



Jaka powinna być podstawa systemu elektroenergetycznego w Polsce?

○ czym trzeba wiedzieć projektując transformację
polskiej elektroenergetyki





Jaka powinna być podstawa systemu elektroenergetycznego w Polsce?

O czym trzeba
wiedzieć projektując
transformację polskiej
elektroenergetyki



Raport pod kierunkiem Kamila Moskwika,
Energy Market Advisor, Plentra
Warszawa, 22 maja 2025 r.



Spis treści

Transformacja energetyczna jest tu i teraz!	s.6
Wprowadzenie	s.8
1. Wyłączenie odpowiedzialności	s.10
2. Historyczna ewolucja strony popytowej i podażowej KSE	s.12
3. Czego uczą nas ostatnie lata?	s.16
3.1. Struktura produkcji EE oraz emisje CO ₂	s.16
3.2. Dynamika cen hurtowych EE	s.17
3.3. Wyzwania techniczne	s.19
3.4. Kwestie geopolityczne	s.23
4. Czynniki kształtujące polski miks mocy wytwórczo-magazynowych w horyzoncie roku 2040	s.24
4.1. Prognozowana sytuacja popytowo-podażowa	s.25
4.2. Wymagania normatywne nowego miks	s.29
4.3. Analiza jakościowa technologii wytwórczo-magazynowych przez pryzmat dyspozycyjności, elastyczności oraz inercji	s.30
5. Nowy miks elektroenergetyczny Polski – czyli jaki?	s.32

Wykaz skrótów

Skrót	Objaśnienie
BEV, PHEV	Battery electric vehicle / Plug-in hybrid electric vehicle (pojazd bateryjny / pojazd hybrydowy)
BWR, PWR, SMR	Boiling water reactor, Pressurised water reactor, Small modular reactor (reaktor wrzącej wody, reaktor wodny ciśnieniowy, mały reaktor modułowy)
CO ₂	Dwutlenek węgla
DSR	Demand-side response (odpowiedź storny popytowej w kierunku redukcji lub zwiększenia poboru)
EC	Elektrociepłownia
EE	Energia elektryczna
ESP	Elektrownia szczytowo-pompowa
GW, MW	Gigawat, megawat
GWh, MWh, TWh	Gigawatogodzina, megawatogodzina, terawatogodzina
H ₂	Wodór
JWCD, nJWCD	Jednostka wytwórcza centralnie dysponowana, jednostka wytwórcza niebędąca JWCD



KSE	Krajowy System Elektroenergetyczny
KZEE	Krajowe zużycie EE
KZM	Krajowe zapotrzebowanie na moc chwilową
LEW, MEW	Lądowe elektrownie wiatrowe, morskie elektrownie wiatrowe
MEE	Magazyny energii elektrycznej
MWs	Megawatosekunda (jednostka inercji)
OZE	Odnawialne źródła energii
PKB	Produkt krajowy brutto
PSE	Polskie Sieci Elektroenergetyczne
WB, WK	Węgiel brunatny, węgiel kamienny



Transformacja energetyczna jest tu i teraz!

*E*ra dominacji węgla w polskiej elektroenergetyce właśnie dobiega końca. To nie znaczy, że z tego surowca zrezygnujemy w ciągu najbliższych lat, tak jak zakończy się historia wydobycia i spalania węgla brunatnego w Wielkopolsce Wschodniej, gdzie w 2026 r. zostanie wyłączony ostatni „brunatny” blok, ale jego udział przestaje dominować. Gdy w miksie energetycznym węgla jest coraz mniej, a dynamicznie rośnie udział OZE, nasuwa się pytanie - co ma zapewnić podstawę systemu?

Od wiosny do jesieni w słoneczne dni produkcja energii ze źródeł słonecznych jest większa niż z węgla. „To co uważano za nierealne, stanie się rzeczywiste” – śpiewa Stare Dobre Małżeństwo i tak dzieje się teraz w energetyce, bo gdyby ktoś 5 lat temu, w pierwszym roku pandemii Covid 19 przewidywał taką sytuację, to uznany byłby za chorego. Psychicznie. Pół dekady temu roczne wydobycie węgla kamiennego sięgało 60 mln ton rocznie, a teraz spadło do niewiele ponad 40 mln. Przy takiej dynamice na koniec tej dekady, węgiel może stać się na trwałe „mniejszościowym udziałowcem” miks energetycznego, a w kolejnej pięcioletce z systemu wypadnie nam Bełchatów – największa elektrownia węglowa nie tylko w Polsce, ale i Europie. Staje przed nami wielkie wyzwanie zbudowania w ciągu najbliższych 10 lat nie tylko różnicowanego i niskoemisyjnego miks, ale i zapewnienie dostaw taniej energii przez 24 godziny na dobę.

O ile w 2020 r. moc zainstalowana fotowoltaiki w Polsce wynosiła blisko 4 GW, a w wietrze na lądzie mieliśmy 6,6 GW, to na koniec 2024 moc elektrowni słonecznych wzrosła do 20 GW, zaś w onshore wind zanotowaliśmy 10,5 GW. Tak słaby wynik wiatru, to efekt tzw. ustawy odległościowej, która skutecznie zamroziła rozwój jednego z najtańszych źródeł energii. W 2025 r. wiatr na lądzie powinien zostać odblokowany, zaś z końcem dekady do systemu ma zostać przyłączonych blisko 6 GW mocy z morskich wiatraków. W 2030 r. wedle rządowych planów OZE ma stanowić połowę miks energetycznego, ale widząc dynamikę przyrostu tych mocy, możemy iść na rekord.

W najbliższych latach przyjdzie nam się zmierzyć z sytuacjami, które dotychczas były w sferze symulacji i teoretycznych rozważań. I czas ten nadejdzie szybciej niż nam się wydaje. Kompas energetyczny Polskich Sieci Elektroenergetycznych informuje codziennie w których godzinach należy z energii korzystać a w których zużycie ograniczać. I w takim rytmie zaczniemy konsumować płynący z gniazdka prąd.



Magazyny energii pojawią się nie tylko w domach prosumentów, ale coraz częściej będą uzupełnieniem farm fotowoltaicznych i wiatrowych. Dzięki temu zaczniemy spłaszczać piki – zarówno te produkcyjne w ciągu dnia gdy energia gwałtownie tanieje przy słonecznej lub wietrznej pogodzie, jak te związane z zapotrzebowaniem w czasie popołudniowego bilansowania, gdy produkcja energii ze słońca szybko spada i do systemu trzeba dostarczyć gigawaty mocy.

Mówienie, że węgiel będzie stanowił podstawę systemu elektroenergetycznego do czasu gdy powstanie pierwsza elektrownia jądrowa jest w pewnym sensie zaklinaniem rzeczywistości. Węgiel może stanowić element podstawy, ale nie jej całość. Po drugie mając 30 GW mocy zainstalowanej OZE musimy zakładać, że źródła zależne od pogody stanowią już część podstawy i wreszcie pytanie o to jakie źródło ma stabilizować system z coraz większym udziałem elektrowni zależnych od pogody. Naturalnym rozwiązaniem jest gaz, bo jest to najbardziej elastyczne źródło, mamy jego zdywersyfikowane dostawy i powinniśmy myśleć o perspektywie wykorzystania wodoru. Po trzecie wreszcie transformacja jest tu i teraz. Nie mamy czasu aby czekać na pierwszą elektrownię jądrową, która i tak na tle całego systemu niewiele zmieni.

Niniejszy raport nie jest gotowym przepisem na rozwiązanie problemu, ale dokonuje diagnozy i ma na celu pobudzić dyskusję na temat podstawy systemu energetycznego, która jest kluczowa dla trwającej transformacji.

Jedną z inspiracji dla powstania tego raportu była dyskusja podczas spotkania Klubu Energetycznego, które organizuję od pięciu lat. Jeden z uczestników słusznie zauważył, że źródła OZE z uwagi na rosnący potencjał wytwórczy powinny być częścią podstawy systemu. Uznałem, że warto rozwinąć ten wątek mając na uwadze spadający udział węgla w produkcji energii i zapowiedzi powrotu do gazu jako paliwa transformacji.

Michał Niewiadomski



Wprowadzenie

Ostatnia dekada polskiej elektroenergetyki obfituje w zjawiska wcześniej nie obserwowane. Zjawiska te – zachodzące zarówno po stronie popytowej, jak i po stronie podaży – są świadectwem postępującej w Polsce transformacji energetycznej, która stawia przed sektorem wyzwanie stworzenia nowego miksu oraz systemu elektroenergetycznego.

Z uwagi na rzeczywistą złożoność systemu elektroenergetycznego, planowanie jego rozwoju (w tym planowanie rozwoju miksu mocy) jest zagadnieniem o bardzo wysokim poziomie skomplikowania. Na potrzeby niniejszego raportu dokonano prezentacji wybranych czynników determinujących decyzje w zakresie rozwoju miksu mocy wytwórczo-magazynowych Polski. Jednocześnie, o ile szereg czynników¹ pozostał poza zakresem niniejszej analizy, należy zaznaczyć, że obszary te są niezbędnym elementem szczegółowych prac analityczno-prognostycznych związanych z rozwojem i bezpieczeństwem pracy KSE.

W niniejszym raporcie poddano analizie ewolucję KSE na przestrzeni ostatniej dekady (rozdział 2) ze szczególnym uwzględnieniem ostatnich pięciu lat i obserwowanych zjawisk oraz wyzwań (rozdział 3) mających wpływ na emisję CO₂, ceny hurtowe EE, a także – co ma znaczenie kardynalne – na bezpieczeństwo bieżącej pracy (stabilność operacyjną) systemu.

Wnioski płynące z analizy historycznej posłużyły do sformułowania pryncypiów rozwoju miksu mocy w Polsce, a także do dokonania przeglądu technologii wytwórczo-magazynowych pod kątem wspierania bezpieczeństwa technicznego pracy KSE (rozdział 4).

Ostatni rozdział (rozdział 5) prezentuje wyniki analizy i modelowania rozwoju dwóch możliwych wariantów miksu mocy w horyzoncie roku 2040.

Kluczowe wnioski płynące z analizy są następujące:

- z punktu widzenia strony popytowej, na znaczeniu zyskują nowe, nie obserwowane wcześniej zjawiska w sektorze elektroenergetycznym:
 - wzrost liczby pojazdów elektrycznych czy pomp ciepła,
 - rosnący sektor sztucznej inteligencji przekładający się na zapotrzebowanie na rozwój centrów danych
 - rozwój sektora produkcji zielonego wodoru w oparciu o elektrolizę zasilaną energią elektryczną z odnawialnych źródeł energii (OZE)
- powyższe czynniki łącznie warunkują przyszły wzrost KZEE, a także – co równie ważne – wzrost oraz zmiany przyszłego dobowogodzinowego profilu KZM

- nowy miks mocy wytwórczo-magazynowych KSE będzie musiał zapewnić pokrycie rosnącego KZEE, a także bilansowanie KZM w ujęciu chwilowym
- kluczowymi wyzwaniami związanymi z bilansowaniem chwilowego KZM będą okresy suszy OZE (Dunkelflaute) oraz okresy wysokiej (lub nadmiarowej) generacji z pogodozależnych OZE
- okresy te już dzisiaj stanowią wyzwanie dla bilansowania KSE, czego wyrazem są m.in. rosnące wolumeny redukcji OZE, konieczne jednak z uwagi na dotrzymanie technicznego bezpieczeństwa pracy systemu
- nowy miks polskiej elektroenergetyki musi cechować się odpowiednim poziomem mocy:
 - dyspozycyjnych (tj. pozwalających generować moc niezależnie od warunków pogodowych),
 - elastycznych (pozwalających na absorpcję nadmiaru generacji OZE oraz szybką zmianę obciążenia w okresach duck curve)
 - zapewniających inercję (tj. zdolność do przeciwstawienia się nagłej zmianie częstotliwości w momencie awarii)
- poza powyższymi kwestiami technicznymi związanymi z bezpieczeństwem pracy systemu, rozwój miksów mocy musi uwzględniać:
 - czynniki geopolityczne warunkujące dostępność paliw (gaz, uran) oraz technologii (panele PV, turbiny wiatrowe, baterijne MEE, inwertery, komponenty sieciowe)
 - dążenie do minimalizowania kosztu rozwoju systemu oraz dostaw energii do odbiorców końcowych
 - dążenie do redukcji emisji
 - dążenie do uzyskania jak największego udziału local content
 - ryzyko ograniczonej dostępności mocy w sektorze budownictwa energetycznego.

Wykonana analiza dwóch wariantów rozwoju miksów (więcej OZE / mniej atomu oraz mniej OZE / więcej atomu) nie wskazuje jednoznacznego zwycięzcy.

Obydwa miksy charakteryzują się zbliżonymi poziomami nakładów inwestycyjnych, kosztów produkcji EE oraz uzyskanymi redukcjami emisji.

Miks z większym udziałem OZE pozwala na osiągnięcie nieco niższych poziomów cen hurtowych EE, lecz jest przy tym miksem o mniejszym udziale mocy zapewniających inercję oraz potencjalnie stwarzającym większe wyzwania w zakresie bilansowania i zapewnienia bezpieczeństwa pracy systemu.

¹ Analizy wystarczalności zasobów, analizy stabilności częstotliwościowej i napięciowej, analizy zwarciowej, analizy przyłączeniowej, analizy rozprężowej.



1 Wyłączenie odpowiedzialności

Zaprezentowane w niniejszym raporcie perspektywy na przyszłość mają charakter ekspercko-badawczy i są dostarczane na zasadzie „takie jakie są”.

Dane i analizy w niniejszym raporcie opierają się na najlepszej wiedzy i szacunkach na moment przygotowania. Pomimo dołożenia należytej staranności, nie możemy zagwarantować absolutnej bezbłędności wykonanych analiz, co wynika z wysokiego stopnia skomplikowania analizowanych obszarów.

