

---

# Analiza potrzeb wdrożenia magazynów energii w KSE

Maksymilian Przygodzki, Rafał Gwóźdź | PSE Innowacje Sp. z o.o.

Bolesław Jankowski | Narodowe Centrum Analiz Energetycznych, PSE S.A.

22-24 kwiecień 2024 r.

[www.pse-innowacje.pl](http://www.pse-innowacje.pl)

# | Agenda

1. Tło prowadzonych prac
2. Dobór danych:
  - a) Narzędzie
  - b) Popyt i podaż,
  - c) Uwarunkowania wewnętrzne,
  - d) Uwarunkowania zewnętrzne,
  - e) Scenariusze
3. Wyniki:
  - a) Ogólne wyniki obliczeń,
  - b) Szczegółowe wyniki obliczeń
4. Wnioski i kierunki dalszych prac

# 01

## | Tło prowadzonych prac

# | Zmiany w strukturach i funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego

⇒ Potrzeby konsumpcyjne

⇒ Struktura wytwarzania

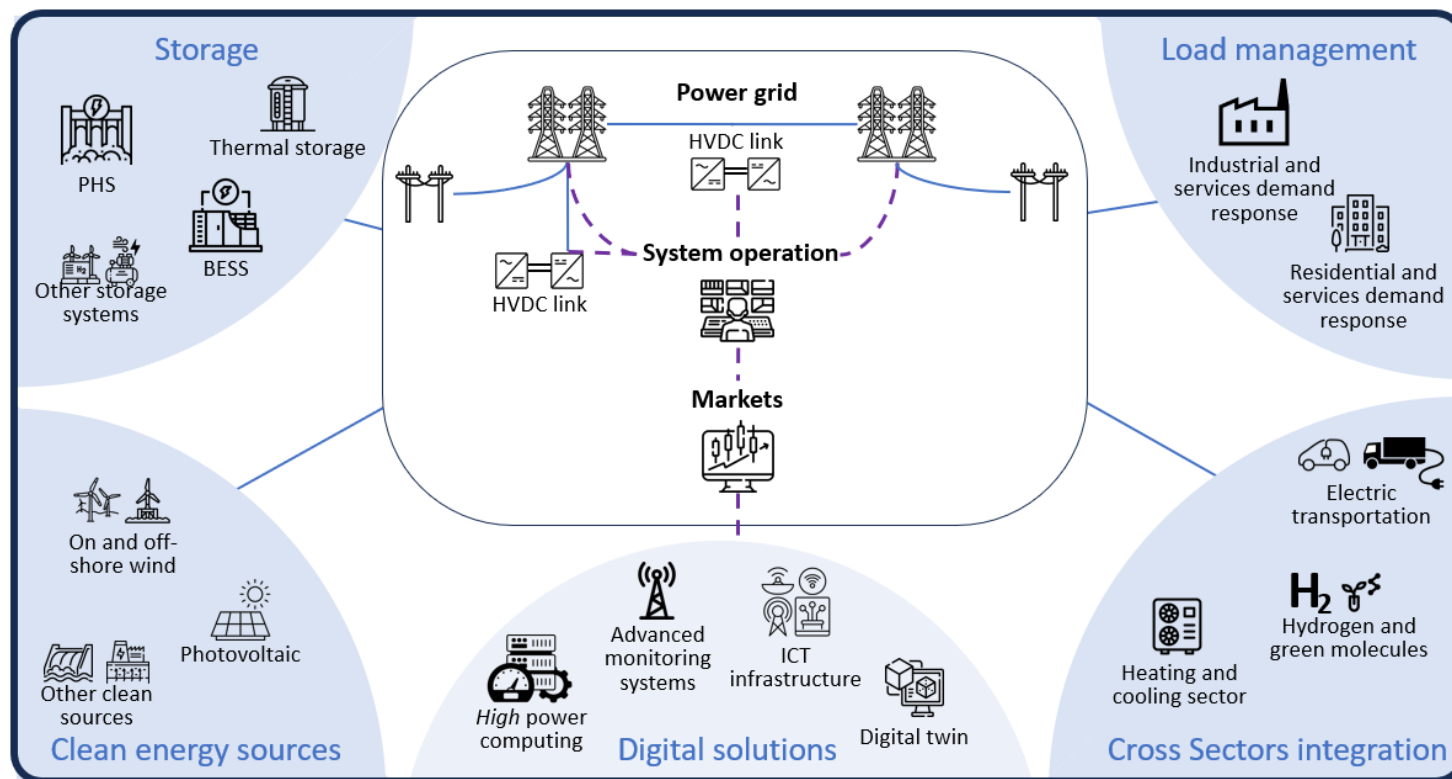
⇒ Nowe technologie

⇒ Ochrona środowiska

⇒ Ekonomia systemu



Zapewnienie płynności działania SEE w warunkach transformacji energetycznej



Źródło: Roadmap. ENTSO-E

# 02

## | Dobór danych

## PLEXOS – charakterystyka formalna

Narzędzie obliczeniowe, umożliwia analizę symulacyjną wraz z optymalizacją przy wykorzystaniu w pełni zintegrowanych modułów:

- ➞ planowanie długoterminowe (LT Plan),
- ➞ projekcja oceny wystarczalności systemu (PASA),
- ➞ średniookresowe harmonogramowanie pracy jednostek wytwórczych (MT Schedule),
- ➞ krótkookresowy plan pracy (ST Schedule).



## | LT Plan – planowanie długoterminowego rozwoju

Znajduje optymalną kombinację budowy nowych i wycofań istniejących linii i jednostek wytwórczych, która minimalizuje całkowite koszty (włącznie z kosztami stałymi i operacyjnymi zmiennymi) systemu w horyzoncie długoterminowym.

Wspierane są następujące typy rozbudowy/wycofań i właściwości:

- ➞ Budowa i wycofania jednostek wytwórczych i linii,
- ➞ Projekty wieloetapowe,
- ➞ Zwiększanie przepustowości na istniejących przekrojach przesyłowych,
- ➞ Zawieranie nowych kontraktów w zakresie zapotrzebowania i generacji,
- ➞ Optymalizacja deterministyczna bądź stochastyczna.

## | ST Schedule – analizy krótkoterminowe

ST Schedule wykorzystuje programowanie całkowitoliczbowe (*mixed – integer programming MIP*) oparte na optymalizacji chronologicznej. Może odzwierciedlić warunki rozdziału mocy i wyceny energii na rzeczywistych rynkach energii, ale dodatkowo obejmuje wiele zadań związanych z:

- ⊕ doborem jednostek wytwórczych;
- ⊕ modelowaniem ograniczeń;
- ⊕ optymalizacją finansową/portfolio;
- ⊕ symulacjami Monte Carlo.

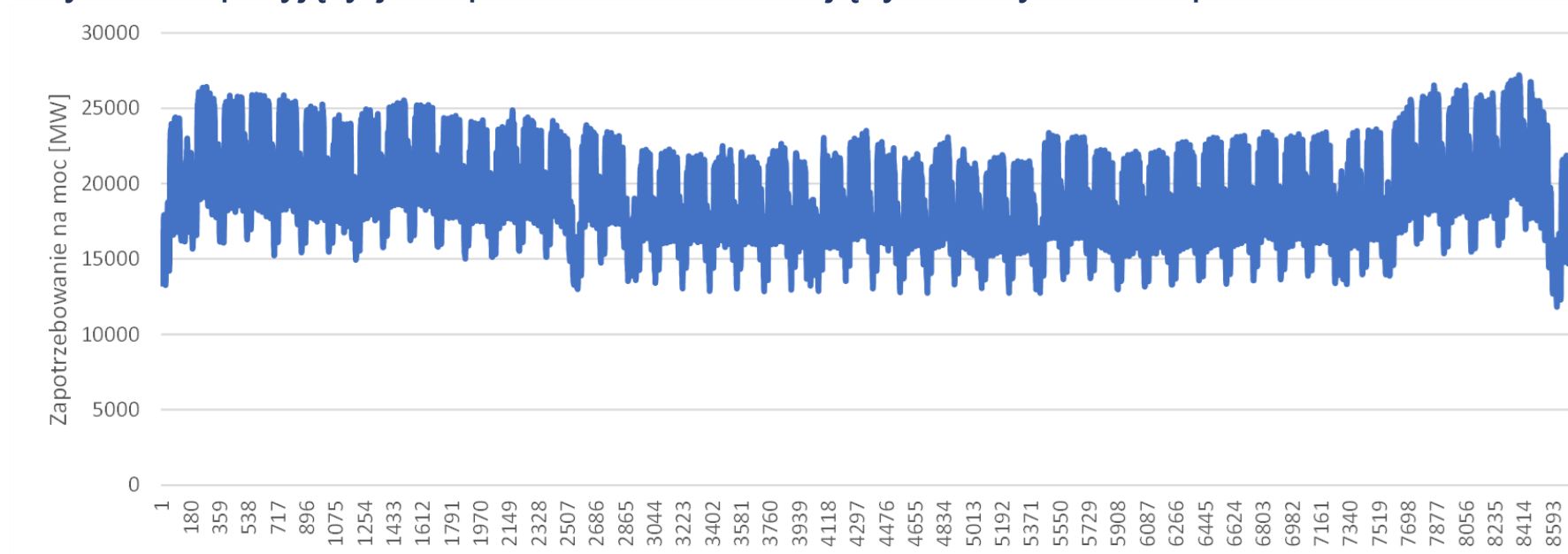
ST Schedule dostarcza dwóch metod modelowania chronologii:

- ⊕ **Pełna chronologia** Każdy okres handlowy (interwał) w ramach horyzontu ST Schedule jest modelowany jawnie (interwał może mieć długość od 1 sekundy do 24 godzin).
- ⊕ **Typowy tydzień** Jeden typowy tydzień jest modelowany dla każdego miesiąca w horyzoncie a wyniki są uwzględniane również dla pozostałych tygodni.



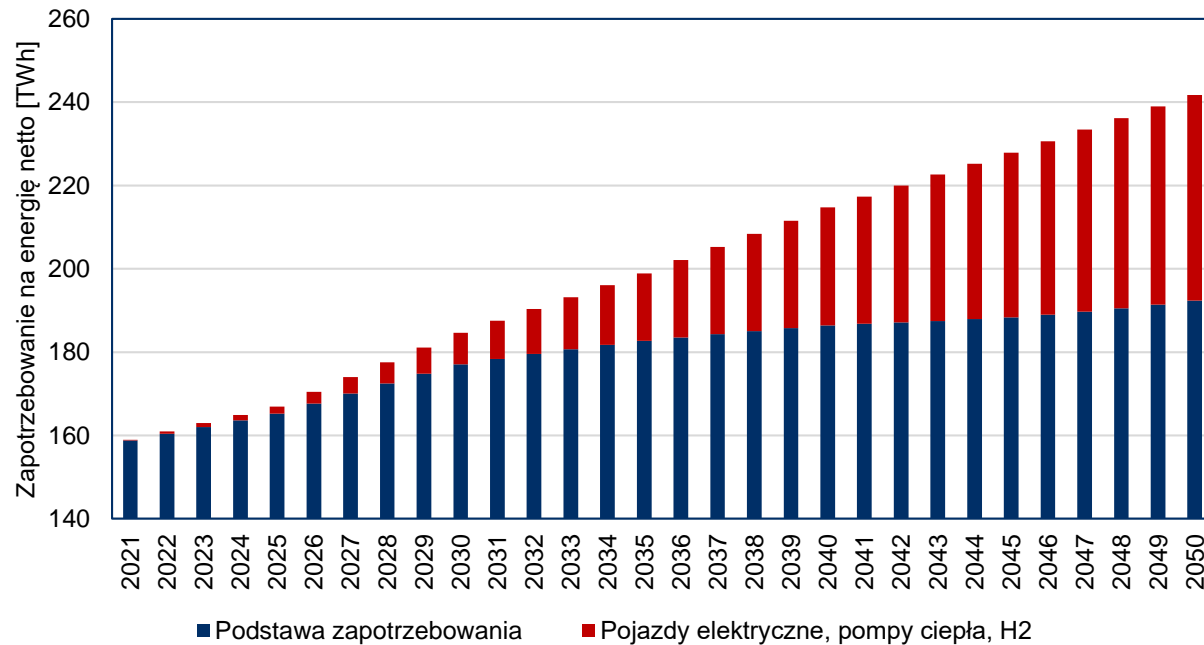
## | Prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną (1)

- ➔ Na potrzeby projektu stworzono prognozę obciążenia za pomocą funkcjonalności zaimplementowanej w programie PLEXOS. Dla prawidłowego utworzenia prognozy podano trzy podstawowe dane:
  - ➔ profil godzinowy popytu z „roku bazowego”,
  - ➔ prognoza całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną (GWh) w każdym roku objętym horyzontem prognozy,
  - ➔ prognoza maksymalnego zapotrzebowania na moc (MW) w każdym roku objętym horyzontem prognozy.
- ➔ Profil godzinowy został przyjęty jako profil odzwierciedlający rzeczywiste zapotrzebowanie z 2022 roku.

