

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2024



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Analiza wykonana w ramach zadań ustawowych
Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2024 poz. 54 ze zm.)



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Praca jest finansowana ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Warszawa 2025

Autorzy:

mgr inż. Paweł Durka

dr hab. inż. Joanna Strużewska

prof. dr hab. inż. Jacek W. Kamiński

mgr inż. Grzegorz Jeleniewicz

mgr inż. Aleksander Norowski

mgr inż. Aleksandra Starzomska



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Data publikacji: Czerwiec 2025

Spis treści

Wstęp	4
1. Metodyka obliczeń	6
1.1 Konfiguracja modelu GEM-AQ	6
1.2 Dane emisyjne	7
2. Ocena sprawdzalności	11
3. Zakres analiz	13
4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń na podstawie wyników modelowania 16	
4.1 Pył PM ₁₀	16
4.2 Pył PM _{2,5}	21
4.3 Dwutlenek siarki SO ₂	24
4.4 Dwutlenek azotu NO ₂	29
4.5 Tlenki azotu NO _x	32
4.6 Ozon O ₃	35
4.7 Benzo(a)piren	40
5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego.....	43
5.1 Pył PM ₁₀	44
5.2 Dwutlenek siarki SO ₂	46
5.3 Dwutlenek azotu NO ₂	50
5.4 Ozon O ₃	52
6. Podsumowanie	54
6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym	54
6.2 Dwutlenek siarki.....	54
6.3 Tlenki azotu	55
6.4 B(a)P	55
6.5 Ozon	55
Spis rysunków.....	57
Spis tabel	58

Wstęp

Matematyczne modelowanie transportu i przemian substancji w powietrzu zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy oraz Ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2024 poz. 54 ze zm.) stanowi metodę uzupełniającą w stosunku do pomiarów zanieczyszczeń powietrza, a w szczególnych warunkach je zastępującą.

Realizacja modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce, zgodnie z zapisami Ustawy Prawo Ochrony Środowiska (art. 88 ust. 6 ustawy POŚ), została od roku 2018 powierzona Instytutowi Ochrony Środowiska – Państwowemu Instytutowi Badawczemu. Zakres przedstawionych w raporcie wyników modelowania jest określony Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 lutego 2023 r. w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2023 poz. 350). Zgodnie z ww. aktem prawnym wyniki modelowania zostały przekazane do Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w terminie ustawowym.

Z uwagi na ogłoszenie nowej dyrektywy (UE) 2024/2881 z dnia 23 października 2024 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy (dyrektywa AAQD) w której rola modelowania została wzmocniona, w tym w kontekście oceny transgranicznego przenoszenia zanieczyszczeń, w porozumieniu z Ministerstwem Klimatu i Środowiska odpowiedzialnym za transpozycję dyrektywy oraz za współpracę bilateralną, rozszerzono analizy wykonując dodatkowe symulacje modelowe, pozwalające ocenić bardziej szczegółowo wpływ krajów sąsiadujących na poziom stężeń normowanych zanieczyszczeń w Polsce.

Zakres prac obejmował:

- Przygotowanie konfiguracji systemu modelowania,
- Przygotowanie danych emisyjnych,
- Realizację modelowania dla dziewięciu scenariuszy:
 - scenariusz bazowy – dane o emisji w Europie najbardziej aktualne dla roku oceny,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Polski,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Niemiec,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Czech,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Słowacji,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych łącznie z obszaru Ukrainy i Białorusi,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Litwy,
 - scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Obwodu Królewieckiego,

- scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Polski i krajów sąsiadujących, celem oceny tła ponadregionalnego
- Wykonanie oceny sprawdzalności wyników modelowania dla scenariusza bazowego względem pomiarów ze stacji PMŚ z roku 2024,
- Obliczenie procentowego udziału wpływu źródeł transgranicznych w kształtowaniu poziomów normowanych diagnostyk zanieczyszczeń nad obszarem Polski, z podziałem na udział źródeł z poszczególnych krajów lub regionów bezpośrednio sąsiadujących,
- Analizę wielkości ekspozycji ze względu na ochronę zdrowia i ochronę roślin, wynikającej z oddziaływania źródeł transgranicznych,
- Obliczenie średniego procentowego udziału źródeł spoza obszaru kraju dla każdej strefy.

1. Metodyka obliczeń

Do obliczeń stężeń zanieczyszczeń przy powierzchni ziemi zastosowano model jakości powietrza GEM-AQ (Kamiński i inni, 2008¹). Model ten jest podstawą systemu modelowania wdrożonego w IOŚ-PIB do celów realizacji zadań zgodnie z zapisami Ustawy Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2024 poz. 54). Ponadto, model GEM-AQ wykorzystywany jest w europejskim serwisie Copernicus (CAMS2_40 Copernicus Atmosphere Monitoring Service - Regional Production) oraz w ramach inicjatywy europejskiej FAIRMODE (Forum for Air Quality Modelling in Europe). Opis modelu przedstawiono w Załączniku nr 1.

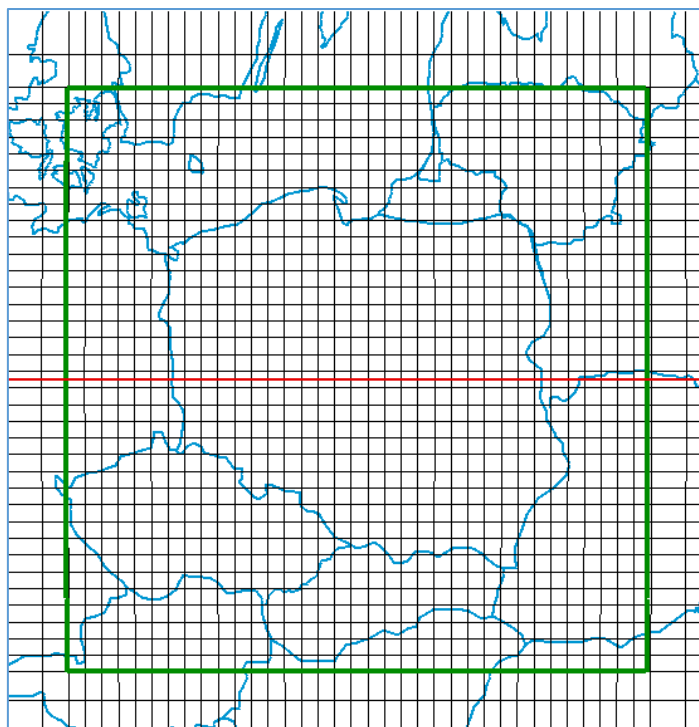
1.1 Konfiguracja modelu GEM-AQ

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych dotyczy stref zdefiniowanych jako aglomeracje o liczbie mieszkańców powyżej 250 tys., miasta o liczbie mieszkańców powyżej lub zbliżonej do 100 tys. oraz pozostały obszar kraju w podziale na województwa (Dz. U. z 2022 r. poz. 1576).

Obliczenia modelem GEM-AQ oraz przeprowadzone analizy na potrzeby wsparcia oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce były wykonywane na siatce skupionej nad obszarem Europy Środkowej z rozdzielczością $0,1^\circ$ (ok. 10,0 km) (**Rysunek 1**). Konfiguracja taka zapewnia właściwe odtworzenie napływu transgranicznego.

Na potrzeby niniejszej analizy wykorzystano pola meteorologiczne - analizy obiektywne z roku 2024, stanowiące warunek początkowy symulacji, pobrane z Kanadyjskiego Centrum Meteorologicznego (Canadian Meteorological Centre - CMC). Warunki początkowe stężeń modelowanych zanieczyszczeń dla 1 stycznia 2024 pochodzą z Serwisu Obserwacji Atmosfery Copernicus.

¹Kaminski, J.W., L. Neary, J. Struzewska, J.C. McConnell, A. Lupu, J. Jarosz, K. Toyota, S.L. Gong, J. Côté, X. Liu, K. Chance, and A. Richter, GEM-AQ, an on-line global multiscale chemical weather modelling system: model description and evaluation of gas phase chemistry processes. Atmos. Chem. Phys., 8, 3255-3281, 2008.



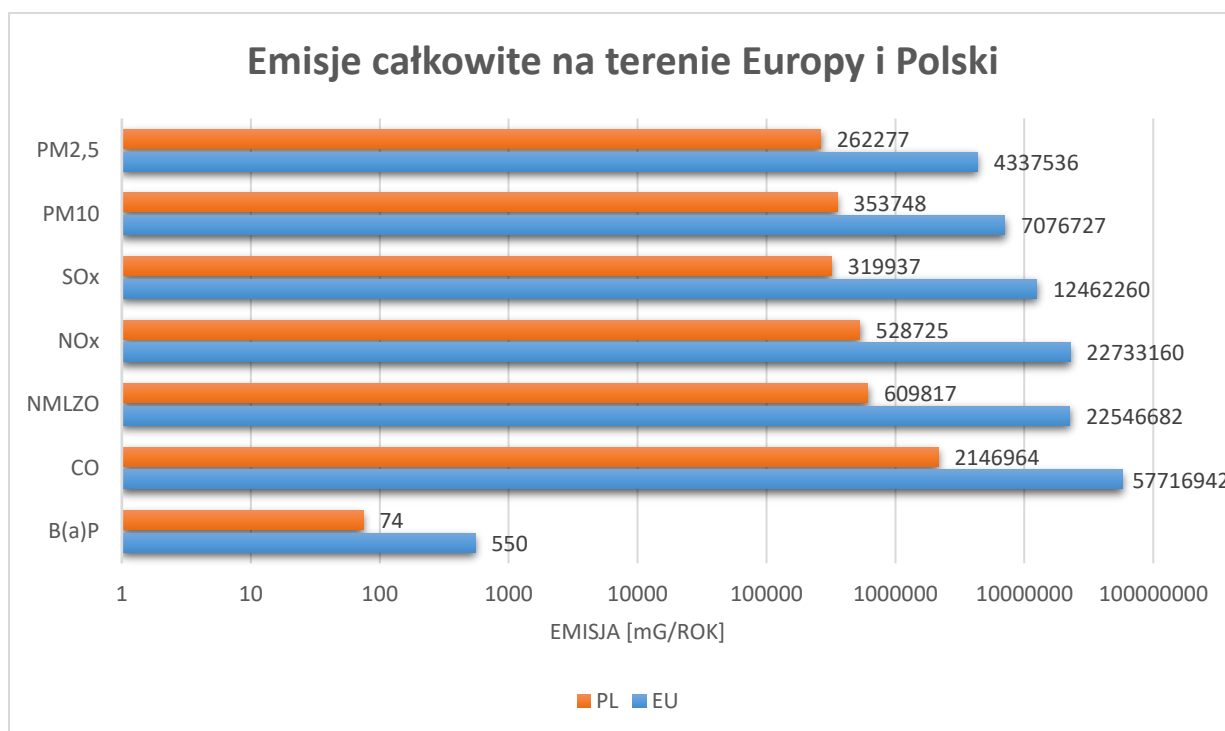
Rysunek 1. Konfiguracja siatki globalnej o zmiennej rozdzielczości: zielony kwadrat obejmuje obszar domeny obliczeniowej o stałej rozdzielczości 10km, czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, kreślone są co 3 kwadraty siatki.

1.2 Dane emisyjne

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2024 roku wykonano z wykorzystaniem bazy emisji EMEP z roku 2022 dla Europy, w tym Polski, tworzonej w oparciu o dane raportowane przez kraje członkowskie w ramach Konwencji LRTAP. Pozwala to na zachowanie spójności oszacowania wielkości ładunku emisji w poszczególnych krajach, a w konsekwencji uniknięcia niedoszacowania lub przeszacowania transportu transgranicznego. Baza danych EMEP jest udostępniana w rozdzielczości $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$ (ok. 10 km)².

Rysunek 2 przedstawia porównanie całkowitych emisji zanieczyszczeń powietrza na terenie Europy i Polski. W przypadku analizowanych zanieczyszczeń, z pominięciem B(a)P, udział procentowy emisji z terenu Polski w emisji z całej Europy wynosi od 2,3% w przypadku NO_x do 6,0% dla PM_{2,5}. W przypadku B(a)P, udział emisji z terenu Polski stanowi aż 14% emisji w Europie, co przekłada się na znaczny udział emisji krajowych w kształtowaniu poziomów stężeń B(a)P na terenie naszego kraju.

² <https://www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions>

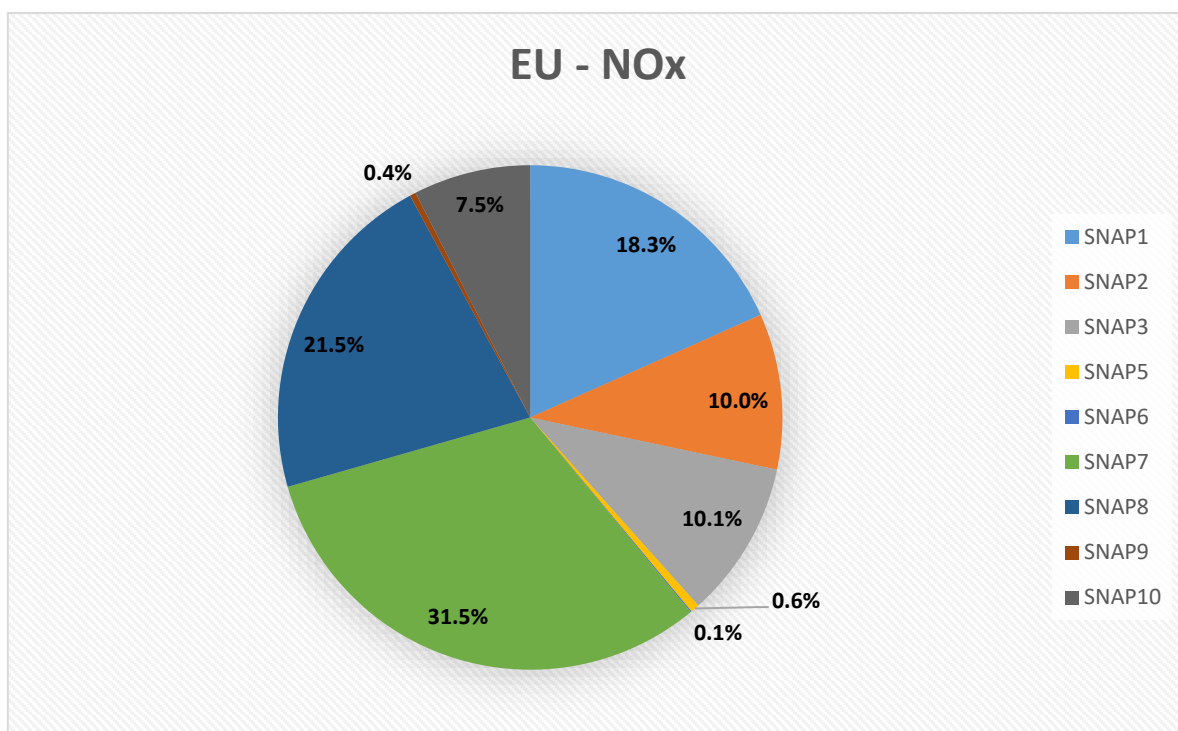


Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2022

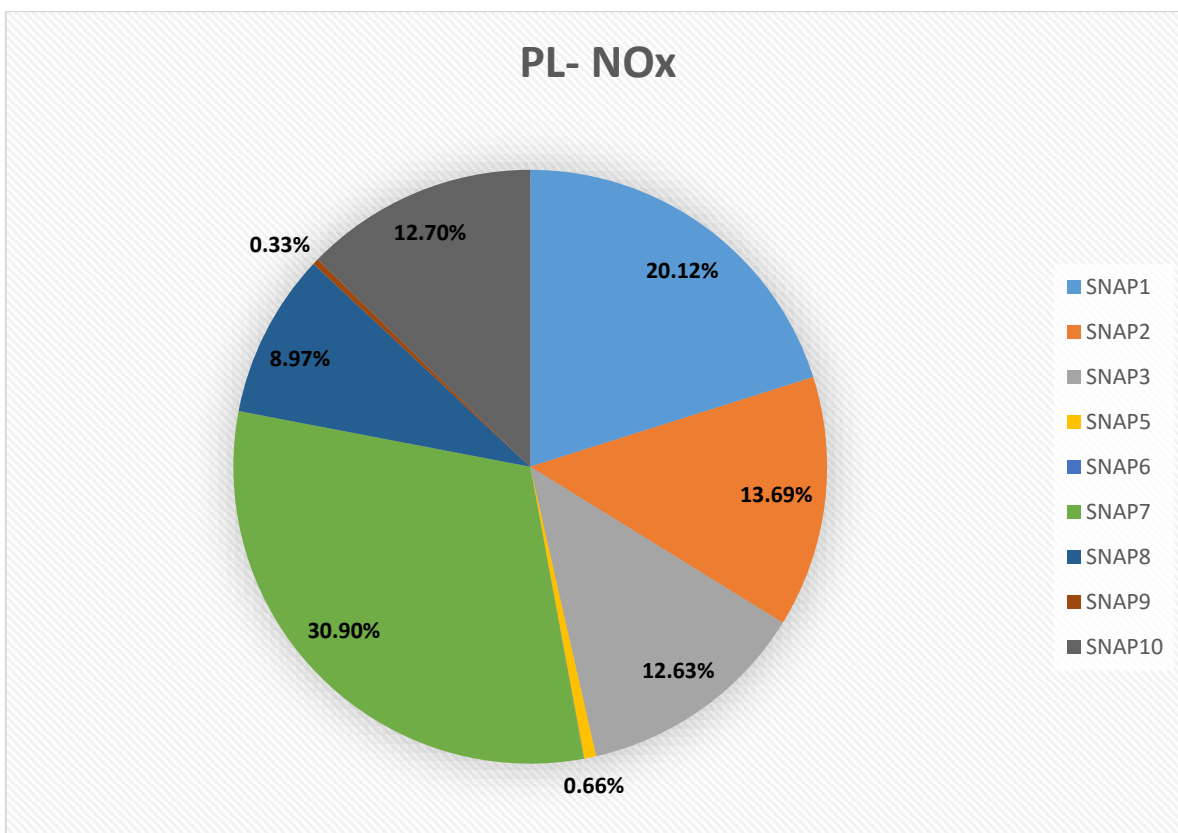
Dane emisyjne udostępniane są przez EMEP w podziale na kategorie źródeł emisji GNFR. Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń dane te zostały zreklasyfikowane na kategorie źródeł emisji SNAP. Poniżej przedstawiono porównanie udziału poszczególnych źródeł w emisji PM₁₀ i NO_x na terenie Polski i Europy.

