyjski dozór jądrowy wykazały, że nawet po stopieniu rdzenia reaktora EPR dawki od chmury, osadów i pokarmu są w sumie **mnijšie niż dawka wymagająca ewakuacji**

Ocena ryzyka EJ na tle innych energii wg UE

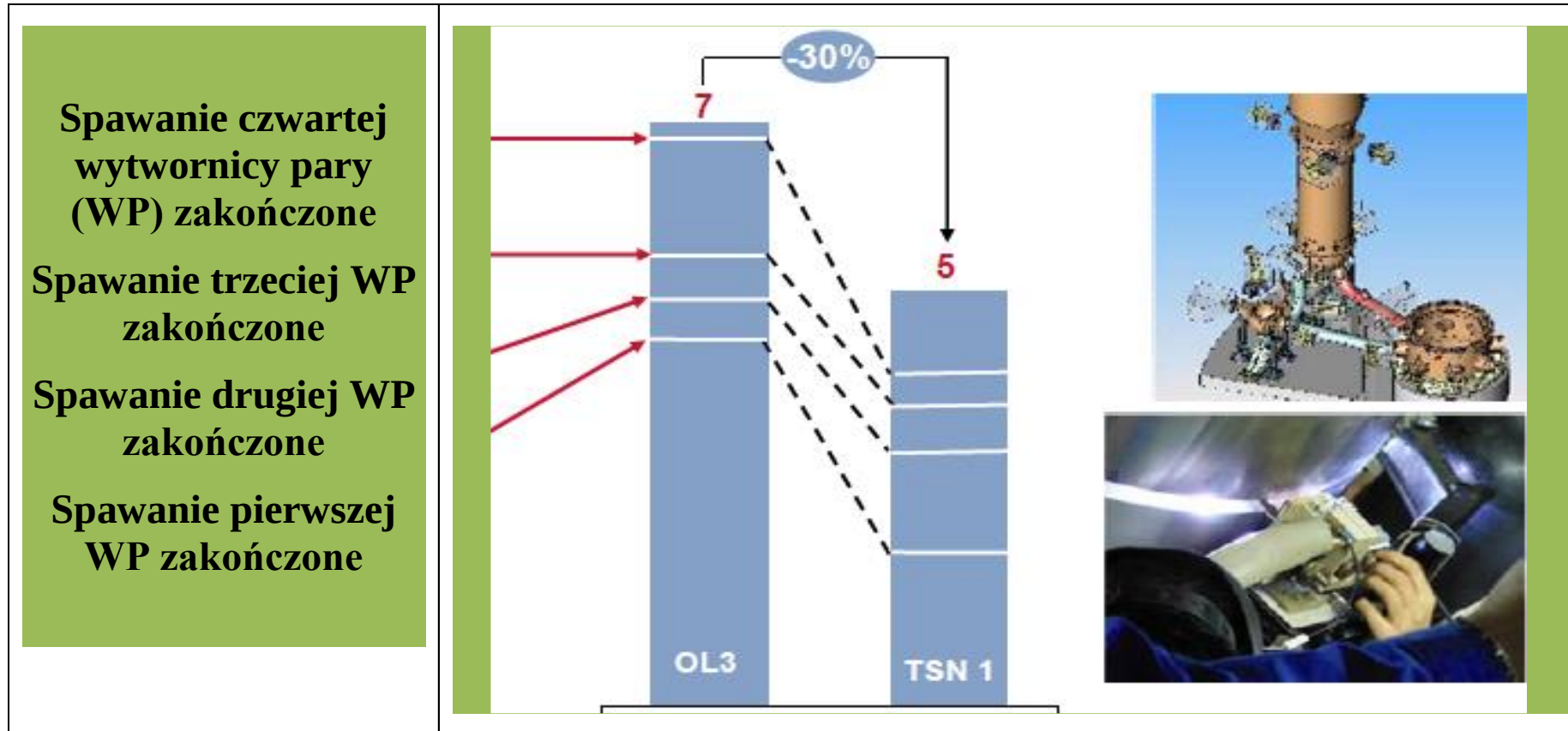


Nawet przy pesymistycznych założeniach, ExternE wykazało, że EJ jest jednym z najbezpieczniejszych źródeł energii. .