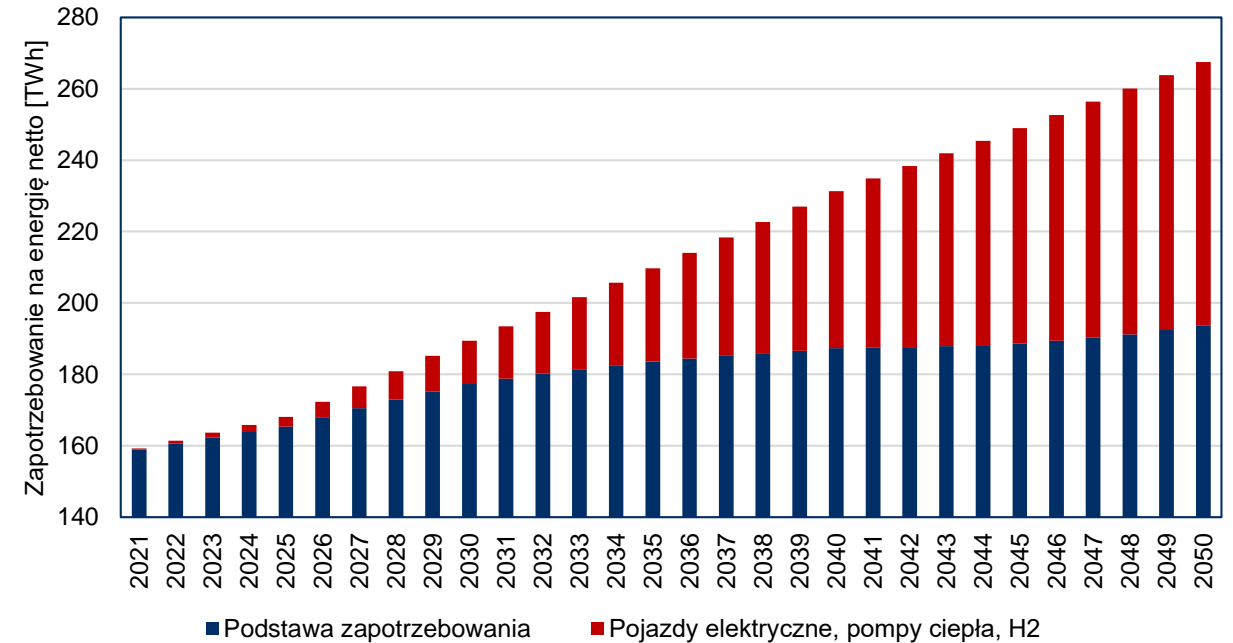


# Prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną (3)

Prognoza rocznego zapotrzebowania na moc – wariant bazowy



Prognoza rocznego zapotrzebowania na moc – wariant znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię



## | DSR – modelowanie

W kolejnych latach DSR został zamodelowany jako kandydat do budowy.

W kolejnych latach założono, że może powstać maksymalnie 500 MW w DSR o cenie uruchomienia rosnącej wraz z wolumenem.

Parametr PLEXOS	Parametr	od 2024	od 2025	od 2026	od 2027	od 2028
Max Capacity	Moc [MW]	500	500	500	500	500
VO&M Charge	Cena uruchomienia [zł/MWh]	1100	1900	2700	4700	18900
Max Up Time	Liczba godzin ciągłej pracy [h]	8	8	8	8	8
Max Starts Year	Maksymalna liczba uruchomień na rok	14	14	14	14	14

## | Wytwarzanie energii elektrycznej

- ➞ Dane jednostek wytwórczych przyjęto na podstawie ankietyzacji jednostek wytwórczych przeprowadzonej przez Departament Rozwoju Systemu PSE S.A.
- ➞ Uwzględniono bieżące parametry jednostek wytwórczych, w tym: minimum techniczne, terminy i poziomy niedostępności związane z planowanymi wyłączeniami, terminy wycofania poszczególnych jednostek, liczby jednostek wytwórczych niezbędnych do zachowania stabilności działania elektrowni bądź systemu (tzw. must-run), wydajności na jednostkę paliwa oraz maksymalne poziomy generacji energii w ciągu miesiąca.
- ➞ Dane rozpisano na okres od 2022 do 2038 roku zgodnie z wynikami ankietyzacji. Dla generatorów, których termin wycofania przekracza rok 2038 przyjęto, iż moc osiągalna jednostki pozostaje stała w horyzoncie do 2050 roku.

## | Założenia dotyczące nowych technologii (1)

- ⇒ Budowa elektrowni jądrowej została przyjęta przy założeniu umiarkowanego tempa rozwoju. Uwzględniono deterministycznie 6 bloków o mocy 1100 MW każdy poczynając od 2033 r. do 2043 r., przy czym budowa bloków następowała co 2 lata.
- ⇒ Współczynniki emisji CO<sub>2</sub> dla poszczególnych paliw przedstawiono w poniższej tabeli.

Paliwo	Współczynnik emisji [kg/GJ]	Paliwo	Współczynnik emisji [kg/GJ]
Gaz ziemny ( <i>Natural Gas</i> )	55,44	Gaz wielkopiecowy ( <i>x_GAZ_wielkopiecowy</i> )	241,00
Gaz ziemny zaazotowany ( <i>Natural Gas zaazotowany</i> )	55,44	Węgiel kamienny ( <i>Coal</i> )	96,40
Gaz koksowniczy ( <i>Coke Oven Gas</i> )	56,10	Węgiel brunatny ( <i>Lignite</i> )	110,55
Gaz rafineryjny ( <i>x_GAZ_rafineryjny</i> )	66,00	Ropa ( <i>Oil</i> )	73,00

## Żałożenia dotyczące nowych technologii (2)

- ➔ Potencjały magazynów energii przyjęto na podstawie raportu przygotowanego przez ekspertów z PSME oraz AGH: „Wpływ rozbudowy infrastruktury magazynów energii na rozwój gospodarczy w Polsce - prognoza do 2040 r.” Przyjęto wykorzystanie wyników scenariusza PEP2040, zakładającego rozwój oparty na założeniu określonym w aktualnej wersji Polityki Energetycznego Polski do 2040 r, przy czym potencjał przyrostu pojemności magazynów w latach 2041-2050 przyjęto identyczny jak w latach 2036 – 2040.
- ➔ Wprowadzono podział na magazyny prosumenckie i wielkoskalowe. Moc magazynów prosumenckich została skalkulowana przyjmując relację mocy do pojemności magazynu równą 1:2 (praca magazynu z pełną mocą przez max. 2 godz.) Dla obliczenia potencjału mocy magazynów przemysłowych w technologii LiFePO4 przyjęto relację 1:2, a magazynów A-CAES w relacji 150:500.
- ➔ Dostępność mocy znamionowej magazynów energii w poszczególnych latach (narastająco).

Magazyn energii	2021	2026	2031	2036	2041	2050
A-CAES	0	0	300	900	1 500	1 500
BESS LiFePO4	0	3 200	5 800	7 400	9 000	9 000
BESS Li-ion Prosum	305	800	1 555	2 200	2 845	2 845
Razem	305	4 000	7 655	10 500	13 345	13 345

## | Założenia dotyczące nowych technologii (3)

- ⊕ W ramach projektu technologie wodorowe nie były rozpatrywane,
- ⊕ Potencjał energetyki wiatrowej na lądzie do 2040 roku został przyjęty zgodnie z założeniami proponowanymi do aktualizacji PEP 2040

	OBECNIE	PEP 2040		AKTUALIZACJA PEP 2040	
		2030	2040	2030	2040
On-shore	10 GW	10 GW	10 GW	14 GW	18 GW

- ⊕ W zakresie lądowej energetyki wiatrowej w okresie 2041 – 2050 przyjęto możliwość budowy dodatkowych 4 GW mocy.
- ⊕ W zakresie morskich farm wiatrowych przyjęto następujące wolumeny mocy:
  - ⊕ 5,9 GW do roku 2030 – zamodelowane jako budowa zdeterminowana.
  - ⊕ dodatkowa moc zainstalowana 9,4 GW w okresie od roku 2031 do roku 2040 – decyzje inwestycyjne podlegające optymalizacji kosztowej.
  - ⊕ dodatkowa moc zainstalowana 17,7 GW w okresie od roku 2041 do roku 2050 decyzje inwestycyjne podlegające optymalizacji kosztowej.

## | Założenia dotyczące nowych technologii (4)

- ⊕ Moc instalacji fotowoltaicznych przyjęto 15 627,5 MW dla roku 2023, 19 795 MW dla roku 2024 oraz 23 791 MW dla roku 2025. W kolejnych latach ograniczono maksymalny potencjał rozwoju źródeł PV jako równy wartościom scenariusza 3 z prekonsultacji aktualizacji KPEIK/PEP 2040. Zestawienie wartości przedstawiono w poniższej tabeli.

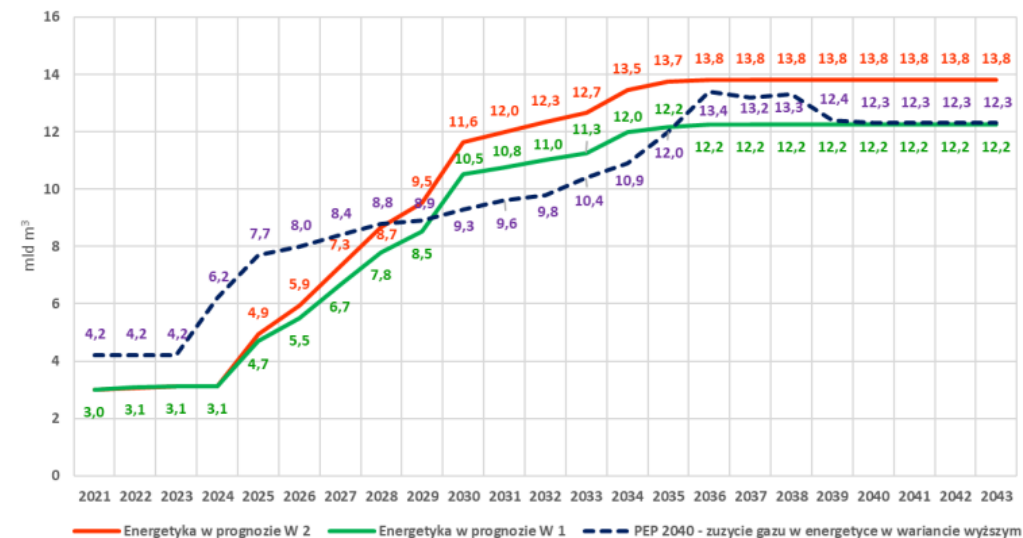
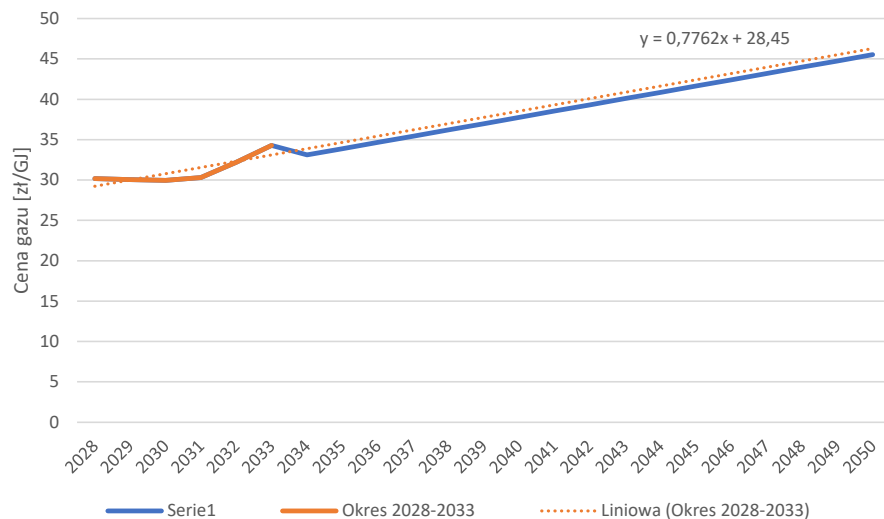
2022	2025	2030	2035	2040	2050
12 189	18 760	27 000	36 000	45 000	54 000*

\*na lata 2040 – 2050 przyjęto identyczny możliwy przyrost jak w latach 2035 – 2040, czyli 9 000 MW



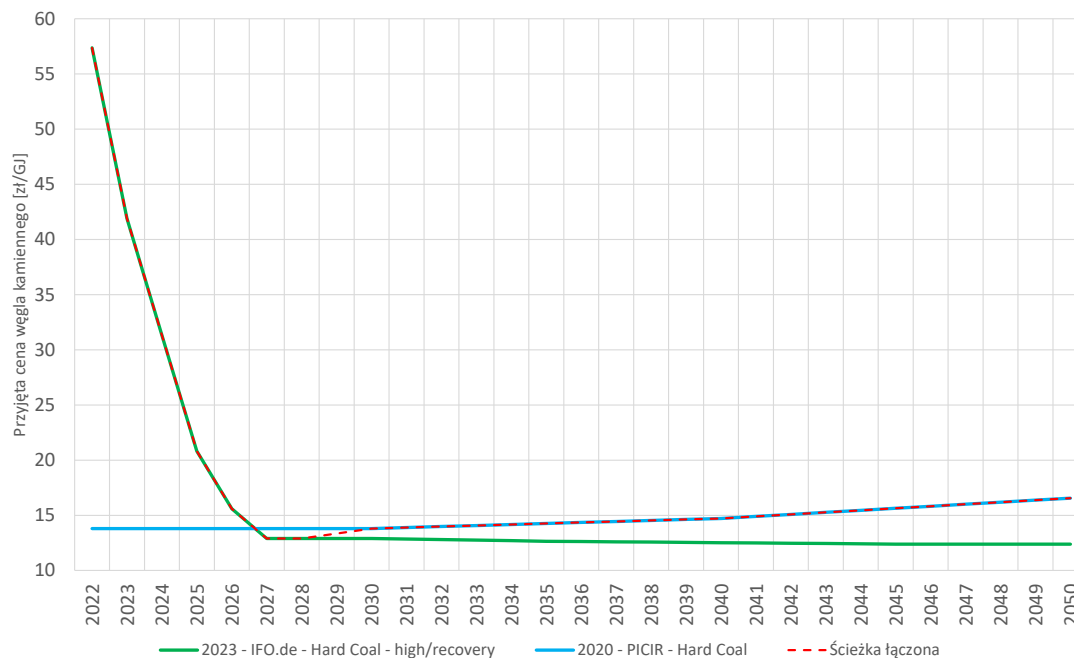
## Ceny, dostępność paliw i ich emisyjność (1)

- ➔ Ceny paliw gazowych oparto na prognozach cen notowanych na holenderskim TTF Natural Gas (europejski benchmark cenowy dla gazu ziemnego) z dnia 24 listopada 2023 r.
- ➔ Dla okresu 2034 – 2050 oszacowano prognozowane ceny gazu ziemnego na podstawie wyznaczonych wcześniej cen z okresu 2028 – 2033.
- ➔ Dla gazu ziemnego wprowadzono ograniczenie związane z jego dostępnością w poszczególnych latach wg Planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na paliwa gazowe na latach 2022-2031.