W przypadku emisji NO_x (**Rysunek 3** i **Rysunek 4**) największa część emisji pochodzi z transportu drogowego (SNAP7) i jest to odpowiednio 31,5% dla Europy oraz 30,9% dla Polski. Istotnymi źródłami w udziale emisji NO_x są: procesy spalania w sektorze produkcji energii (SNAP1), inne pojazdy i urządzenia (SNAP8) oraz procesy spalania w przemyśle (SNAP3). W przypadku większości sektorów udział poszczególnych SNAP w Polsce jest podobny jak na terenie Europy, wyjątkiem jest SNAP8, gdzie w Europie stanowi 21,5%, a w Polsce 9,0%.

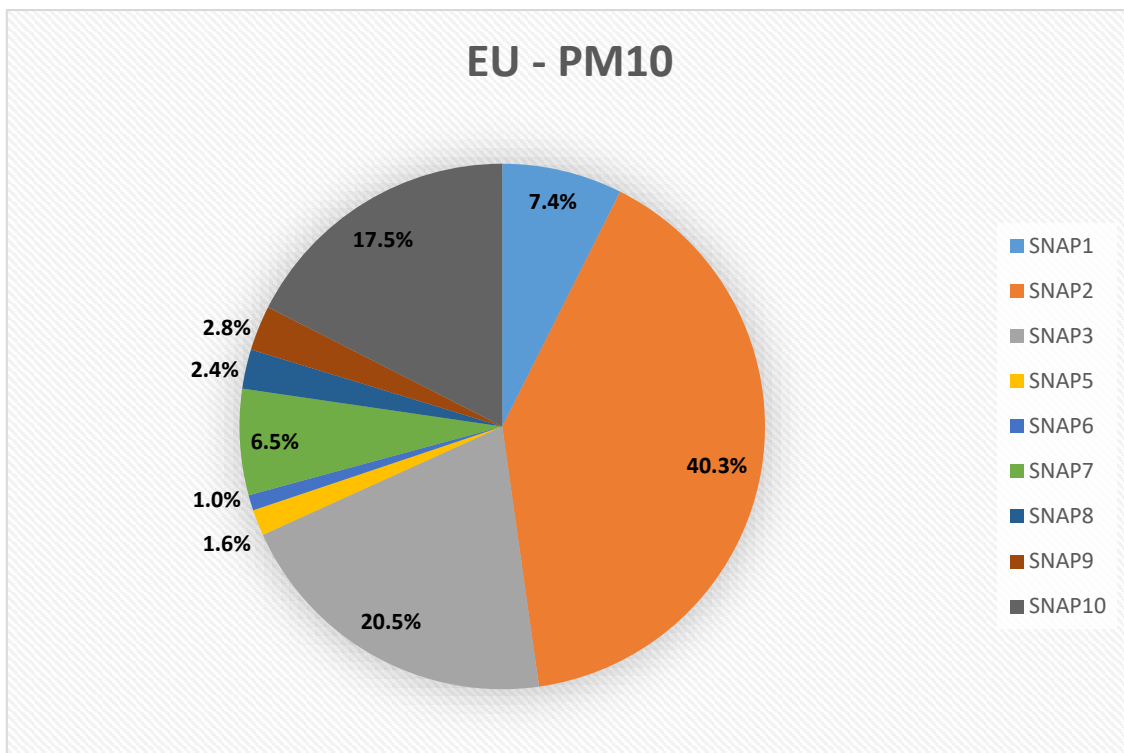
Struktura źródeł emisji PM₁₀ jest inna niż w przypadku NO_x. Zanieczyszczenie to zarówno w Europie jak i w Polsce pochodzi w dużej części z sektora komunalno-bytowego (SNAP2) i jest to odpowiednio 40,3% (Europa) oraz 67,2% (Polska) w stosunku do całkowitej emisji antropogenicznej tych zanieczyszczeń. Udział kategorii SNAP2 w emisjach PM₁₀ znacząco odbiega od wartości z bazy emisyjnej dla 2019 roku, pomimo spadku względem emisji z 2021 (71%) wciąż jest mało realny oraz trudny do uzasadnienia i wymaga komentarza ze strony zespołu KOBiZE raportującego dane do EMEP. Pozostałymi kategoriami o znaczącymi udziałem są: procesy spalania w przemyśle (SNAP3) oraz rolnictwo (SNAP10).



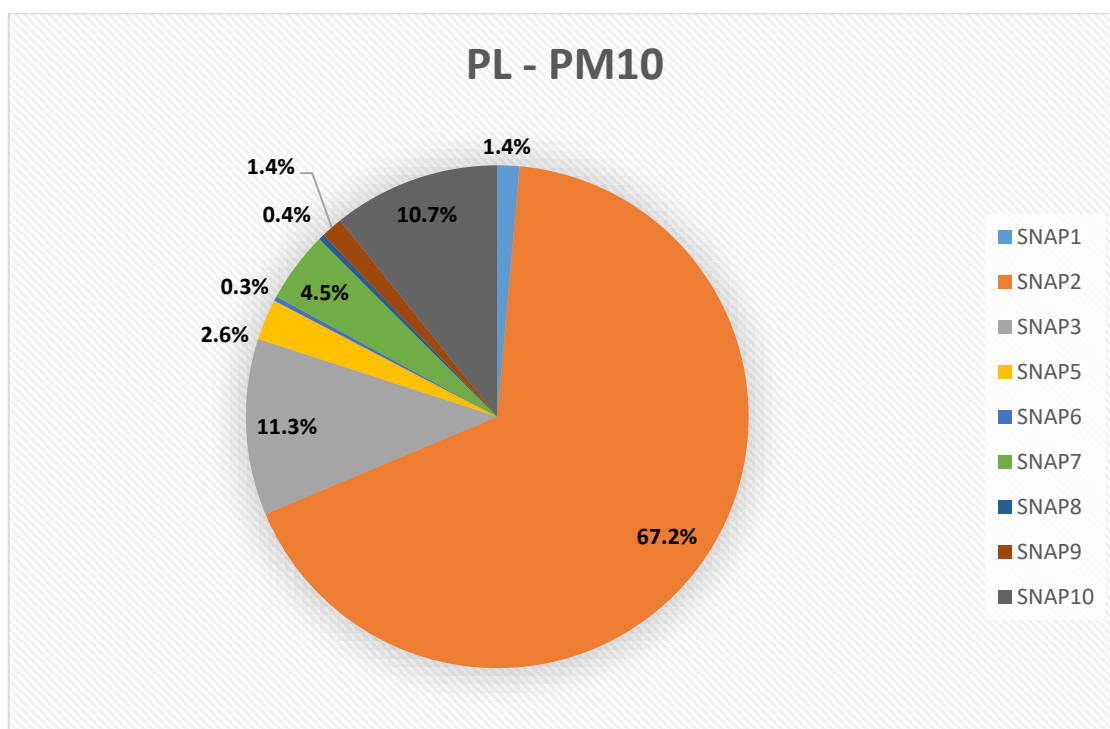
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Europy; EMEP 2022



Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Polski; EMEP 2022



Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM10 na terenie Europy; EMEP 2022



Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM10 na terenie Polski; EMEP 2022

2. Ocena sprawdzalności

Zgodnie z Dyrektywą CAFE (2008/50/WE) wyniki modelowania wykorzystywane w analizach związanych z zarządzaniem jakością powietrza muszą spełniać określone wymagania w odniesieniu do zgodności z obserwacjami. Zgodnie z Załącznikiem 1 Dyrektywy „niepewność modelowania jest definiowana jako maksymalne odchylenie między zmierzonym, a obliczonym poziomem stężenia dla 90% punktów monitoringu w danym okresie dla wartości dopuszczalnej (lub wartości docelowej) z pominięciem stacji niespełniających warunków ewaluacji ustalonych dla narzędzia DELTA tool. Niepewność modelowania interpretuje się jako mającą zastosowanie w zakresie stężeń zbliżonych do odpowiedniej wartości dopuszczalnej (lub wartości docelowej w przypadku ozonu). Pomiary stałe, które należy wybrać dla porównania z wynikami modelowania, muszą być reprezentatywne dla skali objętej modelem”. Ze względu na ten warunek w analizach sprawdzalności pominięto stacje komunikacyjne, niereprezentatywne w przypadku rozdzielczości siatki obliczeniowej ok. 10km.

Takie same kryteria zostały przyjęte do oceny jakości i wiarygodności wyników modelowania scenariusza bazowego, mającego na celu odtworzenie rozkładu zanieczyszczenia w Europie Środkowej. Analizę wykonano wyłącznie w oparciu o pomiary ze stacji monitoringowych PMŚ.

Poziom zgodności wyników modelowania dla poszczególnych zanieczyszczeń podano poniżej w tabeli (**Tabela 1**).

Tabela 1. Procentowy udział stacji, dla których spełniono kryterium niepewności zgodnie z dyrektywą CAFE i Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu

	Substancja i czas uśredniania	Procentowy udział stacji spełniających kryterium niepewności modelowania wg. dyrektywy 2008/50/WE
1	Dwutlenek azotu (NO ₂) – średnia roczna	59,5 %
2	Tlenki azotu (NO _x) – średnia roczna	58,0 %
3	Ozon (O ₃) – 8hmax	100 %
4	Pył zawieszony PM ₁₀ – średnia roczna	95,2 %
5	Pył zawieszony PM _{2,5} – średnia roczna	94,9 %
6	Dwutlenek siarki (SO ₂) – średnia roczna	48,8 %
7	Benzo(a)piren (B(a)P) – średnia roczna	60,8 %

Do szczegółowej ewaluacji wyników modelowania wykorzystano narzędzie DELTA tool w aktualnie dystrybuowanej dostępnej wersji (wersja 7.2, październik 2022 r.). Analizie poddano wyniki modelowania uzyskane dla symulacji bazowej, dla roku 2024. Obecnie w narzędziu DELTA tool pełną analizę modelowania, wraz z uzyskaniem Diagramu Celu uzyskać można dla pyłu PM10, pyłu PM2,5, ozonu i dwutlenku azotu. Diagramy celu zostały przedstawione dla wszystkich stacji w rozdzielczości 10 km w Załączniku nr 2.

Sprawdzalność wykonana z wykorzystaniem DELTA tool wskazuje na zachowanie kryterium jakości przez modelowanie dla większości ewaluowanych w narzędziu zanieczyszczeń. Diagramy celu oraz wykresy rozrzutu obrazują bardzo dobrą (ozon) lub dobrą zgodność wyników modelowania względem obserwacji, z nieznaczną ogólną tendencją modelu do przeszacowania poziomów stężeń. W niemal wszystkich przypadkach wartość tzw. Wskaźnika Jakości Modelowania (MQI – Model Quality Index) wynosi mniej niż 1, co oznacza spełnienie kryterium jakości. Wyjątek, stanowi MQI dla dziennej i rocznej sprawdzalności PM10. Rygorystyczny sposób obliczania wskaźnika MQI w przypadku PM10 jest dyskutowany w dedykowanych grupach roboczych FAIRMODE, gdyż sprawdzalność rocznych stężeń pyłu z warunkiem zawartym w dyrektywie CAFE została spełniona. Ponadto powtarza się problem dla stacji w województwie Śląskim, co znacząco wpływa na wartości wskaźnika jednak nie odzwierciedla w pełni efektywności modelowania. W przypadku sprawdzalności rocznych stężeń NO₂ oraz NO_x nie spełniono warunku zawartego w dyrektywie CAFE. Powodem są dość wysokie przeszacowania na pojedynczych stacjach- mogące wskazywać na problem w rozkładzie emisji. W przypadku ewaluacji modelowanych stężeń SO₂, pomimo dobrych wskaźników statystycznych, kryterium dyrektywy CAFE nie zostało spełnione. Podobnie jak w poprzednich latach występują przeszacowania na pojedynczych stacjach wynikające bezpośrednio z rozkładu i wielkości źródeł emisji w zastosowanej inwentaryzacji.

Zgodność wyników modelowania z pomiarami dla symulacji bazowej roku 2024, podobnie jak w roku poprzednim, wykazała sprawdzalność niższą od oczekiwanej w przypadku NO_x, SO₂ i B(a)P. Powodem może być wykorzystana baza emisji, która budzi wątpliwości ze względu na powtarzające się w kolejnych latach rozbieżności w tych samych częściach kraju. Również rozkład strumienia emisji oraz jego wielkość różni się w dużym stopniu względem Centralnej Bazy Emisyjnej dla której wyniki sprawdzalności są satysfakcjonujące.

Wykonano także analizę struktury emisji w lokalizacjach stacji charakteryzujących się przeszacowaniem. Za znaczące przeszacowania PM10 odpowiada głównie sektor wydobywania paliw (SNAP5), gospodarki odpadami (SNAP9) i spalania paliw w przemyśle (SNAP3). Podobnie jak w poprzednim roku, przeszacowania SO₂ wystąpiły na stacjach w Płocku, gdzie zgodnie z inwentaryzacją EMEP przeważają emisje z sektora spalania paliw w przemyśle (SNAP3) oraz wydobywania paliw (SNAP5). W przypadku NO_x/NO₂ na wysoką wartość emisji z sektora transportu w problemowych lokalizacjach nakładało się oddziaływanie źródeł z sektora spalania paliw w przemyśle (SNAP3) i produkcji energii (SNAP1). Ponieważ w przypadku inwentaryzacji

EMEP nie ma żadnej informacji o wysokości źródeł zweryfikowane zostaną stosowane profile dystrybucji pionowej strumienia emisji.

Ewaluację poszerzono o wykresy słupkowe korelacji i raporty podsumowując wykonane w DELTA tool, które również potwierdziły dobrą jakość wykonanego modelowania. Diagramy oraz wykresy dla wszystkich zanieczyszczeń zostały przedstawione dla wszystkich stacji poza stacjami komunikacyjnymi – gdyż nie są reprezentatywne w zastosowanej do modelowania skali siatki.

Pełna analiza z wykorzystaniem narzędzia DELTA tool oraz wykresy rozrzutu dla poszczególnych zanieczyszczeń dostępne są w Załączniku 2 do niniejszego raportu.

3. Zakres analiz

Na podstawie jednogodzinnych wyników modelowania wykonanych na potrzeby oceny wpływu transportu transgranicznego w Polsce w roku 2024 obliczono parametry statystyczne zgodnie z Załącznikiem nr 4 do Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 lutego 2023 r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczeń powietrza (Dz.U. 2023 poz. 350).

Tabela 2 prezentuje zestawienie parametrów, dla których wykonana została analiza udziału źródeł transgranicznych. Dane te w formie cyfrowej zostały przygotowane w formacie SHP zgodnie z ww. Rozporządzeniem.

Tabela 2. Zestawienie parametrów

	Substancja	Parametr statystyczny
1	Pył zawieszony PM10	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
2	Pył zawieszony PM10	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniami wartości dobowej 50 µg/m ³ w roku kalendarzowym
3	Pył zawieszony PM10	Wartość percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych dla napływu transgranicznego
4	Pył zawieszony PM2,5	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
5	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego

	Substancja	Parametr statystyczny
6	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego w okresie zimowym (01.10-31.03)
7	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniami wartości dobowej 125 µg/m ³ w roku kalendarzowym
8	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniami wartości jednogodzinnej 350 µg/m ³ w roku kalendarzowym;
9	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Wartość percentyla 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dla napływu transgranicznego
10	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Wartość percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych dla napływu transgranicznego
11	Dwutlenek azotu (NO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
12	Dwutlenek azotu (NO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniami wartości jednogodzinnej 200 µg/m ³ w roku kalendarzowym
13	Dwutlenek azotu (NO ₂)	Wartość percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń godzinnych dla napływu transgranicznego
14	Tlenki azotu (NO _x)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
15	Ozon (O ₃)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniami wartości 120 µg/m ³ przez stężenia ośmiogodzinne kroczące w roku oceny
16	Ozon (O ₃)	Wartość percentyl 93,2 w rocznej serii maksimów dobowych stężenia ośmiogodzinne kroczącego dla napływu transgranicznego
17	Ozon (O ₃)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do AOT40 liczone w godzinach 8 ⁰⁰ - 20 ⁰⁰ czasu środkowoeuropejskiego w okresie 01.05- 31.07
18	Benzo(a)piren (B(a)P)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego.

Zgodnie z treścią Załącznika 4, podającego alternatywne formuły obliczania udziałów, procentowy udział transportu transgranicznego zdefiniowano jako:

$$\frac{\text{wartość parametru statystycznego dla napływu transgranicznego obliczonego przy braku emisji z terytorium Rzeczypospolitej Polskiej}}{\text{wartość parametru statystycznego uzyskanego z oceny poziomów substancji w powietrzu}} \times 100$$

Wartości tak zdefiniowanego indeksu odnoszą się bezpośrednio do wpływu emisji zanieczyszczeń spoza obszaru Polski na kształtowanie się poziomów stężeń lub innych diagnostyk narażenia, jednakże bez możliwości wskazania z jakiego kraju lub obszaru pochodzą.

W roku 2024, tak jak zaznaczono we wstępie, rozszerzono analizę o napływ transgraniczny w podziale na udziały emisji zanieczyszczeń z poszczególnych państw sąsiadujących z Polską: Niemiec, Czech, Słowacji, łącznie Ukrainy i Białorusi ("ściana wschodnia"), Litwy i Obwodu Królewieckiego. Udziały te obliczono z wykorzystaniem następującej definicji:

$$\frac{\text{wartość parametru statystycznego dla napływu transgranicznego obliczonego przy braku emisji z terytorium państwa sąsiadującego}}{\text{wartość parametru statystycznego uzyskanego z oceny poziomów substancji w powietrzu}} \times 100$$

Obliczono również udział napływu zanieczyszczeń spoza Polski i krajów sąsiadujących, poprzez wyłączenie emisji z obszarów wszystkich wymienionych powyżej państw i zastosowanie powyższego wzoru celem ustalenia poziomu tła ponadregionalnego.

Dla każdej strefy obliczono średni udział procentowy napływu transgranicznego poszczególnych zanieczyszczeń. Wartość odpowiadająca danej strefie jest obliczana jako średnia ważona obszarem oczek siatki, które pokrywają strefę. Wyniki tych obliczeń zawarto w Załączniku 3.

4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń na podstawie wyników modelowania

Wyniki modelowania zostały wykorzystane do analizy rozkładu przestrzennego procentowego udziału transportu transgranicznego w poziomie stężeń zanieczyszczeń i diagnostyk narażenia na podwyższone wartości zanieczyszczeń na obszarze Polski, jak i ocenę udziału emisji z Polski w roku 2024.