- Mieszkańcy UE-25 obecnie tracą średnio 7.5 miesiąca oczekiwanej długości życia wskutek zanieczyszczeń powietrza, które wcale nie są powodowane przez EJ.
- Ujemne skutki zdrowotne energii jądrowej są niedostrzegalnie małe. Nawet awarie nie powodują znaczących ujemnych skutków zdrowotnych.
- Wg ocen ExternE energia jądrowa należy do preferowanych, stabilnych i bezpiecznych źródeł energii

Czas trwania prac spawalniczych (miesiące) w Olkiluoto 3 i w Taishan



Skrócenie czasu budowy EJ z EPR (m-cy)

EJ	Olkiluoto	Taishan 1
Projektowanie: Opisy systemów	30	20
Projektowanie: Orurowanie, rysunki przestrzenne	10	3
Jądrowy układ wytwarzania pary, prace inżynierskie		- 60%
Ceramiczne elementy chwytacza rdzenia	28	9
Produkcja ciężkich elementów (WP, PRZ)	60	36
Prace spawalnicze na wyspie jądrowej		- 30%

Bloki Taishan 1 i Taishan 2 pracują od 2019 r. Wyniki bardzo dobre.

Jeśli wybierzemy EPR, to będą to nr 9 i 10 – doświadczenia wykorzystamy

Czy budowa EJ to transfer pieniędzy zagranicę ?

Reaktor musimy importować, ale większość wydatków pozostanie w kraju, dla polskich firm.

Nakłady bezpośrednie na budowę EJ, bez uwzględnienia kosztów oprocentowania kapitału, dane historyczne

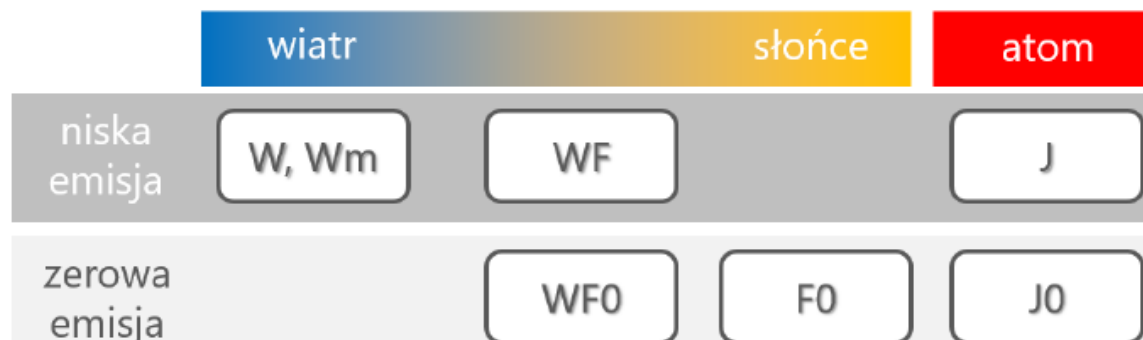
Element kosztów	Czechy Temelin (VVER, 1 000 MWe)	Meksyk Laguna Verde (BWR, 650 MWe)	W. Brytania Sizewell-B (PWR, 1 200 MWe)	Francja, N4 (PWR, 1 450 MWe)	Niemcy KONVOI (PWR, 1 380 MWe) 1990
Koszty bezpośrednie % całych wydatków					
Teren lokalizacji	0.3	0.1	0.2	0.2	
Wyposażenie reaktora	21.9	27.6	23.2	29.0	32.0
Wyposażenie hali turbin	7.2	14.7	5.9	16.0	22.8
Urządzenia elektryczne	20.0	13.2	13.5	10.0	5.9
Układy usuwania ciepła	2.0	2.2	2.5	7.0	3.1
Różne inne urządzenia	6.3	15.2	7.1	8.0	-
Budowa i montaż	19.4	10.1	23.4	10.0	17.8
Suma kosztów bezpośrednich	77.1	83.1	75.8	80.0	83.4

Główne problemy omawiane w wykładzie

- Obecne emisje zanieczyszczeń do atmosfery w Polsce
- Skutki zdrowotne zanieczyszczeń atmosfery
- Jak zasilać system elektroenergetyczny by wyrównać utratę elektrowni węglowych?
- Możliwości wiatrowych źródeł energii – nierównomierna generacja Niemcy, W. Brytania
- Niewystarczające przesyłanie energii wiatrowej z innych krajów
- Koszty eksportu nadmiernej energii wiatrowej
- Porównanie skuteczności OZE i EJ w redukcji emisji CO₂
- Potrzeby materiałów i powierzchni dla OZE
- Koszty wprowadzania OZE
- Problemy wprowadzania EJ – promieniowanie, ciężkie awarie , Generacja III+
- **Wybór strategii dla Polski: OZE czy EJ**