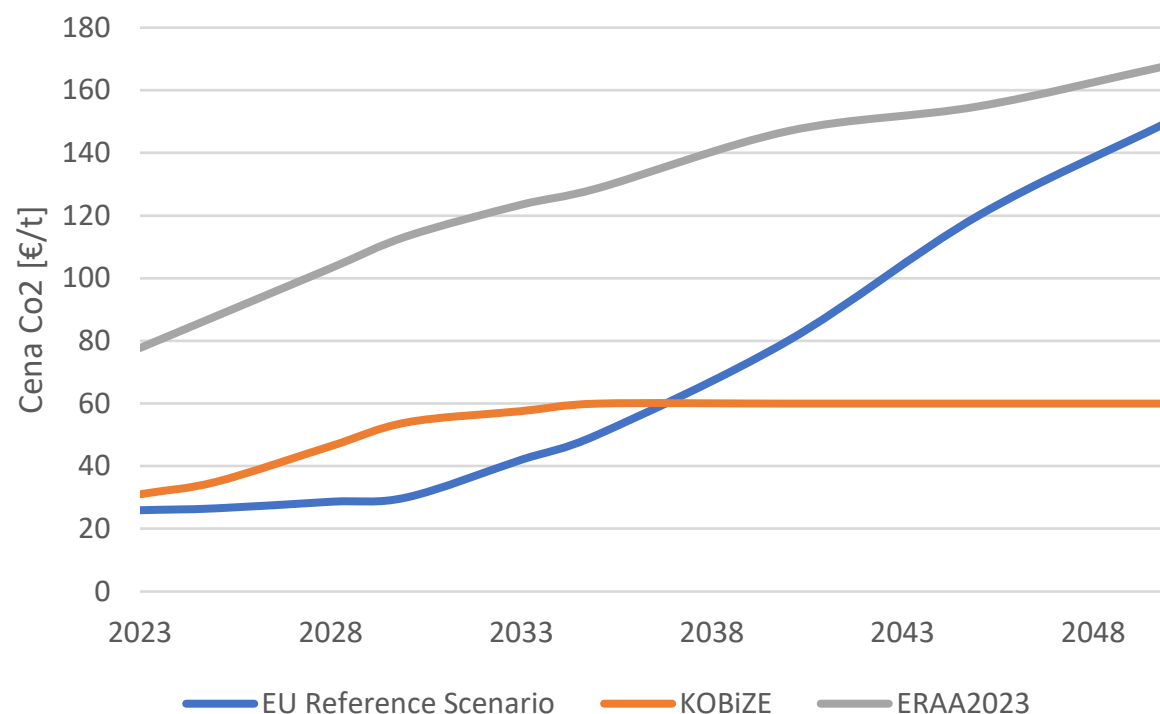
## Ceny, dostępność paliw i ich emisyjność (2)

- ➔ Ceny węgla kamiennego przyjęto na podstawie prognoz światowych cen tego surowca. Uzgodniona ścieżka opiera się na propozycjach IFO.de – Hard Coal – high/recovery oraz PICIR – Hard coal.
- ➔ Przyjęto, że cena węgla brunatnego stanowi około 70% cen węgla kamiennego, jest punktem wyjścia w modelu oraz przyjęto nieznaczny wzrost cen węgla brunatnego w stosunku do cen węgla kamiennego od poziomu 70% w roku 2050 do 75% w roku 2050.



## | Ceny, dostępność paliw i ich emisyjność (3)

- ⇒ Ceny biogazu przyjęto na podstawie cen referencyjnych określonych w projekcie Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 5 września 2023 r.
- ⇒ Cena uranu została przyjęta na poziomie zgodnym z dokumentem „Program polskiej energetyki jądrowej”.
- ⇒ Przyjęto ścieżkę cenową uprawnień do emisji dwutlenku węgla opracowaną w projekcie ERAA 2023.



## | Scenariusze obliczeniowe

- ➡ Obliczenia wykonano z wykorzystaniem optymalizacji LT Plan dla okresu 28 lat, tj. od roku 2023 do roku 2050.
- ➡ Przyjęto 4 scenariusze obliczeniowe.

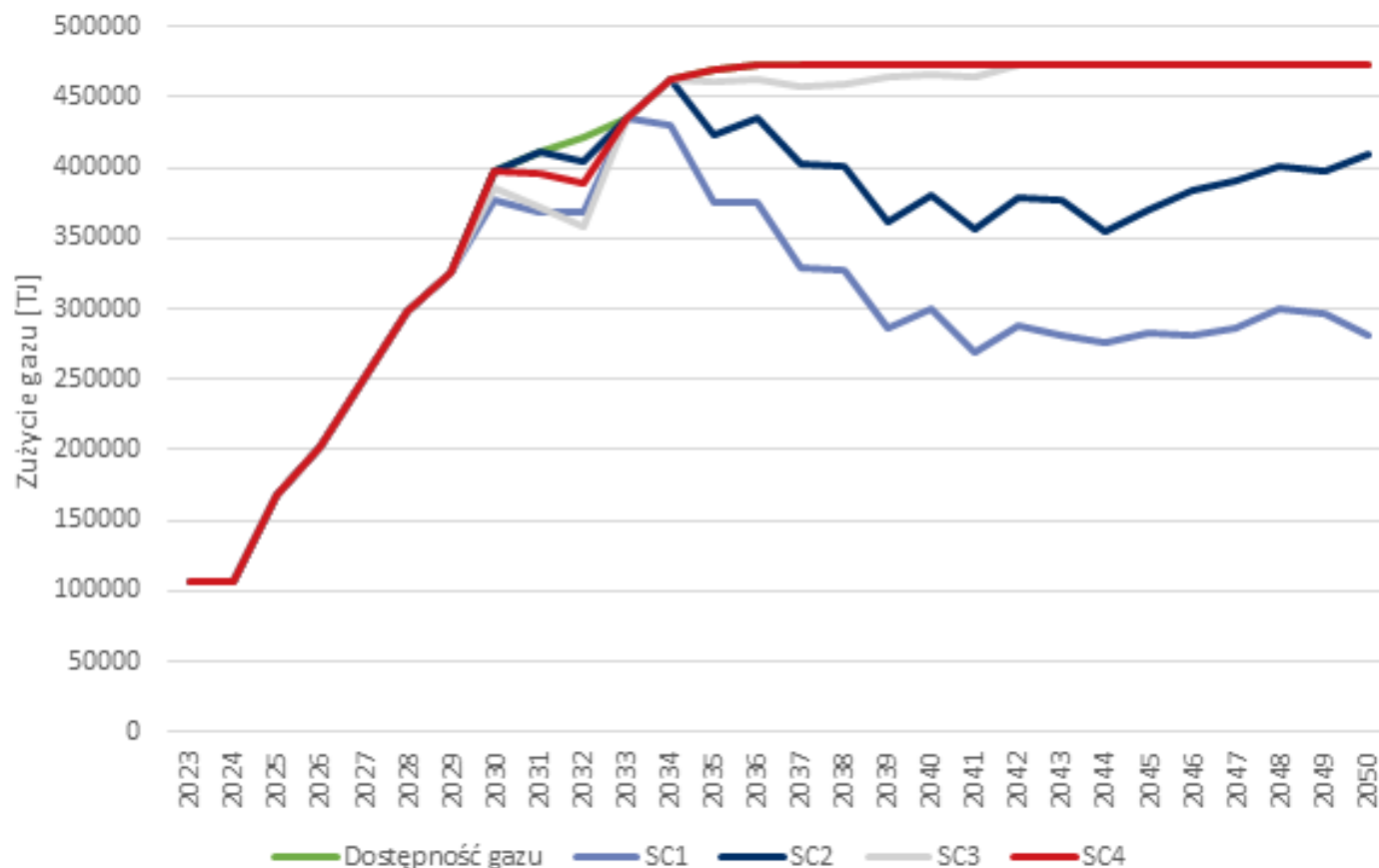
Oznaczenia scenariusza	Zapotrzebowanie	EJ	Analizy czułościowe
SC1	Bazowe	+	-
SC2	Wysokie	+	Dostępność gazu +/- 20%
SC3	Bazowe	-	
SC4	Wysokie	-	Dostępność gazu +/- 20%

03

## Wyniki obliczeń

## | Ogólne wyniki obliczeń (1)

➡ Wykorzystanie gazu ziemnego do produkcji energii elektrycznej.

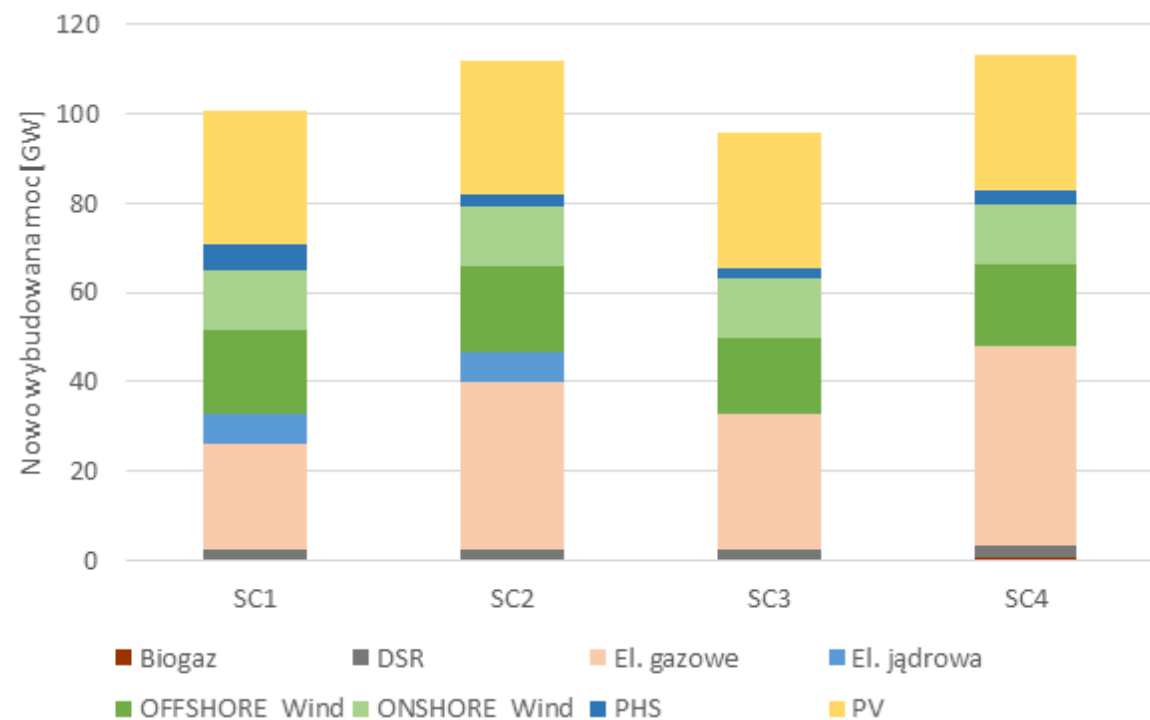


➡ W horyzoncie do 2029 r. w każdym z analizowanych scenariuszy jednostki gazowe wykorzystują cały dostępny założony wolumen gazu ziemnego. W kolejnych latach natomiast w scenariuszach z elektrownią jądrową, niezależnie od poziomu zapotrzebowania, wykorzystanie gazu jest znacznie poniżej dopuszczalnego limitu. W przypadku braku technologii nuklearnej w systemie w zasadzie cały dostępny wolumen gazu ziemnego jest wykorzystywany.

## | Ogólne wyniki obliczeń (2)

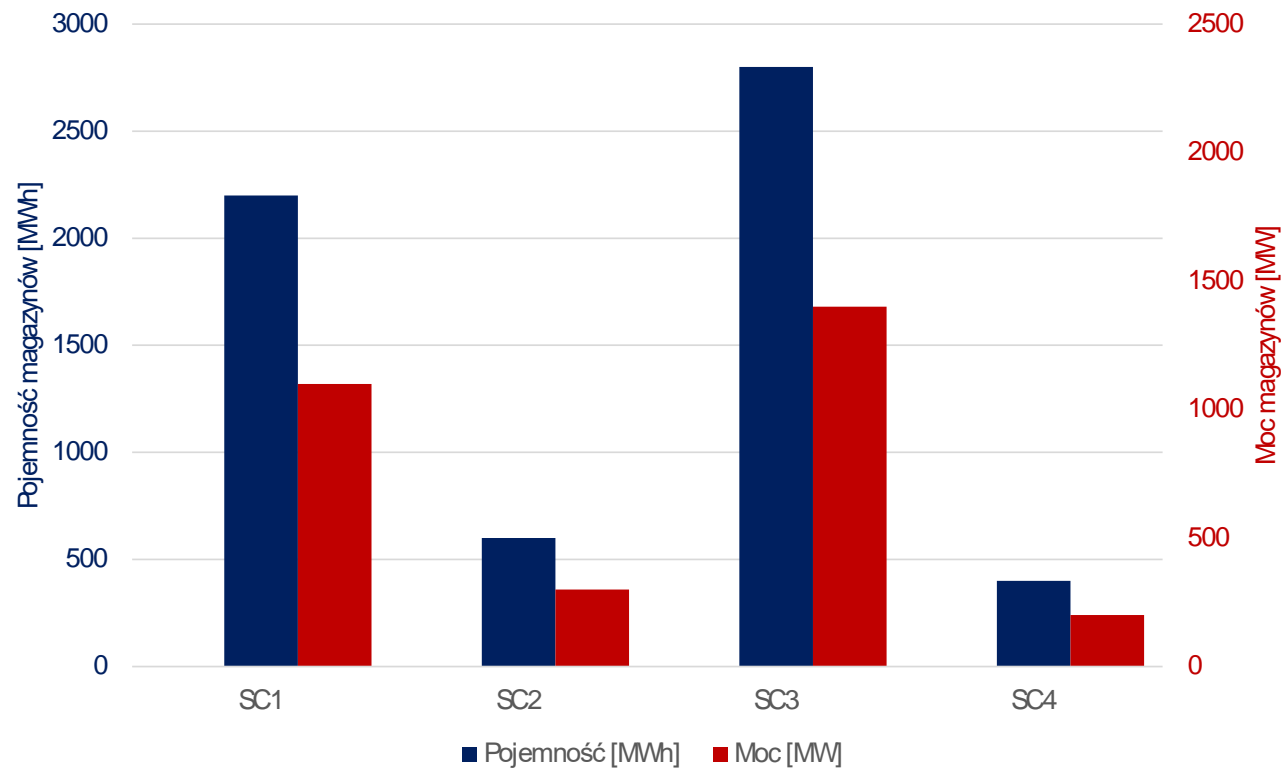
➡ Wolumeny nowo wybudowanych mocy [MW] w poszczególnych scenariuszach