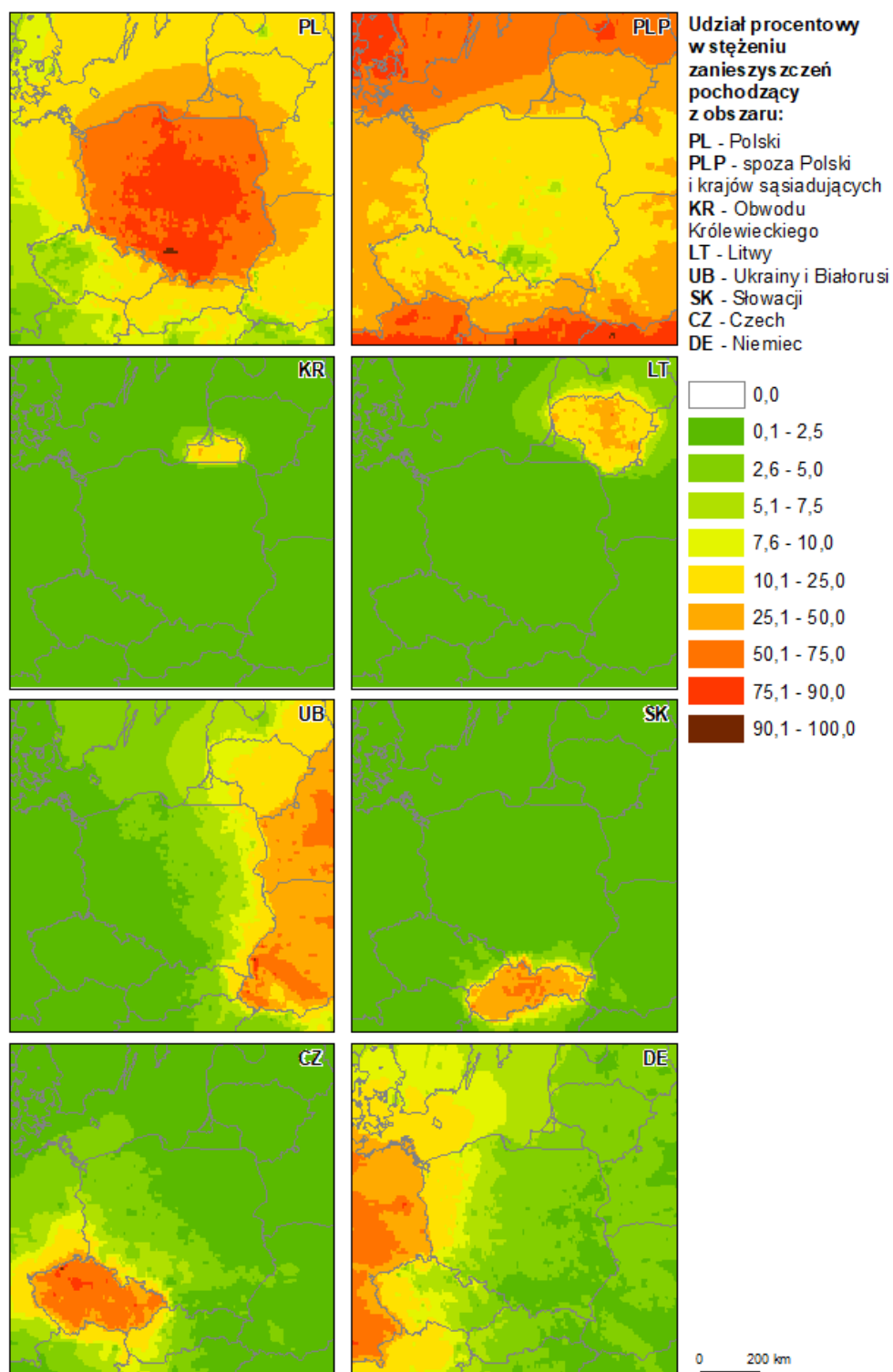
4.1 Pył PM₁₀

Analiza udziału źródeł transgranicznych pyłu PM₁₀ w 2024 roku obejmuje zarówno przestrzenny rozkład napływu zewnętrznego na teren Polski, jak i ocenę udziału emisji z Polski w kształtowaniu poziomów stężeń zanieczyszczeń na terenie Polski i krajów sąsiednich na podstawie:

- Stężeń średnich rocznych,
- Uśrednionych stężeń w trakcie epizodów przekroczeń średniej dobowej powyżej 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na co najmniej 10 stacjach.

W 2024 roku udział źródeł krajowych w kształtowaniu średniorocznego stężenia PM₁₀ dominował na przeważającym obszarze Polski – w centralnej i południowej części kraju wartości te osiągały 50–75%, a miejscami nawet powyżej 75%. Najwyższe wartości, lokalnie przekraczające 90%, wystąpiły lokalnie w województwie śląskim (**Rysunek 7**).

Napływ zewnętrzny był najbardziej istotny w rejonach przygranicznych, szczególnie w zachodniej i południowo-wschodniej Polsce. W pasie województw lubuskiego, dolnośląskiego, śląskiego, małopolskiego, podkarpackiego i lubelskiego udział źródeł transgranicznych osiągał 25–50%, a lokalnie (przy granicy z Czechami i Słowacją) przekraczał 50%.



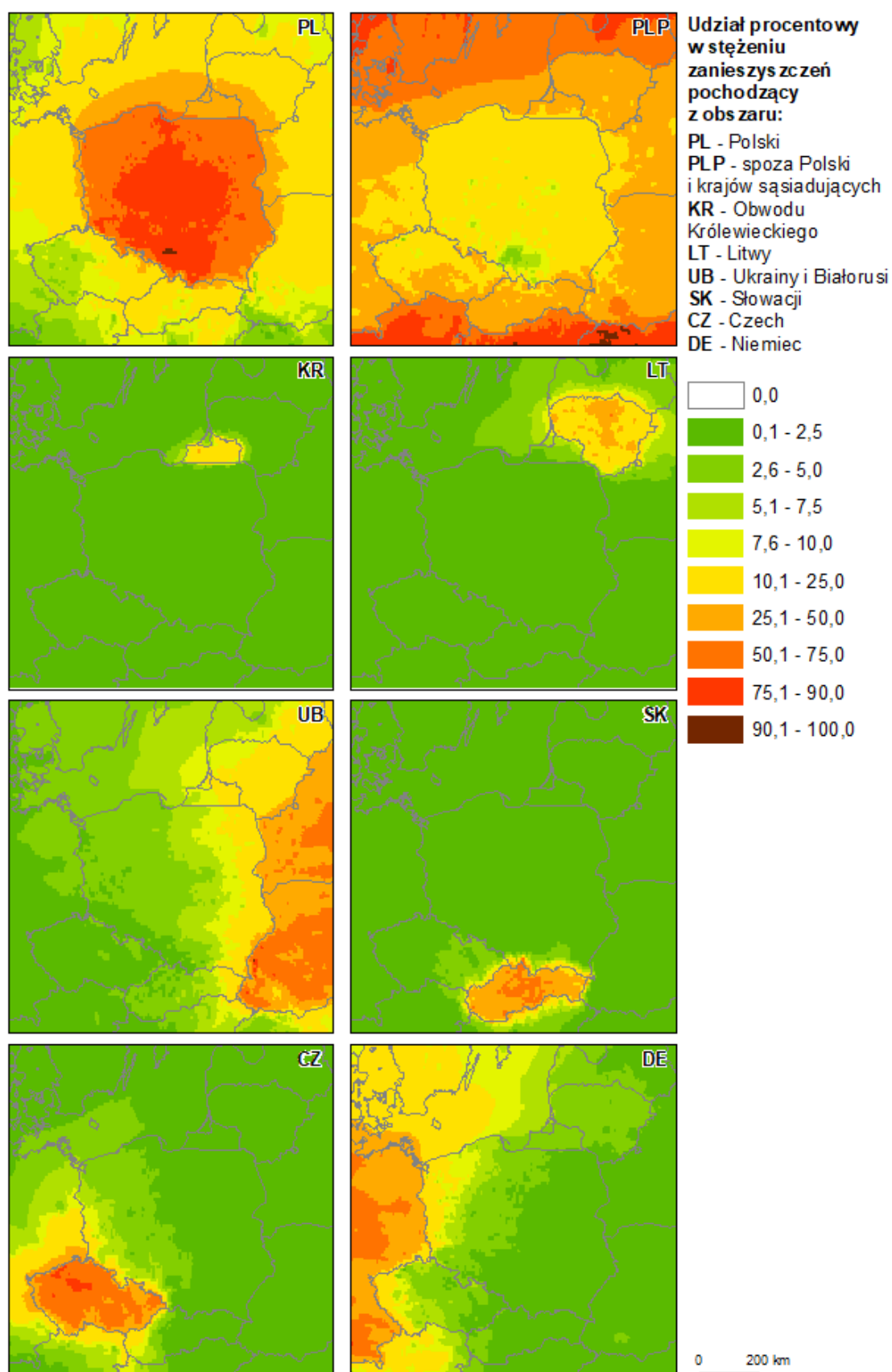
Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM₁₀ na obszarze Polski oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Poszczególne mapy przedstawiają wpływ emisji z wybranych krajów na roczne średnie stężenie PM₁₀ w Polsce i krajach ościennych:

- **PL (Polska)** – Krajowe emisje PM₁₀ mają dominujący wpływ na stężenia wewnątrz kraju, zwłaszcza w centrum i na południu, gdzie udział ten przekracza 75%, a lokalnie na terenie województwa śląskiego powyżej 90%. Wkład Polski jest również zauważalny w rejonach przygranicznych krajów sąsiadujących, szczególnie na terenie Ukrainy, Białorusi, Litwy oraz Obwodu Królewieckiego.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiadujących)** – Wpływ emisji ze źródeł odległych, spoza regionu Europy Środkowej, był największy w południowo-wschodniej Polsce oraz miejscami na północy i południu kraju – tam udział ten osiągał 25–50%. Na przeważającym obszarze kraju wartości te były niższe – 10–25%, a lokalnie w centrum i na południu nawet poniżej 5%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Oddziaływanie emisji z Obwodu Królewieckiego było terytorialnie ograniczone i niewielkie, ograniczając się do pasa przygranicznego północno-wschodniej Polski (do 25%).
- **LT (Litwa)** – Emisje z Litwy wpływały punktowo na jakość powietrza w rejonie Suwalszczyzny, osiągając lokalnie wartości 5–10%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Wpływ emisji z kierunku wschodniego był widoczny wzdłuż pasa granicznego od Podkarpacia po Podlasie. W pasie przygranicznym udział wynosił 10–25%, lokalnie do 50%, im dalej od granicy tym wartości te malały do poziomu kilku procent.
- **SK (Słowacja)** – Wkład emisji z obszaru Słowacji zaznaczał się lokalnie na południu województwa małopolskiego i częściowo na Podkarpaciu. Udział w tych regionach mieścił się w przedziale 10–25%, przekraczając lokalnie 25% w bezpośredniej strefie przygranicznej.
- **CZ (Czechy)** – Emisje czeskie wpływały na stężenia w południowo-zachodniej Polsce, szczególnie w woj. opolskim i dolnośląskim. W pasie przygranicznym udział ten przekraczał 50%, lokalnie przy samej granicy osiągając 75%, a w głębi województw malał do 10–25%.
- **DE (Niemcy)** – Emisja zanieczyszczeń z obszaru Niemiec oddziaływała na zachodnią część Polski, głównie woj. lubuskie i zachodniopomorskie. W strefie przygranicznej udział źródeł przekraczał 25–50%, a w miarę przemieszczania się powietrza na wschód – spadał do poziomu 5–10%.

W przypadku dni z przekroczeniami wartości dopuszczalnej, znaczący udział krajowych źródeł (PL) wystąpił na obszarze niemal całej Polski – od 50 do 75% w przeważającej części kraju, a lokalnie (zwłaszcza w centrum, południu i południowym zachodzie) przekraczał 75%, a nawet 90% (na terenie województwa śląskiego). Największe wartości obserwuje się w rejonie Śląska, Małopolski, Mazowsza oraz Wielkopolski. Potwierdza to dominację lokalnych i regionalnych źródeł emisji pyłu PM₁₀ w generowaniu przekroczeń wartości dobowej (**Rysunek 8**).

Napływ zewnętrzny odpowiadał głównie za udział w przekroczeniach na południowym wschodzie, południu i zachodzie kraju. W tych rejonach wartości te wynosiły od 10 do 25%, lokalnie osiągając 25–50%. W centrum Polski udział ten był z reguły niższy i nie przekraczał 7,5%.



Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego uśrednionych stężeń w trakcie epizodów przekroczeń średniej dobowej pyłu PM10 powyżej $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na co najmniej 10 stacjach, na obszarze Polski w 2024 roku

Poszczególne mapy przedstawiają wpływ emisji z określonych państw na poziom stężeń w trakcie dni z przekroczeniem poziomu dopuszczalnego:

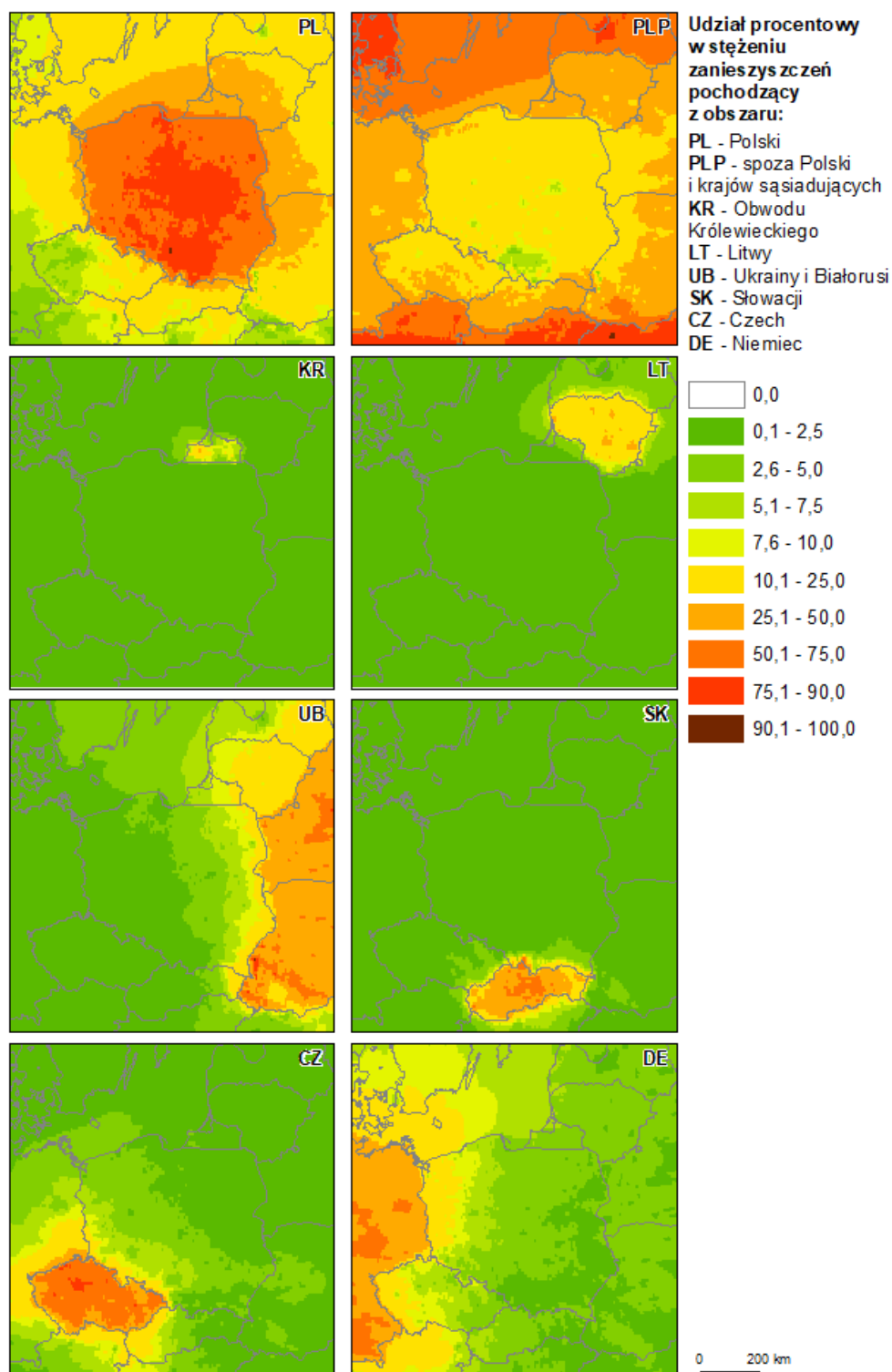
- **PL (Polska)** – Emisje krajowe w dominujący sposób wpływały na występowanie przekroczeń, zwłaszcza w województwach środkowych, południowych i południowo-zachodnich. W dużej części kraju udział przekroczeń związanych z emisją z terytorium Polski wynosił 50–75%, a lokalnie na Śląsku – powyżej 90%.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiednich)** – Wpływ źródeł odległych (ponadregionalnych) był szczególnie istotny na południowym wschodzie (Podkarpacie) oraz punktowo na północy i południu kraju. W tych obszarach udział ten wynosił 25–50%, natomiast lokalnie w centralnej i południowej Polsce był niższy od 10%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Oddziaływanie było ograniczone przestrzennie i dotyczyło wyłącznie północno-wschodniego krańca Polski. Wkład nie przekraczał przy samej granicy kraju 25%.
- **LT (Litwa)** – Wpływ emisji z Litwy był zauważalny tylko lokalnie w rejonie Suwalszczyzny, gdzie wartości udziału przekroczeń wynosiły 5–10%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Napływ z obszarów wschodnich odpowiadał za udział w przekroczeniach wzdłuż wschodniej granicy – od Podkarpacia po Podlasie. W tych rejonach wartości wynosiły 10–25%, a lokalnie na w województwie lubelskim i podkarpackim (przy samej granicy) nawet 25–50%. W głębi kraju udział ten spadał poniżej 10%.
- **SK (Słowacja)** – Emisje słowackie wpływały lokalnie na południe województwa małopolskiego i częściowo podkarpackiego, gdzie udział ten wynosił 10–25%, przy granicy przekraczał 25%. Lokalnie w południowo-zachodniej części województwa małopolskiego przekroczył 50%.
- **CZ (Czechy)** – Udział czeskich źródeł był szczególnie widoczny na południowym zachodzie kraju – w woj. opolskim i dolnośląskim. W strefie przygranicznej przekraczał 25%, lokalnie nawet 50%. Dalej od granicy kraju sięgał 10–25%.
- **DE (Niemcy)** – Emisje niemieckie wpływały na liczbę przekroczeń głównie w woj. lubuskim i zachodniopomorskim. W rejonie przygranicznym wartości osiągały 25–50%, a dalej w głąb kraju spadały do 10%.