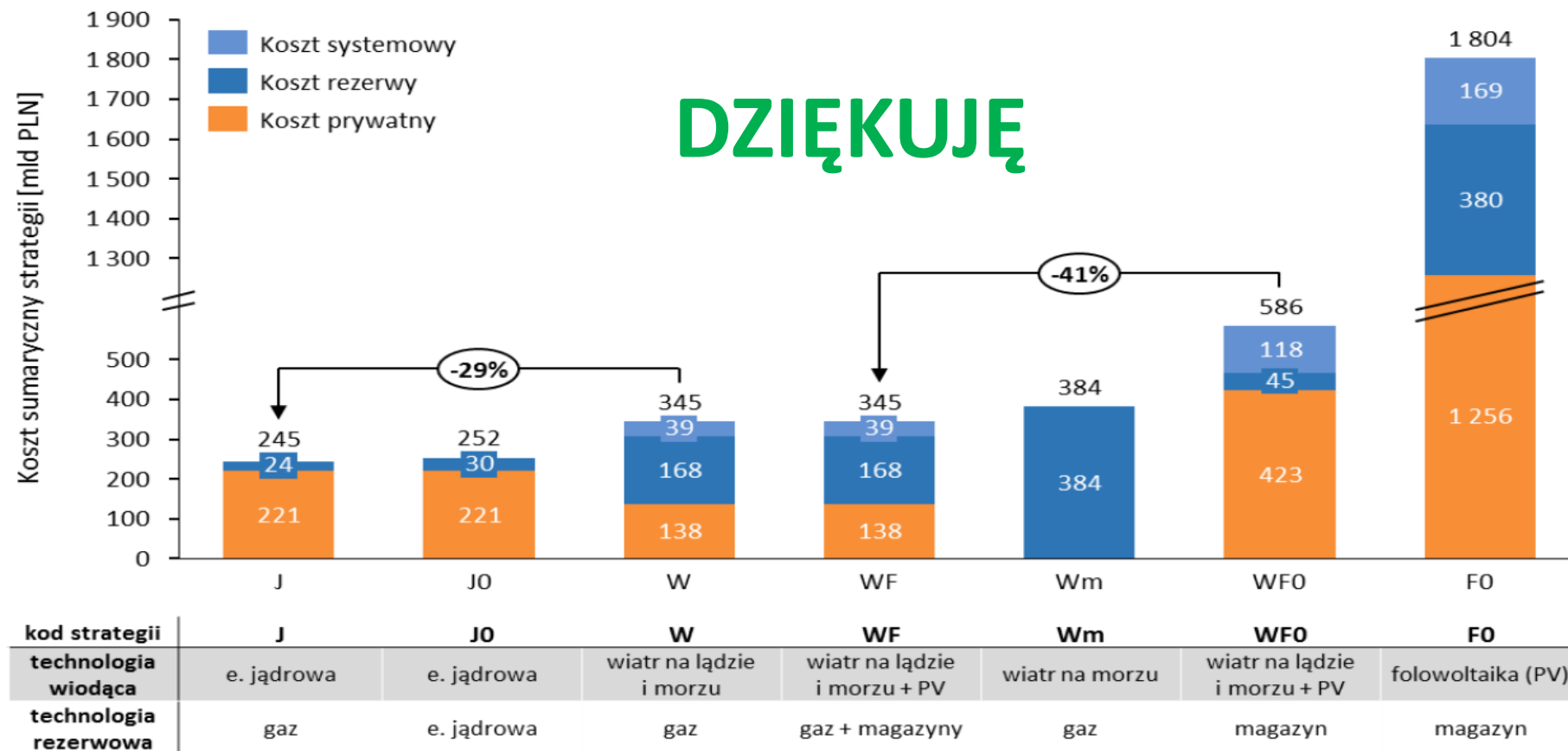
Wybór strategii EJ lub OZE

- Analizy z **NCAE: W. Jaworski i inn. Bezpieczeństwo energetyczne w dobie neutralności klimatycznej, 2020**
- Założenia: oprocentowanie kapitału 3%; Czas budowy 8 lat, Okres działania 60 lat.
- Wsp. Wykorzystania mocy zainst. **Wiatr 40%, MFW 52%, pV 16%, EJ 95%**
- Zdyskontowany koszt stały mln PLN/MW, , wiatr 17, FW 31,4, pV 8, EJ 28, gaz CCGT, mag en. 7,5 mln PLN/MW obejmuje sumę **zdyskontowanej wartości amortyzacji, kosztów stałych O&M, kosztów systemowych oraz kosztów likwidacji**



W	wiatr na lądzie i morzu + gaz
Wm	wiatr na morzu + gaz
F0	fotowoltaika + magazyn energii
WF	wiatr na lądzie i morzu, PV + gaz i magazyn energii
WFO	wiatr na lądzie i morzu, PV + magazyn energii
J	energia jądrowa + gaz
JO	wyłącznie energetyka jądrowa

Skutki wyboru strategii EJ lub OZE (60 lat)



Źródło: NCAE ; W. Jaworski i inn. Bezpieczeństwo energetyczne w dobie neutralności klimatycznej , 2020