Przedstawione perspektywy na przyszłość są wizją jednego lub kilku z bardzo wielu możliwych stanów przyszłej rzeczywistości. Z tego względu, perspektywy na przyszłość są prezentowane bez żadnej gwarancji (wprost lub dorozumianej) co do ich pewności i materializacji oraz przydatności komercyjnej lub inwestycyjnej.

W szczególności, przedstawione perspektywy na przyszłość nie stanowią i nie powinny być odczytywane jako forma doradztwa inwestycyjnego.

Autorzy niniejszego opracowania nie mogą odpowiadać za ewentualne decyzje podjęte w oparciu o prezentowane analizy przeszłe oraz perspektywy na przyszłość, niezależnie od tego, czy okazały się trafne czy nie.

Wykorzystanie niniejszego raportu przez jakąkolwiek osobę trzecią, w jakimkolwiek celu, nie powinno zwalniać i nie zwalnia takiej osoby trzeciej z obowiązku dołożenia należytej staranności przy weryfikacji treści dokumentu. Jakiegokolwiek wykorzystanie tego dokumentu przez osobę trzecią, poleganie na nim lub decyzje, które mogą zostać podjęte na jego podstawie, są wyłączną odpowiedzialnością osoby trzeciej.

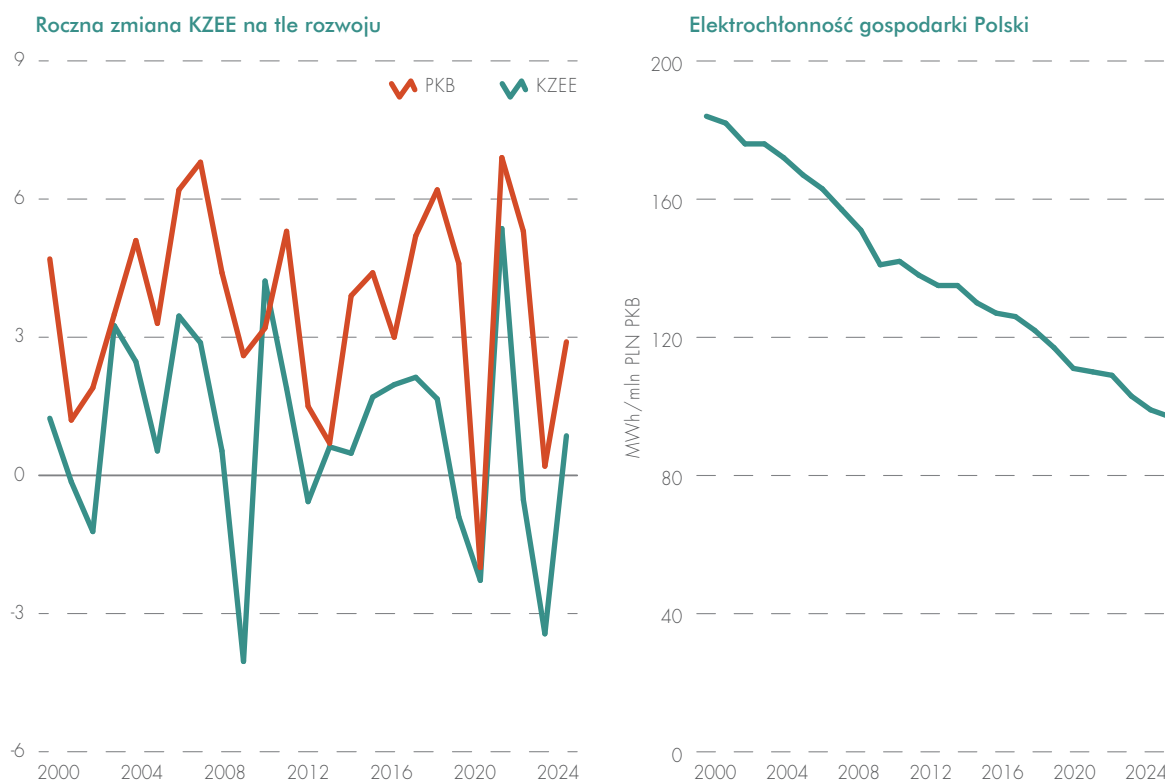
Autorzy nie przyjmują żadnych zobowiązań ani odpowiedzialności w stosunku do osób trzecich, ani nie ponoszą żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody poniesione przez osoby trzecie w wyniku decyzji lub działań opartych na niniejszym dokumencie.

2

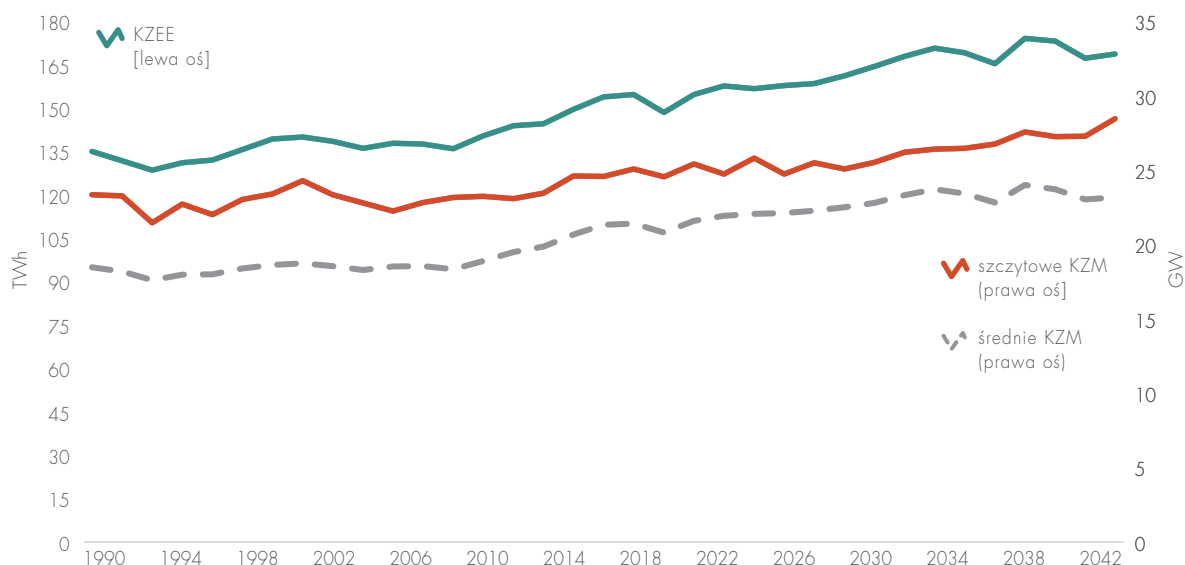
Historyczna ewolucja strony popytowej i podaźowej KSE

Jeszcze dekadę temu strona popytowa krajowej elektroenergetyki – obejmująca zarówno KZEE (MWh), jak i KZM (MW) – kształtowana była głównie przez czynniki uchodzące za „tradycyjne”. Czynniki te to głównie tempo wzrostu gospodarki² i ewolucja elektrochłonności³ (Rys. 1a), a także względnie powtarzalne i przewidywalne zachowania konsumenckie kształtujące dobowogodzinowy profil KZM.

RYS. 1a TRADYCYJNE CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA KZEE ORAZ KZM



RYS. 1b EWOLUCJA ROCZNEGO KZEE ORAZ KZM W POLSCE



Źródło: obliczenia własne w oparciu o dane GUS oraz PSE

Ostatnie pięć lat w ujęciu krajowym oraz globalnym pokazuje jednak, iż na znaczeniu zyskują nowe, nie obserwowane wcześniej zjawiska. Zjawiska te – stymulowane rozwojem technologii i wpisujące się w szeroko pojęty trend elektryfikacji i łączenia sektorów – obejmują:

- wzrost liczby pojazdów elektrycznych czy pomp ciepła (Rys. 2),
- rosnący sektor sztucznej inteligencji przekładający się na zapotrzebowanie na rozwój centrów danych
- spodziewany rozwój sektora produkcji zielonego wodoru w oparciu o elektrolizę zasilaną energią elektryczną z odnawialnych źródeł energii (OZE).

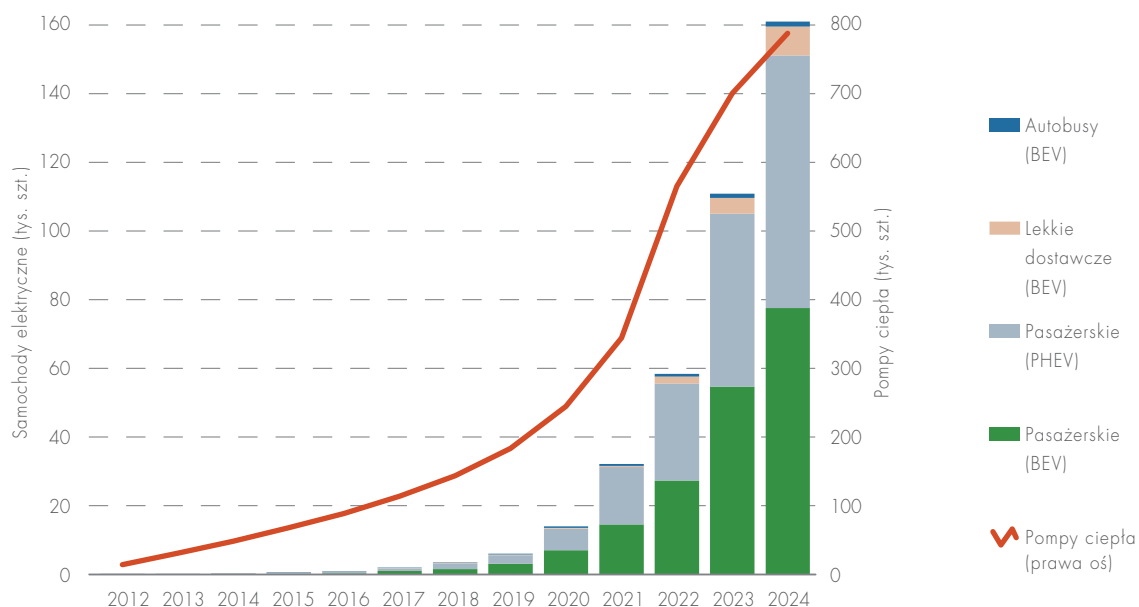
Powyższe czynniki łącznie warunkują przyszły wzrost KZEE, a także – co równie ważne – wzrost oraz zmiany przyszłego dobowogodzinowego profilu KZM, determinującego wymogi nowego miksu mocy wytwórczo-magazynowych KSE (por. szerzej rozdział 4).

2 Mierzone przez produkt krajowy brutto (PKB).

3 Rozumianej jako ilość EE zużywanej do wygenerowania 1 mln PLN PKB.

Powyższe czynniki łącznie warunkują przyszły wzrost KZEE, a także – co równie ważne – wzrost oraz zmiany przyszłego dobowogodzinowego profilu KZM, determinującego wymogi nowego miksu mocy wytwórczo-magazynowych KSE (por. szerzej rozdział 4).

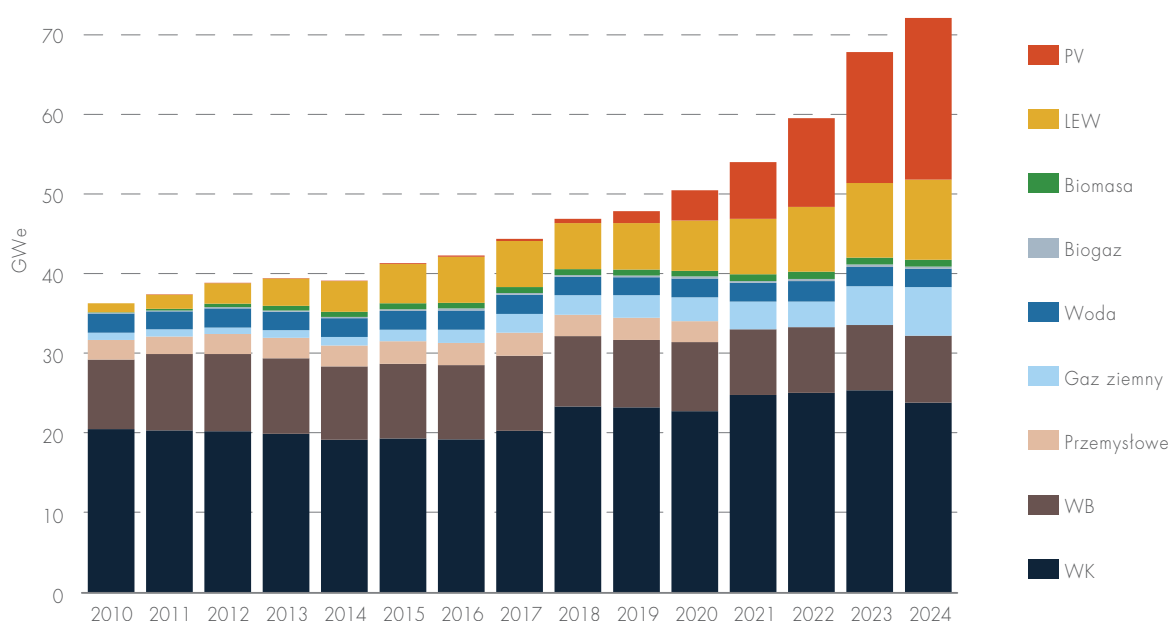
RYS. 2 ROZWÓJ SEGMENTU POMP CIEPŁA ORAZ SAMOCHODÓW ELEKTRYCZNYCH W POLSCE



Źródło: dane EAFO oraz PORT PC

Z punktu widzenia strony podaźowej, ostatnia dekada polskiej elektroenergetyki to przede wszystkim silny przyrost mocy elektrowni fotowoltaicznych (PV), a także stopniowy wzrost mocy lądowych elektrowni wiatrowych (LEW) oraz mocy opalanych gazem ziemnym (Rys. 3).