4.2 Pył PM_{2,5}

Analiza udziału źródeł transgranicznych pyłu PM_{2,5} w 2024 roku obejmuje zarówno przestrzenny rozkład napływu zewnętrznego na teren Polski, jak i ocenę udziału emisji z Polski w kształtowaniu jakości powietrza w krajach sąsiednich, na podstawie rozkładu przestrzennego stężeń średnich rocznych.

W 2024 roku udział źródeł w średniorocznym stężeniu pyłu PM_{2,5} na obszarze Polski pochodził głównie ze źródeł krajowych – od 50 do 75 % na większości obszaru kraju, 75 do 90% w części środkowej oraz na południu, lokalnie na w województwie śląskim powyżej 90% (**Rysunek 9**).

Największe wartości napływu (powyżej 50%) wystąpiły lokalnie w południowo-wschodniej Polsce (głównie przy granicy z Ukrainą i Słowacją), a także w rejonach południowo-zachodnich, w bezpośrednim sąsiedztwie Czech. W pasie przygranicznym – obejmującym województwo lubuskie, małopolskie, śląskie i dolnośląskie – napływ transgraniczny kształtował się zazwyczaj w przedziale 25–50%. W środkowej, wschodniej i północnej Polsce dominowały wartości 10–25%, a lokalnie – głównie w centrum kraju – poniżej 7,5%, co wskazuje na dominację emisji lokalnych.



Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM_{2,5} na obszarze Polski oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Poszczególne mapy przedstawiają procentowy wpływ emisji z poszczególnych krajów na roczną średnią stężenia PM_{2,5} w Polsce i krajach ościennych:

- **PL (Polska)** – Krajowe emisje PM_{2.5} mają dominujący wpływ na stężenia na obszarze kraju, zwłaszcza w centrum i na południu, gdzie udział ten przekracza 75%, a lokalnie na terenie województwa śląskiego powyżej 90%. Wkład Polski jest również zauważalny w rejonach przygranicznych krajów sąsiadujących, szczególnie na terenie Ukrainy, Białorusi, Litwy oraz Obwodu Królewieckiego.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiadujących)** – emisje spoza obszaru Polski i krajów ościennych wpływają głównie na stężenia w południowo-wschodniej części kraju, miejscowo na północy i zachodzie (25 - 50%). Większość kraju objęta jest napływem rzędu 10-25%. W dużych miastach oraz na Śląsku i w Małopolsce udział ten spada i wynosi poniżej 7,5%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – wpływ ograniczony terytorialnie i niewielki, obejmujący jedynie obszar przygraniczny (1-10%).
- **LT (Litwa)** – emisje litewskie wpływają minimalnie na jakość powietrza w rejonie przygranicznym, ale udział ten nie przekracza 2,5-5%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – wyraźny wpływ występuje we wschodniej Polsce, od Podkarpacia, przez Lubelszczyznę po Podlasie, z udziałem do 50% lokalnie, w pasie przygranicznym, malejący stopniowo do kilku procent w centrum kraju.
- **SK (Słowacja)** – wpływ skoncentrowany jest lokalnie w rejonie przygranicznym w Małopolsce i miejscami na Podkarpaciu, osiągając wartości średnio 10-25%, miejscami przy granicy do 50%. Lokalnie w południowo-zachodniej części województwa małopolskiego przekroczył 50%.
- **CZ (Czechy)** – emisje z obszaru Czech wpływają głównie na jakość powietrza w południowo-zachodniej Polsce, zwłaszcza woj. opolskie i dolnośląskie, z udziałem 10-25, przekraczając lokalnie przy granicy 50%. Wpływ emisji z Czech maleje wraz z przemieszczaniem się powietrza na północny wschód, w środkowej części kraju utrzymuje się do kilku procent.
- **DE (Niemcy)** – emisje z obszaru Niemiec oddziałują na zachodnią część kraju, głównie w województwach lubuskim i zachodniopomorskim, gdzie udział źródeł transgranicznych przekracza oscyluje od ponad 25% przy granicy, do 10% w centrum i na wschodzie województw. Wpływ maleje systematycznie ze wzrostem odległości od granicy

4.3 Dwutlenek siarki SO₂

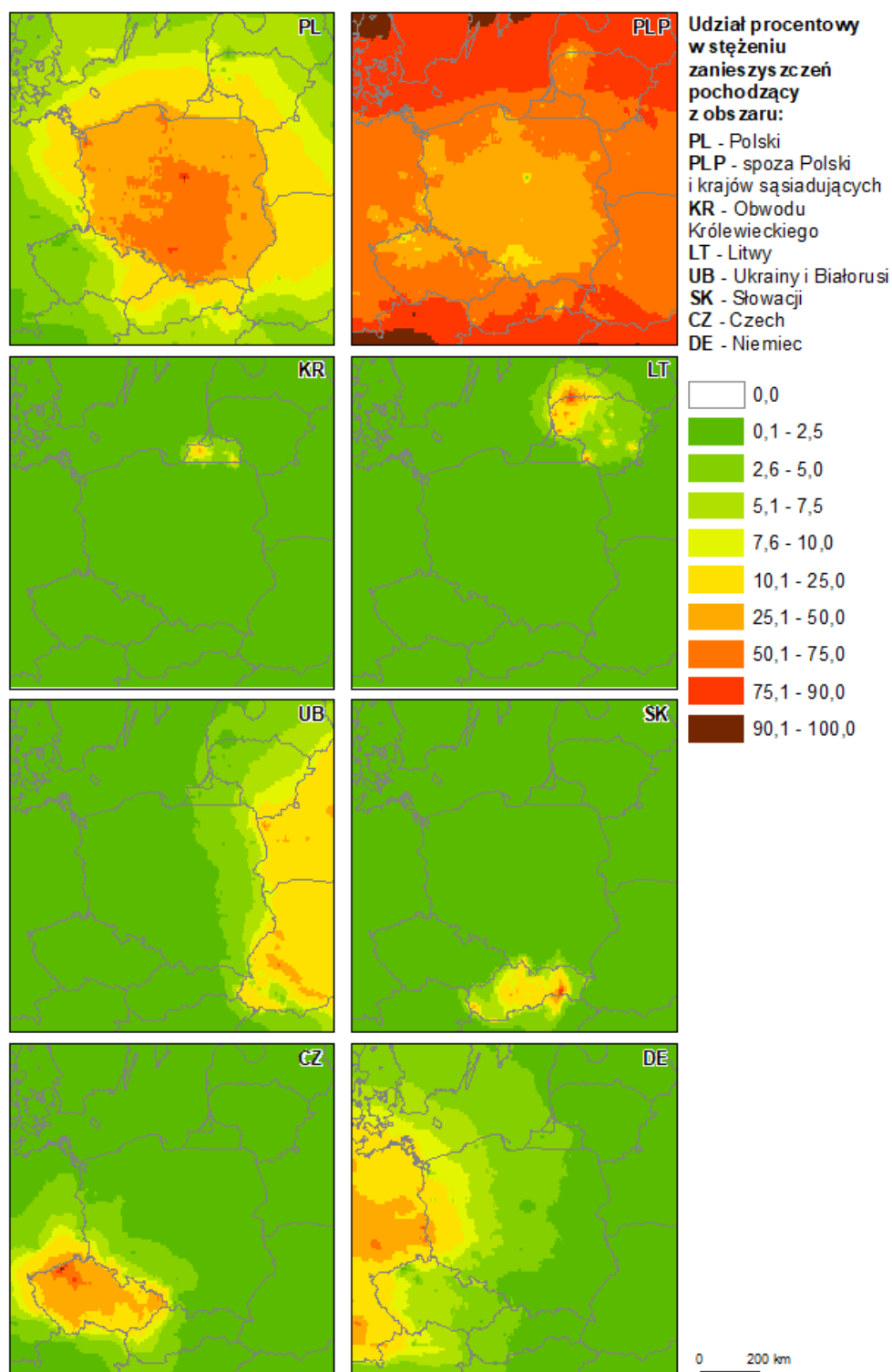
Analiza udziału źródeł transgranicznych SO₂ w 2024 roku obejmuje zarówno przestrzenny rozkład napływu zewnętrznego na teren Polski, jak i ocenę udziału emisji z Polski w kształtowaniu jakości powietrza w krajach sąsiednich na podstawie:

- Stężeń średnich rocznych,
- Stężeń średnich w okresie zimowym (01.01-31.03 i 01.10-31.12),
- Liczby dni z przekroczeniem wartości średniodobowej powyżej 125 µg/m³,

- Liczby godzin z przekroczeniem wartości godzinowej powyżej 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

W 2024 roku największym źródłem SO_2 w Polsce pozostawały emisje krajowe, zwłaszcza na obszarach centralnych i południowo-zachodnich (**Rysunek 10**). W większości regionów Polski udział emisji z terytorium kraju wynosił 25–50%, natomiast w centrum kraju – zwłaszcza w woj. łódzkim, śląskim i dolnośląskim – przekraczał 50%. W lokalnych strefach przemysłowych (np. Górny Śląsk czy rejon Płocka) udział wynosił powyżej 75%.

Emisje spoza Polski i krajów ościennych (PLP) miały wyraźny udział w kształtowaniu tła stężeń SO_2 na terenie całego kraju – szczególnie widoczny w północno-wschodniej i południowo-wschodniej Polsce, gdzie udział ten wynosił 50–75%, a lokalnie na południu województwa podkarpackiego przekraczał 75%, co sugeruje znaczny wpływ transportu dalekosiężnego SO_2 w warstwach wyższych atmosfery.



Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Poszczególne mapy przedstawiają wpływ poszczególnych państw na średnioroczne stężenie SO_2 w Polsce:

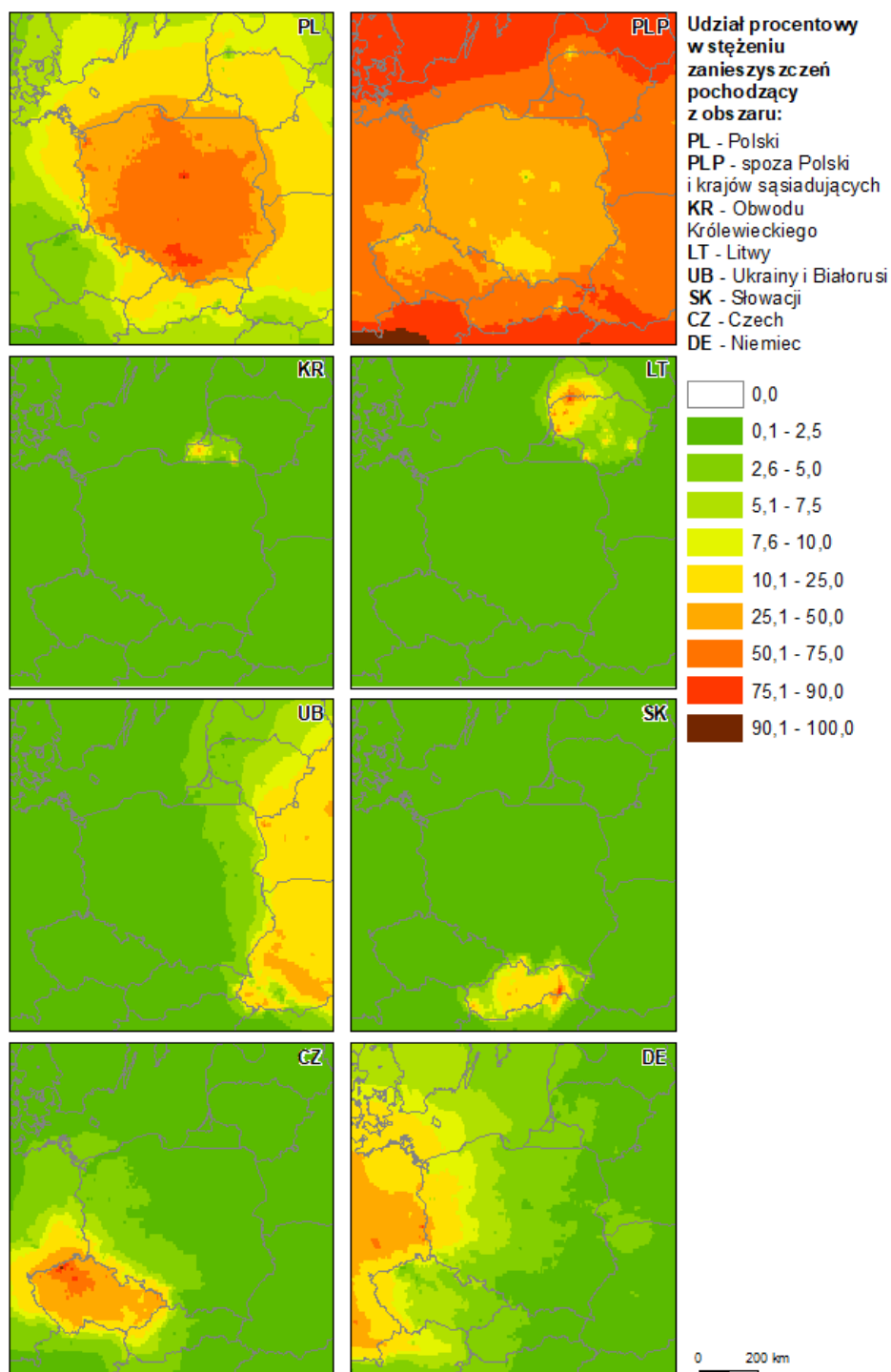
- **PL (Polska)** – Emisje krajowe miały największy udział w południowo-zachodniej, środkowej i częściowo północnej Polsce, osiągając wartości 25–50%, a lokalnie

powyżej 50%, szczególnie w województwach: śląskim, dolnośląskim, opolskim i łódzkim.

- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiadujących)** – Transport z odległych źródeł miał bardzo duży udział w północno-wschodniej Polsce (Warmińsko-Mazurskie, Podlasie), gdzie ze względu na brak lokalnych źródeł wartości te sięgały 50–75%. Wyższe wartości wystąpiły także wzdłuż południowej granicy – w pasie województw podkarpackiego, lubelskiego i małopolskiego, lokalnie na podkarpaciu wartość ta przekroczyła 75%. W centrum kraju wartości te mieściły się w przedziale 25–50%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Wpływ ograniczał się do wąskiego pasa przygranicznego w północno-wschodniej Polsce, gdzie udział emisji wynosił do 10%, punktowo nieco więcej – do 50%.
- **LT (Litwa)** – Emisje z Litwy wpływały lokalnie na północno-wschodnią część kraju (Suwalszczyzna), gdzie udział ten mieścił się w przedziale 5–10%, punktowo dochodząc do 25%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Wkład z obszaru wschodniego był istotny w południowo-wschodniej Polsce – szczególnie w woj. lubelskim i podkarpackim. W pasie przygranicznym udział wynosił 10–25%, dalej w głąb kraju malał.
- **SK (Słowacja)** – Oddziaływanie emisji ze Słowacji ograniczało się do południowej Małopolski i Podkarpacia, gdzie wartości mieściły się w zakresie 10–25%.
- **CZ (Czechy)** – Wkład emisji czeskich dotyczył głównie południowo-zachodniej Polski, zwłaszcza woj. opolskiego i dolnośląskiego. W rejonach przygranicznych udział wynosił 10–25%, lokalnie do 50%.
- **DE (Niemcy)** – Emisje niemieckie wpływały na zachodnie regiony Polski, szczególnie woj. lubuskie i zachodniopomorskie. W strefie przygranicznej udział sięgał 25–50%, a dalej w głąb województw – 10–25%.

W chłodnej połowie roku 2024 roku dominującym źródłem emisji SO₂ pozostawały źródła krajowe – szczególnie w regionach centralnych, południowych i południowo-zachodnich (**Rysunek 11**). W wielu rejonach Polski udział emisji z terytorium kraju mieścił się w przedziale 50–75%, a lokalnie – m.in. na Górnym Śląsku, w Małopolsce, punktowo na terenie Bełchatowa i Płocka – przekraczał 75%, osiągając miejscami wartość powyżej 90%. Rozkład przestrzenny wskazuje na istotny wpływ emisji komunalnych i przemysłowych w tym okresie.

Emisje pochodzące spoza Polski i krajów sąsiadujących (PLP) również istotnie kształtowały tło zanieczyszczenia w warunkach zimowych – zwłaszcza w północno-wschodniej oraz południowo-wschodniej Polsce. W tych regionach udział napływu dalekiego przekraczał 50%, a lokalnie na podkarpaciu dochodził do 75–90%. W pozostałej części kraju wartości te utrzymywały się zwykle w przedziale 25–50%.



Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Poszczególne mapy przedstawiają wpływ emisji z określonych obszarów na zimowe średnie stężenie SO_2 w Polsce:

- **PL (Polska)** – Emisje krajowe miały najwyższy wpływ na poziom stężenia SO_2 w okresie zimowym w południowej, centralnej i północnej części kraju. W województwie śląskim,

dolnośląskim i łódzkim udział ten przekraczał 75%, a lokalnie na terenie Płocka osiągał powyżej 90%, co odzwierciedla silny wpływ źródeł lokalnych i regionalnych zimą.

- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiednich)** – Wkład źródeł spoza regionu był szczególnie zauważalny w północno-wschodniej i południowo-wschodniej Polsce, gdzie udział ten wynosił 50–75%, a lokalnie na podkarpaciu nawet 75–90%. W centrum kraju wartości te były niższe – w zakresie 25–50%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Oddziaływanie emisji z Obwodu Królewieckiego ograniczało się do północno-wschodniego skraju kraju, z udziałem nieprzekraczającym 25%, punktowo do 50%.
- **LT (Litwa)** – Emisje z terenu Litwy wpływały punktowo na północno-wschodnią Polskę (Suwalszczyzna), osiągając 10–25%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Napływ z kierunku wschodniego wynikający z emisji na obszarze Litwy i Białorusi odpowiadał za udział w stężeniach w południowo-wschodniej Polsce – w woj. podkarpackim i lubelskim udział ten wynosił do 25%, malejąc wgłąb kraju.
- **SK (Słowacja)** – Udział emisji z obszaru Słowacji ograniczał się do terenów przygranicznych – głównie południowej Małopolski i Podkarpacia. Udział ten mieścił się w zakresie 10–25%.
- **CZ (Czechy)** – Emisje z Czech wywierały istotny wpływ na poziom stężeń w południowo-zachodniej Polsce, szczególnie w woj. opolskim i dolnośląskim. W pasie granicznym udział ten osiągał 25–50%, punktowo powyżej 50%.
- **DE (Niemcy)** – Wpływ emisji z Niemiec zaznaczał się głównie w woj. lubuskim i zachodniopomorskim – w pasie przygranicznym udział przekraczał 25%, malejąc w miarę zwiększania odległości od granicy.