Technologia	SC1	SC2	SC3	SC4
Biogaz	0,0	10,5	0,0	930,0
DSR	2 500,0	2 500,0	2 500,0	2 500,0
El. gazowe	23 621,4	37 552,2	30 392,2	44 671,4
El. jądrowa	6 600,0	6 600,0	0,0	0,0
OFFSHORE_Wind	19 032,5	19 232,5	16 732,5	18 032,5
ONSHORE_Wind	13 400,0	13 400,0	13 400,0	13 400,0
PHS	5 407,6	2 490,0	2 490,0	3 490,0
PV	30 200,0	30 200,0	30 200,0	30 200,0
SUMA	100 761,5	111 985,2	95 714,7	113 223,9



## | Ogólne wyniki obliczeń (3)

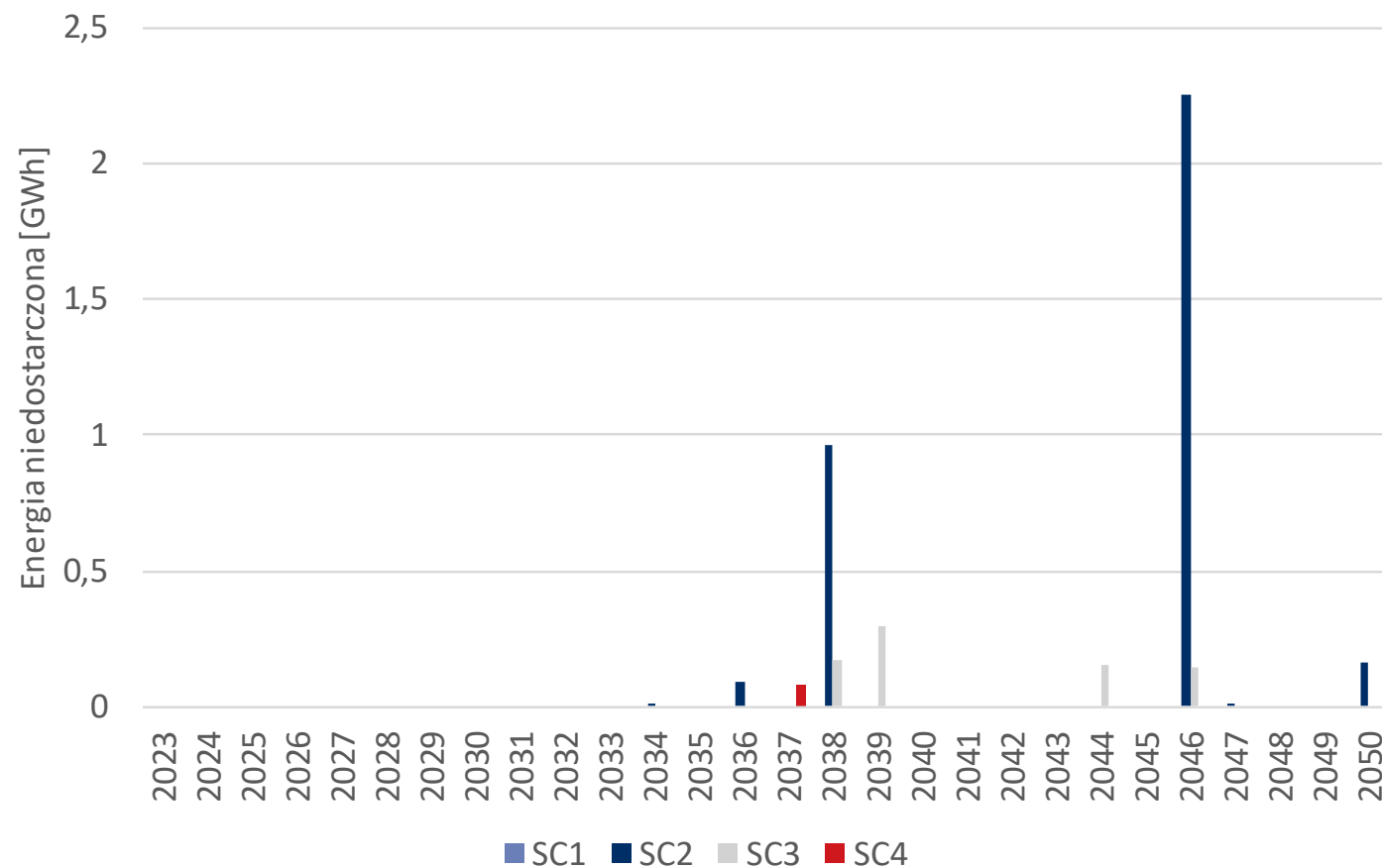
➞ Wolumeny nowo wybudowanych mocy [MW] oraz pojemności [MWh] magazynów energii





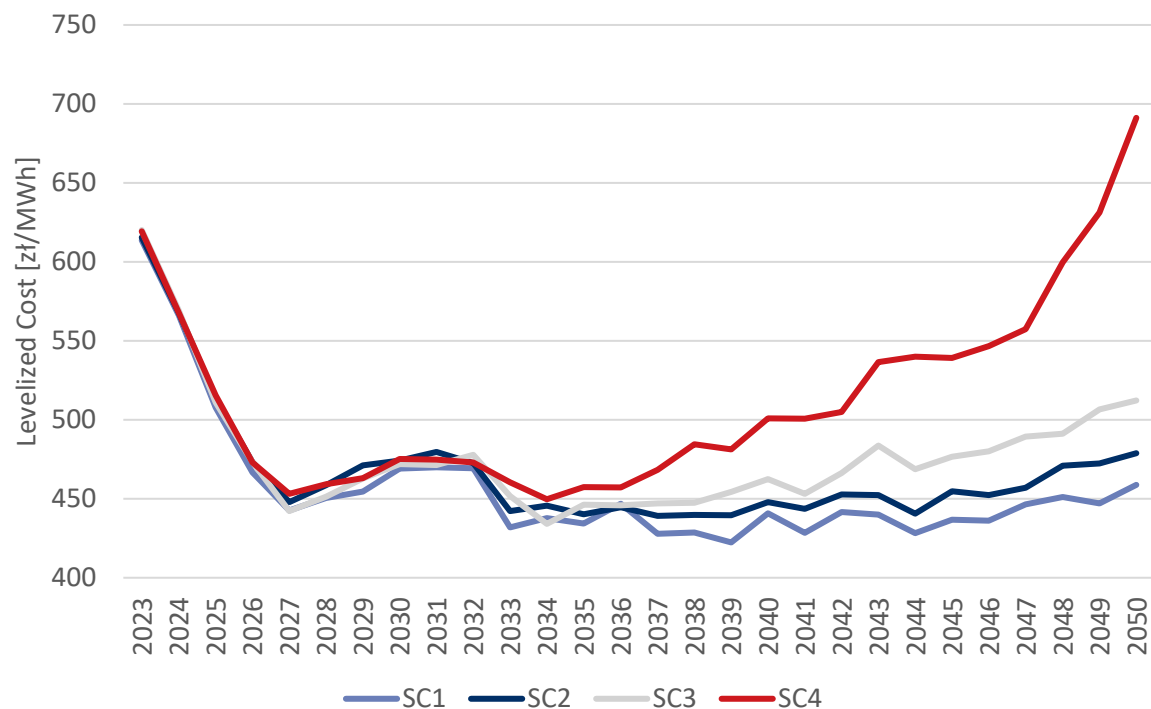
## | Ogólne wyniki obliczeń (4)

➡ Poziom energii niedostarczonej w podziale na scenariusze

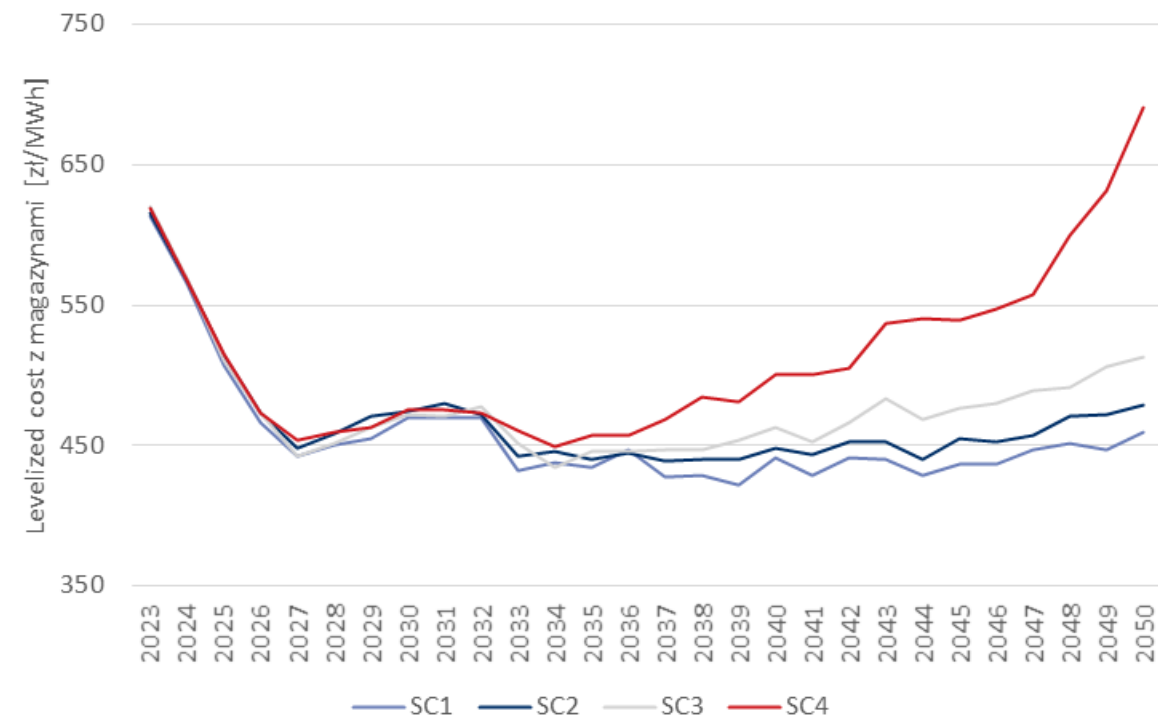


## Ogólne wyniki obliczeń (5)

Koszt roczny średni [*Levelized Cost*] w podziale na scenariusze

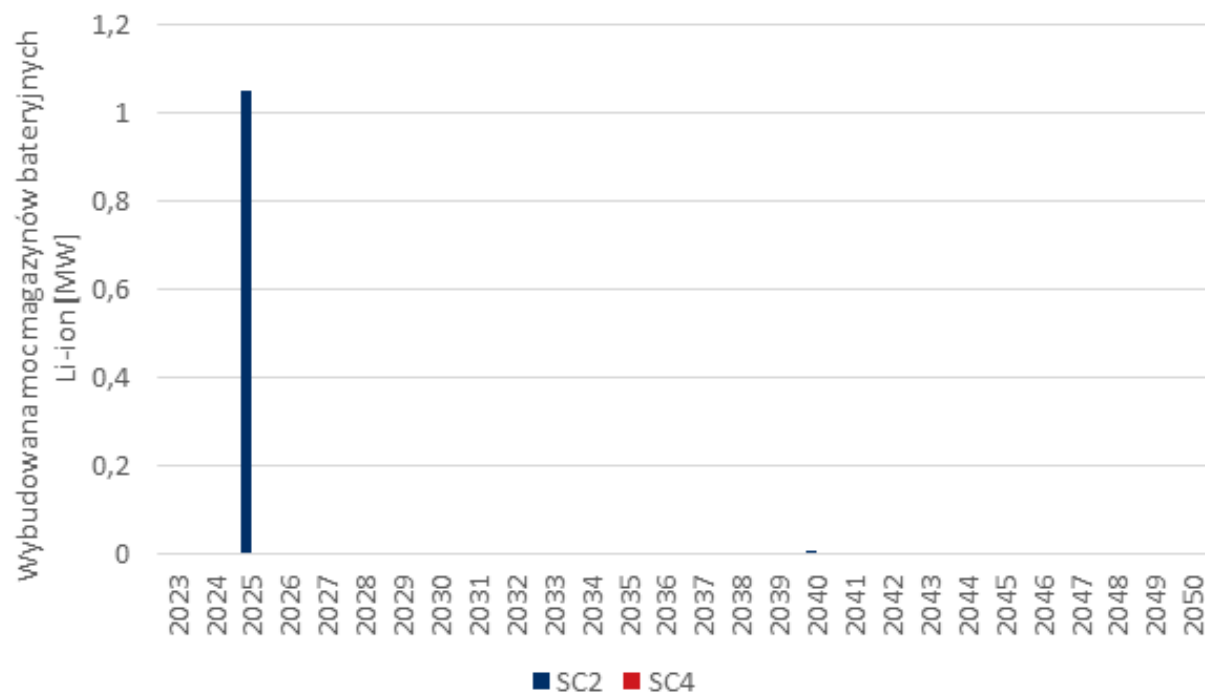


Koszt roczny średni [*Levelized Cost*] uwzględniający koszt magazynów energii w podziale na scenariusze

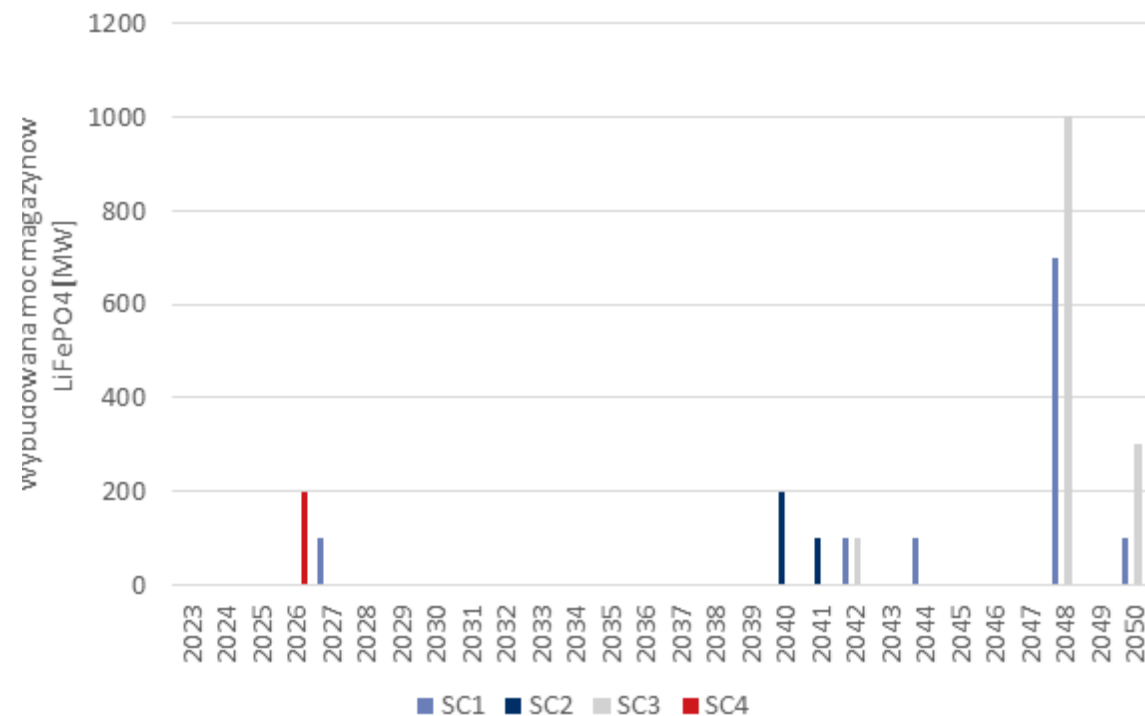


## Szczegółowe wyniki obliczeń (1)

➡ Moc wybudowana prosumenckich magazynów bateryjnych Li-Ion w poszczególnych latach