RYS. 3 EWOLUCJA MIKSU MOCY WYTWÓRCZYCH ENERGII ELEKTRYCZNEJ W POLSCE



Źródło: dane PSE oraz IRENA

Należy zwrócić uwagę, że zilustrowana na Rys. 3 ewolucja miksu mocy wytwórczych w Polsce oznacza fundamentalną jakościową zmianę w zakresie technologii oraz ich wpływu na funkcjonowanie KSE. Zasadnicze cechy jakościowe odróżniające rozwijane w KSE moce pogodozależne (PV, LEW) od mocy ciepłych to:

- brak emisji CO₂, wynikająca z braku konieczności spalania paliw kopalnych
- zerowy koszt zmienny wytwarzania, będący pochodną braku kosztu paliwa oraz kosztu CO₂
- ograniczona dyspozycyjność (będąca bezpośrednim następstwem pogodozależności)
- przyłączenie przez inwerter, skutkujące brakiem inercji oraz bardzo ograniczoną zdolnością utrzymania wymaganych poziomów prądów zwarciovych
- większe rozproszenie geograficzne oraz mniejsza skala pojedynczej instalacji (zwłaszcza w przypadku instalacji dachowych PV).

Analizę wpływu zmian struktury miksu mocowego Polski na ekologiczne, ekonomiczne i techniczne aspekty funkcjonowania KSE prezentuje rozdział 3.

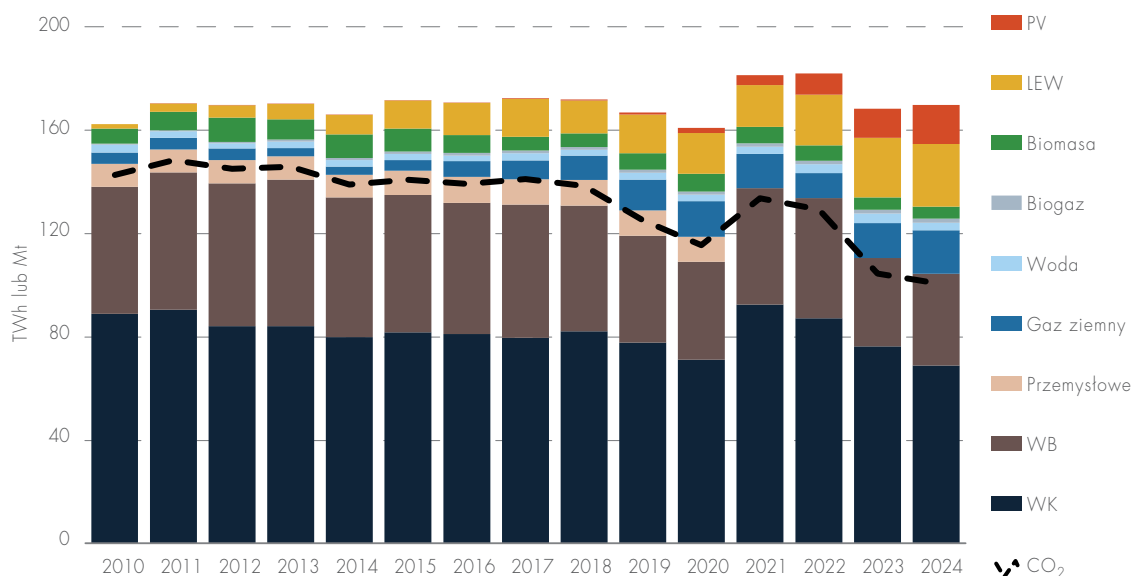


3

Czego uczą nas ostatnie lata?

3.1 Struktura produkcji EE oraz emisje CO₂

Eologicznym aspektem pracy KSE związanym ze wzrostem mocy i produkcji EE ze źródeł gazowych oraz ze źródeł PV i LEW jest spadek wolumenów emisji CO₂ z elektroenergetyki (Rys. 4), które w roku 2024 były o ok. 13% niższe niż w roku 2020 oraz o ok. 29% niższe niż w latach 2010-2015.

RYS. 4 EWOLUCJA MIKSU PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ ORAZ EMISJI CO₂ W POLSCE

Źródło: dane ARE, PSE oraz IRENA

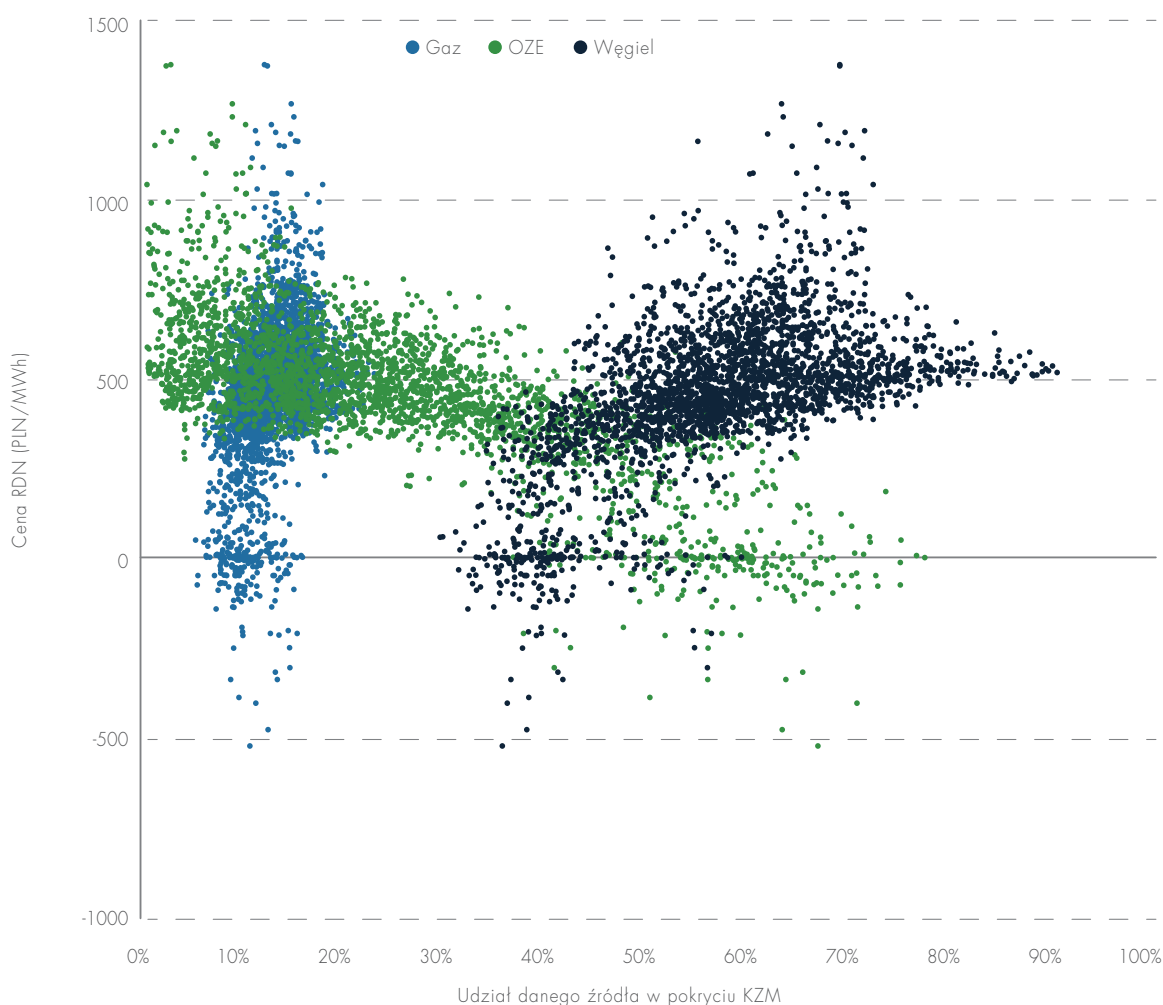
3.2 Dynamika cen hurtowych EE

Ekonomicznym aspektem pracy KSE związanym ze wzrostem mocy i produkcji EE ze źródeł gazowych oraz ze źródeł PV i LEW jest ich wpływ na ceny hurtowe EE, przy czym:

Godziny lub dni o wysokiej generacji PV i LEW cechują się presją na spadek cen, w tym coraz częstszym występowaniem cen ujemnych (por. dalej), natomiast godziny lub dni o niskiej generacji PV i LEW cechują się wysokimi cenami (Rys. 5).

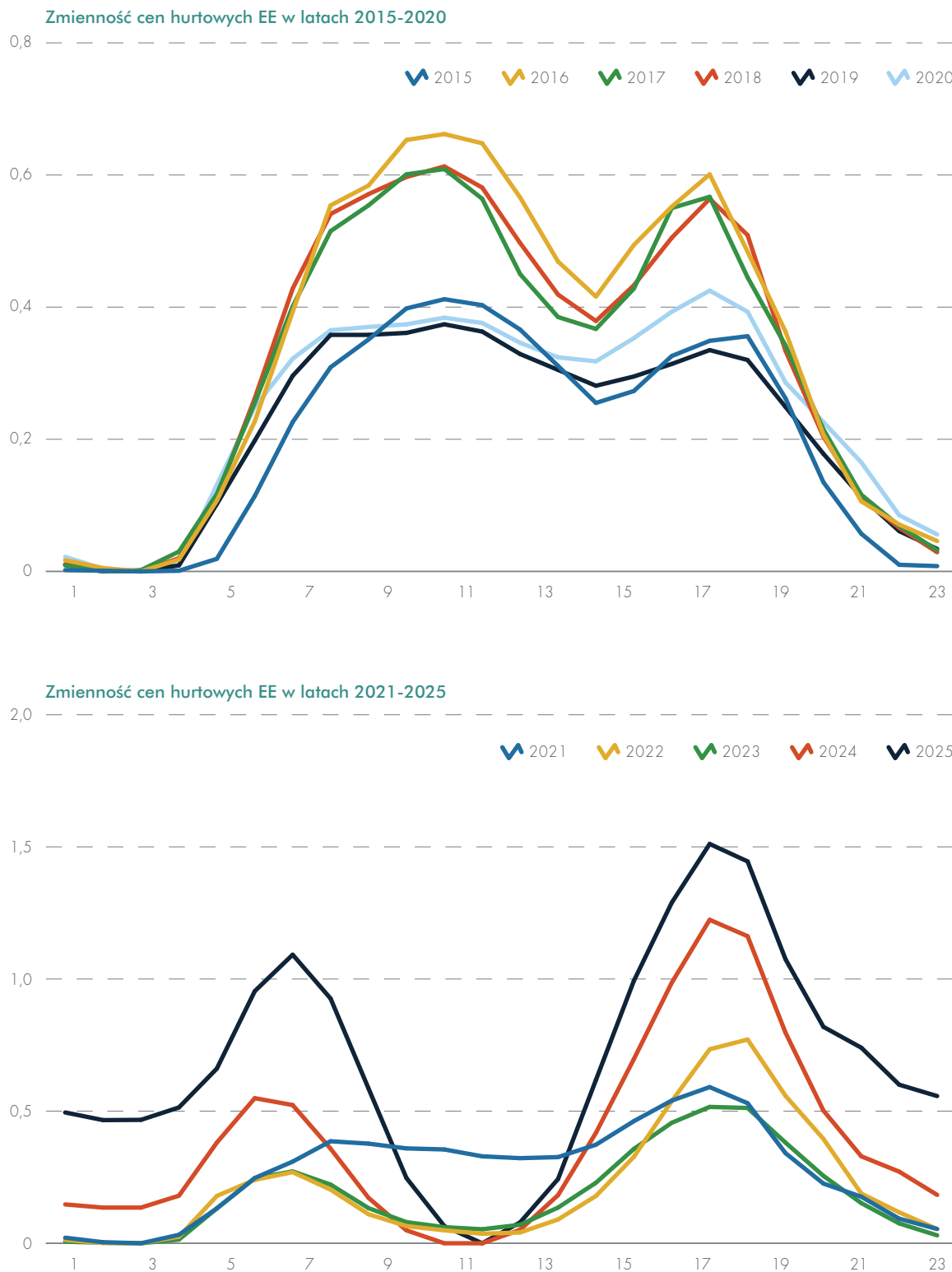
- Presja spadkowa cen EE w okresach o wysokiej generacji PV i LEW wynika z faktu, że źródła te, będąc wytwórcami o zerowym koszcie zmiennej produkcji, zastępują źródła droższe, tj. ponoszące koszt paliwa oraz CO₂;
- Z uwagi na powyższą zależność, dobowogodzinowa zmienność profilu cen wzrosła na przestrzeni lat 2015-2025 (Rys. 6).

RYS. 5 GODZINOWY UDZIAŁ GAZU, OZE I WĘGLA W KZM A POZIOM CEN HURTOWYCH EE W POLSCE (STYCZEŃ-KWIECIEŃ 2025)



Uwaga: OZE oznacza PV i LEW, Węgiel oznacza WB i WK. Źródło: opracowanie własne w oparciu o dane ENTSO-E

RYS. 6 ZMIENNOŚĆ ŚREDNIOROCZNEGO PROFILU DOBOWOGODZINOWEGO CEN HURTOWYCH EE W POLSCE (DANE ZNORMALIZOWANE)



3.3 Wyzwania techniczne

Technicznym aspektem pracy KSE związanym ze wzrostem mocy i produkcji EE z pogodozależnych OZE są przede wszystkim wyzwania dotyczące bilansowania KZM, widoczne zwłaszcza w okresach tzw. „suszy OZE” (niem. Dunkelflaute), oraz okresach wysokiej (lub nadmiarowej) generacji mocy.