Wyniki modelowania w 2024 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ani przypadków przekroczeń wartości jednogodzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny dla tych parametrów wynosi 0%.

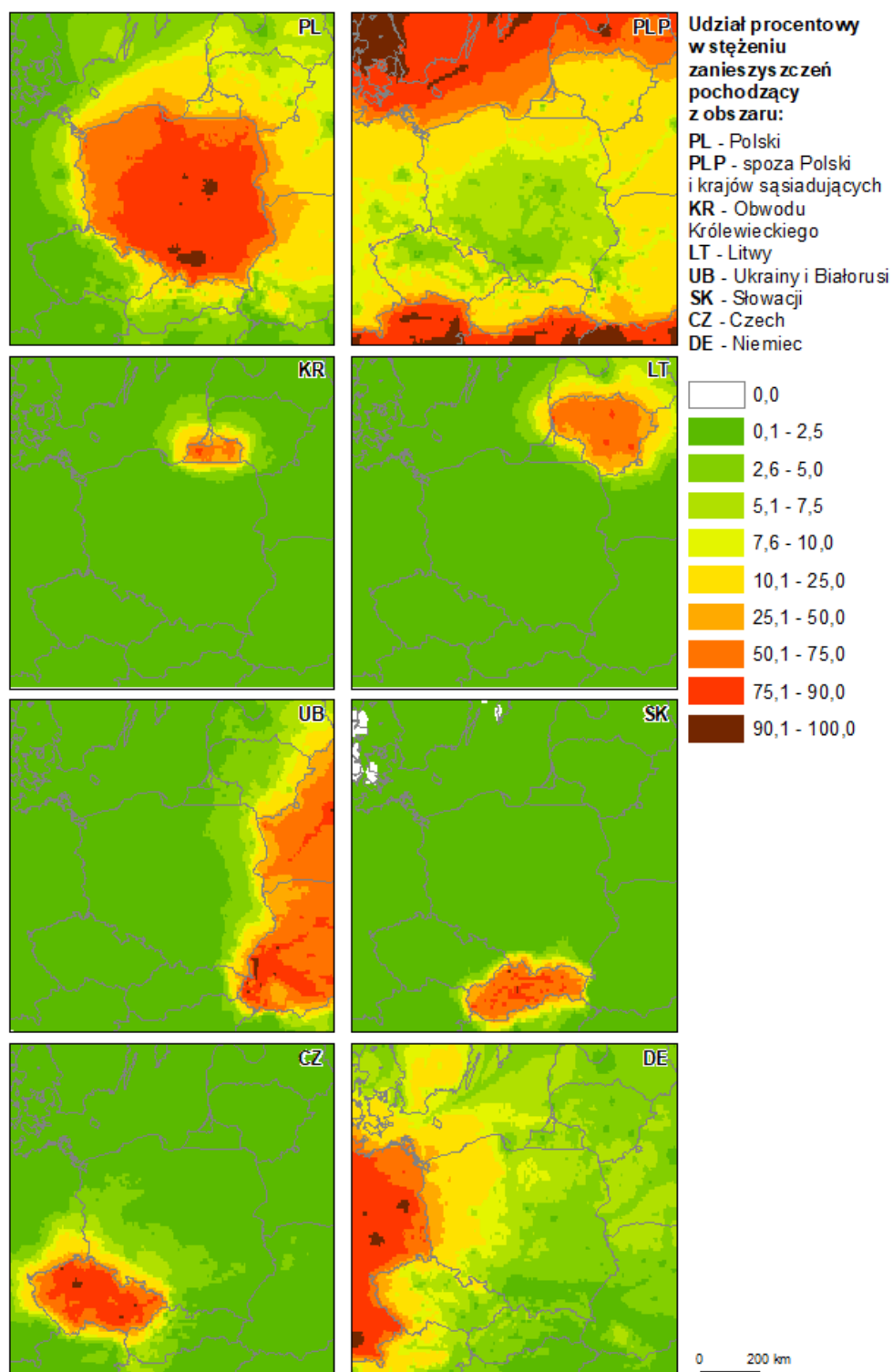
4.4 Dwutlenek azotu NO_2

Analiza udziału źródeł transgranicznych NO_2 w 2024 roku obejmuje zarówno przestrzenny rozkład napływu zewnętrznego na teren Polski, jak i ocenę udziału emisji z Polski w kształtowaniu jakości powietrza w krajach sąsiednich na podstawie:

- Stężeń średnich rocznych,
- Liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej powyżej $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na terenie Polski dominuje wpływ emisji krajowych – w centralnej, południowej i wschodniej części kraju udział NO_2 pochodzącego z Polski wynosił od 75 do 90%, a lokalnie – m.in. w rejonach Płocka, aglomeracji warszawskiej, łódzkiej, górnośląskiej i krakowskiej – przekraczał 90%. To potwierdza, że głównym źródłem stężeń NO_2 są krajowe emisje liniowe i punktowe związane z procesami przemysłowymi (**Rysunek 12**).

W odniesieniu do napływu zewnętrznego – najwyższe wartości udziału, od 50 do 75%, odnotowano w południowo-wschodniej i zachodniej Polsce. Niższy napływ do 50% występował na północy, wschodzie i południu kraju. W centrum kraju napływ ten nie przekraczał zazwyczaj 10%.



Rysunek 12. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Poszczególne mapy przedstawiają wpływ poszczególnych obszarów na średnioroczne stężenie NO_2 w Polsce:

- **PL (Polska)** – Emisje krajowe mają dominujący udział w na przeważającym obszarze Polski, zwłaszcza w rejonach aglomeracyjnych i przemysłowych. Udział ten na rozległym obszarze kraju przekraczał 50%, a w centralnych województwach – często 75%, lokalnie osiągając powyżej 90% na terenie największych aglomeracji miejskich.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiednich)** – Transport dalekozasięgowy miał ograniczony wpływ na stężenia NO₂, ale w północnej i południowo-wschodniej Polsce udział ten osiągał 25%, a punktowo na północy nawet do 50%. W pozostałej części kraju wpływ PLP wynosił zazwyczaj do 10%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Wpływ emisji z tego obszaru na poziom stężeń ograniczał się do strefy przygranicznej – głównie w woj. warmińsko-mazurskim – i wynosił do 25%, lokalnie w pasie granicznym do 50%.
- **LT (Litwa)** – Emisje z Litwy wpływały lokalnie na obszar Suwalszczyzny, gdzie udział ten wynosił 10–25%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – W południowo-wschodniej i wschodniej Polsce (Podkarpacie, Lubelszczyzna, Podlasie) udział napływu z kierunku wschodniego wynosił 10–25%, lokalnie przy granicy do 50%. W centrum granicznych województw wartości te były niższe – zazwyczaj do 5%.
- **SK (Słowacja)** – Wpływ emisji ze Słowacji na poziom stężeń NO₂ ograniczał się do obszarów przygranicznych w Małopolsce i na Podkarpaciu, z udziałem rzędu 25–50%, a lokalnie do 75%.
- **CZ (Czechy)** – Emisje z Czech miały istotny wpływ na południowo-zachodnią Polskę – zwłaszcza w rejonach woj. opolskiego, śląskiego i dolnośląskiego. W pasie przygranicznym udział ten przekraczał 50%, a punktowo był w przedziale 75–90%.
- **DE (Niemcy)** – Wpływ emisji z Niemiec był wyraźny w zachodniej Polsce – szczególnie w woj. lubuskim i zachodniopomorskim. Udział w pasie przygranicznym osiągał 50–75%, dalej od granicy na wschód do 50%, następnie wartości udziału emisji z tego kraju wyraźnie malały.

Wyniki modelowania w 2024 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia przekroczeń poziomu 200 µg/m³ dla wartości jednogodzinnej stężeń dwutlenku azotu. Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.

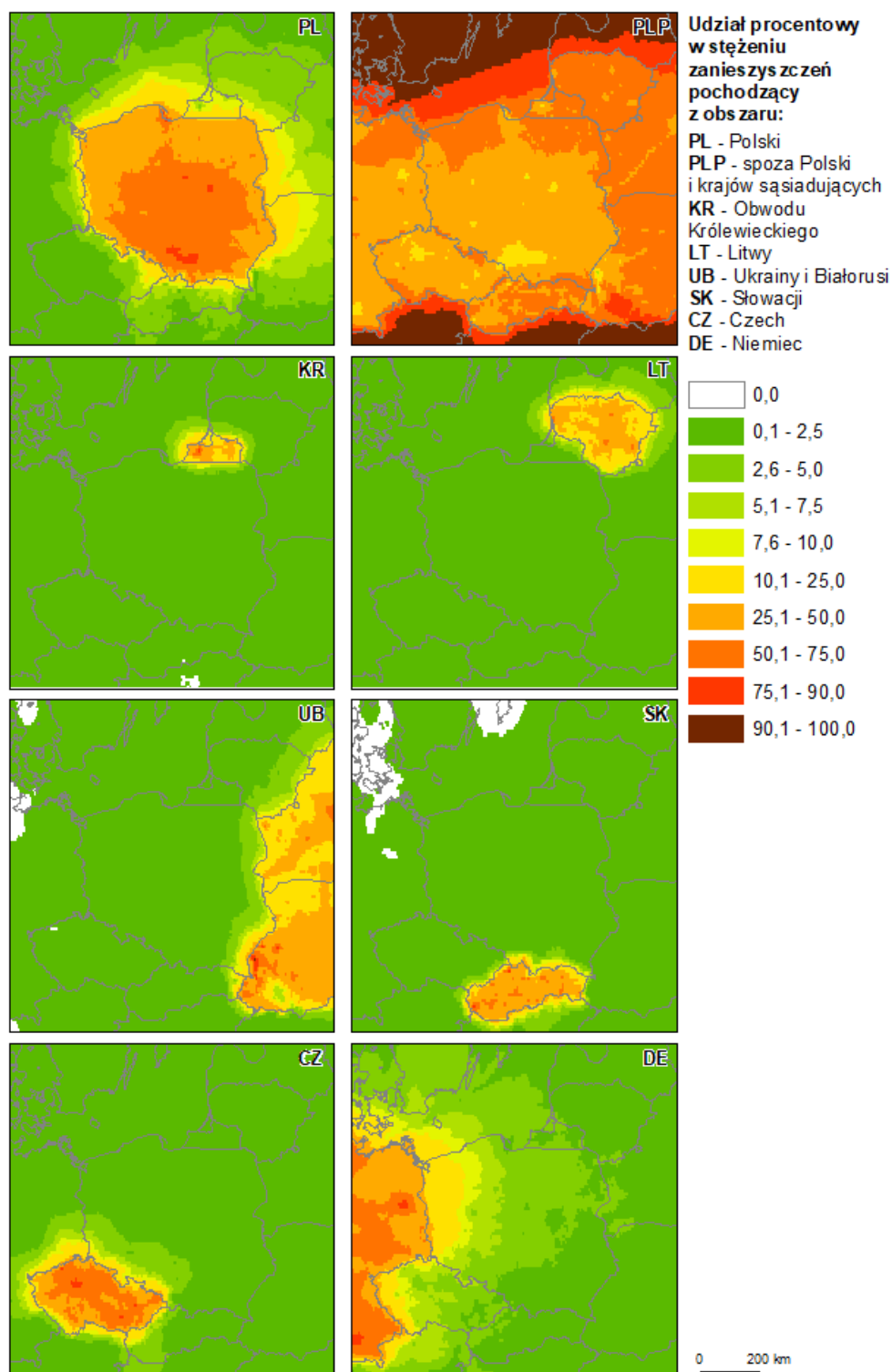
4.5 Tlenki azotu NO_x

Analiza udziału źródeł transgranicznych dwutlenków azotu w 2024 roku dotyczy rozkładu przestrzennego stężeń średnich rocznych.

W 2024 roku dominującym źródłem NO_x na terytorium Polski były emisje krajowe – ich udział wynosił 50–75% w większości kraju, natomiast na terenie dużych ośrodków miejskich

przekraczał 75% (w rejonie aglomeracji górnośląskiej, łódzkiej i warszawskiej). Wysokie udziały krajowe wskazują na silny wpływ emisji liniowych (transport) i punktowych (energetyka, przemysł) na jakość powietrza w Polsce (**Rysunek 13**).

Emisje zewnętrzne wywierały wpływ na poziom stężeń w północnej, północno-wschodniej oraz południowo-wschodniej Polsce – w tych rejonach udział transgraniczny sięgał 50–75%, co sugeruje udział tła regionalnego i transportu dalekozasięgowego NO_x.



Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Szczegółowe mapy przedstawiają udział poszczególnych krajów w kształtowaniu stężeń NO_x :

- **PL (Polska)** – Emisje krajowe dominowały na przeważającym obszarze Polski. W centralnej, południowej i północnej części kraju wpływ NO_x emitowanych na terenie Polski na poziom stężeń tego zanieczyszczenia przekraczał 75%, lokalnie powyżej 90%

na terenie dużych ośrodków miejskich (aglomeracja krakowska, górnośląska, trójmiejska i na terenie Płocka).

- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiadujących)** – Wpływ emisji spoza regionu przenoszonych wskutek transportu dalekozasięgowego był wyraźny szczególnie w północnej, północno-wschodniej oraz południowo-wschodniej Polsce – tam udział ten wynosił 50–75%. Na przeważającym obszarze kraju wartości mieściły się w zakresie 25–50%. W centralnej części kraju wartości te spadały do 25%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Emisje z tego obszaru miały ograniczony wpływ przestrzenny – głównie w rejonie granicy z woj. warmińsko-mazurskim – gdzie udział sięgał 10–25%.
- **LT (Litwa)** – Emisje z Litwy oddziaływały na północno-wschodnią Polskę (Suwalszczyzna), osiągając 10–25%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Wkład emisji ze wschodu na poziom stężeń w Polsce zaznaczał się szczególnie w woj. lubelskim i podkarpackim – udział w pasie przygranicznym wynosił 25–50%, dalej w głąb kraju malał do 10%.
- **SK (Słowacja)** – Emisje ze Słowacji wpływały głównie na poziom stężeń w południowych rejonach Małopolski i Podkarpacia. W strefie przygranicznej udział NO_x osiągał 25–50%.
- **CZ (Czechy)** – Emisje z Czech miały wpływ na jakość powietrza w południowo-zachodniej Polsce – szczególnie w woj. opolskim, śląskim i dolnośląskim. Udział w strefie granicznej przekraczał 25–50%, a punktowo osiągał wartości powyżej 50%.
- **DE (Niemcy)** – Wpływ emisji z Niemiec odnotowano głównie w woj. lubuskim i zachodniopomorskim. Udział w przygranicznej strefie wynosił 25–50%, w głębi województw – do 10–25%.

4.6 Ozon O_3

Analiza udziału źródeł transgranicznych ozonu w 2024 roku dotyczy rozkładu przestrzennego:

- Uśrednionych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu w trakcie epizodów przekroczeń $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na co najmniej 10 stacjach,
- Wartości wskaźnika AOT40³.

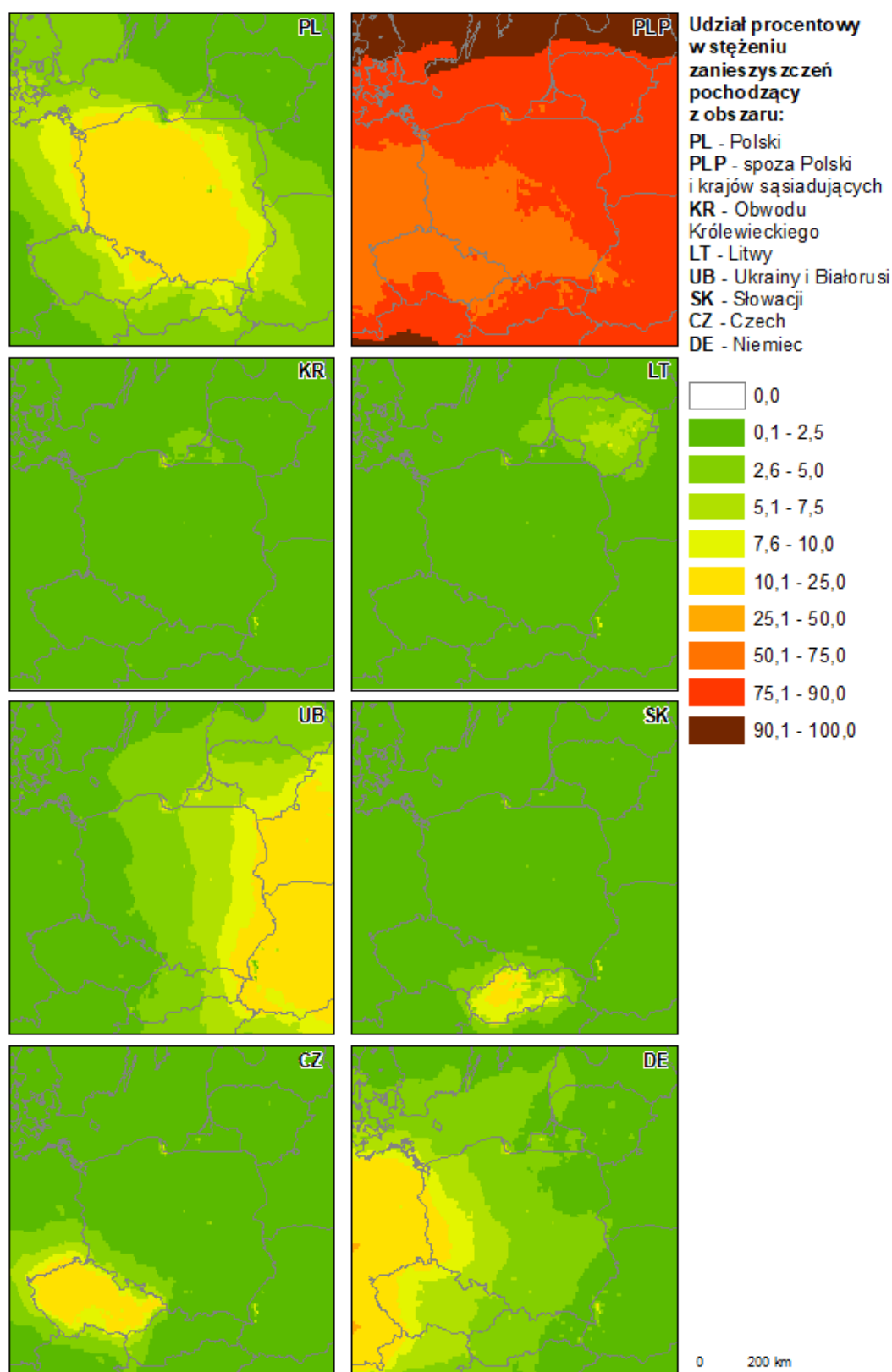
³ Wskaźnik obliczany na podstawie stężeń jednogodzinnych, definiowany jest jako zakumulowana ekspozycja na stężenia większe niż 40 ppbv (ok. $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) w okresie od 1 maja do 31 lipca, w godzinach od 8:00 do 20:00 czasu lokalnego:

$$AOT40 = \int_{t=8 \text{ godz.}(1 \text{ maja})}^{20 \text{ godz.}(31 \text{ lipca})} \max \left[\left(O_3^{1h}(t) - 80 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right), 0.0 \right] \cdot \text{godzina}$$

W 2024 roku dominującym źródłem przekroczeń poziomu docelowego ozonu ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, jako najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca) były transgraniczne emisje prekursorów i transport dalekozasięgowy ozonu – na terenie Polski udział napływu zewnętrznego przekraczał 50%, a na znacznych obszarach centralnej, wschodniej i północnej Polski osiągał wartości powyżej 75%, lokalnie nawet do 90%. Tak wysoki udział wskazuje na przeważający wpływ transportu dalekozasięgowego i tła regionalnego ozonu, który powstaje wtórnie z prekursorów emitowanych poza terytorium Polski (**Rysunek 14**).