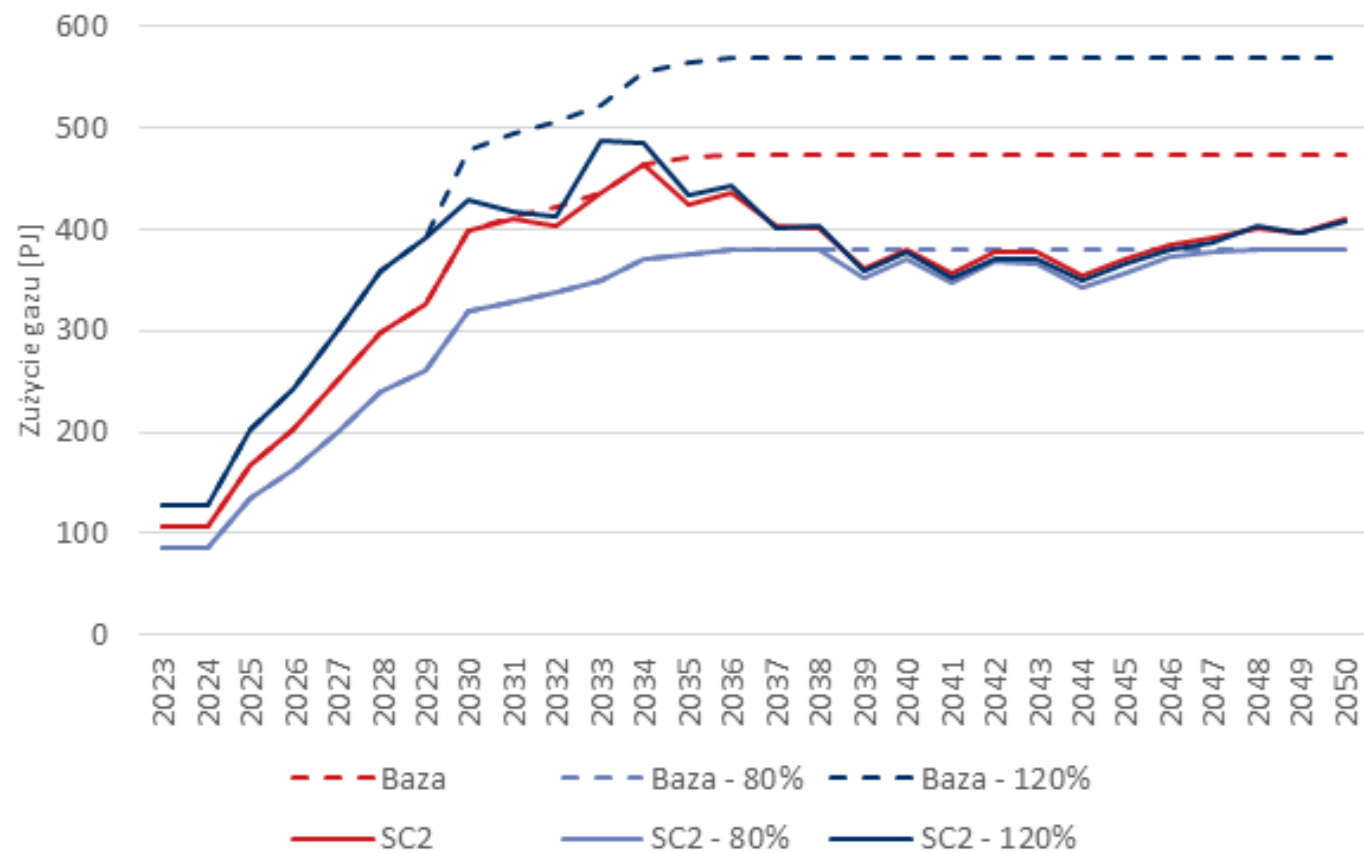


➡ Moc wybudowana magazynów bateryjnych LiFePO4 w poszczególnych latach



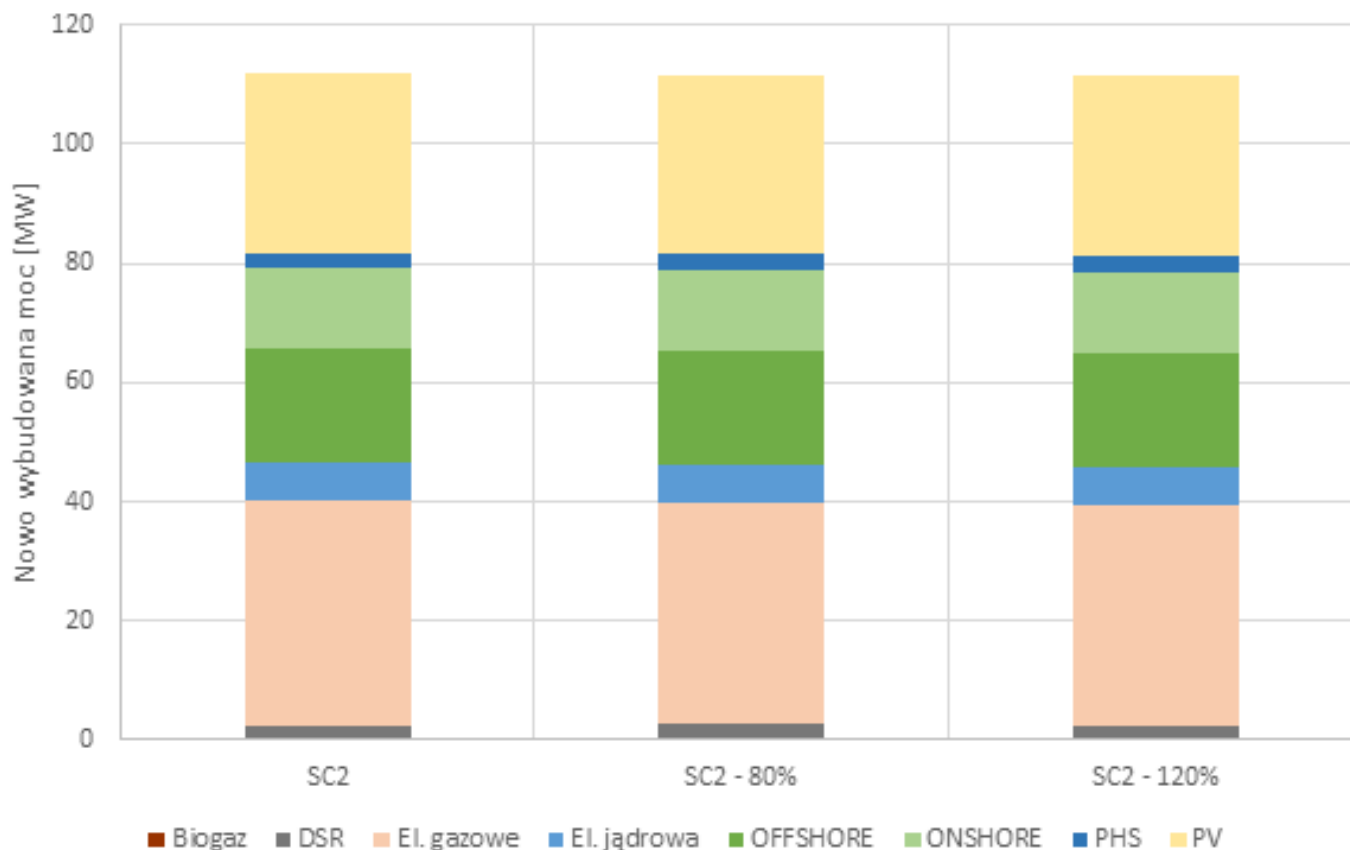
## | Wyniki analiz czułościowych (1)

➡ Wykorzystanie gazu ziemnego do produkcji energii elektrycznej dla scenariusza SC2



## | Wyniki analiz czułościowych (2)

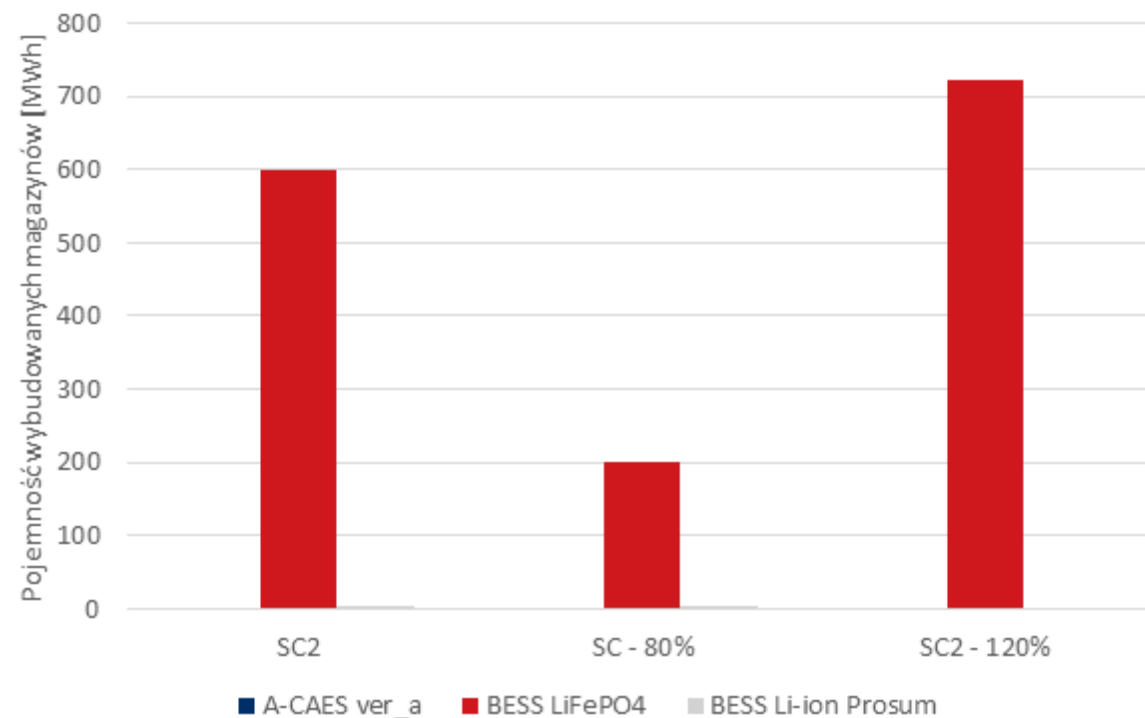
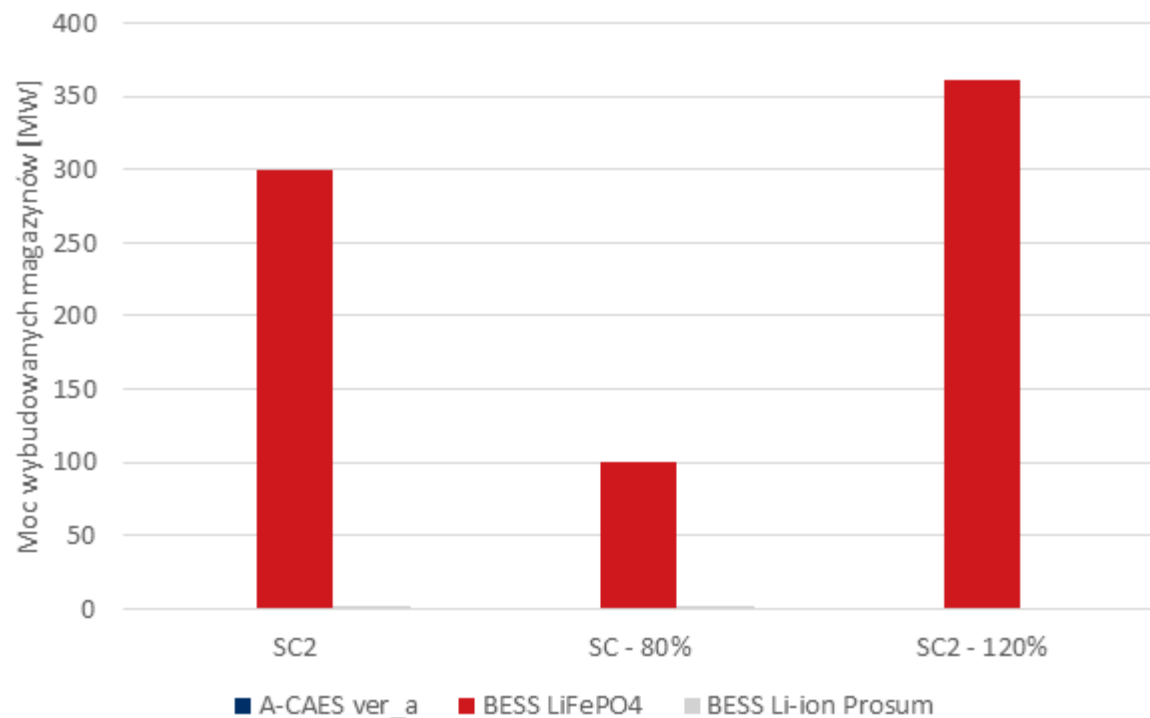
➡ Moc wybudowana w scenariuszu SC2 przy zmiennych limitach dostępności gazu ziemnego dla scenariusza SC2