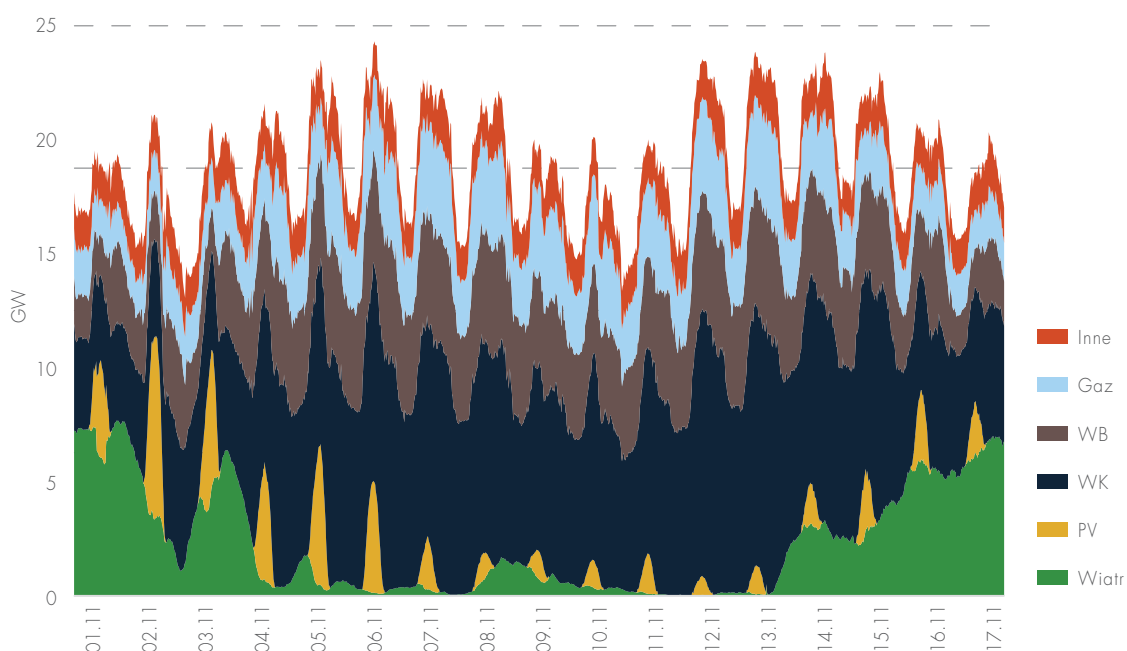
Okresy Dunkelflaute, czyli wielogodzinne lub wielodniowe warunki bardzo niskiej lub zerowej wietrzności i/lub nasłonecznienia oznaczają brak możliwości produkcji EE z tych źródeł w ilościach wystarczających na pokrycie KZE. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest konieczność, aby w systemie istniała odpowiednia ilość dyspozycyjnych mocy rezerwowych zdolnych pokrywać KZM w okresach niskiej generacji OZE. Mocami rezerwowymi zapewniającymi bilansowanie systemu w okresach suszy OZE mogą być:

- Źródła ciepłne,
- Naładowane moce magazynowe,
- Moce DSR lub
- Moce importowe

Należy wskazać, że powyższe wyzwanie potęguje się zwłaszcza, gdy okres braku generacji z OZE występuje na równi z bardzo wysokimi poziomami KZM.

Istotę Dunkelflaute przedstawia Rys. 7, obrazując okres 10 dni, w których chwilowe współczynniki wykorzystania mocy przez elektrownie wiatrowe nie przekraczały 10%, a w wielu następujących po sobie godzinach były bliskie 0%. W tych dniach KSE polegało głównie na źródłach dyspozycyjnych (WB, WK, gaz, biomasa/biogaz, ESP).

RYS. 7 ILUSTRACJA OKRESU DUNKELFLAUTE W POLSCE NA PRZYKŁADZIE DNI 4 LISTOPADA – 14 LISTOPADA 2024 ROKU



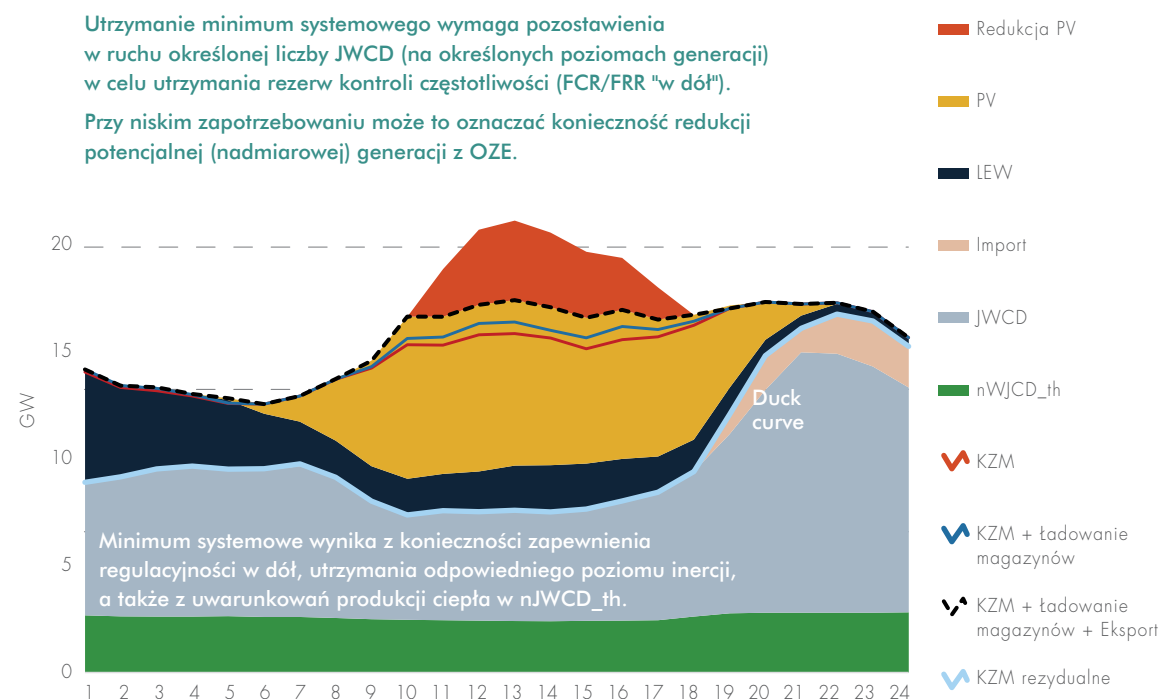
Źródło: opracowanie własne w oparciu o dane PSE

W kontraście do okresów Dunkelflaute, okresy wysokiej (lub nadmiarowej) generacji mocy oznaczają kolejne godziny lub dni, w których dostępna podaż mocy PV i/lub mocy wiatrowych jest bardzo wysoka lub wręcz przekracza możliwe do pokrycia zapotrzebowanie. Okresy tego typu oznaczają następujące wyzwania dla pracy KSE:

- Konieczność utrzymywania tzw. minimum systemowego związanego z dotrzymaniem parametrów bezpieczeństwa pracy KSE (ujemne rezerwy, inercja)⁴ oraz z uwarunkowaniami produkcji ciepła w EC
- Konieczność dokonywania redukcji generacji OZE w celu zapewnienia minimum systemowego. Środkiem zaradczym w tym zakresie jest rozwój magazynów energii lub zwiększenie elastyczności istniejących jednostek ciepłych (możliwość pracy na niższym niż dotychczas poziomie minimum technicznego).
- Występowanie tzw. duck curve, czyli bardzo stromego wzrostu KZM rezydualnego w godzinach popołudniowych⁵. Zjawisko duck curve oznacza konieczność posiadania mocy elastycznych, pozwalających na szybkie zwiększanie generacji pomiędzy dziennym minimum i maksimum KZM rezydualnego.

Ilustrację okresów wysokiej (nadmiarowej) generacji OZE oraz zjawiska duck curve przedstawia Rys. 8.

RYS. 8 ILUSTRACJA OKRESU WYSOKIEJ (NADMIAROWEJ) GENERACJI OZE W POLSCE (NA PRZYKŁADZIE 9 CZERWCA 2024 ROKU)



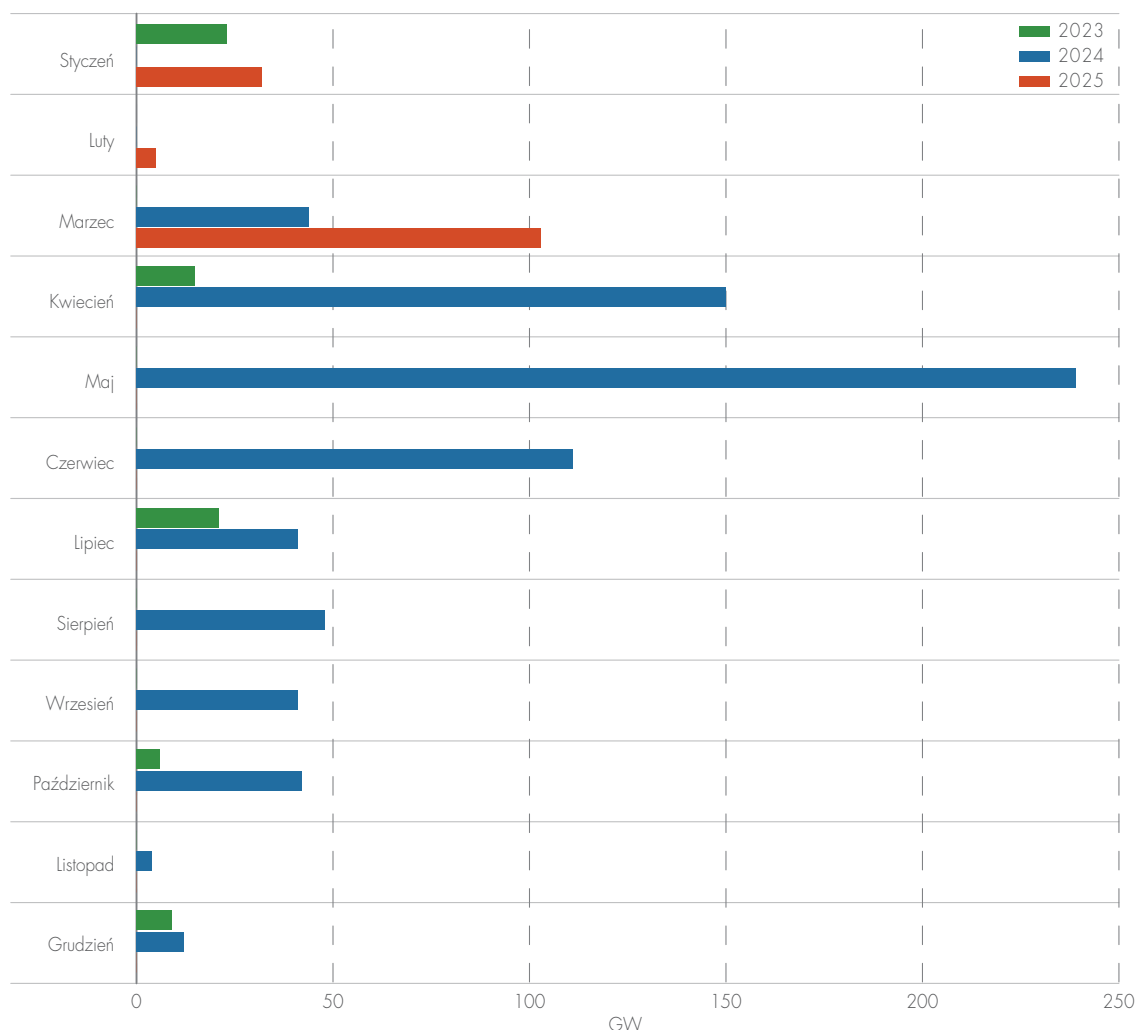
Źródło: opracowanie własne w oparciu o dane PSE

⁴ Parametrami bezpieczeństwa istotnymi zwłaszcza w okresach wysokiej (nadmiarowej) generacji OZE są odpowiednie poziomy ujemnych rezerw mocy na wypadek wzrostu częstotliwości (tzw. rezerwy FCR_d, FRR_d) oraz odpowiednia ilość inercji na wypadek nagłego spadku lub wzrostu częstotliwości na skutek utraty źródła wytwórczego, odbioru lub elementu sieciowego. Znaczenie inercji dla stabilności systemu elektroenergetycznego z wysokimi udziałami pogodozależnych OZE ilustruje m.in. niedawna awaria zasilania w Hiszpanii i Portugalii (28 kwietnia 2025 roku).

⁵ KZM rezydualne to KZM pozostające do pokrycia przez źródła inne niż pogodozależne OZE.

Konsekwencją okresów nadmiarowej generacji OZE jest konieczność redukcji generacji z tych źródeł. Wolumeny redukcji za lata 2023-2025 przedstawione na Rys. 9 wskazują na roczny wzrost skali tego zjawiska. Potencjalnym środkiem zaradczym przeciwko redukcjom OZE jest rozwój magazynów EE, umożliwiający absorpcję nadmiarowej generacji.