Udział krajowych źródeł w okresach dni z przekroczeniami wartości docelowej był znacznie niższy i ograniczał się głównie do południowo-zachodniej Polski – tam wartości nie przekraczały 25%. W pozostałej części kraju udział ten wynosił zazwyczaj poniżej 10%.

Jednocześnie należy wziąć pod uwagę, że scenariusz transgraniczny zakłada brak jedynie emisji antropogenicznych. Emisje biogenne (NMLZO z lasów i NO_x z gleb) są nadal aktywne, ponieważ są poza możliwością zarządzania i planowania działań redukcyjnych.



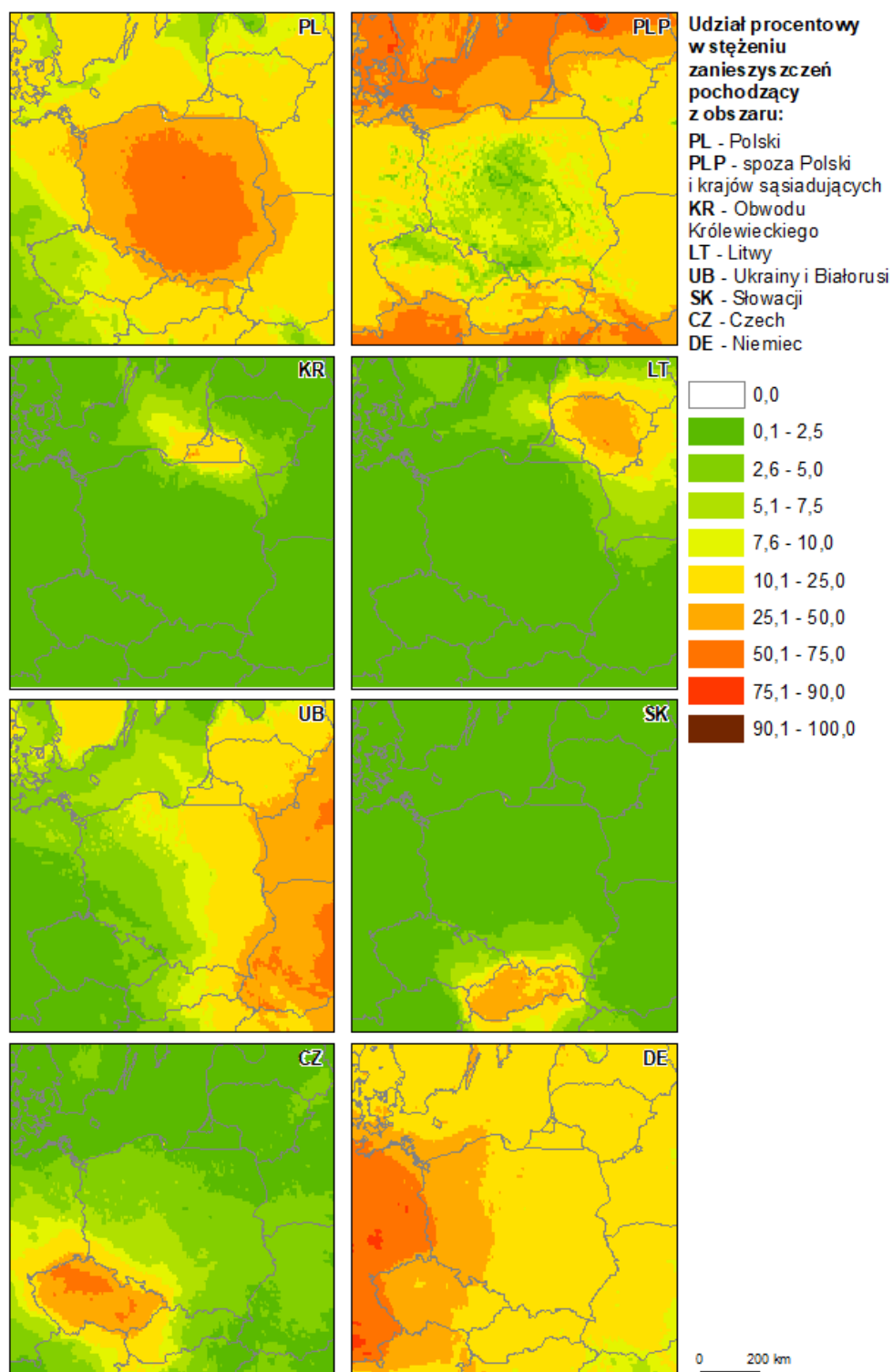
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego uśrednionych stężeń w trakcie epizodów przekroczeń, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężenia ozonu przekraczała $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na co najmniej 10 stacjach, na obszarze Polski w 2024 roku

Szczegółowe mapy przedstawiają procentowy udział poszczególnych obszarów w kształtowaniu liczby dni z przekroczeniami poziomu docelowego ozonu:

- **PL (Polska)** – Wkład emisji krajowych był ograniczony przestrzennie i koncentrował się głównie w południowo-zachodniej i centralnej Polsce, gdzie udział wynosił do 25%. W pozostałej części kraju (północny-wschód i wschód Polski) wartości te wynosiły do 10%.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiadujących)** – Emisje spoza regionu na skutek transportu dalekozasięgowego miały znaczący wpływ na poziom stężeń na większym obszarze kraju. W centralnej, północnej i wschodniej Polsce udział przekraczał 75%. Wskazuje to na silne oddziaływanie ozonu wtórnego transportowanego na znaczne odległości.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Oddziaływanie ograniczone przestrzennie do północnego krańca Polski. Udział przekraczał 5%, lokalnie 10%, głównie w rejonie woj. pomorskiego.
- **LT (Litwa)** – Wpływ emisji z Litwy odnotowano w rejonie Trójmiasta, gdzie udział sięgał do 10%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Udział emisji wschodnich był zauważalny w woj. lubelskim, podkarpackim i podlaskim. W strefie przygranicznej wzdłuż wschodniej granicy wartości osiągały do 25%.
- **SK (Słowacja)** – Emisje ze Słowacji wpływały na poziom stężeń w południowej części woj. małopolskiego i podkarpackiego. Udział w rejonach przygranicznych sięgał 10%.
- **CZ (Czechy)** – Wpływ emisji z Czech zaznaczał się szczególnie w południowo-zachodniej Polsce – udział w woj. dolnośląskim i opolskim dochodził do 10%.
- **DE (Niemcy)** – Udział emisji z Niemiec zaznaczał się w zachodniej Polsce (woj. lubuskie, zachodniopomorskie, częściowo dolnośląskie), gdzie wartości sięgały 25%.

W 2024 roku dominującym źródłem zanieczyszczenia ozonem troposferycznym – w odniesieniu do wskaźnika AOT40 – były krajowe emisje ozonu, szczególnie w centralnej Polsce (**Rysunek 15**). Na tym obszarze udział źródeł krajowych w wartościach AOT40 dochodził do 50%, a lokalnie w rejonie Płocka osiągał nawet 75–90%. W regionach południowych, wschodnich i zachodnich udział wynosił zazwyczaj 25–50%.

Emisje zewnętrzne miały istotny udział głównie na obrzeżach Polski. W południowej, północno-wschodniej i zachodniej części kraju ich udział przekraczał 25%. W centrum Polski wpływ tych źródeł był niższy (poniżej 25%).



Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Szczegółowe mapy przedstawiają procentowy udział poszczególnych obszarów w kształtowaniu stężeń ozonu:

- **PL (Polska)** – Udział krajowych emisji prekursorów ozonu przekraczał 75% w rejonie Płocka. Wartości udziałów w przedziale 50–75% występowały głównie w centralnej części. W pozostałych częściach kraju udział źródeł polskich wahał się głównie w granicach 25–50%.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiednich)** – Wpływ emisji spoza regionu był zauważalny głównie na obrzeżach Polski – szczególnie na północy i południowym wschodzie – gdzie udział wynosił 25–50%. W centralnej Polsce wartości te były niższe – zazwyczaj poniżej 10%.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Emisje z tego regionu miały mniejszy wpływ, ograniczony do północno-wschodniego skraju Polski (udział do 25%).
- **LT (Litwa)** – Wkład emisji prekursorów na Litwie widoczny był na Suwalszczyźnie, gdzie udział osiągał wartość między 7,6 – 10%, a lokalnie punktowo do 25%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Emisje prekursorów i napływ ze wschodu wpływały szczególnie na woj. podlaskie, lubelskie i podkarpackie, gdzie udział w pasie przygranicznym wynosił 25–50%, im dalej od granicy tym udział był niższy, na krańcach województw do 25%.
- **SK (Słowacja)** – Oddziaływanie emisji prekursorów z Słowacji ograniczone było głównie do południowej Małopolski i Podkarpacia – udział do 25%, punktowo do 50% w pasie granicznym.
- **CZ (Czechy)** – Emisje prekursorów z Czech miały istotny wpływ na poziom stężeń ozonu w południowo-zachodniej Polsce – w woj. opolskim, śląskim i dolnośląskim udział wynosił 25–50%.
- **DE (Niemcy)** – W zachodniej części Polski udział emisji prekursorów z Niemiec przekraczał 25–50%, a lokalnie 50–75%, co świadczy o istotnym wpływie transportu regionalnego z tego kierunku.

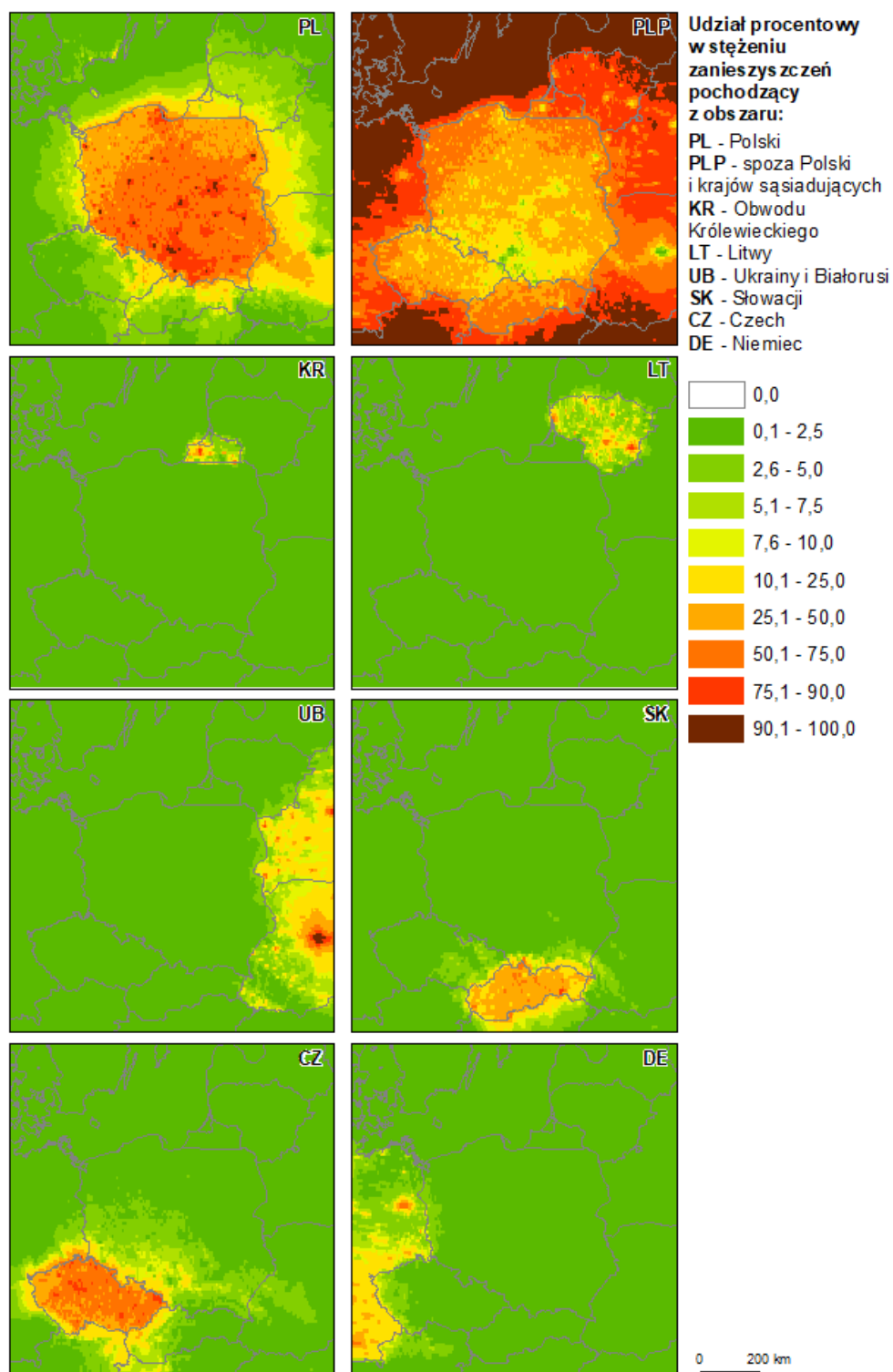
4.7 Benzo(a)piren

Analiza udziału źródeł transgranicznych benzo(a)pirenu w 2024 roku dotyczy rozkładu przestrzennego stężeń średnich rocznych.

W 2024 roku dominującym źródłem zanieczyszczenia benzo(a)pirenem w Polsce były krajowe emisje (**Rysunek 16**). Na przeważającej części kraju udział źródeł krajowych przekraczał 50%, a w rejonach o największym zanieczyszczeniu – takich jak Górny Śląsk, Małopolska, Mazowsze i woj. łódzkie – sięgał 75–90%, lokalnie na terenie dużych ośrodków miejskich powyżej 90%. Wysoki udział krajowy świadczy o dominującym wpływie emisji niskiej (głównie spalanie paliw stałych w sektorze komunalno-bytowym), które odpowiadają za obecność BaP w powietrzu.

Rozkład ten wykazuje dużą korelację względem gęstości zabudowy jednorodzinnej i intensywności ogrzewania indywidualnego.

Emisje transgraniczne miały ograniczony wpływ i zaznacza się jedynie w północnej i północno-wschodniej Polsce (udział powyżej 50%, lokalnie 75%). W pozostałej części kraju udział nie przekraczał 25–50%, a w centralnej i południowej Polsce zazwyczaj był niższy niż 25%.



Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku

Szczegółowe mapy przedstawiają procentowy udział poszczególnych obszarów w kształtowaniu średniorocznego stężenia benzo(a)pirenu:

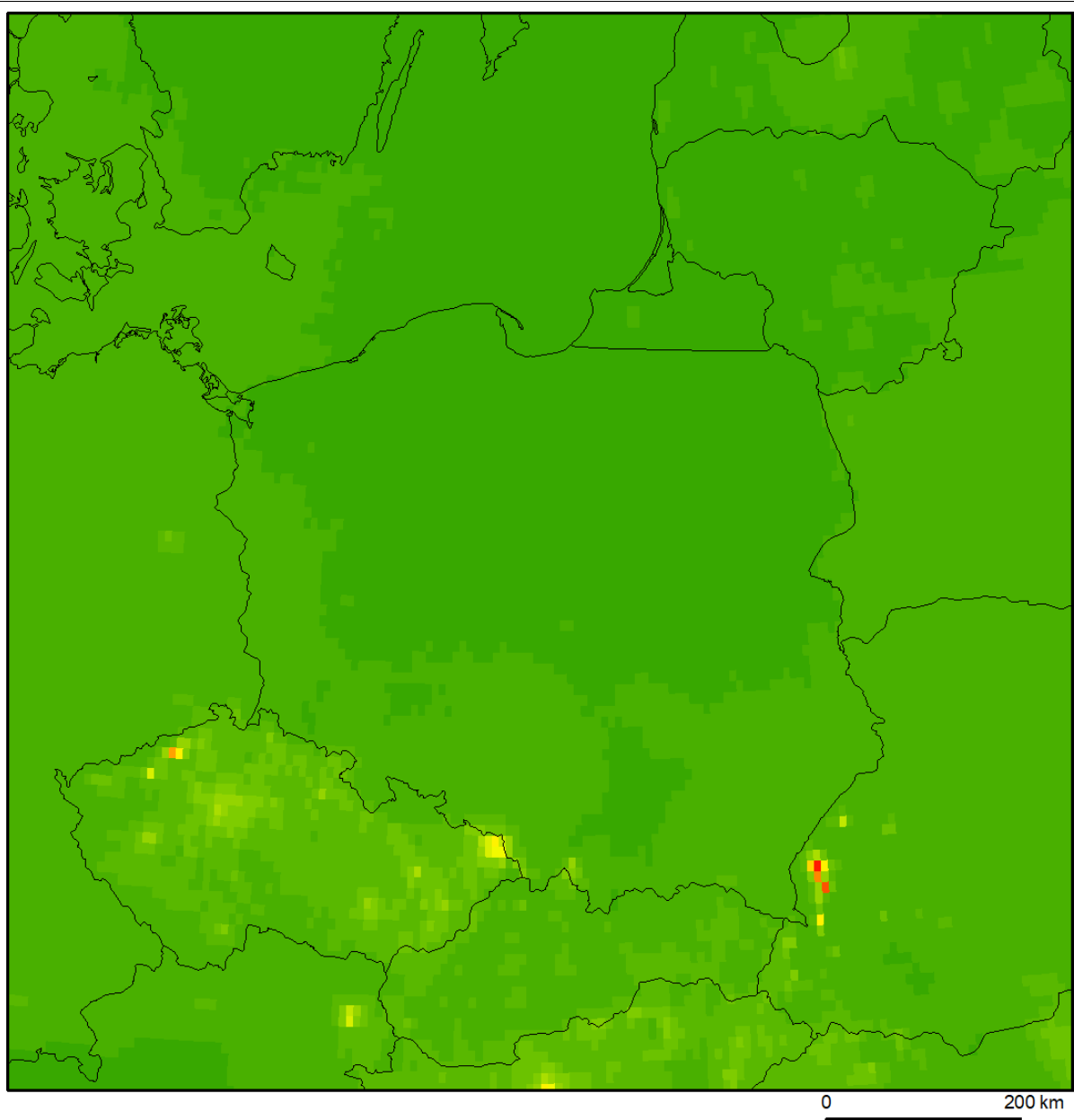
- **PL (Polska)** – Emisje krajowe stanowiły główne źródło BaP w całym kraju. Udział przekraczał 75–90% w woj. śląskim, małopolskim, łódzkim i mazowieckim. W wielu innych regionach wartości utrzymywały się na poziomie 50–75%.
- **PLP (spoza Polski i krajów sąsiednich)** – Udział emisji spoza regionu był stosunkowo wysoki tylko w północnej, północno-zachodniej i północno-wschodniej Polsce, gdzie sięgał lokalnie 50–75%. W pozostałej części kraju ich udział był znacznie niższy.
- **KR (Obwód Królewiecki)** – Wpływ był lokalny – zaznaczał się tylko punktowo w rejonie granicy z woj. warmińsko-mazurskim (udział do 50%).
- **LT (Litwa)** – Emisje z Litwy miały ograniczony wpływ stężenia BaP w północno-wschodniej Polsce, gdzie udział sięgał jedynie do 2,5%.
- **UB (Ukraina i Białoruś)** – Udział źródeł z Ukrainy i Białorusi zaznaczał się w woj. lubelskim, podlaskim i podkarpackim – w rejonach przygranicznych udział dochodził do 10%.
- **SK (Słowacja)** – Emisje z obszaru Słowacji wpływały na poziom stężeń w południowej Małopolsce i na Podkarpaciu. W pasie granicznym udział wynosił 25–50%. Lokalnie na południowo-zachodnim krańcu województwa małopolskiego do 75%.
- **CZ (Czechy)** – Emisje z Czech miały istotny wpływ na poziom stężeń w rejonie południowej części woj. śląskiego i opolskiego – tam udział BaP z tego kierunku osiągał 25–50%, lokalnie więcej.
- **DE (Niemcy)** – Udział emisji z Niemiec był ograniczony – w zachodniej Polsce ich wpływ był niewielki (do 10–25%).

5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego

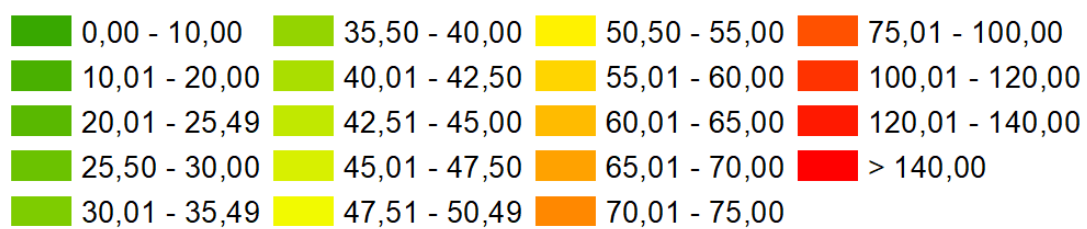
Zgodnie z Załącznikiem 4 Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 lutego 2023 r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2023 poz. 350) ocenie poddano wartości percentyli dla wybranych zanieczyszczeń, obliczone przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski. Pozwala to stwierdzić, w jakim stopniu napływ transgraniczny jest znaczący dla wartości ekstremalnych stężeń.

5.1 Pył PM10

Na obszarze Polski w 2024 roku udział źródeł transgranicznych w stężeniu pyłu PM10 wyrażonego jako percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych z obszaru Polski, wahał się od 7 do około 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 20**). Najwyższe wartości percentyla 90,4 pyłu PM10, z zakresu od 15 do 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły na krańcach południowych kraju. Na południu i zachodzie Polski wartości wahały się między 10 a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Natomiast w centralnej i północnej części kraju stężenia były niższe od 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



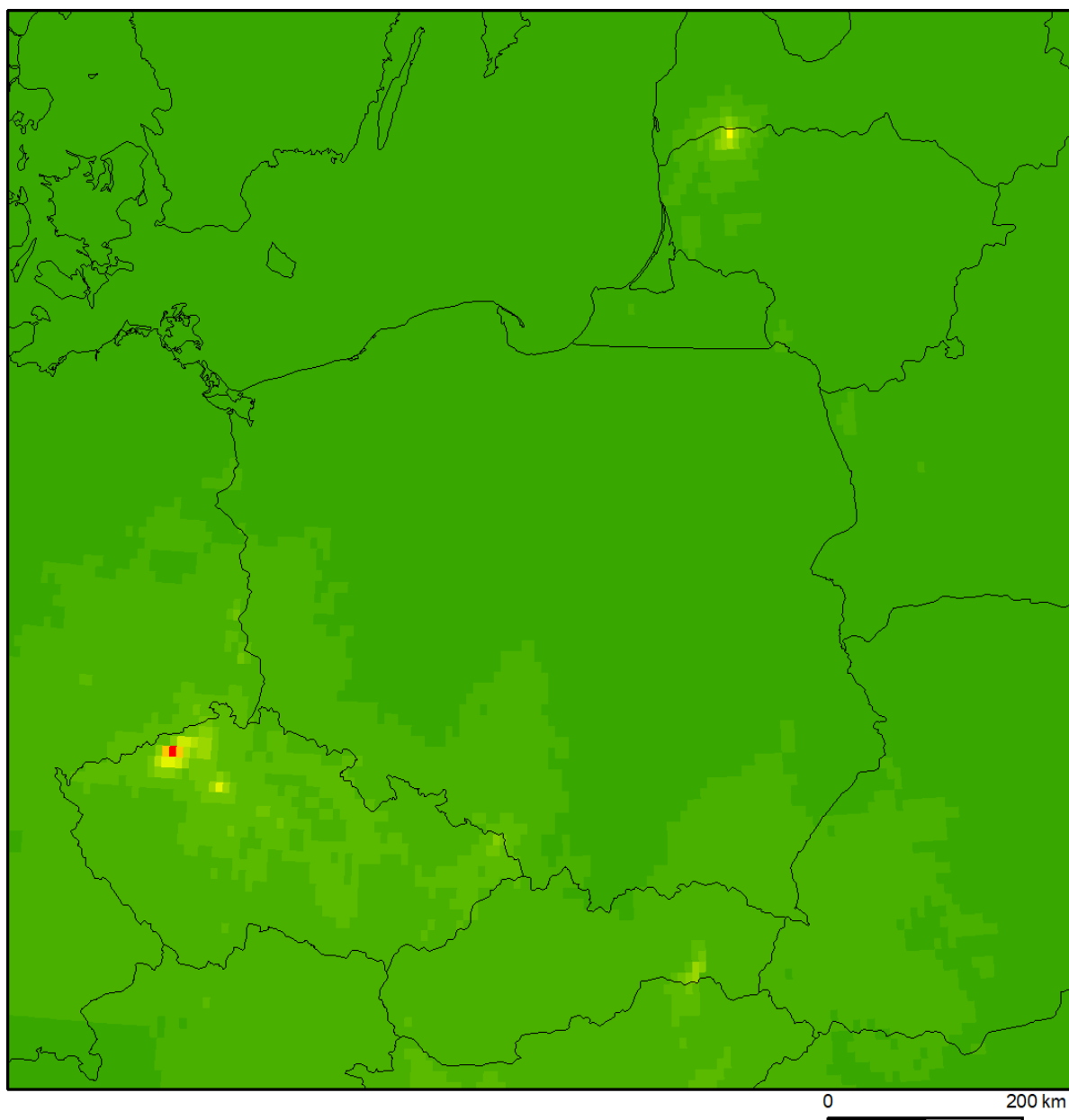
Percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych - PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



Rysunek 17. Rozkład przestrzenny percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń pyłu PM10 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku

5.2 Dwutlenek siarki SO₂

Wartość udziału źródeł transgranicznych stężeń SO₂ wyrażonych jako percentyl 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, na przeważającym obszarze kraju wyniosła poniżej 5 µg/m³ (**Rysunek 18**). Wyższa wartość percentyla wystąpiła lokalnie na południu i zachodzie kraju - do 10 µg/m³, lokalnie przy granicy do 15 µg/m³.

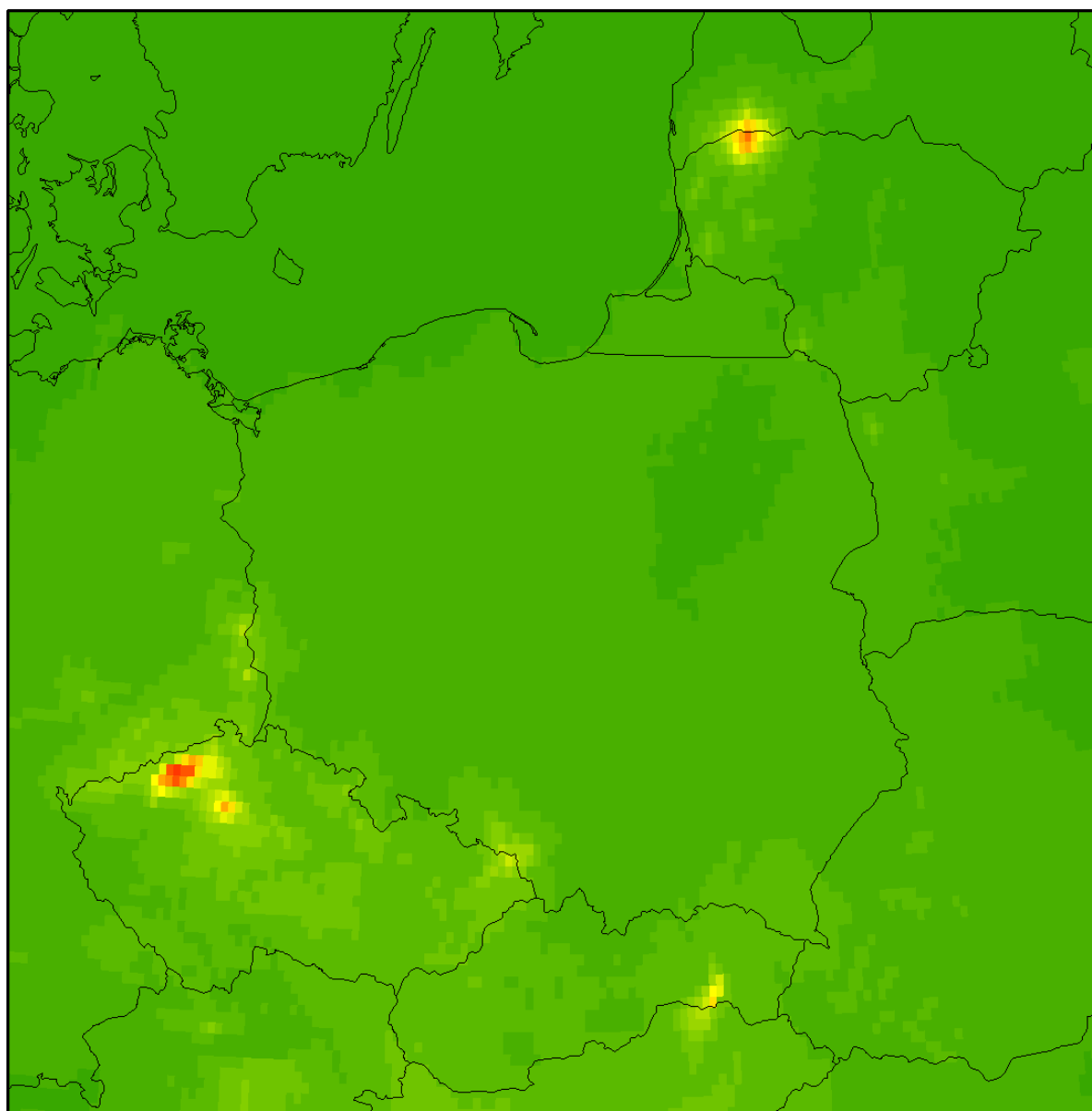


Percentyl 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych - SO₂ [µg/m³]

0,00 - 5,00	25,01 - 30,00	50,01 - 52,49	92,51 - 102,50
5,01 - 10,00	30,01 - 35,00	52,50 - 62,50	102,51 - 112,50
10,01 - 15,00	35,01 - 40,00	62,51 - 72,50	112,51 - 125,49
15,01 - 20,00	40,01 - 45,00	72,51 - 82,50	> 125,49
20,01 - 25,00	45,01 - 50,00	82,51 - 92,50	

Rysunek 18. Rozkład przestrzenny percentyla 99.2 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń dwutlenku siarki SO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku

W 2024 roku na obszarze Polski wartości udziału źródeł transgranicznych stężeń SO_2 wyrażonych jako percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, wahały się od około 1 do ponad 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 19**). Wartości percentyla poniżej 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły w północnej i wschodniej części kraju. Stężenia z zakresu od 5 do 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły na przeważającym obszarze Polski. Natomiast w kilku lokalizacjach na krańcach zachodnich i południowych kraju wartości percentyla 99,7 z serii stężeń jednogodzinnych SO_2 były wyższe, z zakresu od 10 do 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Percentyl 99,7 z rocznej serii
stężeń jednogodzinnych - SO₂ [µg/m³]

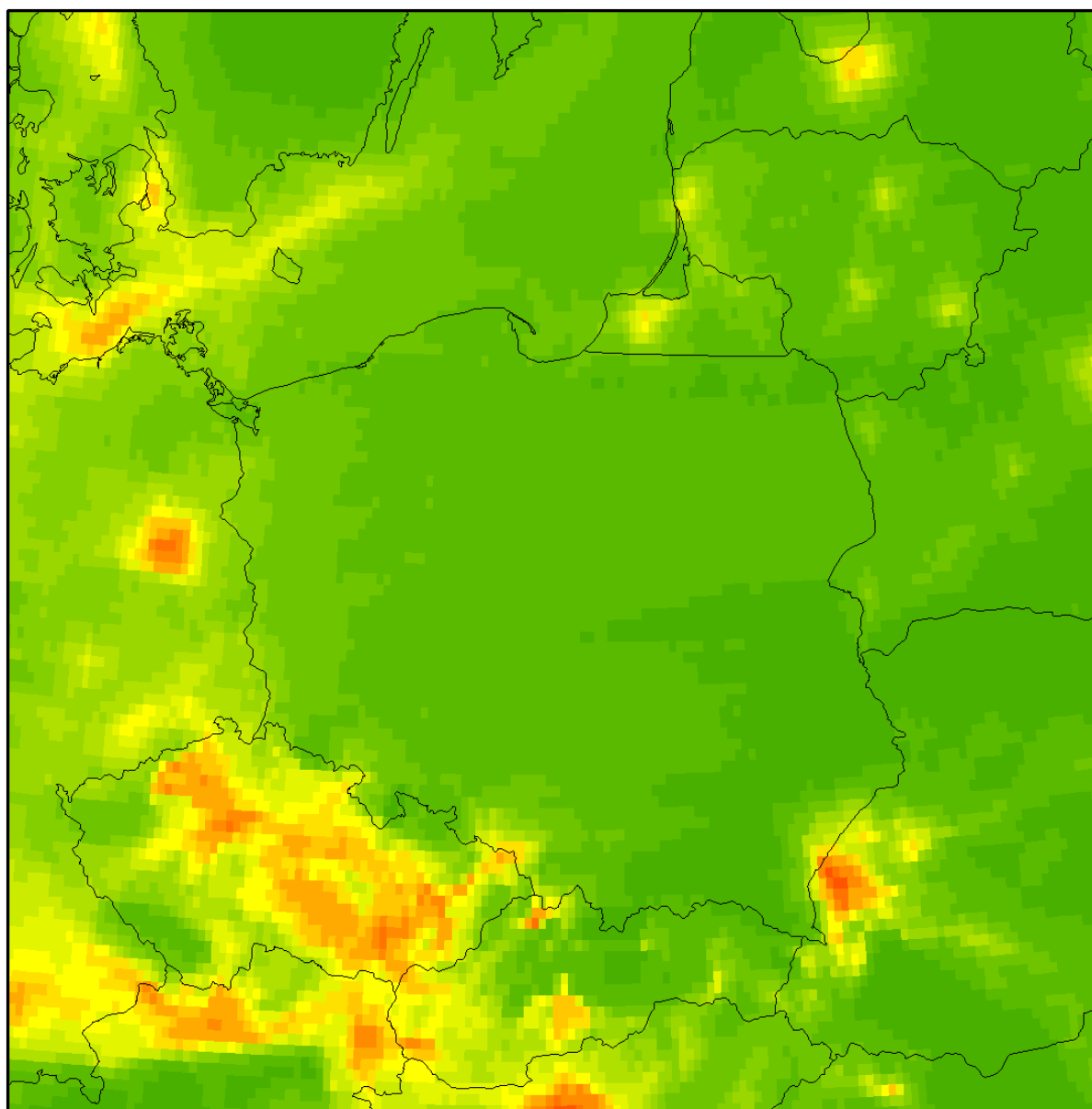
0 200 km

1,39 - 5,00	25,01 - 30,00	50,01 - 60,00	100,01 - 200,00
5,01 - 10,00	30,01 - 35,00	60,01 - 70,00	200,01 - 300,00
10,01 - 15,00	35,01 - 40,00	70,01 - 80,00	300,01 - 350,49
15,01 - 20,00	40,01 - 45,00	80,01 - 90,00	350,50 - 538,12
20,01 - 25,00	45,01 - 50,00	90,01 - 100,00	

Rysunek 19. Rozkład przestrzenny percentyla 99.7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku siarki SO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku

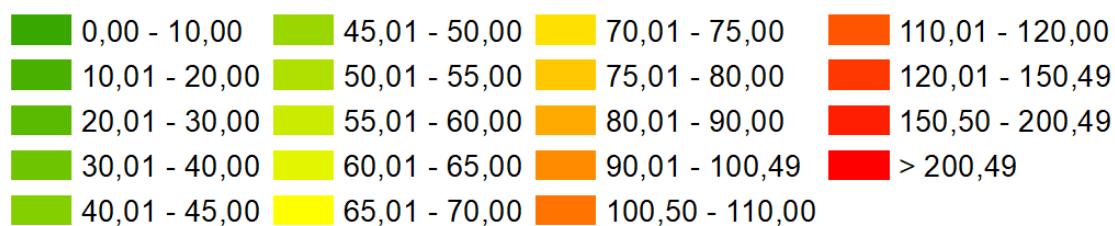
5.3 Dwutlenek azotu NO₂

Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych stężeń NO₂ wyrażonych jako percentyl 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, był bardziej zróżnicowany na obszarze kraju w 2024 roku niż w roku poprzednim (**Rysunek 20**). Na przeważającym obszarze Polski wartości percentyla 99,8 były niższe od 30 -40 µg/m³. Lokalnie na południowym wschodzie wartości spadały poniżej 20 do 30 µg/m³. Wzdłuż zachodniej granicy kraju stężenia wzrastały i wynosiły od 40 do 50 µg/m³. Najwyższe stężenia wystąpiły lokalnie przy południowej i południowo-wschodniej granicy kraju, do około 80 µg/m³. Rozkład percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski pokazuje, że dominujący jest transport z kierunków zachodnich i południowo-zachodnich, nie tylko ze względu na klimatologicznie przeważające kierunki wiatrów, ale także ze względu na wielkość strumienia emisji raportowanego w krajach ościennych. Podwyższone wartości w Polsce południowo-wschodniej mogą mieć związek z nieprawidłowym opisem źródeł emisji na Ukrainie. Należy zwrócić uwagę, że w świetle toczących się tam działań wojennych ocena poziomu emisji z obszaru Ukrainy jest wysoce niepewna.