Technologia	SC2	SC2 – 80%	SC2 – 120%
Biogaz	10,5	118,4	0,0
DSR	2500,0	2500,0	2500,0
El. gazowe	37552,2	37117,8	36836,8
El. jądrowe	6600,0	6600,0	6600,0
OFFSHORE	19232,5	18932,5	19117,8
ONSHORE	13400,0	13400,0	13400,0
PHS	2490,0	2790,0	2869,9
PV	30200,0	30200,0	30200,0

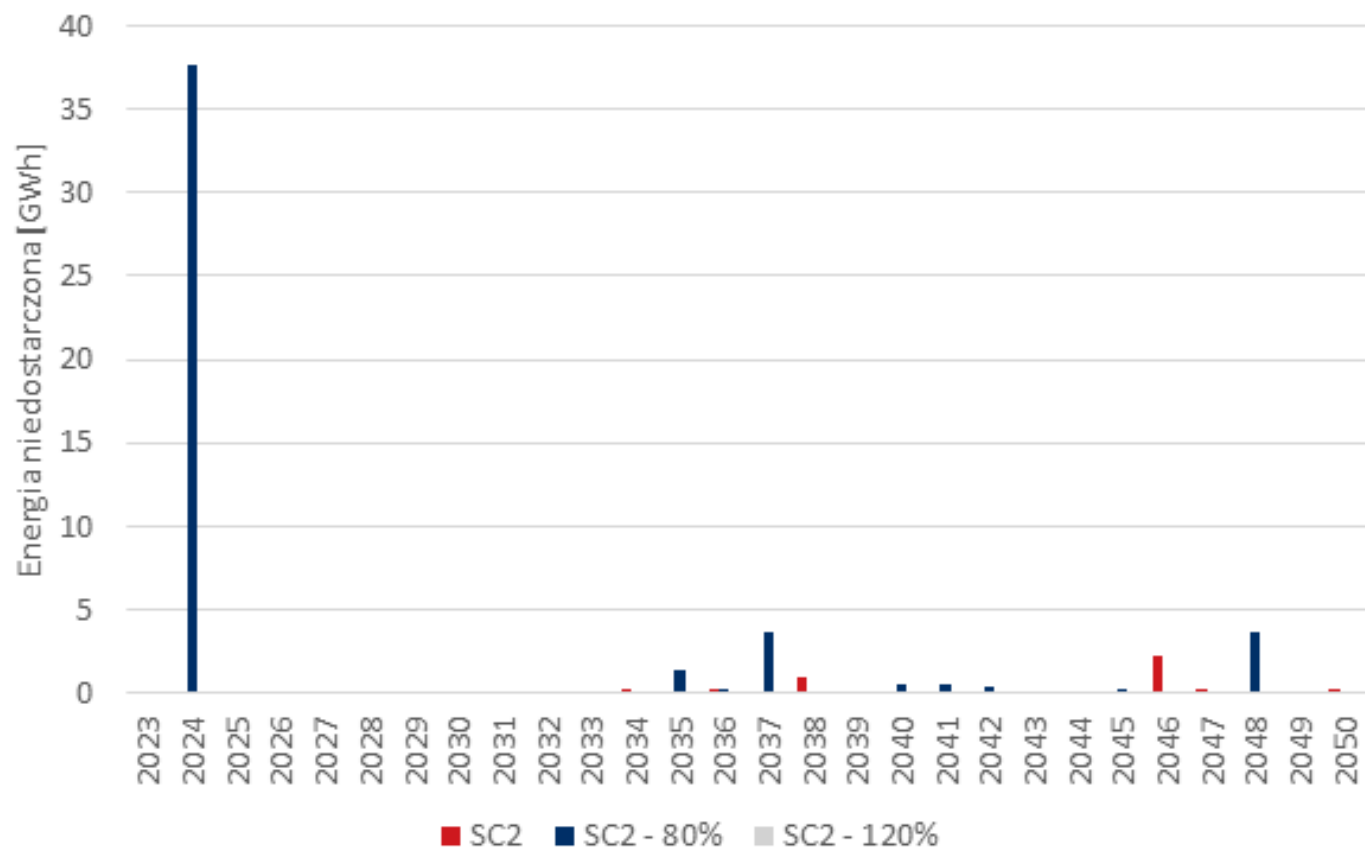
## | Wyniki analiz czułościowych (5)

➡ Wolumeny nowo wybudowanych mocy oraz pojemności magazynów energii dla scenariusza SC2



## | Wyniki analiz czułościowych (6)

- ➡ Poziom energii niedostarczonej dla scenariusza SC2 przy zmiennych limitach dostępności gazu ziemnego dla scenariusza SC2



Scenariusz	Energia niedostarczona [GWh]
SC2	3,47
SC2 – 80%	47,91
SC2 – 120%	0

04

## Wnioski i kierunki dalszych prac

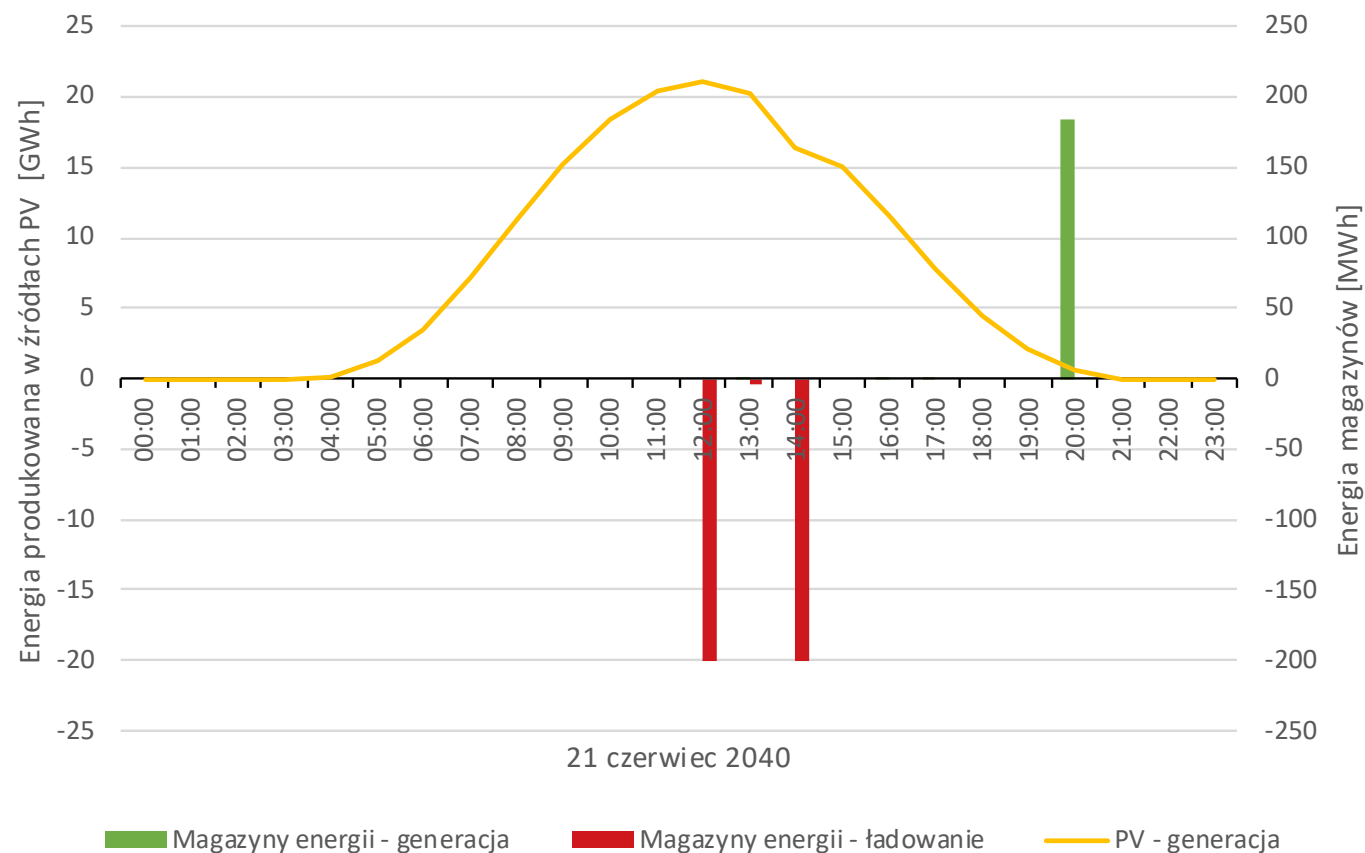


## | Wnioski

- ⇒ W świetle uzyskanych wyników można zaobserwować, iż transformacja energetyki nie może obyć się bez źródeł sterowalnych o stabilnej generacji. W głównej mierze w analizowanym systemie produkcję przejmują elektrownie gazowe (oraz elektrownia jądrowa w scenariuszach SC1 i SC2). Elektrownie gazowe w scenariuszach z wysokim zapotrzebowaniem (scenariusze SC2 i SC4) w pełni wykorzystują dostępny potencjał paliwa jakim jest gaz ziemny. Wynika z tego, że ograniczenie dostępności paliwa gazowego prowadzi do braku pokrycia możliwości zbilansowania systemu i wystąpienia energii niedostarczonej.
- ⇒ W zakresie magazynów energii elektrycznej wiodącą rolę pełnią magazyny wielkoskalowe w technologii BESS LiFePO<sub>4</sub>, które zostały wybudowane w każdym scenariuszu. Pozostałe technologie zaczynają odgrywać zauważalną rolę w przypadkach szczególnych, takich jak brak elektrowni jądrowej bądź ograniczenie dostępności gazu. Warto zaznaczyć, iż magazyny energii nie mogą być traktowane na równi z nowymi mocami wytwórczymi, bowiem nie wytwarzają energii elektrycznej, a służą jedynie do jej przechowywania i przesunięcia jej zużycia na bardziej dogodne okresy z punktu widzenia pracy systemu elektroenergetycznego lub rynku (wyższe ceny).
- ⇒ Przedstawione wyniki mają charakter wstępny i zostały uzyskane z wykorzystaniem zaawansowanego modelu do optymalizacji miksu energetycznego. Modele tej klasy nie są jednak w stanie odwzorować w pełni poprawnie współpracy źródeł OZE z magazynami i źródłami konwencjonalnymi. Z tego powodu obecnie trwają prace nad rozwinięciem metodyki badawczej o zagadnienia szczegółowej weryfikacji bilansowania KSE z wysokim udziałem źródeł OZE i wykorzystaniem magazynów energii.

# | Wyniki analizy krótkoterminowej (1)

➡ Ładowanie magazynu energii przy generacji energii ze źródeł fotowoltaicznych

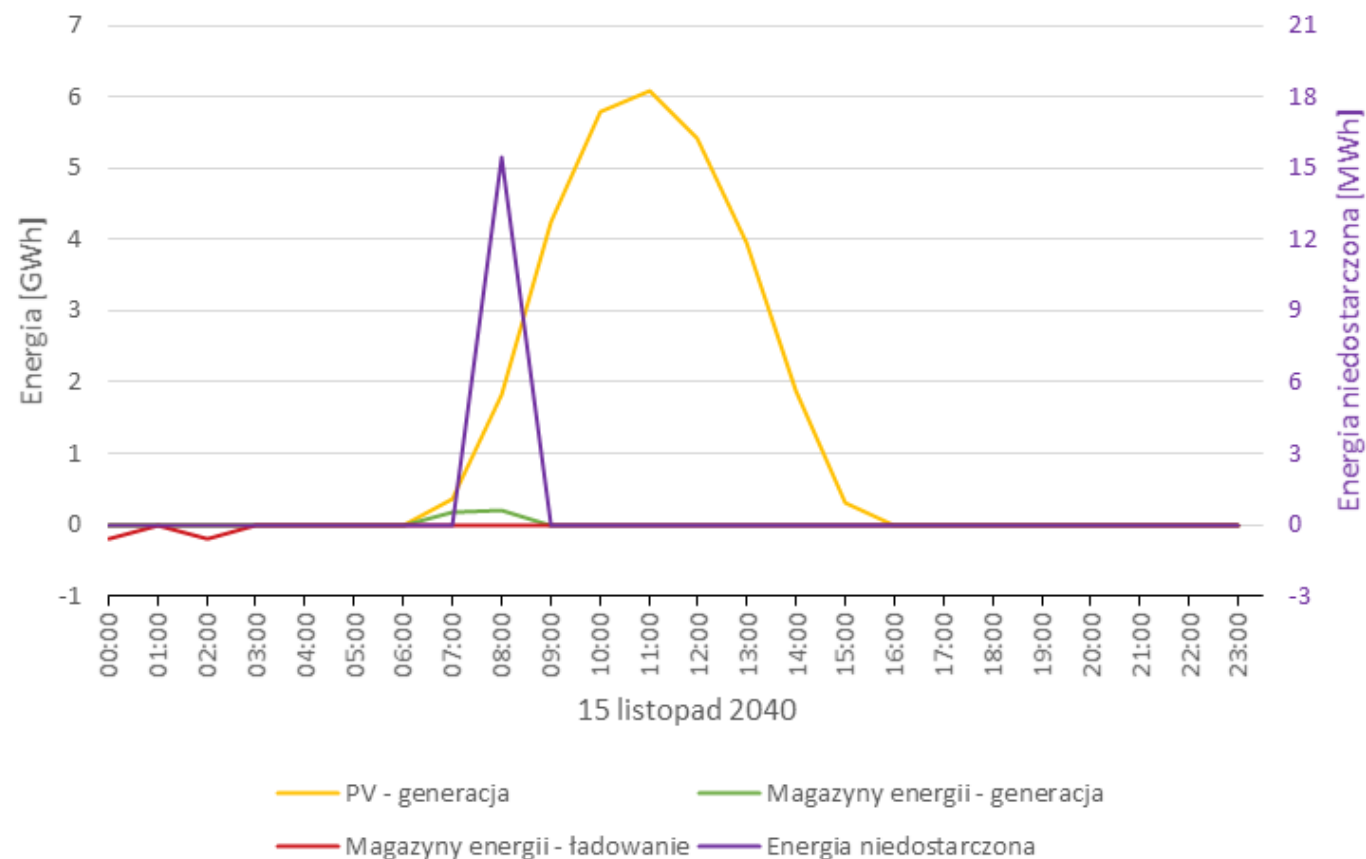


➡ Poziom energii niedostarczonej

Scenariusz	Unserved Energy [MWh]	Godziny z USE [h]
SC1	8289,78	15
SC2	93,04	6

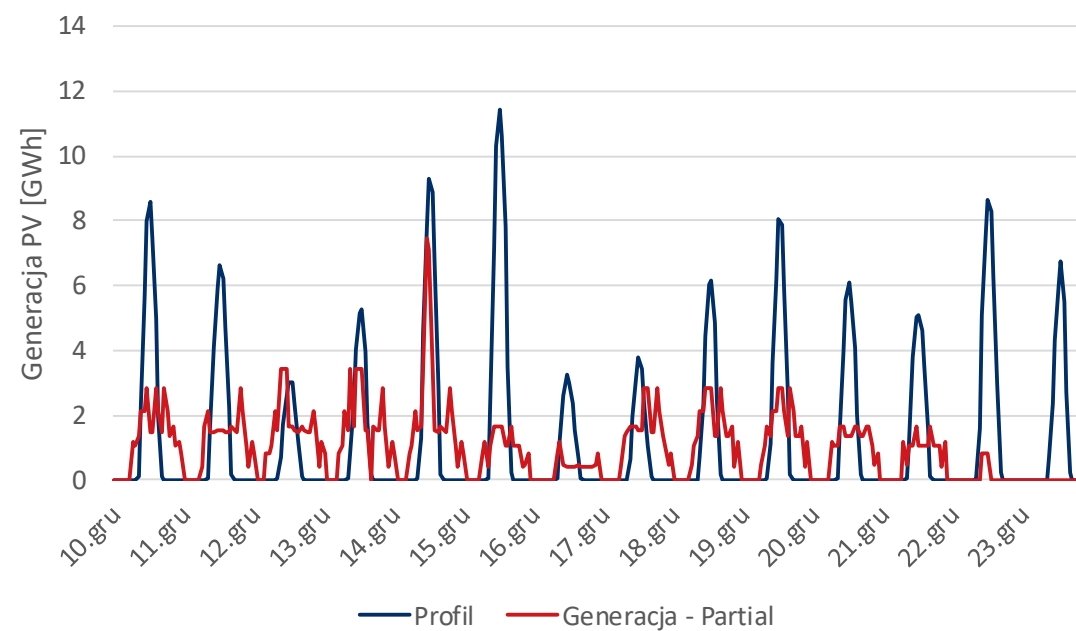
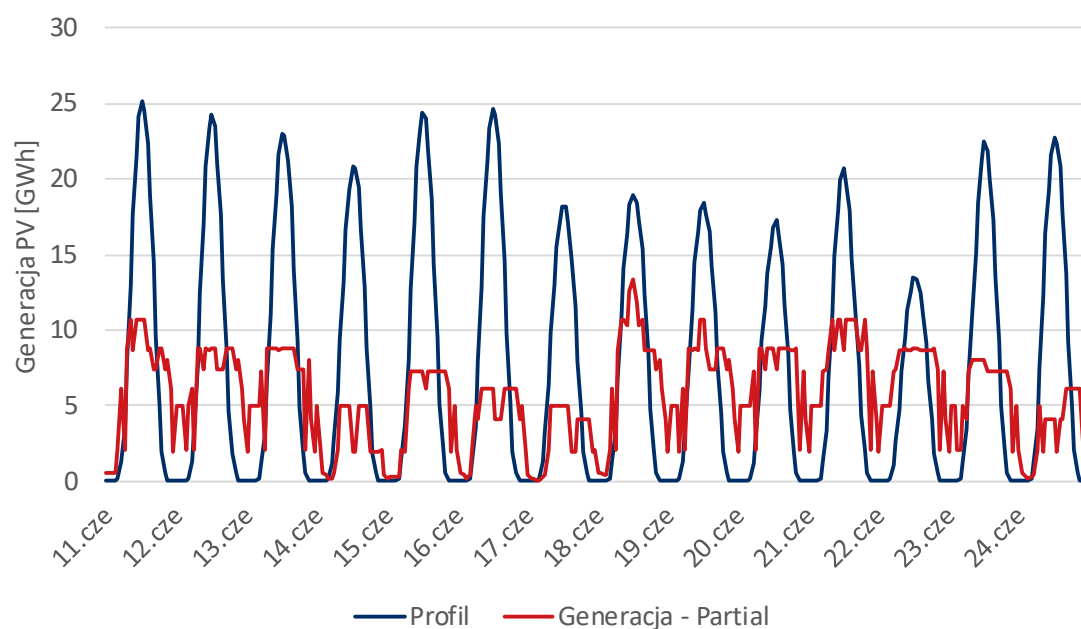
## | Wyniki analizy krótkoterminowej (2)

➡ Generacja energii z magazynu przy występowaniu energii niedostarczonej



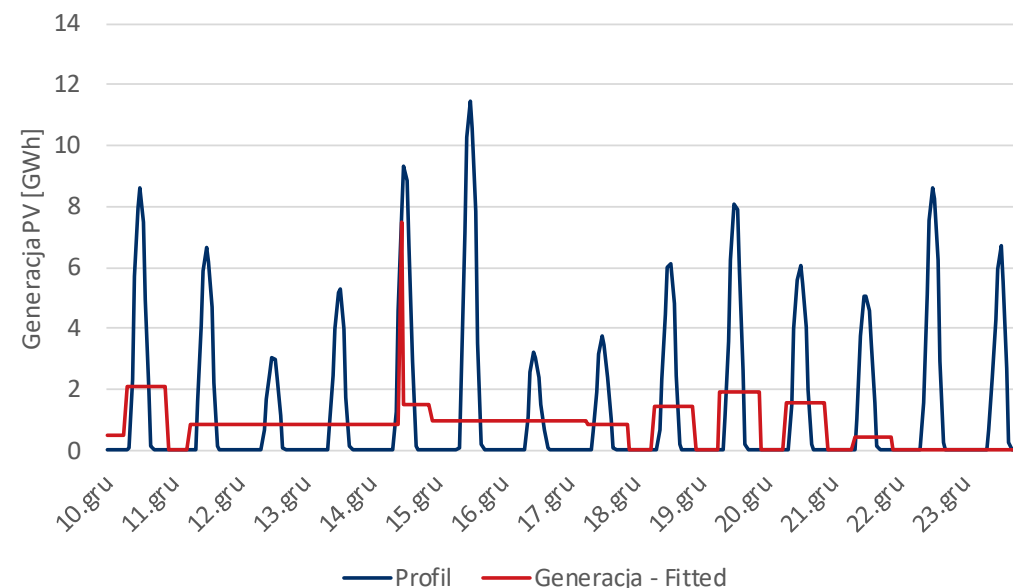
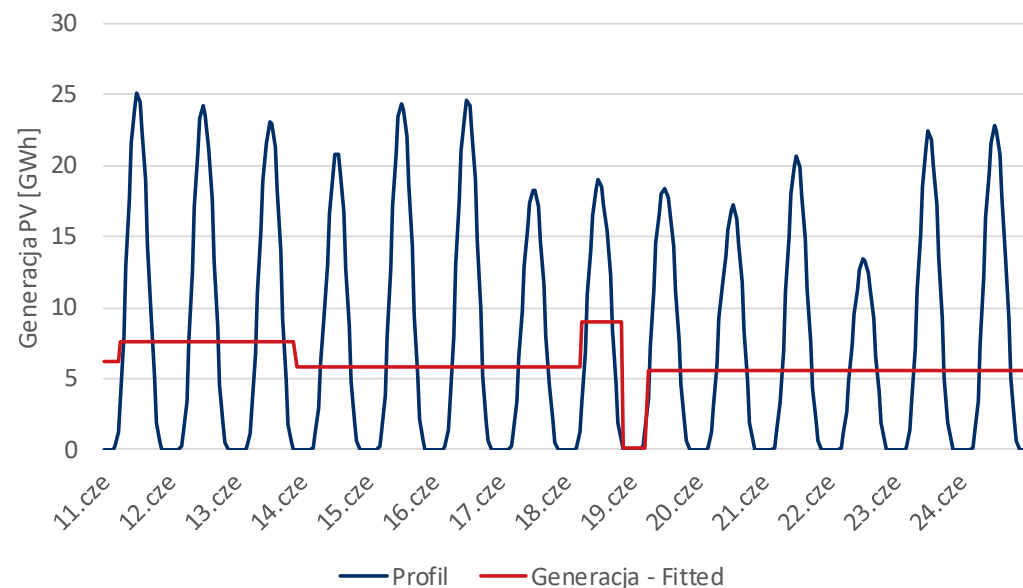
## Analiza dokładności odzwierciedlania parametrów (1)

- ➡ Profil wynikowy generacji ze źródeł fotowoltaicznych w odniesieniu do rzeczywistego profilu generacji – chronologia Partial 30 bloków na miesiąc



## | Analiza dokładności odzwierciedlania parametrów (2)

- ➞ Profil wynikowy generacji ze źródeł fotowoltaicznych w odniesieniu do rzeczywistego profilu generacji – chronologia Fitted 30 blozków na miesiąc



## | Analiza dokładności odzwierciedlania parametrów (3)

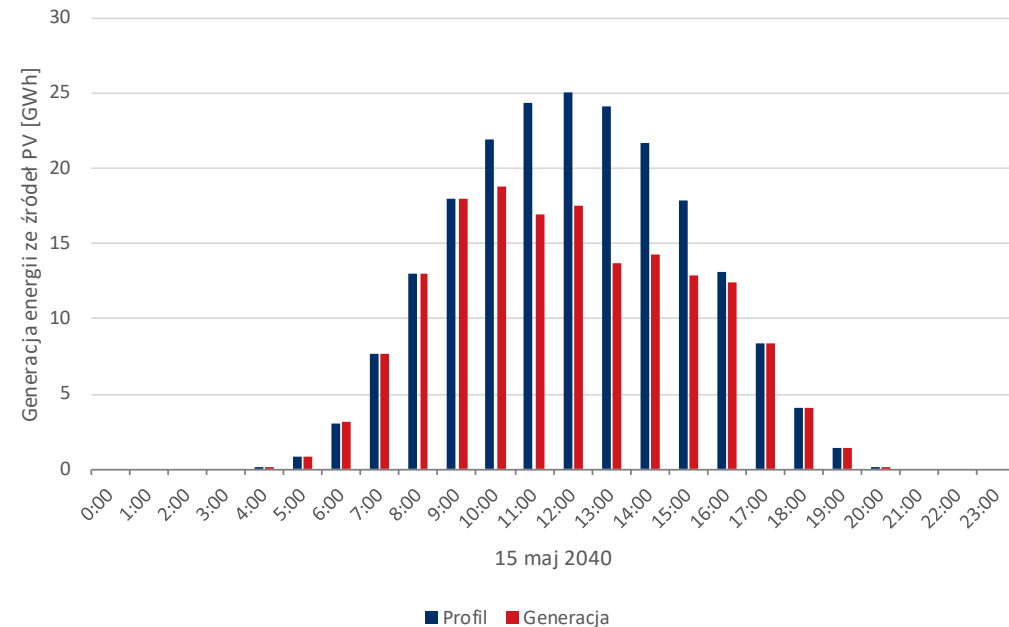
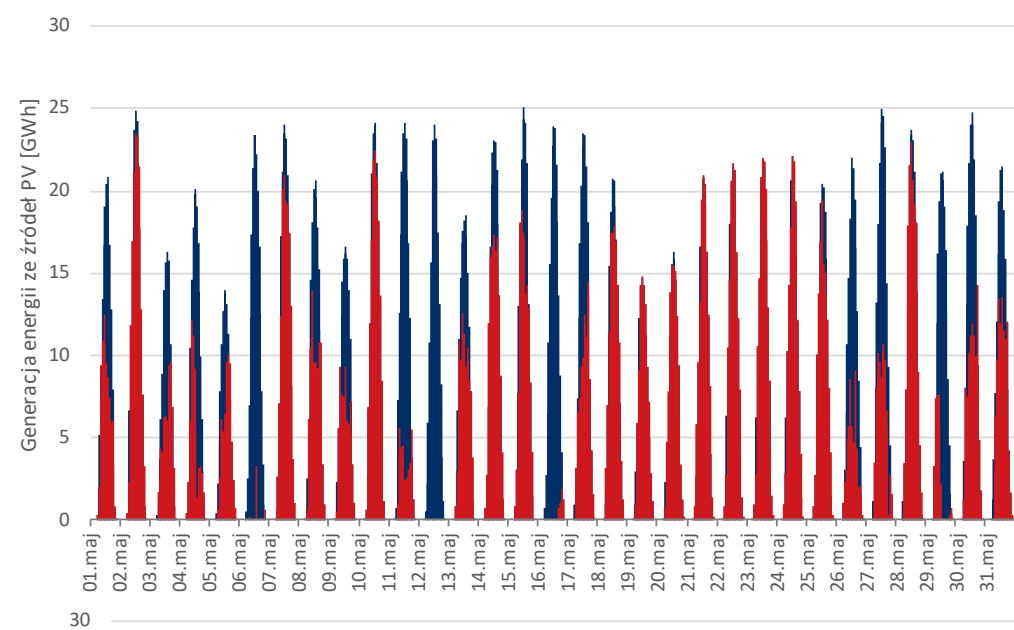
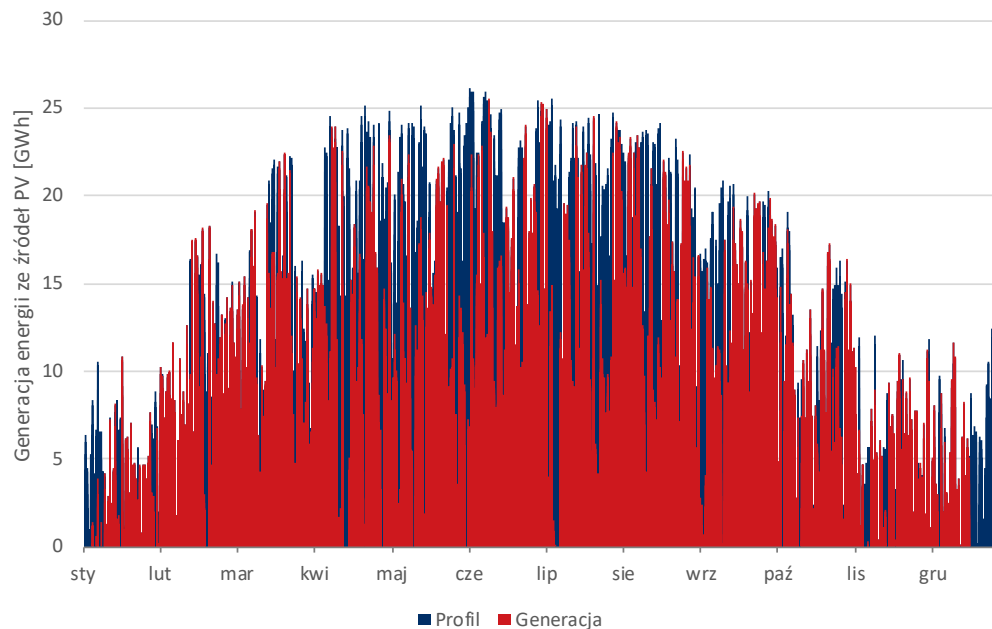
- ⇒ Wpływ zwiększenia liczby blozków na czas obliczeń
- ⇒ Optymalna pod względem dokładności odwzorowania parametrów oraz czasu obliczeń okazała się rozdzielczość 30 bloków na miesiąc.
- ⇒ Obliczenia prowadzone za pomocą modułu LT Plan narzędzia PLEXOS z rozdzielczością godzinową przy uproszczeniu 30 bloków na miesiąc (wynikowo 360 bloków na rok)