RYS. 9 WOLUMENY REDUKCJI GENERACJI Z POGODOZALEŻNYCH OZE W POLSCE W POWODÓW BILANSOWYCH KSE [GWh]

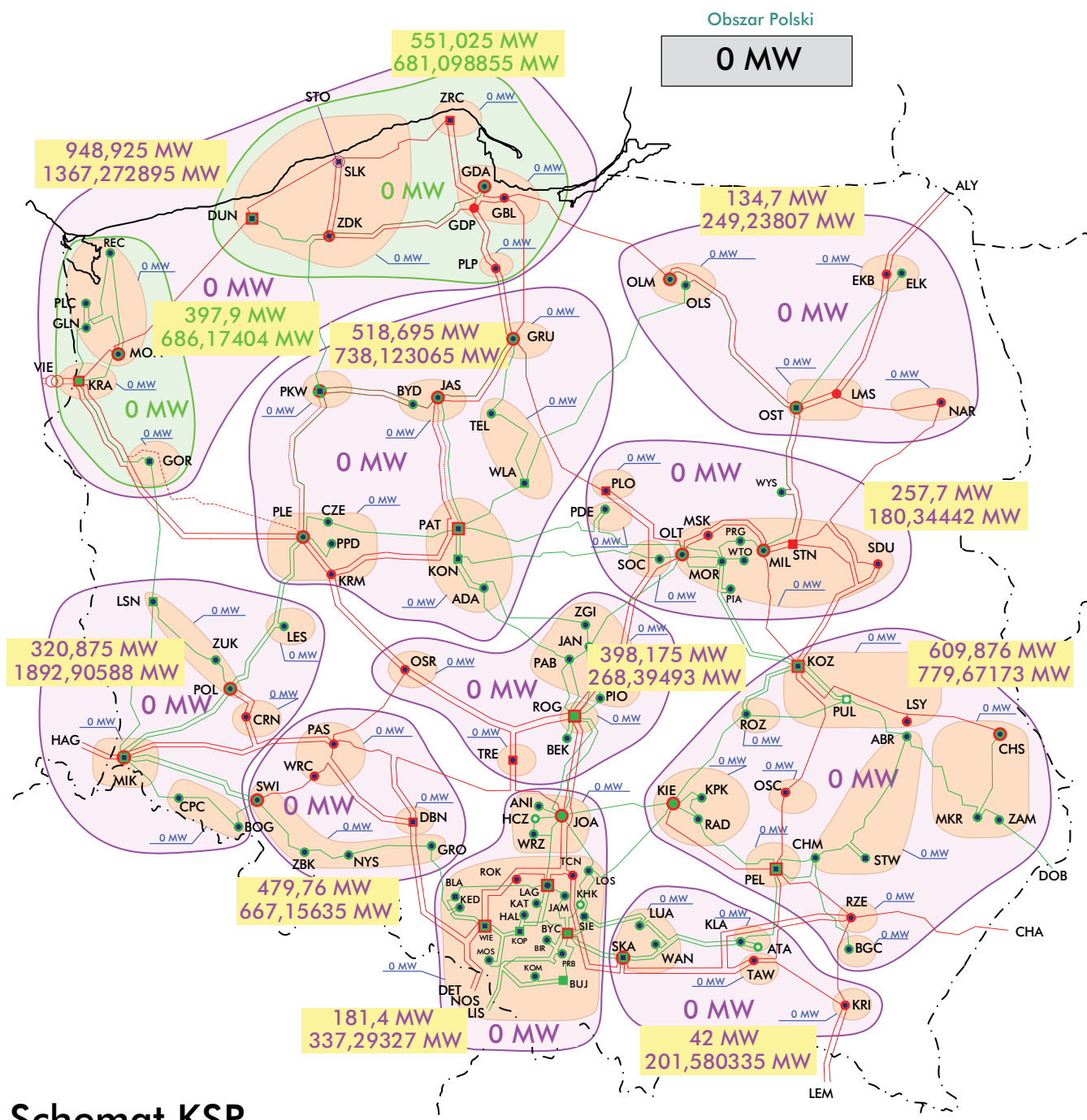


Źródło: opracowanie własne w oparciu o dane PSE

Kolejnym wyzwaniem technicznym związanym z rozwojem miksu mocowego Polski są kwestie sieciowe oraz związane z tym możliwości przyłączeniowe nowych źródeł, a także ryzyko redukcji ze względów sieciowych (ryzyko lokalnego przeciążania linii lub transformatorów w obszarach o lokalnie wysokim skupieniu źródeł OZE). O skali wyzwania świadczą dane PSE⁶, według których aktualne zdolności przyłączeniowe (stan na koniec marca 2025 roku) wynoszą w Polsce zero MW (Rys. 10).

⁶ https://www.pse.pl/documents/20182/51490/informacja_o_dostepnosci_mocy_przylaczeniowej_do_sieci_przesylowej.pdf

RYS. 10 SCHEMAT SIECI PRZESYŁOWEJ Z DOSTĘPNYMI MOCAMI PRZYŁĄCZENIOWYMI
– STAN WYJŚCIOWY NA 31.03.2025



Schemat KSP w 2025 r.

- ✓ linia elektroenergetyczna 400 kV
- ✓ linia elektroenergetyczna 220 kV
- ⚡ linia 400 kV czasowo pracująca na napięciu 220 kV

Moc dostępna
z uwzględnieniem
WP do sieci 110 kV
do opublikowania dla:

100 MW OBSZARU
100 MW PODOBSZARU
100 MW GRUPY

Uzgodnione WP do sieci 110 kV [MW]

100 MW	farm wiatrowych
100 MW	farm fotowoltaicznych

Źródło: PSE

3.4 Kwestie geopolityczne

Analizując kwestie rozwoju miksu mocy wytwórczo-magazynowych w Polsce nie sposób nie podjąć tematu bezpieczeństwa geopolitycznego.

Doświadczenia roku 2022, gdzie w wyniku agresji zbrojnej Rosji na Ukrainę doszło do niespotykanych w historii zawirowań na rynku paliw w Europie (gaz, węgiel) skutkujących szokami cenowymi oraz wstrzymaniem dostaw z Rosji pokazują, że kwestia bezpieczeństwa energetycznego staje się krytycznym elementem kształtującym rzeczywistość oraz budującym przyszłość gospodarki.

Oparcie się w możliwie największym stopniu o krajowe zasoby energii odnawialnej pozwala zminimalizować zależności od importu energii, co ma kluczowe znaczenie przy rozważaniu inwestycji w źródła gazowe, a także jądrowe, w przypadku których Polska musi polegać na imporcie paliw (gaz, uran).

Z drugiej strony należy także wskazać, że od ryzyk geopolitycznych nie są także źródła OZE czy MEE, co ilustrują ostatnie tygodnie związane z „wojną” celną pomiędzy USA i Chinami w zakresie surowców krytycznych dla transformacji energetycznej (lit, grafit, kobalt, nikiel, metale ziem rzadkich) i technologii PV, wiatrowych, bateryjnych MEE, inwerterów czy komponentów sieciowych.



4.

- Czynniki kształtujące polski miks mocy wytwórczo-magazynowych w horyzoncie roku 2040

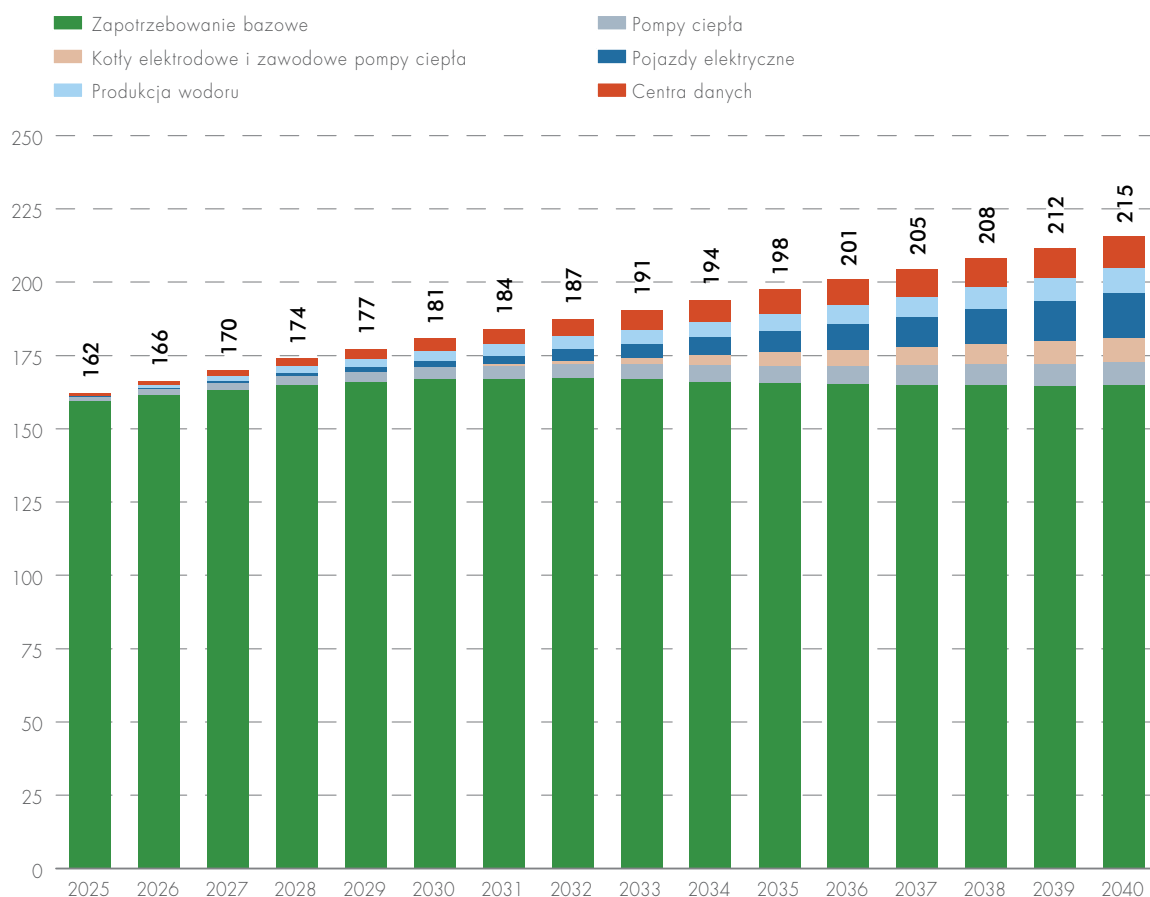
4.1 Prognozowana sytuacja popytowo-podażowa

Podjmując dyskusję na temat kształtu polskiego mixu mocy wytwórczo-magazynowych w horyzoncie roku 2040 należy wziąć pod uwagę zarówno czynniki strony popytowej, jak i strony podażowej.

Z punktu widzenia strony popytowej, analizy PSE^{7, 8} wskazują na kontynuację trendów historycznych, tj. wzrost KZEE oraz KZM, przy czym wzrost te

Rys. 11 przedstawia prognozę rocznego KZEE netto w Polsce dla lat 2025-2040 z podziałem na zużycie bazowe oraz nowe segmenty zużycia.

RYS. 11 PROGNOZA ROCZNEGO KZEE NETTO [TWh] W POLSCE



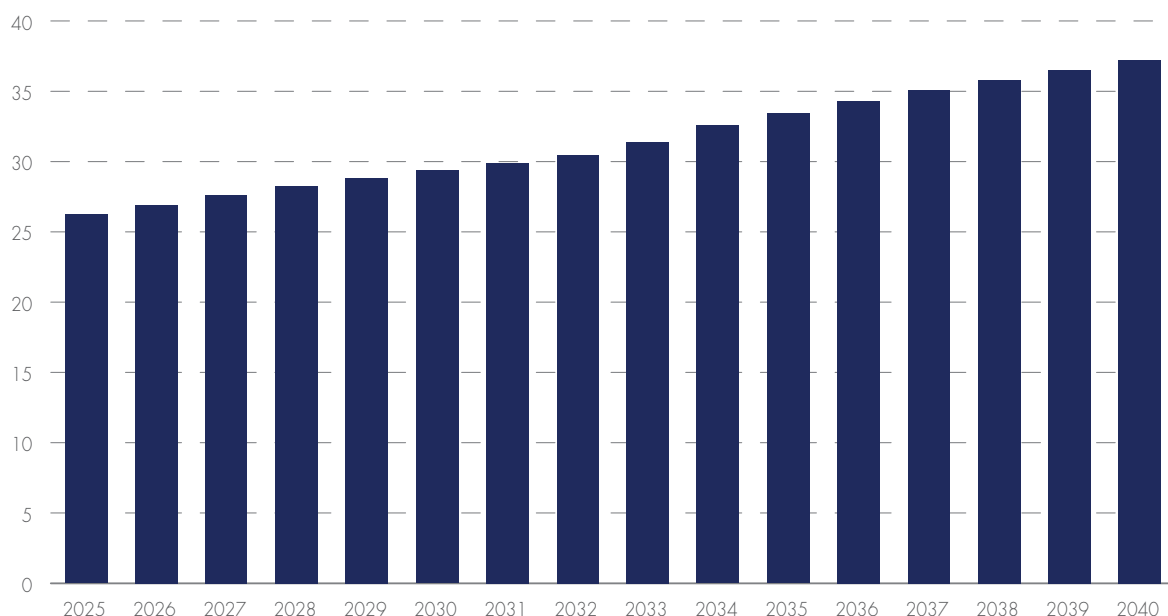
Źródło: PSE (Ocena wystarczalności 2025-2040)

⁷ Ocena wystarczalności zasobów na poziomie krajowym 2025-2040 (listopad 2024)

⁸ Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2025-2034 (grudzień 2024)

Rys. 12 przedstawia prognozę szczytowego KZM w Polsce dla lat 2025-2040.