Percentyl 99,8 z rocznej serii

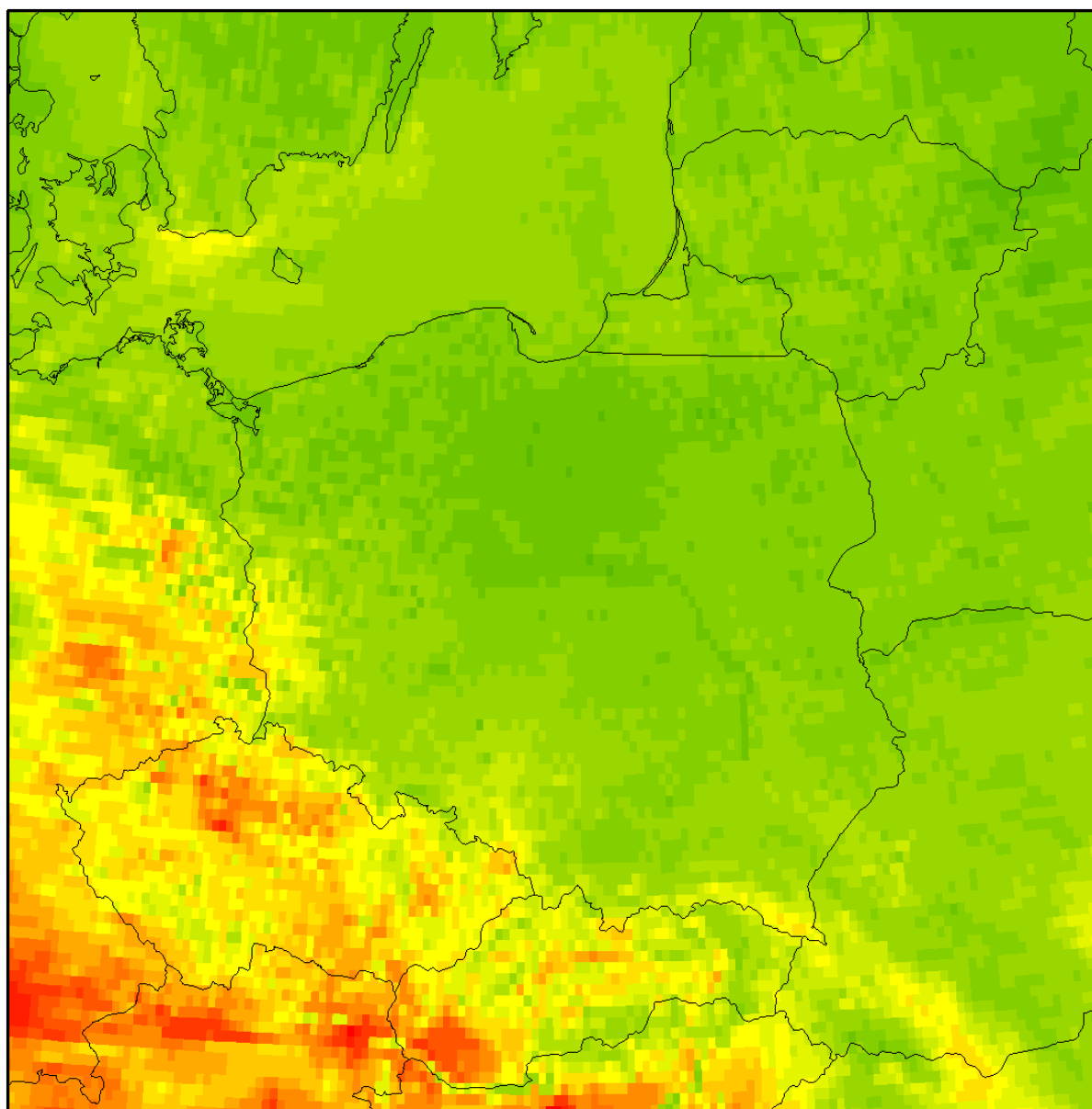
stężeń jednogodzinnych - NO₂ [µg/m³]



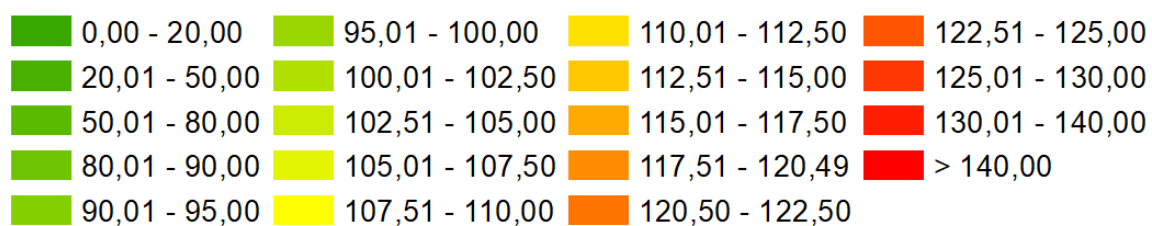
Rysunek 20. Rozkład przestrzenny percentyla 99.8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku azotu NO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku

5.4 Ozon O₃

W 2024 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w stężeniu ozonu wyrażony jako percentyl 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich krocących, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, był dość zróżnicowany (**Rysunek 21**). W północnej i wschodniej części kraju oraz częściowo w południowej i zachodniej, wpływ transgraniczny był najniższy, a wartości percentyla wynosiły od 70 do 90 µg/m³. Udział źródeł transgranicznych rośnie w kierunku zachodnim i południowo-zachodnim. W centrum, na zachodzie i południu oraz lokalnie na północy i wschodzie wartości percentyla wahały się od 90 do 100 µg/m³. Najwyższe wartości percentyla związane z wpływem transgranicznym wystąpiły na krańcach południowych i zachodnich kraju – do 110 µg/m³, lokalnie przy samej granicy nawet do 115 µg/m³. Wysoka wartość percentyla 92,3, zbliżona do poziomu docelowego może świadczyć o tym że rola czynnika transgranicznego w kształtowaniu się przekroczeń liczby dni z przekroczeniem progu 120 µg/m³ dla ośmiogodzinnej najwyższej średniej krocącej stężeń jest wysoka.



Percentyl 93,2 w rocznej serii maksimów dobowych stężenia
ośmiogodzinnego kroczącego - O_3 [$\mu g/m^3$]



Rysunek 21. Rozkład przestrzenny percentyla 93.2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu O_3 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku

6. Podsumowanie

W przypadku wpływu transportu transgranicznego na poziom stężeń zanieczyszczeń w Polsce, procentowy udział źródeł zagranicznych wykazuje duże zróżnicowanie – zarówno w zależności od rodzaju zanieczyszczenia, jak i analizowanego wskaźnika (średnioroczne stężenie, wartości ekstremalne, przekroczenia norm). Zróżnicowanie to odzwierciedla strukturę emisji w Polsce i krajach sąsiednich, jak również wpływają na nie warunki meteorologiczne (m.in. kierunki wiatru, stabilność atmosfery i w konsekwencji czas przebywania mas powietrza nad danym obszarem). W przypadku parametrów krótkookresowych duże znaczenie mają warunki pogodowe i lokalna emisja, natomiast dla wskaźników rocznych wzrasta znaczenie tła regionalnego i emisji spoza kraju. Należy podkreślić, że analiza wpływu transgranicznego w dużej mierze zależy od roku referencyjnego – warunki cyrkulacyjne, występowanie cisz atmosferycznych czy rozkład kierunki wiatru mogą różnić się znacząco między latami.

6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym

Dla stężeń średniorocznych pyłu PM₁₀, udział napływu transgranicznego na obszarze Polski wynosił od 10 do 50%, lokalnie – szczególnie w południowo-wschodniej Polsce – nawet powyżej 50%. Wartości te były najwyższe w pasie przygranicznym (Czechy, Słowacja, Ukraina). Emisje krajowe dominowały w centrum i na południu kraju, gdzie ich udział przekraczał 75%, a lokalnie (woj. śląskie) osiągał ponad 90%.

Dla epizodów z przekroczeniem wartości 50 µg/m³ (średnia dobową) wpływ transgraniczny był zauważalny głównie w rejonach południowych i wschodnich – osiągał tam wartości do 50%, lokalnie więcej. W centrum kraju udział ten był istotnie niższy i nie przekraczał 10%. Wskazuje to, że epizody przekroczeń normy dobowej PM₁₀ są w dużej mierze generowane przez lokalne i regionalne źródła.

W przypadku pyłu PM_{2.5}, przestrzenny rozkład napływu zewnętrznego jest bardzo zbliżony do PM₁₀, ale w niektórych miejscach udział transgraniczny był jeszcze wyższy – do 90% w rejonach przygranicznych na południowym wschodzie. Emisje krajowe dominowały w woj. śląskim, małopolskim oraz w rejonach dużych aglomeracji. Świadczy to o tym, że pył drobny efektywnie ulega długodystansowemu transportowi, ale w największym stopniu kumuluje się w miejscach o dużej emisji lokalnej.

6.2 Dwutlenek siarki

Dla SO₂ udział transgraniczny w stężeniach średniorocznych i zimowych był zbliżony i mieścił się zazwyczaj w przedziale 10–50%, przy średniej około 30%. Najwyższe wartości notowano w południowo-wschodniej i północno-wschodniej Polsce (napływ z Ukrainy, Białorusi i spoza regionu). W strefach silnie zurbanizowanych (np. Górny Śląsk, Bełchatów, Płock, Szczecin)

udział źródeł krajowych przekraczał 75%, co potwierdza dominację lokalnych źródeł – głównie sektora energetycznego i komunalnego.

W 2024 roku nie odnotowano przekroczeń wartości dopuszczalnych (dobowej i jednogodzinnej) wynikających wyłącznie z napływu transgranicznego. Percentyle ekstremalne (99,2 dla dobowych i 99,7 dla jednogodzinnych stężeń) wykazały wyraźny udział napływu jedynie w pasach przygranicznych.

6.3 Tlenki azotu

Dla tlenków azotu wartości udziału transgranicznego były silnie zróżnicowane przestrzennie. W przypadku NO_2 średni udział transportu zanieczyszczeń spoza kraju wahał się od 10 do 75%, a w przypadku NO_x – od 10 do 68%. Najwyższe wartości występowały wzdłuż zachodnich i południowo-wschodnich granic kraju, a także na Wybrzeżu. W centrum oraz w aglomeracjach miejskich dominowały emisje krajowe – udział lokalny przekraczał 75%, a w największych miastach dochodził do 90% i więcej (aglomeracje: warszawska, łódzka, krakowska, śląska, trójmiejska).

Wyniki te odzwierciedlają strukturę emisji – w przypadku NO_x/NO_2 znaczącym udziałem charakteryzuje się sektor transportowy (SNAP7 i SNAP8). Dla godzinowych przekroczeń normy NO_2 ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) nie stwierdzono wpływu wyłącznie transgranicznego.

6.4 B(a)P

Udział transgraniczny benzo(a)pirenu był niski w skali kraju. Na większości obszaru Polski wynosił on poniżej 25%, a w rejonach silnie zurbanizowanych – poniżej 10%. Najwyższe wartości (do 75 – 90%) notowano punktowo w północno-wschodnich regionach przygranicznych, gdzie lokalna emisja jest znikoma a stężenia bardzo niskie. Przestrzenny rozkład udziału krajowego pokrywał się z regionami intensywnego spalania paliw stałych w sektorze komunalno-bytowym (woj. śląskie, małopolskie, łódzkie, mazowieckie). Wynika z tego, że dominującym źródłem zanieczyszczenia BaP pozostaje emisja krajowa.

6.5 Ozon

Ozon jest jedynym analizowanym zanieczyszczeniem wtórnym, którego stężenie nie zależy wprost od emisji ozonu, lecz od emisji jego prekursorów (NO_x , LZO). Udział transportu transgranicznego w epizodach z przekroczeniem progu $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca) był bardzo wysoki – przekraczał 50% na większości obszaru Polski, a w centralnej, wschodniej i północnej części kraju osiągał 75–90%, lokalnie nawet więcej. Wpływ krajowych źródeł ograniczał się do strefy południowo-zachodniej.

W przypadku indeksu AOT40 udział napływu transgranicznego był bardziej zróżnicowany – od kilku do ponad 75%, w zależności od lokalizacji. Najwyższe wartości wystąpiły wzdłuż granic zachodnich, północnych i wschodnich – czyli w obszarach najbardziej narażonych na

długodystansowy transport ozonu. W centrum kraju i na południu dominował wpływ emisji lokalnych, głównie w związku z intensywnym transportem i fotochemią miejską.

W odniesieniu do wartości percentyli, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski. W każdym z analizowanych zanieczyszczeń napływ transgraniczny nie powoduje przekroczeń stężeń dopuszczalnych:

- W 2024 roku wartości percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych pyłu PM₁₀, obliczonych przy założeniu braku emisji krajowej, wahały się od 7 do 25 µg/m³. Najniższe stężenia (poniżej 10 µg/m³) wystąpiły w centrum, na północy i częściowo na południu kraju, a najwyższe (15–25 µg/m³) na krańcach południowych i zachodnich.
- Percentyl 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych SO₂ wynosił na przeważającym obszarze kraju poniżej 5 µg/m³. Wyższe wartości (do 10 µg/m³) wystąpiły lokalnie na południu i zachodzie, a przy granicy do 15 µg/m³.
- W przypadku percentyla 99,7 z rocznej serii jednogodzinnych stężeń SO₂ wartości w większości kraju mieściły się w przedziale 5–10 µg/m³, z najniższymi poniżej 5 µg/m³ na północy i wschodzie oraz lokalnymi wzrostami do 30–35 µg/m³ na krańcach południowych i zachodnich.
- Percentyl 99,8 z rocznej serii jednogodzinnych stężeń NO₂ wykazywał przestrzennie zróżnicowany rozkład: większość kraju osiągała wartości poniżej 30–40 µg/m³, najniższe (20–30 µg/m³) występowały na południowym wschodzie, a najwyższe (do 80 µg/m³) lokalnie przy południowej i południowo-wschodniej granicy.
- Rozkład percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu wykazywał wyraźne zróżnicowanie przestrzenne. Wartości wahały się od 70 do 115 µg/m³ – najniższe wystąpiły na północy i wschodzie kraju, a najwyższe na krańcach południowych i zachodnich, gdzie osiągały do 115 µg/m³.

Na podstawie przestrzennego rozkładu percentyli można stwierdzić, że przy dominującym transporcie z kierunków zachodnich i południowo-zachodnich wpływ transgraniczny jest silnie uzależniony od wielkości emisji w krajach ościennych. Szczególnie w przypadku ozonu wartości percentyla bliskie progowi 120 µg/m³ mogą świadczyć o istotnym udziale transportu transgranicznego w kształtowaniu przekroczeń.

Spis rysunków

Rysunek 1. Konfiguracja siatki obliczeniowej o rozdzielczości 2,5 km (0,025 stopnia): czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, określoną co 10 kwadratów siatki	7
Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2022	8
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Europy; EMEP 2022	9
Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Polski; EMEP 2022	9
Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Europy; EMEP 2022	10
Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Polski; EMEP 2022	10
Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM ₁₀ na obszarze Polski oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	17
Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego uśrednionych stężeń w trakcie epizodów przekroczeń średniej dobowej pyłu PM ₁₀ powyżej 50 µg/m ³ na co najmniej 10 stacjach, na obszarze Polski w 2024 roku ...	20
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM _{2,5} na obszarze Polski oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	23
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	26
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	28
Rysunek 12. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	31
Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	34
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego uśrednionych stężeń w trakcie epizodów przekroczeń, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m ³ na co najmniej 10 stacjach, na obszarze Polski w 2024 roku	37
Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	39

Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu oraz ocenę udziału emisji z Polski w 2024 roku	42
Rysunek 17. Rozkład przestrzenny percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń pyłu PM10 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku	45
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń dwutlenku siarki SO ₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku	47
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny percentyla 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku siarki SO ₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku	49
Rysunek 20. Rozkład przestrzenny percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku azotu NO ₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku	51
Rysunek 21. Rozkład przestrzenny percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu O ₃ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2024 roku	53

Spis tabel

Tabela 1. Procentowy udział stacji, dla których spełniono kryterium niepewności zgodnie z dyrektywą CAFE i Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu	11
Tabela 2. Zestawienie parametrów	13