Chronologia	Liczba blozków	Czas (hh:mm:ss)
Fitted	4 / dzień	01:22:05
Fitted	8 / dzień	06:13:02
Partial	4 / dzień	01:09:17
Partial	8 / dzień	14:26:34

			Błąd odwzorowania zapotrzebowania [%]		
Chronologia	Liczba bloków	Czas obliczeń [h:min,s]	Średni	Max	Min
Fitted	12 na miesiąc	01:29,2	9,80	57,65	0
	24 na miesiąc	03:11,4	8,09	53,97	0
	30 na miesiąc	01:43,4	0,74	3,63	0

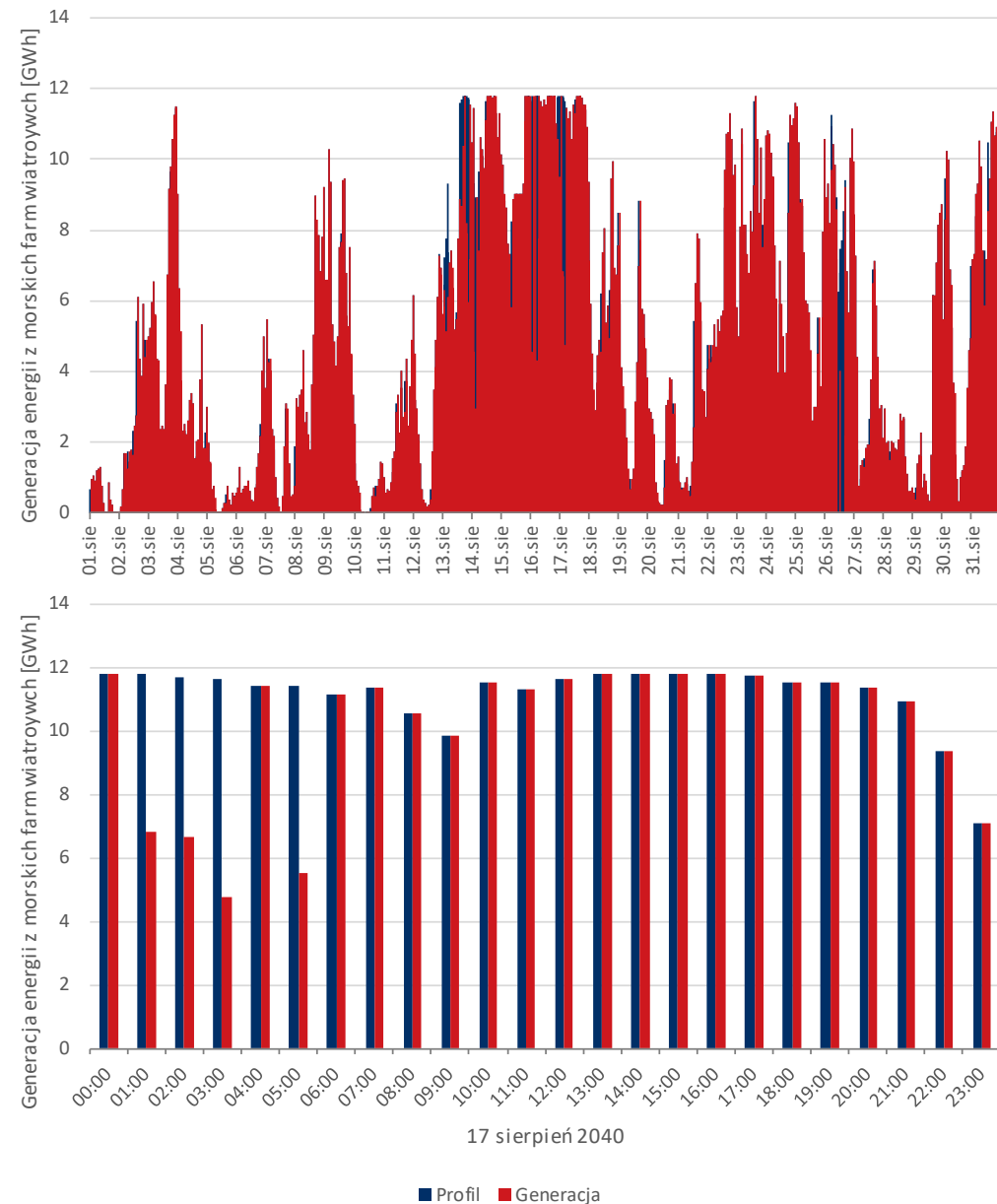
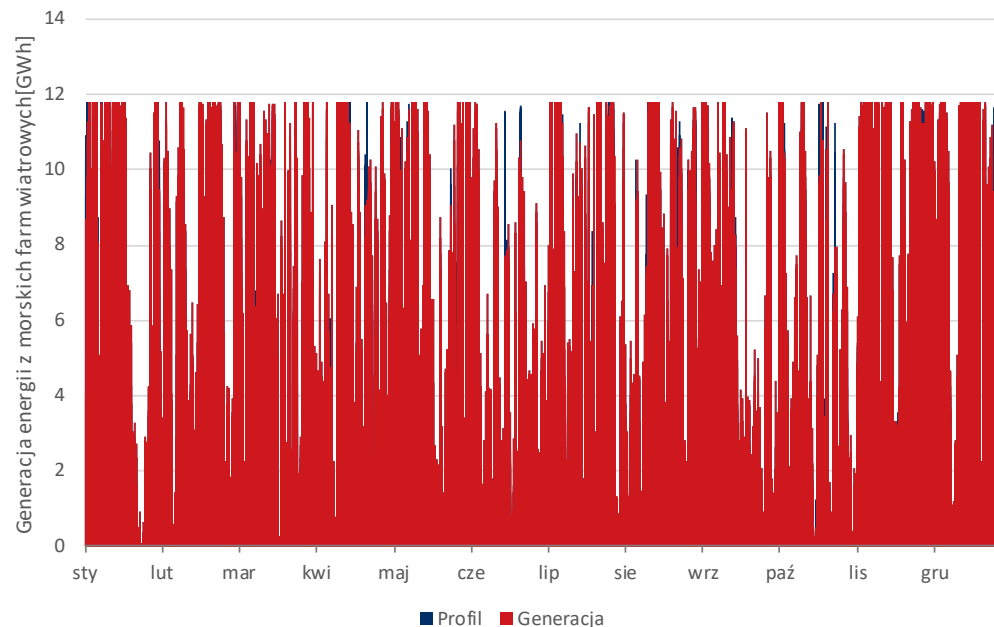
## Analiza dokładności odzwierciedlania parametrów (4)

- ➔ Roczny, miesięczny oraz dzienny profil wynikowy generacji ze źródeł fotowoltaicznych w odniesieniu do rzeczywistego profilu generacji – ST Schedule – scenariusz SC2



## Analiza dokładności odzwierciedlania parametrów (5)

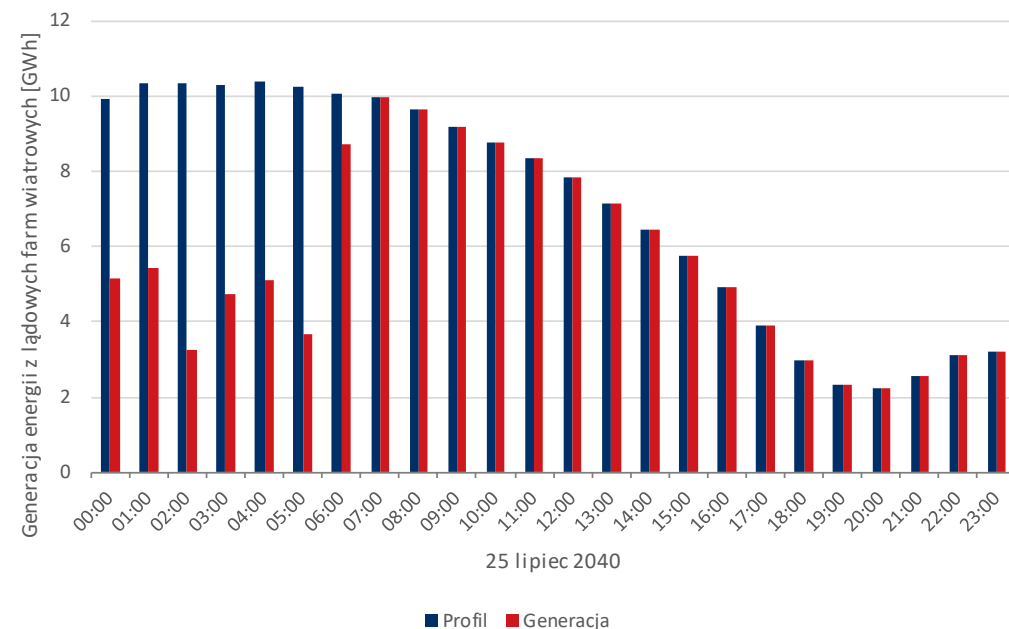
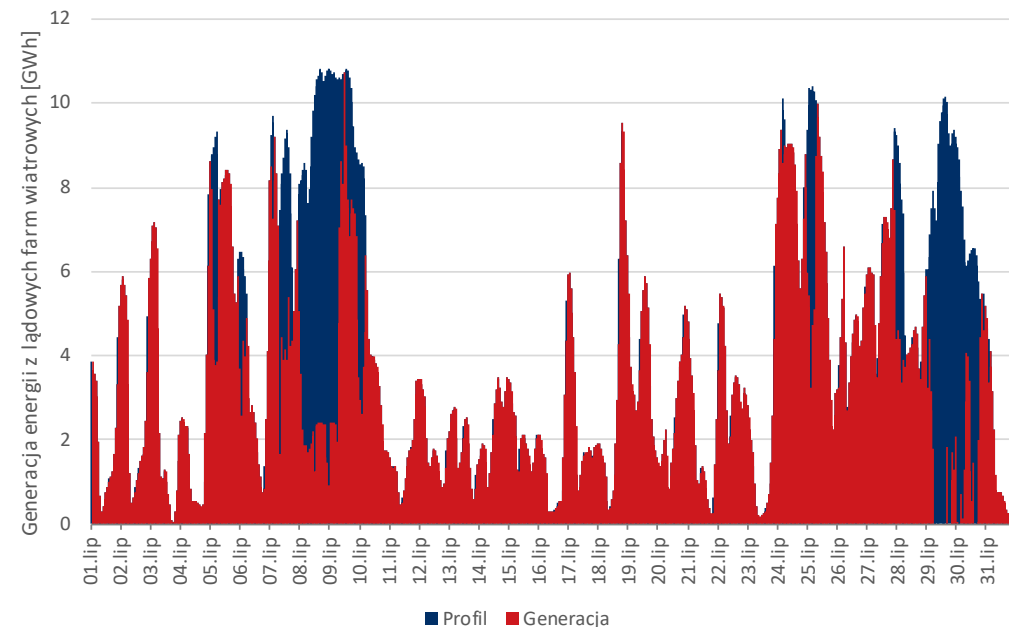
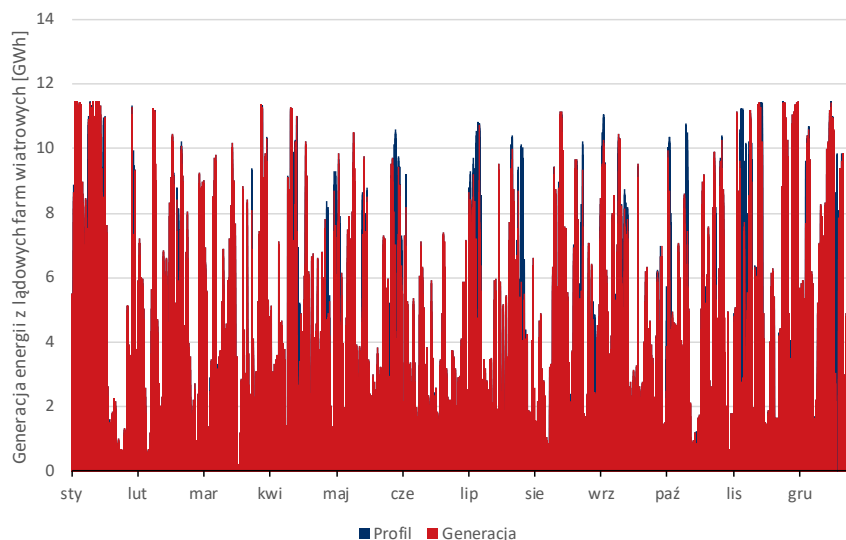
- ➔ Roczny, miesięczny oraz dzienny profil wynikowy generacji z morskich farm wiatrowych w odniesieniu do rzeczywistego profilu generacji – ST Schedule – scenariusz SC2





# Analiza dokładności odzwierciedlania parametrów (6)

- ➔ Roczny, miesięczny oraz dzienny profil wynikowy generacji z lądowych farm wiatrowych w odniesieniu do rzeczywistego profilu generacji – ST Schedule – scenariusz SC2



# Dziękuję za uwagę!

Maksymilian Przygodzki, Rafał Gwóźdź | PSE Innowacje Sp. z o.o.

Bolesław Jankowski | Narodowe Centrum Analiz Energetycznych, PSE S.A.