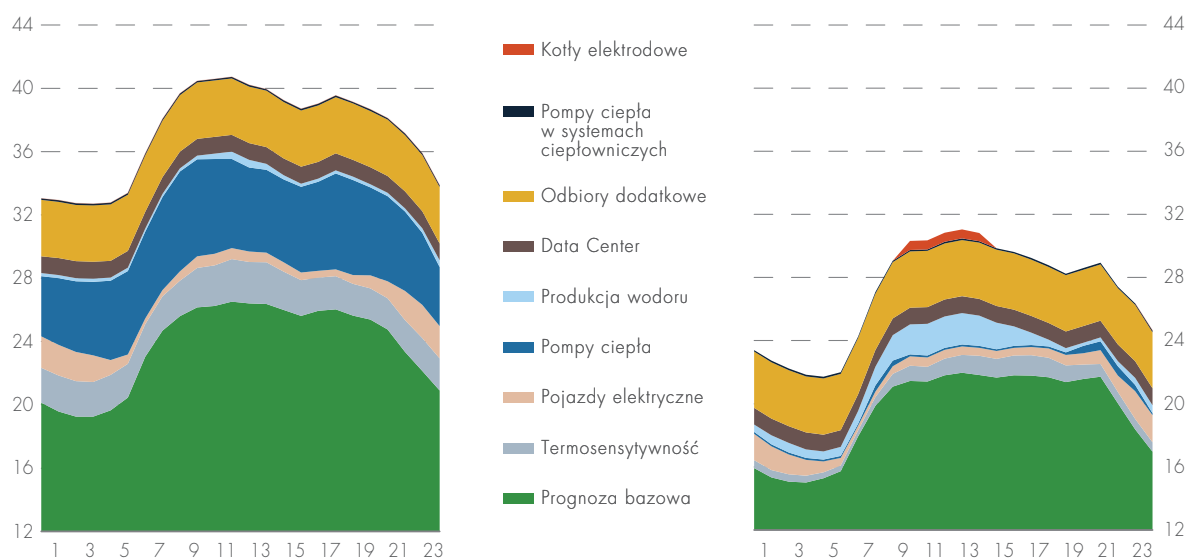
RYS. 12 PROGNOZOWANE KZM SZCZYTOWE [GW] W POLSCE



Źródło: PSE (Ocena wystarczalności 2025-2040)

Rys. 13 przedstawia przykładowe profile dobowogodzinowe KZM w Polsce dla dnia zimowego oraz dnia letniego w roku 2034.

RYS. 13 PRZYKŁADOWE PROFILE KZM [GW] W POLSCE W ROKU 2034



Źródło: PSE (Plan rozwoju 2025-2034)

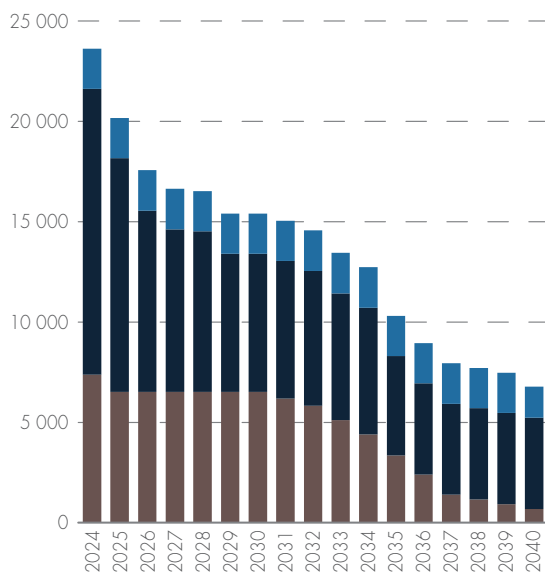
Z punktu widzenia strony podaźowej, istotnym czynnikiem wpływającym na rozwój miksów mocy wytwórczo-magazynowych w Polsce są spodziewane wycofania istniejących mocy wytwórczych, wynikające z wieku oraz stanu technicznego, emisyjności oraz ekonomiki.

Rys. 14 przedstawia analizowane przez PSE warianty wycofań mocy JWCD w podziale na rodzaj paliwa.

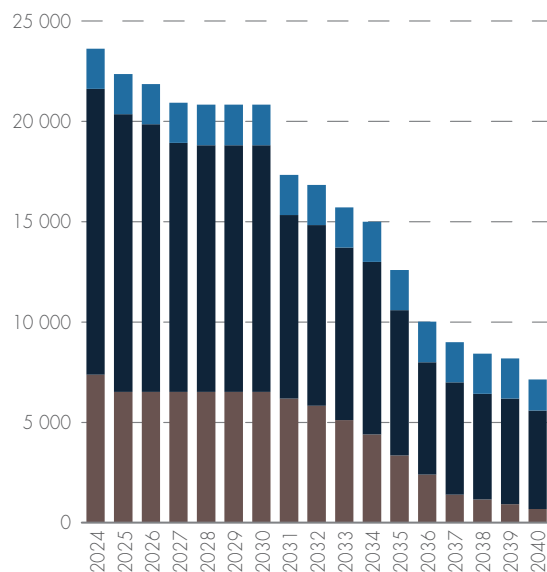
RYS. 14 MOC OSIĄGALNA NETTO [MW] W ISTNIEJĄCYCH JWCD (STAN NA KONIEC ROKU)

Wariant zakładający brak rentowności jednostek opalanych węglem po 01.07.2025 r.

Węgiel brunatny Węgiel kamienny Gaz ziemny



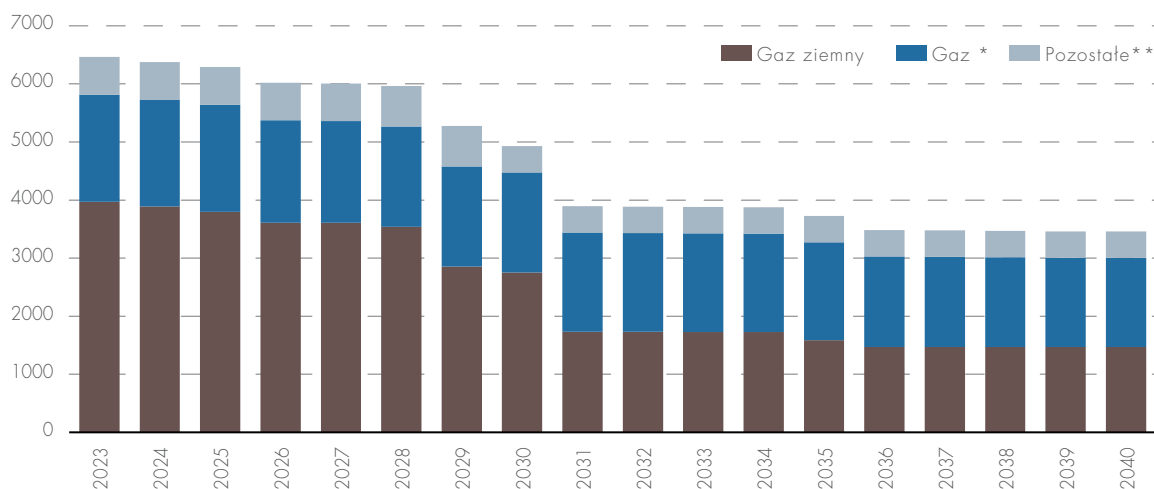
Wariant zakładający rentowność jednostek po 01.07.2025 r. oraz brak aktywności modernizacyjnej przedłużającej okres technicznej eksploatacji



Źródło: PSE (Plan rozwoju 2025-2034)

Rys. 15 przedstawia ewolucję wycofań mocy nJWCD ciepłych (elektrociepłownie zawodowe oraz przemysłowe) w podziale na rodzaj paliwa.

RYS. 15 MOC OSIĄGALNA NETTO [MW] W ISTNIEJĄCYCH NJWCD CIEPLNYCH (STAN NA KONIEC ROKU)



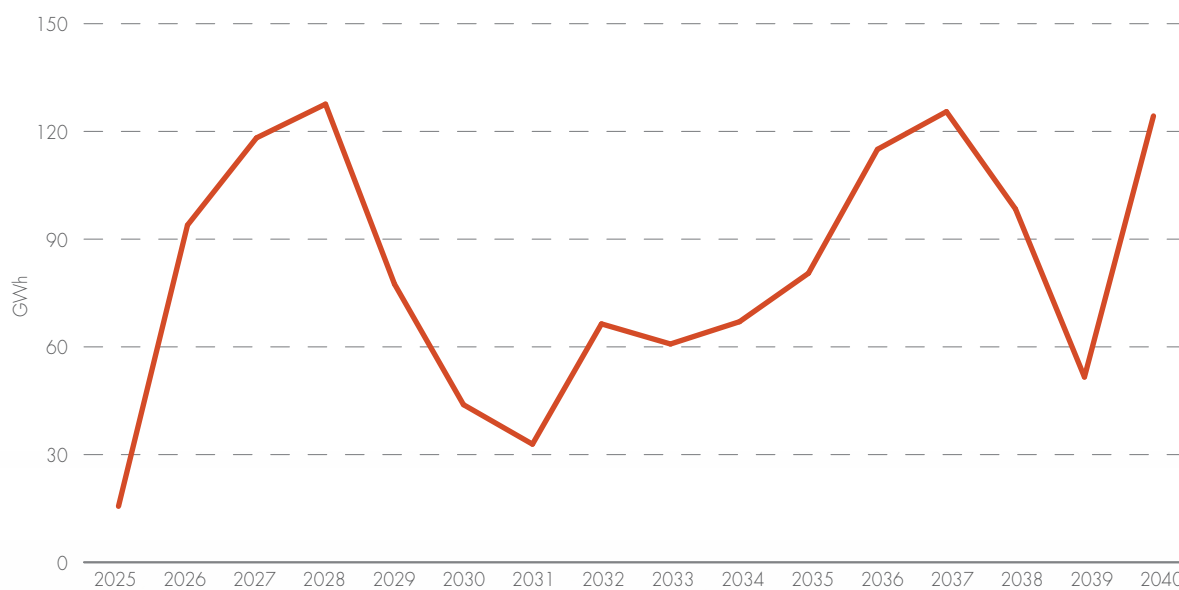
* między innymi: wysokometanowy, zaazotowany, z odmetanowania kopalń, koksowniczy ** gudron, olej, inne

Źródło: PSE (Plan rozwoju 2025-2034)

Podejmując dyskusję o miksie mocowym Polski należy także wspomnieć o wynikach oceny wystarczalności zasobów wytwórczych w Polsce wykonanej w listopadzie 2024 roku przez PSE.

Wyniki powyższej analizy jednoznacznie wskazują, że Polska nie ma czasu na odwlekanie decyzji związanych z inwestycjami w nowe moce wytwórcze, magazynowe, a także sieciowe. Brak działań w tym zakresie rodzi bowiem wysokie ryzyko występowania energii niedostarczonej już w roku 2026 (Rys. 16).

RYS. 16 MODELOWANE WOLUMENY ENERGII NIEDOSTARCZONEJ W POLSCE (GWh)



Źródło: PSE (Ocena wystarczalności 2025-2040)

4.2 Wymagania normatywne nowego miksu

Przedstawione powyżej prognozy rozwoju strony popytowej oraz podaży KSE, a także zjawiska i uwarunkowania obserwowane na przestrzeni ostatnich lat (rozdział 3) wskazują, że miks mocy wytwórczo-magazynowych w Polsce powinien pozwolić na pokrycie prognozowanego KZEE oraz KZM, uwzględniając przy tym:

- spodziewane wycofania mocy istniejących
- konieczność zapewnienia odpowiedniego wolumenu mocy cechujących się dyspozycyjnością, elastycznością i inercją pozwalającą na bezpieczne prowadzenie pracy KSE w okresach Dunkelflaute oraz wysokiej (nadmiarowej) generacji z pogodozależnych OZE
- czynniki geopolityczne wpływające na dostępność paliwa gazowego oraz jądrowego, a także na dostępność technologii PV, wiatrowych oraz bateryjnych
- ryzyko wystąpienia energii niedostarczonej.

Dodatkowo, odnosząc się do postulatów tzw. trylamentu energetycznego, miks energetyczny powinien również pozwalać na redukcję emisji, a także minimalizować koszt dostaw energii.

Kolejnym elementem układanki jest także kwestia local content, czyli postulat, aby rozwój miksu mocowego przekładał się na możliwie największy udział polskich dostawców technologii i rozwiązań.

Istotną kwestią jest także uwzględnienie ograniczeń związanych z dostępnością mocy wykonawczych w sektorze budownictwa energetycznego – kumulacja fala inwestycji w danym roku może prowadzić do braku mocy przerobowych w sektorze budownictwa i przełożyć się na opóźnienia w oddawaniu infrastruktury do użytkowania.

RYS. 17 RAMY NORMATYWNE ROZWOJU MIKSU MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH



Źródło: opracowanie własne

4.3 Analiza jakościowa technologii wytwórczo-magazynowych przez pryzmat dyspozycyjności, elastyczności oraz inercji

Przegląd sytuacji KSE za ostatnie lata (rozdział 3) pokazuje, że fundamentalnym wyzwaniem związanym z projektowaniem nowego miksu mocy wytwórczo-magazynowych Polski jest zrozumienie oraz uwzględnienie wyzwań technicznych prowadzenia bieżącej pracy KSE w obliczu rozwoju pogodozależnych OZE.

Jak wskazano w rozdziale 0, w temacie bezpieczeństwa pracy KSE zasadnicze cechy jakościowe różniące moce pogodozależne (PV, moce wiatrowe) od mocy ciepłych to:

- ograniczona dyspozycyjność (bezpośrednie następstwo pogodozależności)
- przyłączenie przez inwerter⁹, skutkujące brakiem inercji oraz bardzo ograniczoną zdolnością utrzymania wymaganych poziomów prądów zwarciovych.

Biorąc pod uwagę powyższe, w rozważaniach poświęconych projektowaniu miksu mocowego w Polsce zasadnym jest dokonanie przekrojowej analizy technologii wytwórczo-magazynowych pod kątem dyspozycyjności, elastyczności oraz inercji.

Analizie poddano następujące właściwości jakościowe:

- dyspozycyjność¹⁰ (ang. dispatchability), rozumianą jako zdolność do generacji mocy niezależnie od warunków pogodowych (w tym podczas szczytów KZM)
- elastyczność¹¹ (ang. flexibility), rozumianą jako:
- zdolność do absorpcji nadmiaru generacji lub zdolność do pracy z możliwie niskim poziomem obciążenia (minimum generacji, wyrażone jako % mocy maksymalnej)
- zdolność do szybkiej zmiany obciążenia (gradient naboru / zrzutu mocy, wyrażona w MW/min lub %/min)
- inercja, rozumiana jako zdolność maszyny oraz systemu do przeciwstawienia się nagłej zmianie częstotliwości w momencie awarii (wyrażona w MWs).

Należy zauważyć, że z uwagi na rzeczywistą złożoność systemu elektroenergetycznego, na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego składa się dużo szersze spektrum zagadnień, pozostających poza zakresem przedmiotowej analizy.

Podsumowanie analizy przedstawia Tab. 1.

⁹ Przyłączenie przez inwerter typu grid-forming (w odróżnieniu od grid-following) pozwala na zwiększenie funkcjonalności źródeł inwerterowych, lecz wiąże się to z większymi nakładami na infrastrukturę. Do tego, właściwości inwerterów grid-forming nadal podlegają testom.

¹⁰ Dyspozycyjność zależy także od wskaźnika awaryjności; niemniej jednak, na potrzeby niniejszej analizy wskaźnik ten nie został uwzględniony.

¹¹ Na elastyczność składają się także czasy uruchomienia i odstawienia mocy; niemniej jednak, na potrzeby niniejszej analizy parametry te nie zostały uwzględnione.

¹² Szczegółowe analizy wystarczalności zasobów (ang. supply adequacy and system reliability), analizy stabilności częstotliwościowej i napięciowej, analizy zwarciowe, analizy przyłączeniowe, analizy rozprężowe, analizy sztywności sieci.

TAB. 1 CHARAKTERYSTYKI MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W ODNIESIENIU DO WYBRANYCH WYZWAŃ TECHNICZNYCH PRACY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Wyzwanie	Cecha jakościowa	Moce synchroniczne						Moce inwerterowe			DSR	Import / eksport	
		Biomasa/ biogaz	CCGT/ H ₂	OCCG/ H ₂	Siłniki łokowe	BWR / PWR	SMR	ESP	BME	Moce pogodazależne			
										LEW / MEW	PV		
Okresy suszy OZE (Dunkelflaute)	Dyspozycyjność	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ⁽¹⁾	✗	✗	✓	✓
Okresy wysokiej lub nadmierowej generacji OZE	Elastyczność	min gen 40-45%	min gen 33-48%	min gen 30-50% (2)	min gen 10-40%	min gen 50-60%	min gen 20-40%	min gen 25-40%	✓ ⁽³⁾	✓ ⁽⁴⁾	✓ ⁽⁴⁾	✓	✓
Duck curve	Elastyczność	2-3 MW/min	20-85 MW/min	40-85 MW/min 500 MW/min (5)	35 MW/min	0,5-2 MW/min 10-20 MW/min (6)	15-30 MW/min	50-200 MW/min	1000+ MW/min	✗	✗	✓	✓
Kontrola częstotliwości podczas awarii	Inercja	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓

Legenda:

✓ Technologia wspiera system

✓ Technologia wspiera system pod pewnymi warunkami

✗ Technologia nie wspiera systemu

(1) BME pozwalają wspierać system w okresie suszy OZE pod warunkiem uprzedniego nalożowania

(2) Poziom minimum generacji dla OCGT wynika z uwarunkowań ekologicznych

(3) BME pozwalają wspierać system w okresie nadmiaru generacji OZE pod warunkiem uprzedniego rozładowania

(4) Pogodazole OZE w okresach nadmiaru generacji podlegają redukcji

(5) Według dokumentacji dla turbiny LMS100, w trybie awaryjnym

(6) Nowsze reaktory BWR i PWR posiadają znacząco wyższą elastyczność niż reaktory z lat 1980.

W powyższej tabeli nie uwzględniono mocy węglowych, które pomimo spełnienia wielu z powyższych cech jakościowych, zostały wykluczone z uwagi na wysoką emisję CO₂.

5

- Nowy miks elektroenergetyczny Polski – czyli jaki?



Aby odpowiedzieć na pytanie o jakość miksu mocowo-wytwórczego Polski dokonano analizy następujących wariantów:

- Wariant 1, w którym udział pogodozależnych OZE jest mniejszy, natomiast udział mocy jądrowych jest większy
- Wariant 2, w których udział pogodozależnych OZE jest większy, natomiast udział mocy jądrowych jest mniejszy.

Warianty opracowano w oparciu o analizę dokumentów PSE i modelowanie własne oraz zaprezentowane na Rys. 18 (struktura mocy) oraz Rys. 19 (struktura produkcji).

Modelowanie wykonano w autorskim modelu rozwoju miksu (capacity expansion model) oraz w modelu symulującym operacyjne aspekty działania systemu (dispatch model), w oparciu o publicznie dostępne źródła danych.

Wykorzystane źródła danych obejmują:

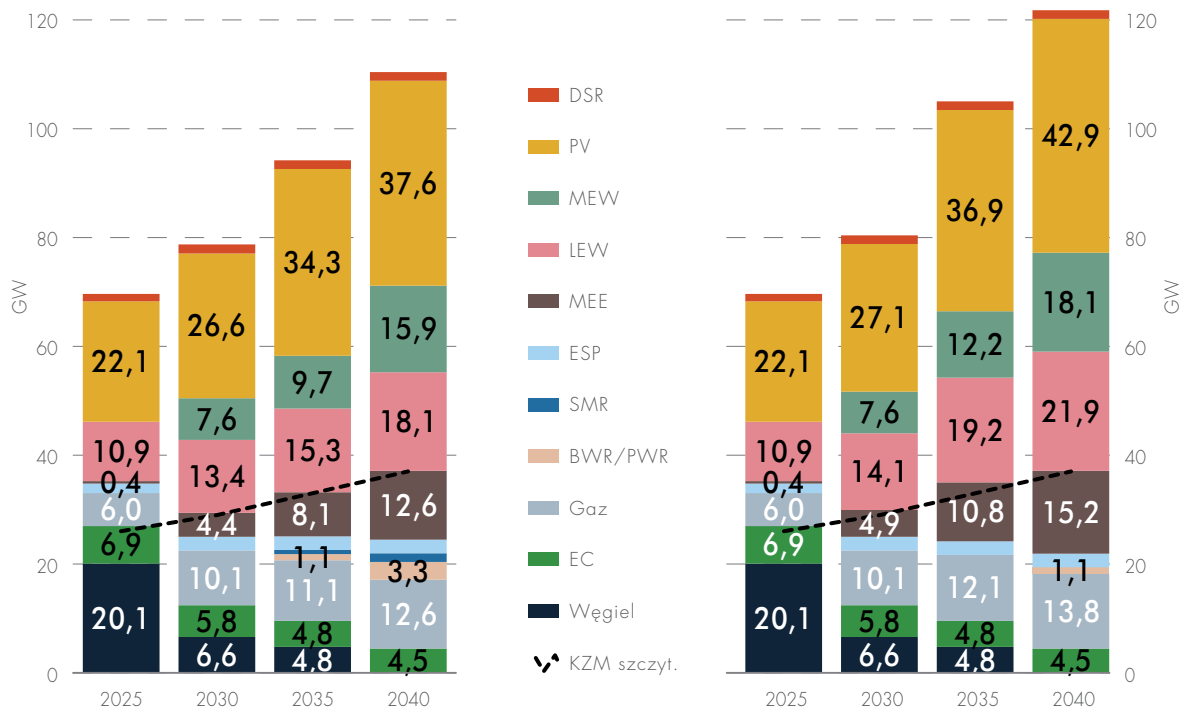
- opracowania Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE):
- Ocena wystarczalności zasobów na poziomie krajowym 2025-2040 (listopad 2024)
- Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2025-2034 (grudzień 2024)
- opracowania Europejskiego Stowarzyszenia Operatorów Systemów Przesyłowych EE (ENTSO-E):
- Ten Year Network Development Plan (TYNDP) 2024
- European Resource Adequacy Assessment (ERAA) 2024.



RYS. 18 ANALIZOWANE WARIANTY ROZWOJU MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W POLSCE [GW]

Wariant 1 (mniej OZE, więcej atomu)

Wariant 2 (więcej OZE, mniej atomu)



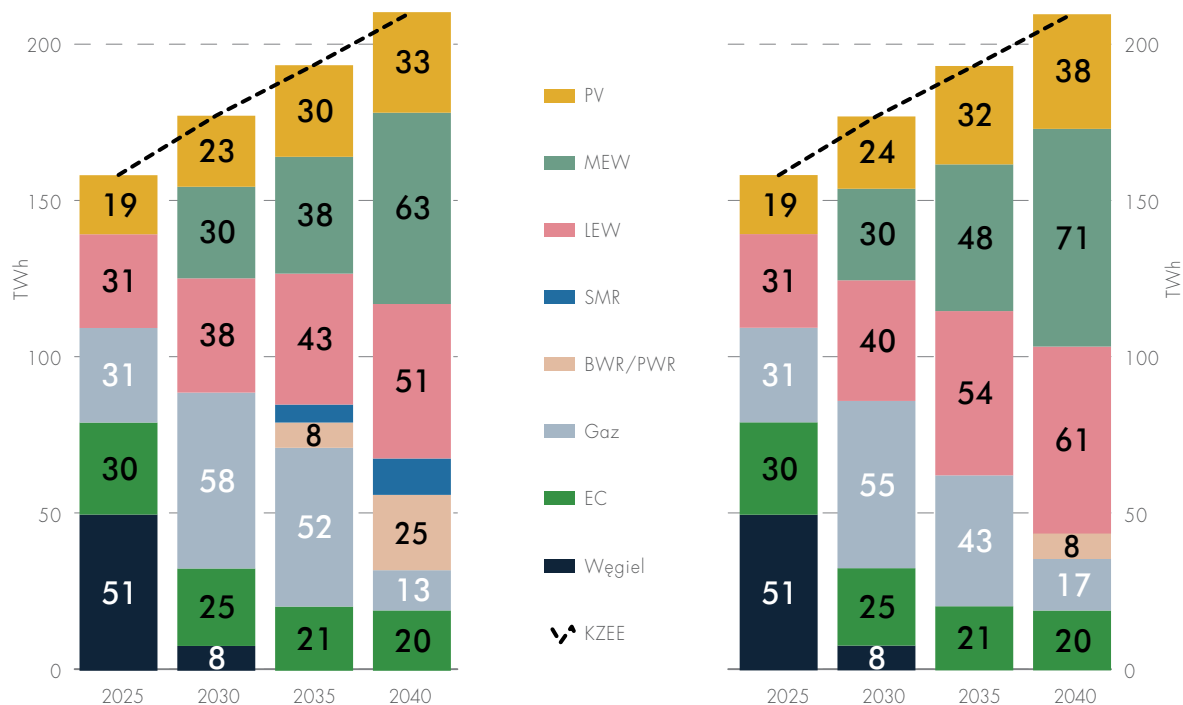
Źródło: opracowanie własne w oparciu o dane PSE
(Ocena wystarczalności 2025-2040, Plan rozwoju 2025-2034) oraz modelowanie własne

Wariant 1 zakłada wolniejszy rozwój pogodozależnych OZE oraz MEE, kompensowanych większym udziałem mocy jądrowych. Wariant 2 zakłada bardziej dynamiczny rozwój pogodozależnych OZE, MEE oraz mocy gazowych (wspomagających bilansowanie systemu opartego o większe wolumeny OZE). Powyższa struktura skutkuje jednocześnie mniejszym zapotrzebowaniem na moce jądrowe.

RYS. 19 ANALIZOWANE WARIANTY ROZWOJU MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W POLSCE [TWh]

Wariant 1 (mniej OZE, więcej atomu)

Wariant 2 (więcej OZE, mniej atomu)



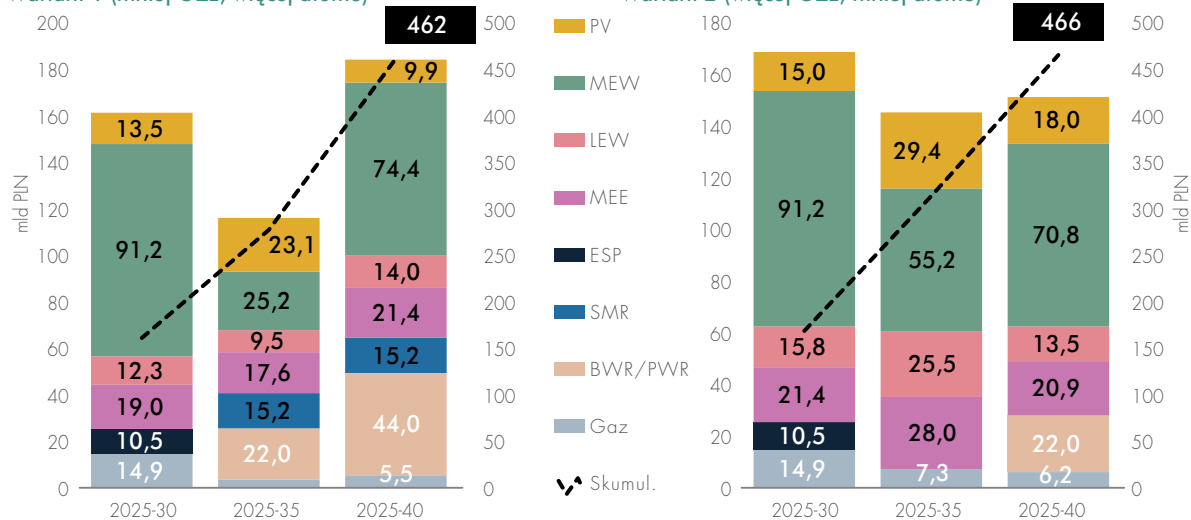
Uwaga: moce gazowe uwzględniają możliwość konwersji do turbin zasilanych wodorem (gaz nieemitujący CO₂) Źródło: modelowanie własne

Wariant 1 cechuje się nieznacznie niższymi łącznymi nakładami capex (o ok. 4 mld PLN), co przedstawiono na Rys. 20.

RYS. 20 NAKŁADY INWESTYCYJNE DLA PORÓWNYWANYCH WARIANTÓW MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W POLSCE [MLD PLN]

Wariant 1 (mniej OZE, więcej atomu)

Wariant 2 (więcej OZE, mniej atomu)

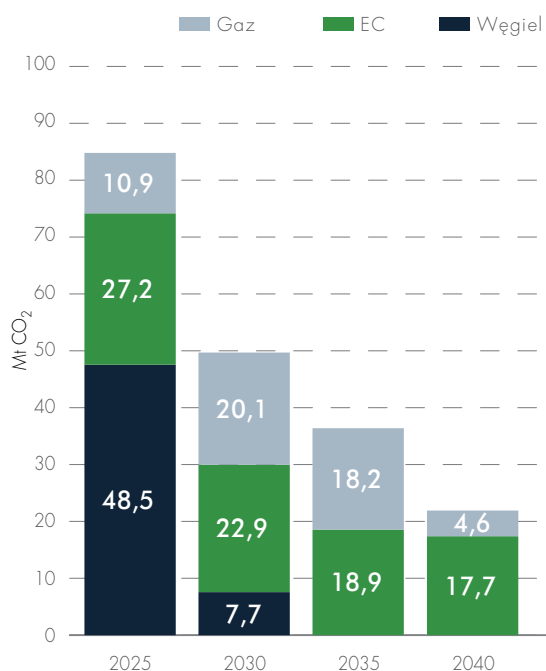


Uwaga: moce gazowe uwzględniają możliwość konwersji do turbin zasilanych wodorem (gaz nieemitujący CO₂) Źródło: modelowanie własne

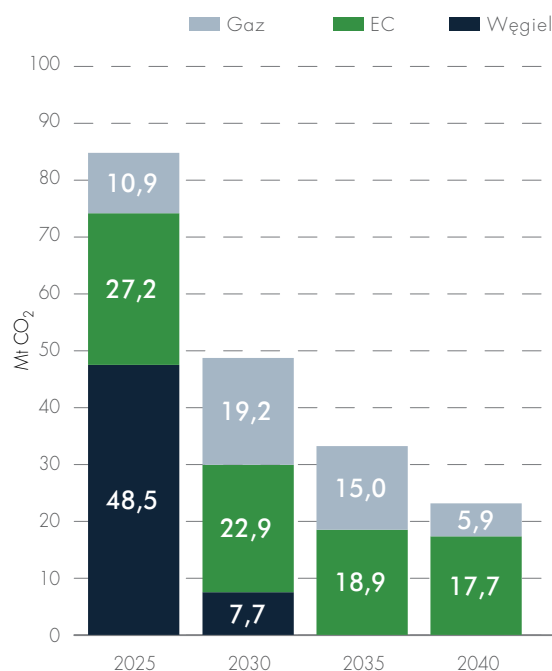
Obydwa warianty osiągają podobne efekty w zakresie redukcji emisji CO₂, co zaprezentowano na Rys. 21.

RYS. 21 MODELOWANE EMISJE CO₂ DLA PORÓWNYWANYCH WARIANTÓW MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W POLSCE [MT CO₂]

Wariant 1 (mniej OZE, więcej atomu)



Wariant 2 (więcej OZE, mniej atomu)

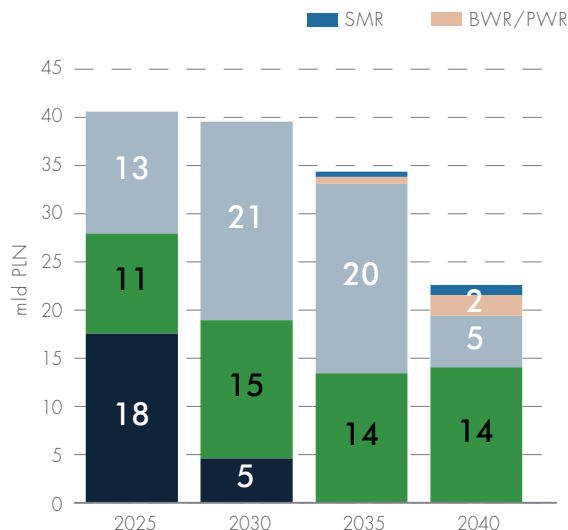


Źródło: modelowanie własne

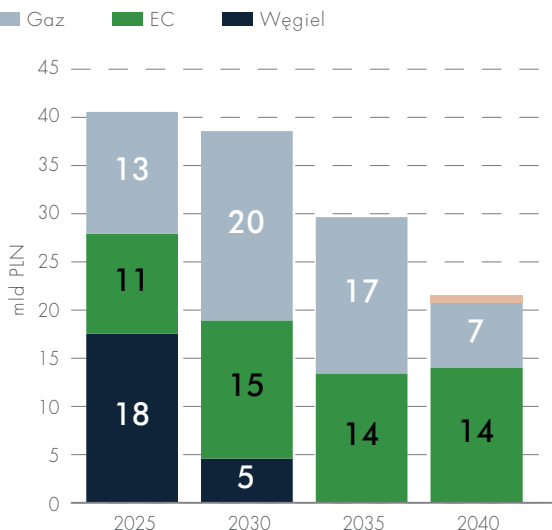
Wariant 2 cechuje się niższymi kosztami produkcji EE (o ok. 7 mld PLN), co wynika głównie z niższych kosztów zużycia paliwa jądrowego (Rys. 22).

RYS. 22 MODELOWANE EMISJE CO₂ DLA PORÓWNYWANYCH WARIANTÓW MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W POLSCE [MT CO₂]

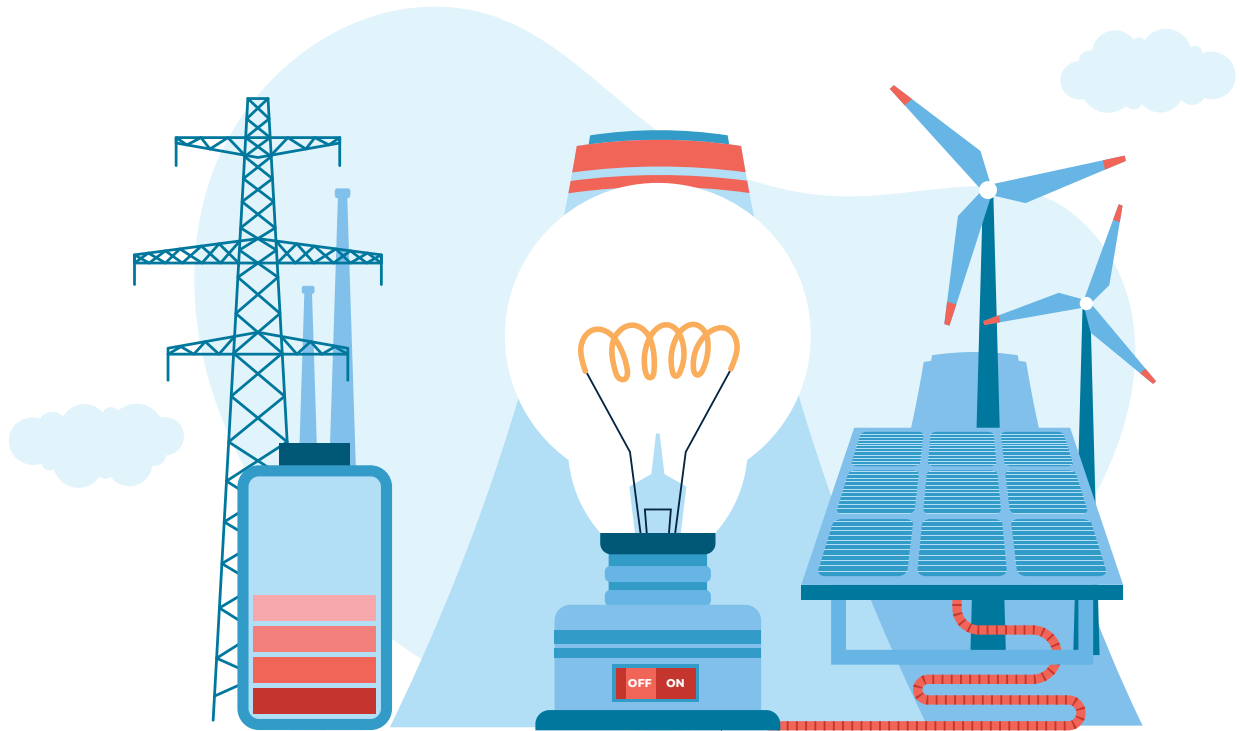
Wariant 1 (mniej OZE, więcej atomu)



Wariant 2 (więcej OZE, mniej atomu)

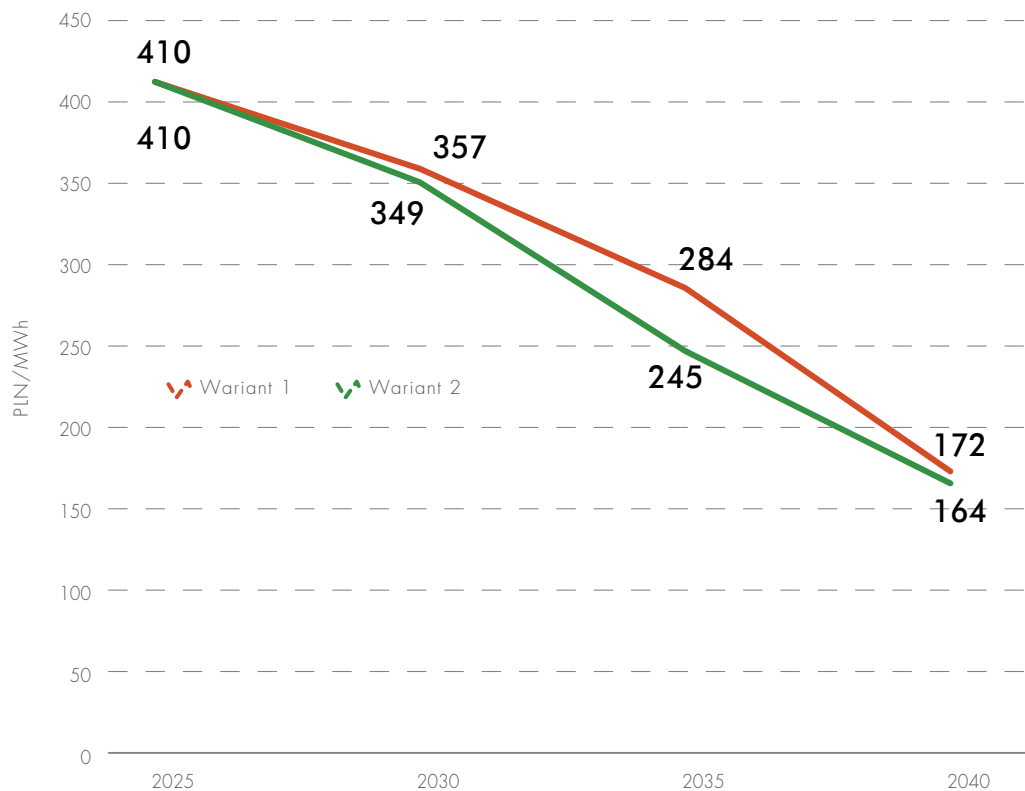


Źródło: modelowanie własne



Z punktu widzenia wpływu na ceny hurtowe EE, Wariant 2 cechuje się niższymi poziomami średnich cen rocznych (Rys. 21), co wynika głównie z wyższego udziału zerokosztowych źródeł OZE.

RYS. 23 MODELOWANE ŚREDNIE ROCZNE CENY HURTOWE EE DLA PORÓWNYWANYCH WARIANTÓW MOCY WYTWÓRCZO-MAGAZYNOWYCH W POLSCE [PLN/MWh]



Źródło: modelowanie własne

Miejsce na notatki

THE ENERGY OF CHANGE

Growing power to meet growing needs.
Taking power where the grid's never been.
Working to run the world on smarter energy every day.



GE VERNOVA

gevernova.com



Klub Energetyczny to niezależna platforma dyskusji o kluczowych zagadnieniach transformacji energetycznej w Polsce, łącząca sektor administracji ze światem biznesu i nauki. Formuła spotkań to ekskluzywne seminaria eksperckie z udziałem najważniejszych ministrów w rządzie odpowiedzialnych za energetykę, prezesów firm energetycznych oraz przedstawicieli świata nauki. Posiedzenia Klubu odbywają się raz na miesiąc, od września 2020 roku.

Dyskusje mają charakter spotkań fizycznych w formule off the record, dzięki czemu można bez skrępowania rozmawiać o najważniejszych problemach i wyzwaniach.

Sesje trwające ok. 2 godzin odbywają się raz w miesiącu w formule zamkniętej.

Na kilka dni przed posiedzeniem Klubu Energetycznego jego członkowie otrzymują merytoryczny brief na temat który będzie poruszany podczas zbliżającego się spotkania.

Po spotkaniu przygotowywane jest podsumowanie zgodnie z zasadą Chatham House, gdzie przedstawiane są tezy, które padły podczas dyskusji bez cytowania konkretnych osób. Podsumowanie otrzymują tylko członkowie Klubu.

Klub tworzy grono ok. 100 osób zaangażowanych w transformację energetyczną, są to osoby które aktywnie zarządzają spółkami, doradzają zarządom, czy też analizują ten proces i przedstawiają rekomendacje, a także tworzą prawo w urzędach centralnych.

Założycielem Klubu jest Michał Niewiadomski.

Klub Energetyczny jest również organizatorem specjalistycznych konferencji:

