

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2023



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



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

Warszawa 2024

Autorzy:

mgr inż. Paweł Durka

dr hab. inż. Joanna Strużewska

prof. dr hab. inż. Jacek W. Kamiński

mgr inż. Grzegorz Jeleniewicz

mgr inż. Paulina Jagiełło

inż. Aleksander Norowski

mgr inż. Aleksandra Starzomska



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Data publikacji: Czerwiec 2024

Spis treści

Wstęp	4
1. Metodyka obliczeń	5
1.1 Konfiguracja modelu GEM-AQ	5
1.2 Dane emisyjne	6
2. Ocena sprawdzalności	10
3. Zakres analiz	12
4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń w skali kraju na podstawie wyników modelowania	15
4.1 Pył PM ₁₀	15
4.2 Pył PM _{2,5}	19
4.3 Dwutlenek siarki SO ₂	21
4.4 Dwutlenek azotu NO ₂	26
4.5 Tlenki azotu NO _x	29
4.6 Ozon O ₃	31
4.7 Benzo(a)piren	35
5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego.....	37
5.1 Pył PM ₁₀	37
5.2 Dwutlenek siarki SO ₂	39
5.3 Dwutlenek azotu NO ₂	43
5.4 Ozon O ₃	45
6. Podsumowanie	47
6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym	47
6.2 Dwutlenek siarki	48
6.3 Tlenki azotu	48
6.4 B(a)P	48
6.5 Ozon	48
6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych	49
Spis rysunków	50
Spis tabel	51

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 czystszej powietrza 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.

Zakres prac obejmował:

- Przygotowanie konfiguracji systemu modelowania,
- Przygotowanie danych emisyjnych,
- Realizację modelowania dla dwóch scenariuszy (scenariusz bazowy i scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Polski),
- Wykonanie oceny sprawdzalności wyników modelowania dla scenariusza bazowego względem pomiarów ze stacji PMŚ z roku 2023,
- Obliczenie procentowego udziału wpływu źródeł transgranicznych w kształtowaniu poziomów normowanych diagnostyk zanieczyszczeń nad obszarem Polski,
- 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.

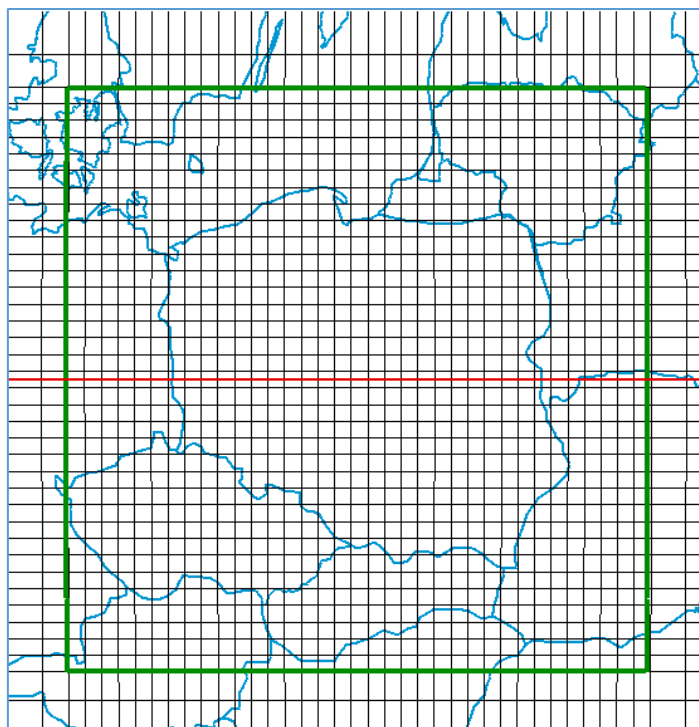
1.1 Konfiguracja modelu GEM-AQ

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 2023, stanowiące warunek początkowy symulacji, pobrane z Kanadyjskiego Centrum Meteorologicznego (Canadian Meteorological Centre - CMC). Warunki początkowe stężeń modelowanych zanieczyszczeń dla 1 stycznia 2023 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.



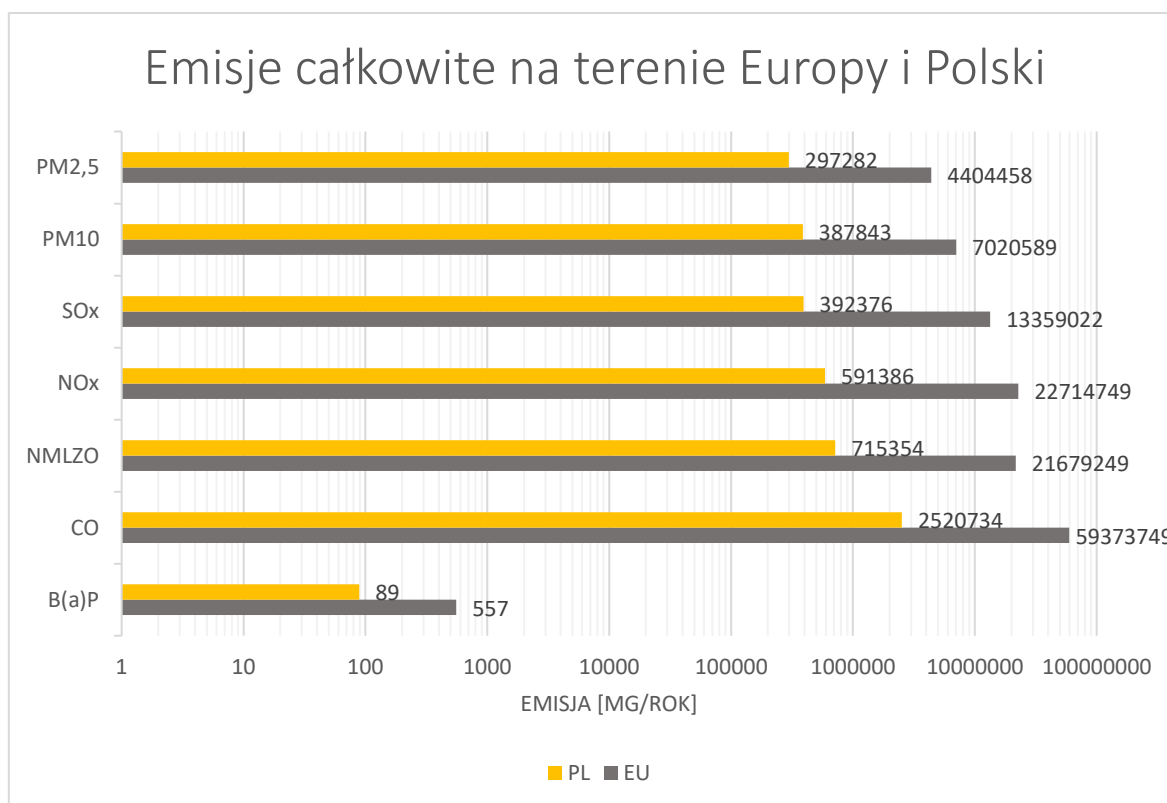
Rysunek 1. Konfiguracja siatki obliczeniowej o rozdzielczości 2,5 km (0,025 stopnia): czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, określoną co 10 kwadratów siatki

1.2 Dane emisyjne

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2023 roku wykonano z wykorzystaniem bazy emisji EMEP z roku 2021 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.

Wykres (**Rysunek 2**) przedstawia porównanie emisji całkowitych zanieczyszczeń powietrza na terenie Europy i Polski na podstawie wykorzystanych do modelowania danych. W przypadku analizowanych zanieczyszczeń, z pominięciem B(a)P, udział procentowy emisji z terenu Polski w emisji z całej Europy wynosi około 3,8% (od 2,6% w przypadku NO_x do 6,7% dla PM_{2,5}). W przypadku B(a)P, udział emisji z terenu Polski stanowi aż 16% 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>

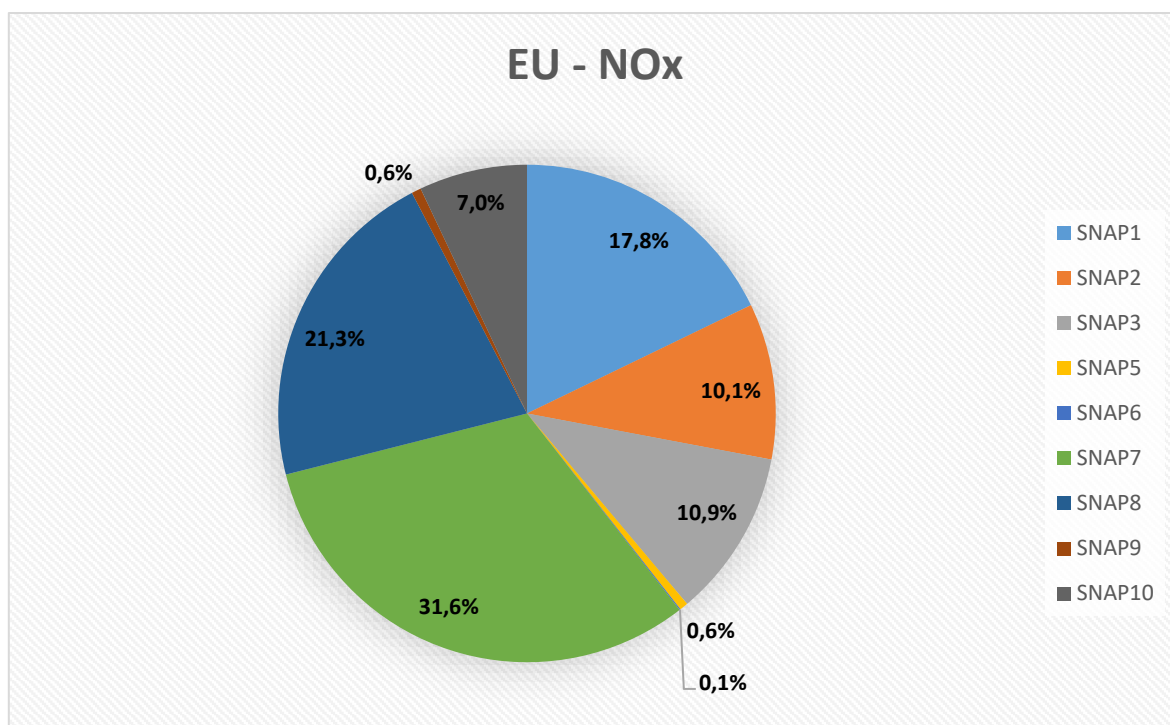


Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2021

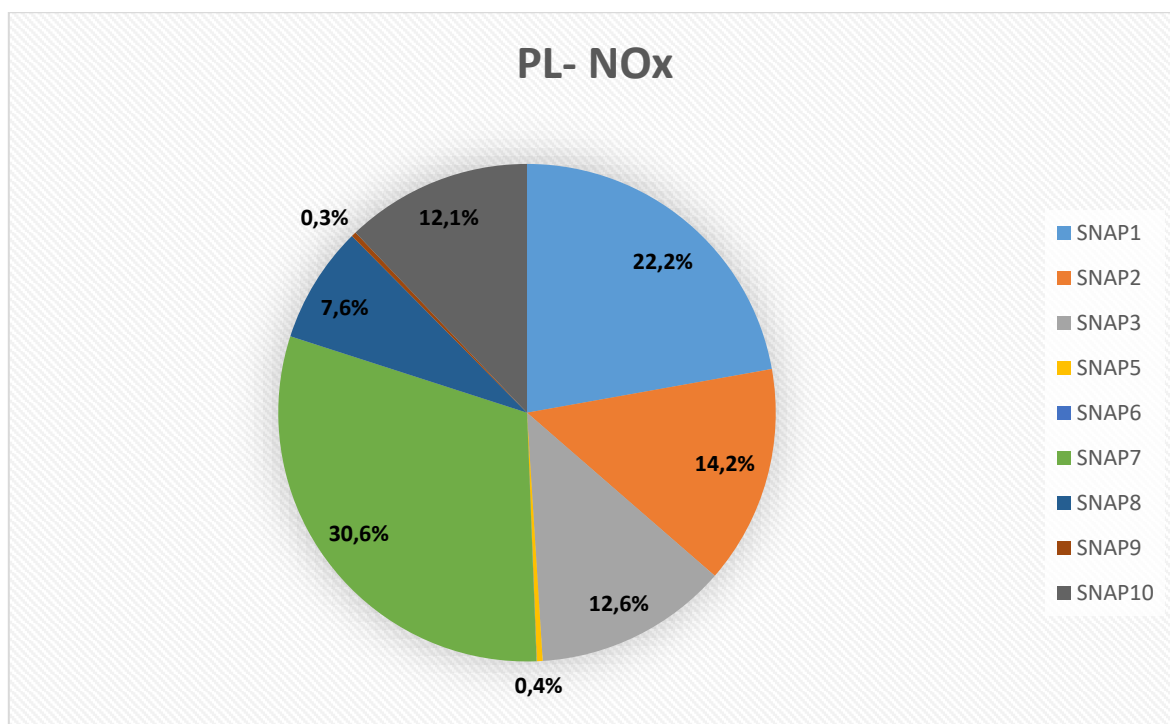
Dane emisyjne udostępniane są przez EMEP w podziale na kategorie źródeł emisji GNFR. Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń dane te zostały zreklasyfikowane na kategorie źródeł emisji SNAP. Poniżej przedstawiono porównanie udziału poszczególnych źródeł w emisji PM10 i NO_x na terenie Polski i Europy.

W przypadku emisji NO_x (**Rysunek 3** i **Rysunek 4**) największa część emisji pochodzi z transportu drogowego (SNAP7) i jest to odpowiednio 31,6% dla Europy oraz 30,6% 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 sektorze komunalno-bytowym (SNAP2). W przypadku większości sektorów udział poszczególnych SNAP w Polsce jest podobny jak na terenie Europy, wyjątkiem jest SNAP8, gdzie w Europie stanowi 21,3%, a w Polsce 7,6%.

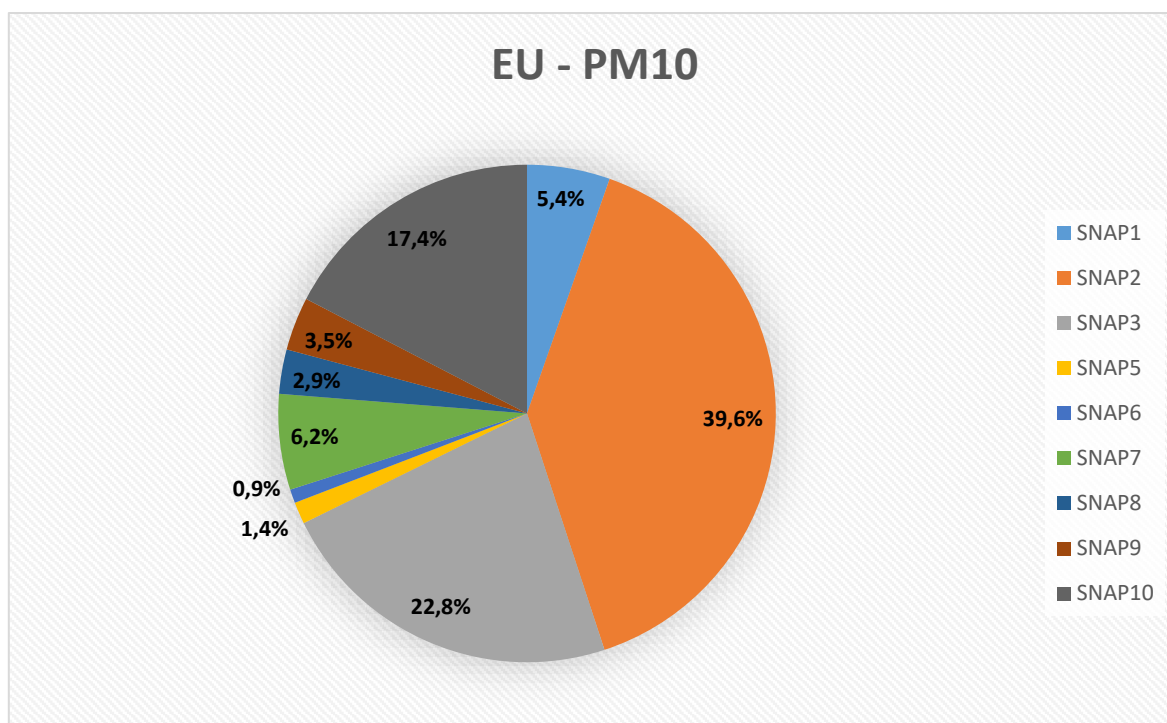
Struktura źródeł emisji PM10 jest inna niż w przypadku NO_x. Zanieczyszczenie to zarówno w Europie jak i w Polsce pochodzi w dużej części z sektora komunalno-bytowego (SNAP2) i jest to odpowiednio 39,6% (Europa) oraz 71% (Polska). Tak wysoki udział kategorii SNAP2 w emisjach PM10 znacząco odbiega od wartości z bazy emisyjnej dla 2019 roku, jest mało realny oraz trudny do uzasadnienia i wymaga komentarza ze strony zespołu KOBiZE raportującego dane do EMEP. Pozostałymi kategoriami o znaczącym udziale są: procesy spalania w przemyśle (SNAP3) oraz rolnictwo (SNAP10).



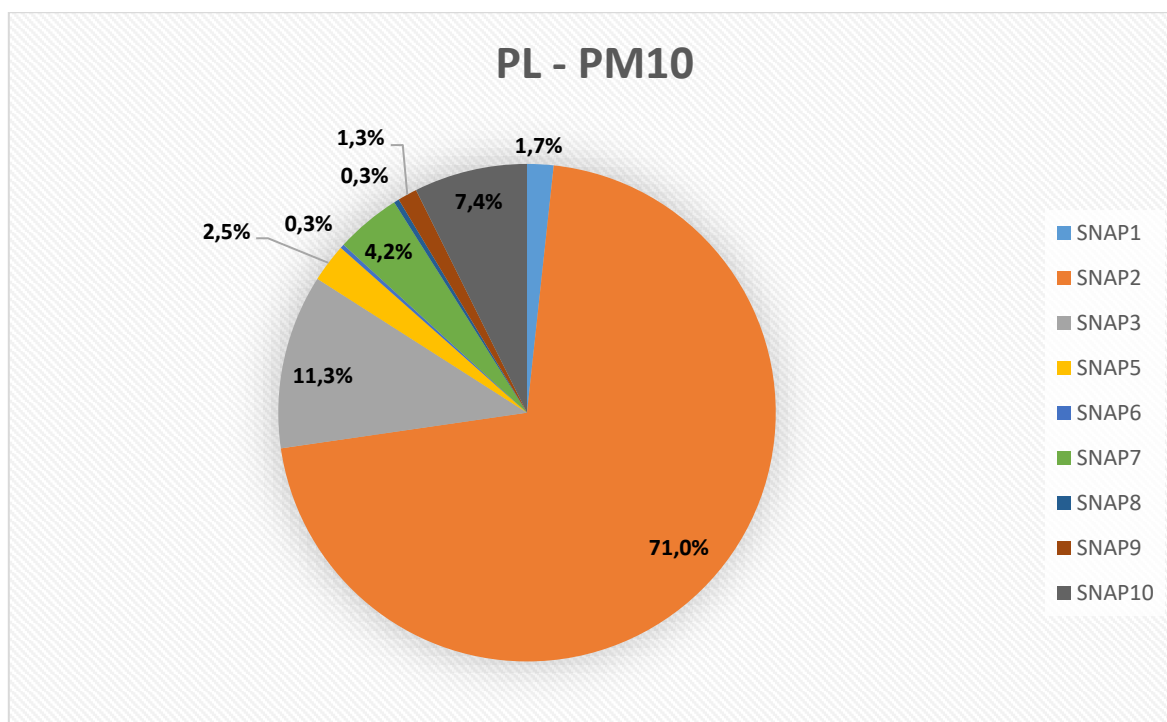
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Europy; EMEP 2021



Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Polski; EMEP 2021



Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM10 na terenie Europy; EMEP 2021



Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM10 na terenie Polski; EMEP 2021

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	71,2%
2	Tlenki azotu (NO _x) – średnia roczna	63,8%
3	Ozon (O ₃) – 8hmax	100%
4	Pył zawieszony PM ₁₀ – średnia roczna	96%
5	Pył zawieszony PM _{2,5} – średnia roczna	94,9%
6	Dwutlenek siarki (SO ₂) – średnia roczna	42%
7	Benzo(a)piren (B(a)P) – średnia roczna	65,1%

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 2023. 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 wszystkich 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, podobnie jak w roku ubiegłym, stanowi MQI dla rocznej sprawdzalności PM10. Rygorystyczny sposób obliczania rocznego wskaźnika MQI 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 2023, 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. W celu zobrazowania i ułatwienia podjęcia dalszej analizy problemu, w następnych latach zostanie poprawiony system wizualizacji stacji niespełniających warunków dyrektywy względem ich lokalizacji.

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 2023 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

	Substancja	Parametr statystyczny
5	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
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.

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 w skali kraju na podstawie wyników modelowania

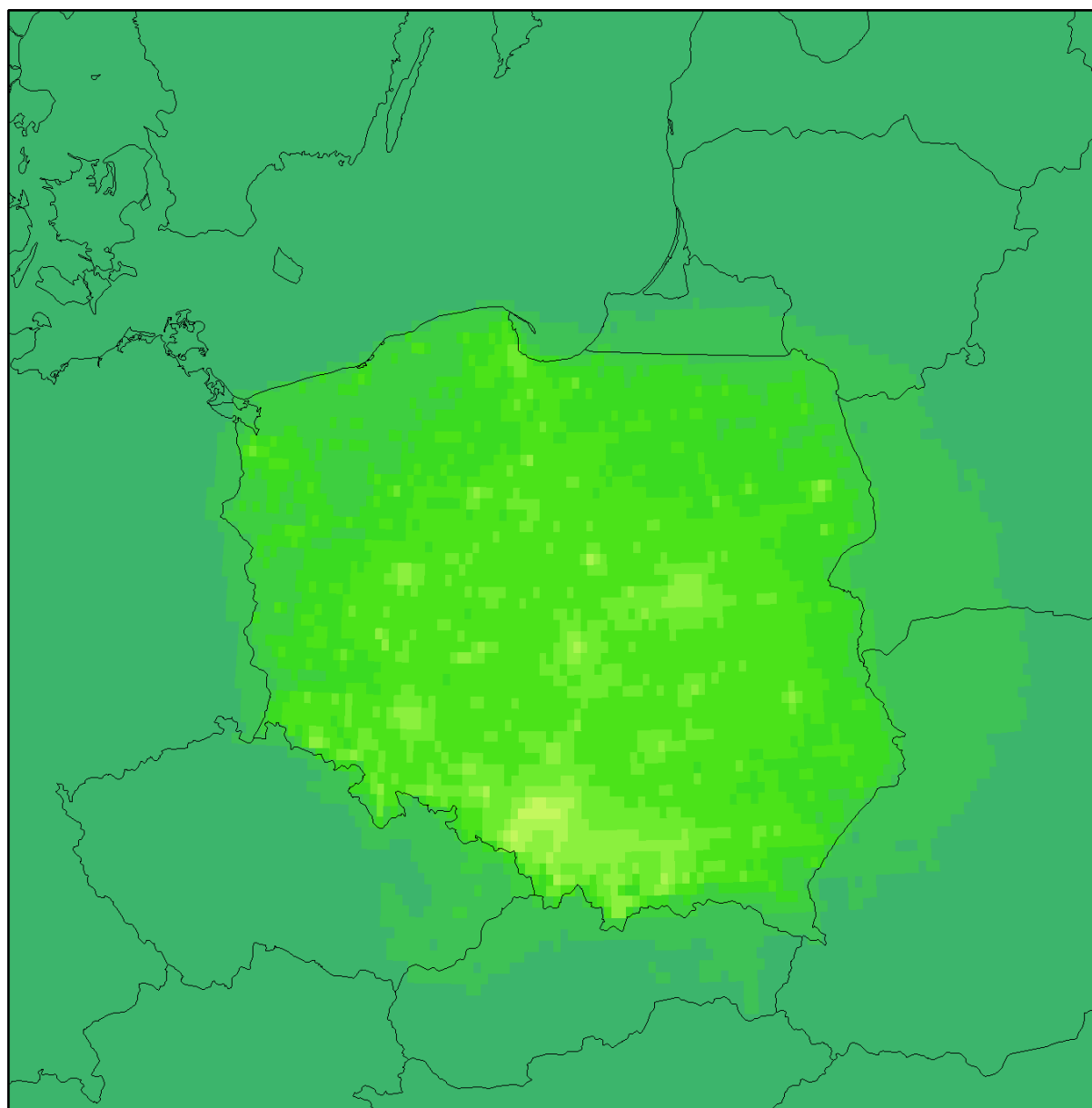
Wyniki modelowania zostały wykorzystane do analizy rozkładu przestrzennego procentowego udziału transportu transgranicznego w poziomie stężeń zanieczyszczeń i diagnostyk narażenia na podwyższone wartości zanieczyszczeń na obszarze Polski w roku 2023.

4.1 Pył PM10

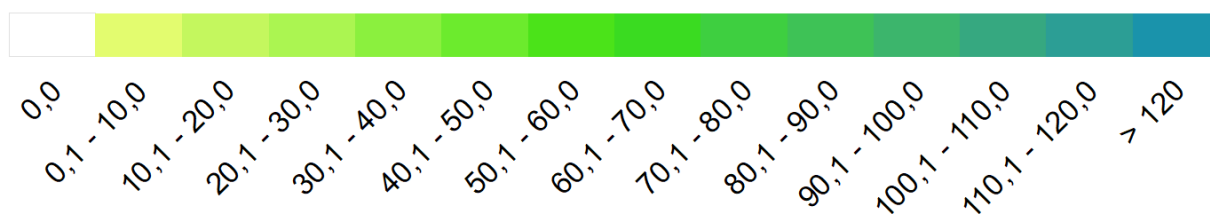
Analiza udziału źródeł transgranicznych pyłu PM10 w 2023 roku dotyczy rozkładu przestrzennego:

- Stężeń średnich rocznych,
- Liczby dni z przekroczeniem średniej dobowej powyżej 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Udział źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu pyłu PM10 na obszarze Polski w 2023 roku wahał się w zakresie od 12% do 84% (**Rysunek 7**). Najwyższy wpływ transportu spoza granic kraju (w zakresie 70-84%) wystąpił wzdłuż każdej granicy kraju oraz regionalnie w jego północno-zachodniej części. Na przeważającym obszarze Polski wpływ zanieczyszczeń transgranicznych wahał się od 40 do 70%. Wyższy napływ, powyżej 60% wystąpił głównie na wschodzie i północy kraju, natomiast niższy, poniżej 50% głównie w centrum i na południu. Udział źródeł transgranicznych poniżej 40% wystąpił na znacznym obszarze województwa śląskiego i małopolskiego oraz lokalnie w województwie opolskim, dolnośląskim, wielkopolskim, kujawsko-pomorskim, łódzkim, mazowieckim, podlaskim, lubelskim i świętokrzyskim- głównie na obszarach dużych miast ze względu na wyższą emisję krajową oraz większy dystans od granic kraju.

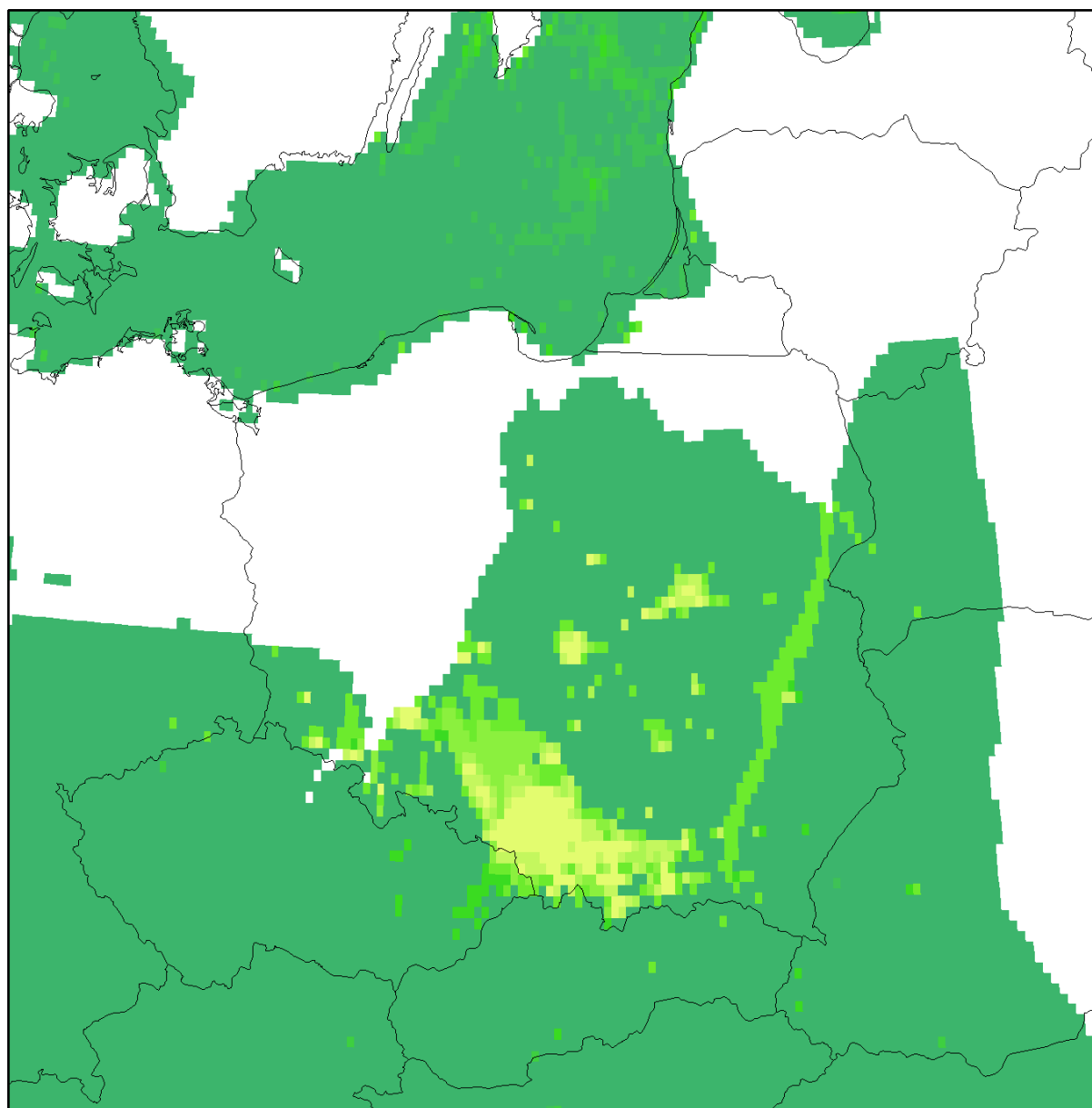


**Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - PM10**

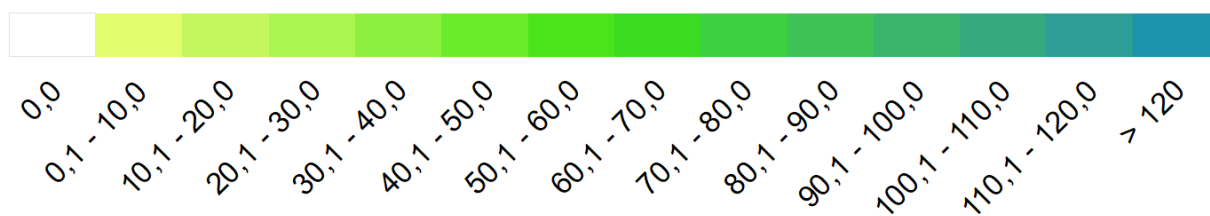


Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM10 na obszarze Polski w 2023 roku

Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni ze średniodobowym stężeniem pyłu PM10 wyższym niż $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, był zróżnicowany na obszarze Polski w 2023 roku (**Rysunek 8**). Na przeważającym obszarze północnej i północno-zachodniej części kraju przekroczenia $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stężenia średniodobowego zależne od napływu transgranicznego nie wystąpiło. Lokalnie w centrum, na wschodzie i północy oraz na znacznym obszarze południowej Polski udział wpływu transgranicznego wahał się od 1 do 50%. W kilku lokalizacjach na południu i południowym-wschodzie wartości wahały się od 50 do 100%. Wpływ udziału źródeł transgranicznych równy 100% wystąpił na znacznym obszarze centralnej i wschodniej części Polski oraz lokalnie na południu i południowym-zachodzie. W stosunku do rozkładów przestrzennych w poprzednich latach rozkład taki może wydawać się zaskakujący, ale w świetle faktu że na tych obszarach model wskazał bardzo niską liczbę przekroczeń – 1 dzień lub 2 dni, w czasie których wystąpiło relatywnie niewielkie przekroczenie progu $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wpływ transgraniczny w tych dniach był wystarczający do spowodowania przekroczenia, zatem obliczony całkowity wpływ emisji z zagranicy na poziom przekroczeń wyniósł 100%.



Wpływ transgraniczny [%]
liczba dni z przekroczeniem 50 (z 24h) - PM10

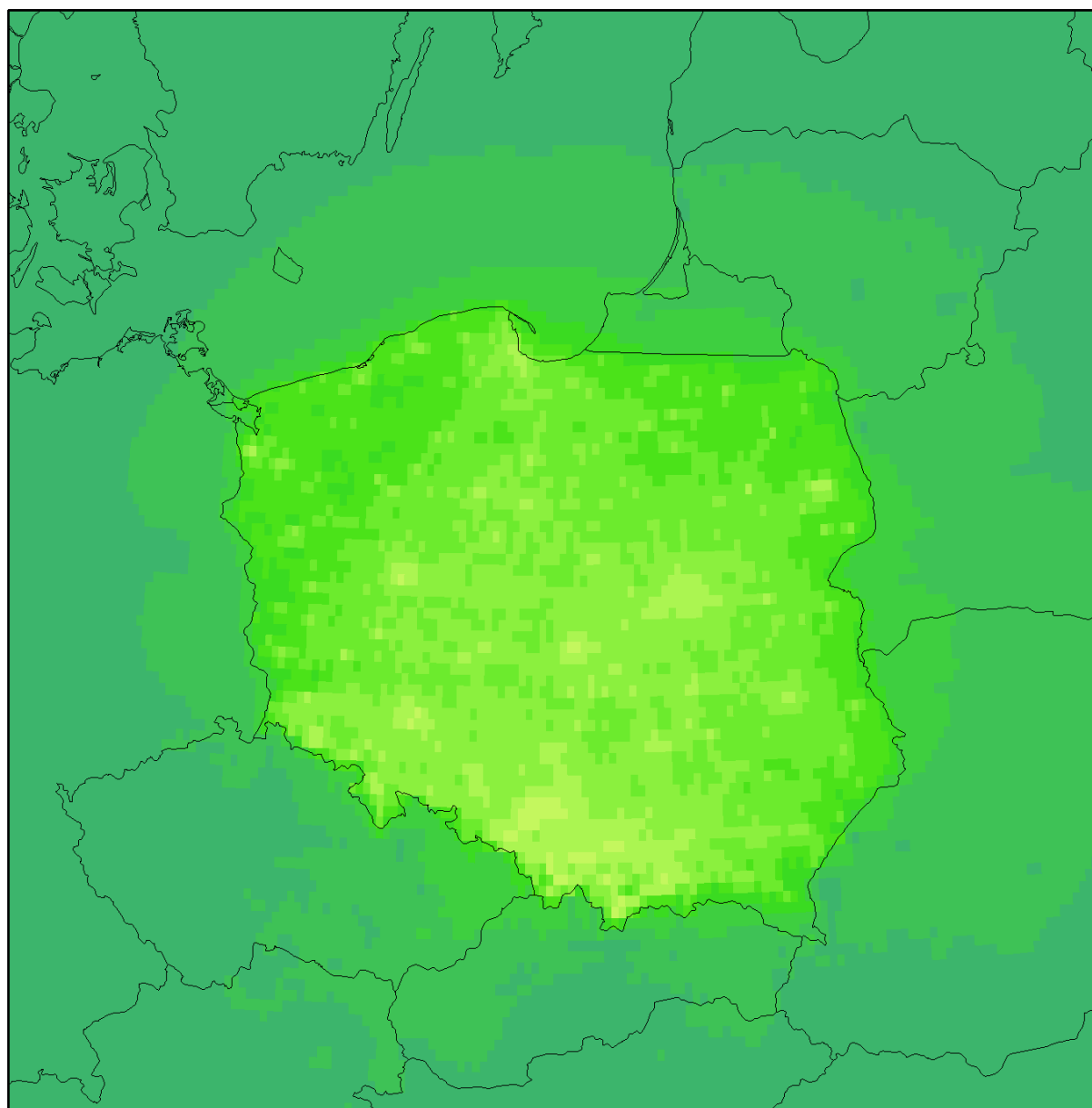


Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ze względu na średniodobowe stężenia pyłu PM10 na obszarze Polski w 2023 roku

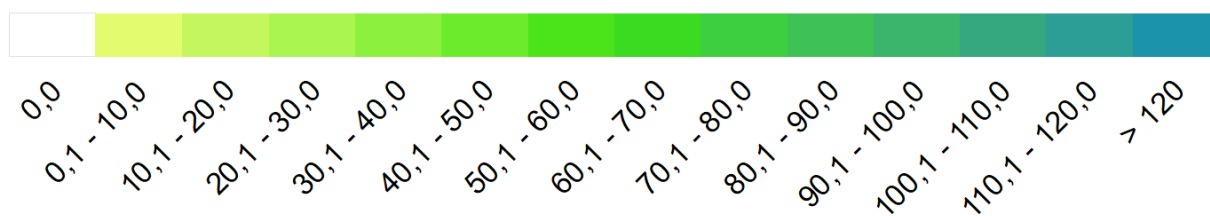
4.2 Pył PM_{2,5}

Analiza udziału źródeł transgranicznych pyłu PM_{2,5} w 2023 roku dotyczy rozkładu przestrzennego stężeń średnich rocznych.

W 2023 roku na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu pyłu PM_{2,5} zawierał się w przedziale od 12 do około 90% (**Rysunek 9**). Najwyższy udział źródeł transgranicznych, powyżej 80% wystąpił na południowo-wschodnim krańcu Polski (Bieszczady) co wiąże się z bardzo niskim poziomem emisji krajowych w tym obszarze. Udział źródeł transgranicznych, z zakresu od 60 do 80% wystąpił wzdłuż granic kraju oraz lokalnie w północno-zachodniej części. Na znacznym obszarze północnej, wschodniej i zachodniej Polski oraz na krańcach południowych wpływ źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu pyłu PM_{2,5} wahał się od 50 do 60%. Na przeważającym obszarze kraju, głównie w centrum, napływ transgraniczny wynosił od 30 do 50%. Niższy udział zanieczyszczeń napływających, poniżej 30% wystąpił lokalnie na obszarze województwa pomorskiego, kujawsko-pomorskiego, wielkopolskiego, łódzkiego, mazowieckiego, podlaskiego, lubelskiego, świętokrzyskiego, małopolskiego, śląskiego, opolskiego i dolnośląskiego- głównie na obszarach dużych miast.



**Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - PM2.5**



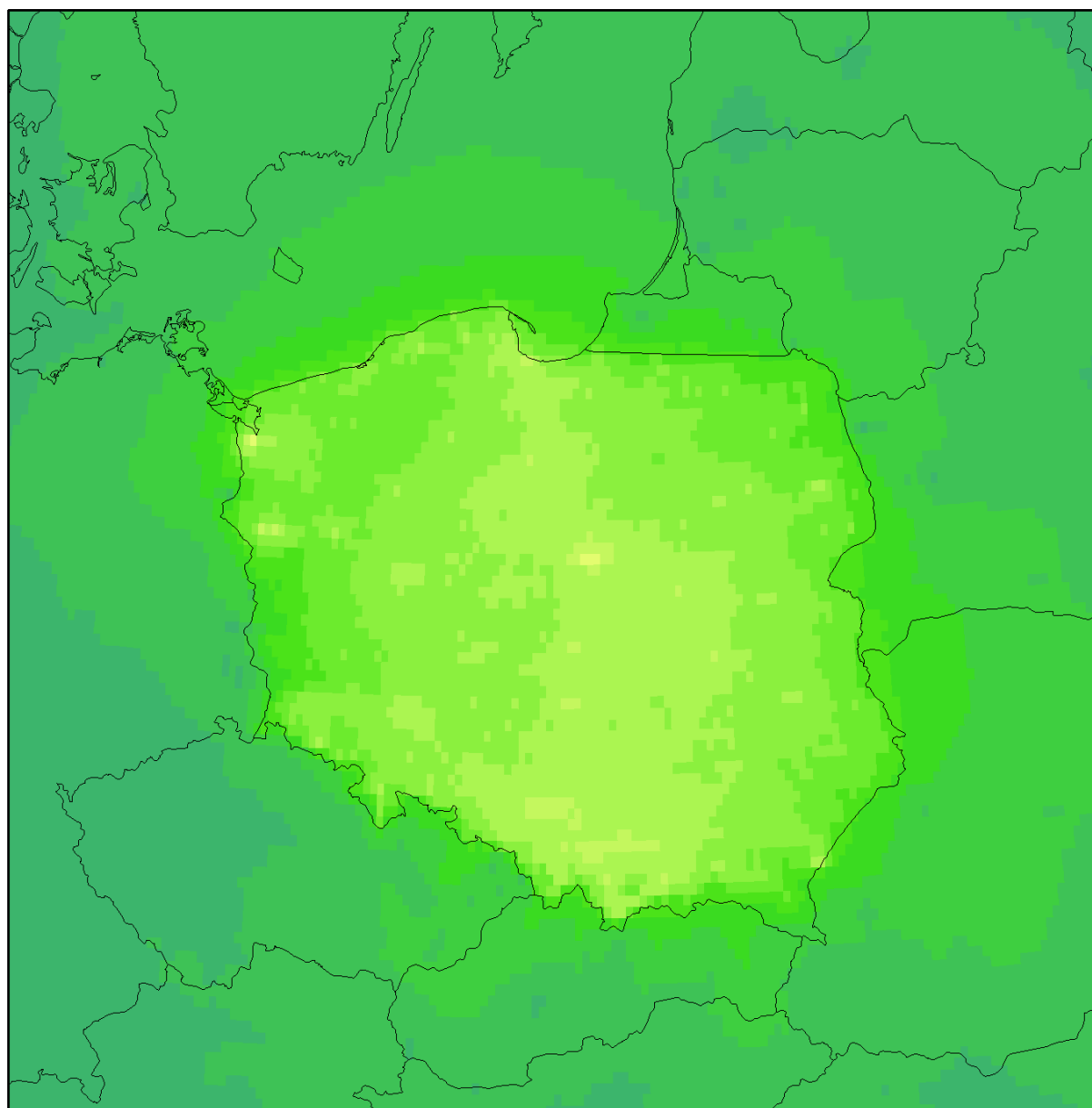
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM_{2,5} na obszarze Polski w 2023 roku

4.3 Dwutlenek siarki SO₂

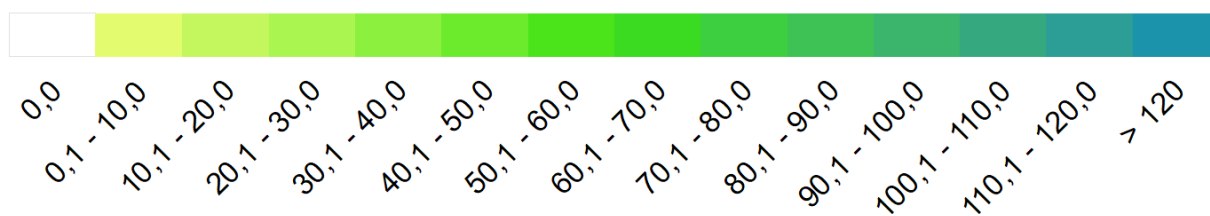
Analiza udziału źródeł transgranicznych dwutlenku siarki w 2023 roku dotyczy rozkładu przestrzennego:

- Stężeń średnich rocznych,
- Stężeń średnich w okresie zimowym (01.10-31.03),
- Liczby dni z przekroczeniem wartości średniodobowej powyżej 125 µg/m³,
- Liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej powyżej 350 µg/m³.

W 2023 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu dwutlenku siarki na obszarze Polski wahał się od 3 do 81% (**Rysunek 10**). Najwyższy udział źródeł transgranicznych, z zakresu od 60 do 81% wystąpił lokalnie wzdłuż zachodniej, południowej i wschodniej granicy Polski. Na znacznym obszarze północnej, wschodniej i zachodniej części kraju oraz na krańcach południowych udział źródeł transgranicznych wahał się od 40 do 60%. Na przeważającym obszarze Polski, głównie w centrum i na południu, napływ transgraniczny wahał się od 20 do 30%. Najniższy wpływ źródeł transgranicznych, poniżej 20% wystąpił w rejonie Gdańska, Szczecina, Grudziądza, Dębna, Lubiszyna, Płocka, Warszawy, Łodzi, Kozienic, Bełchatowa oraz w kilku lokalizacjach w województwie śląskim i małopolskim, co wiąże się z relatywnie wyższą emisją krajową w tych obszarach.



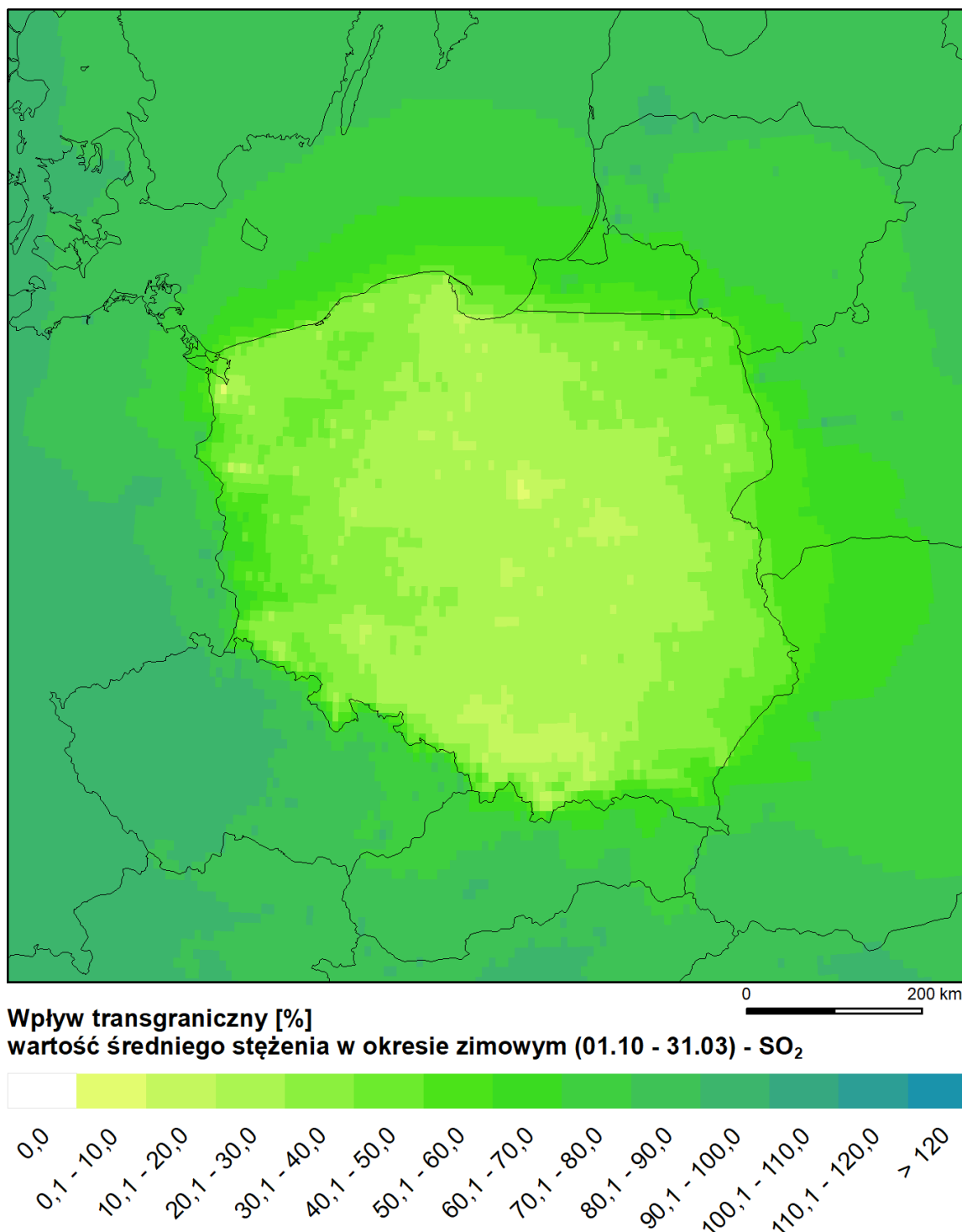
**Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - SO₂**



Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2023 roku

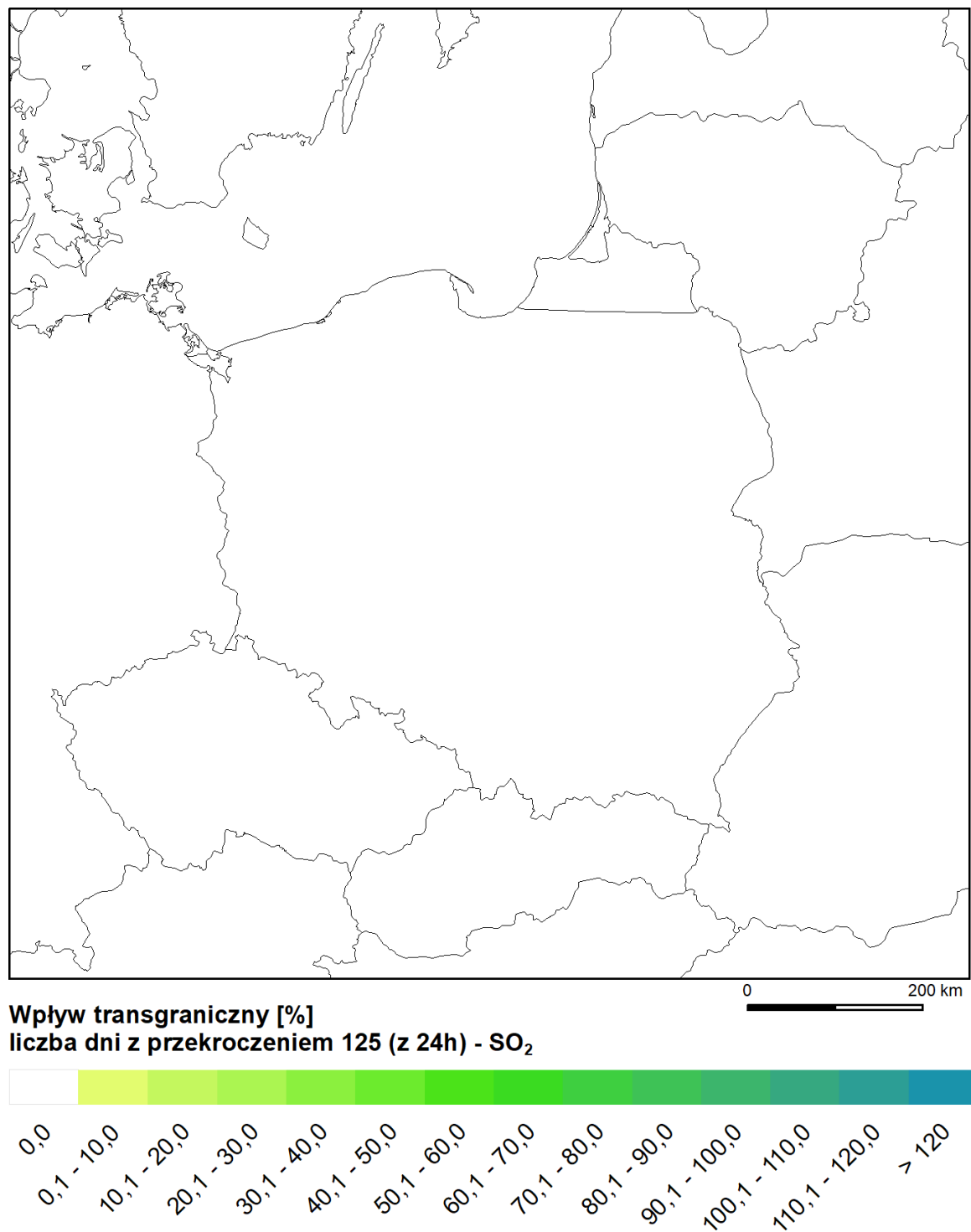
Udział źródeł transgranicznych w stężeniach dwutlenku siarki w okresie zimowym ma podobny rozkład przestrzenny jak w przypadku wartości średnich rocznych (**Rysunek 11**). Wzdłuż zachodniej, południowej i wschodniej granicy kraju udział źródeł transgranicznych wahał się

głównie od 50 do 70%, a lokalnie wzrósł do około 81%. Na przeważającym obszarze kraju udział źródeł napływających wystąpił w zakresie od 20 do 40%. Niższy udział źródeł transgranicznych, poniżej 20 % wystąpił lokalnie w centrum, na południu i zachodzie kraju.



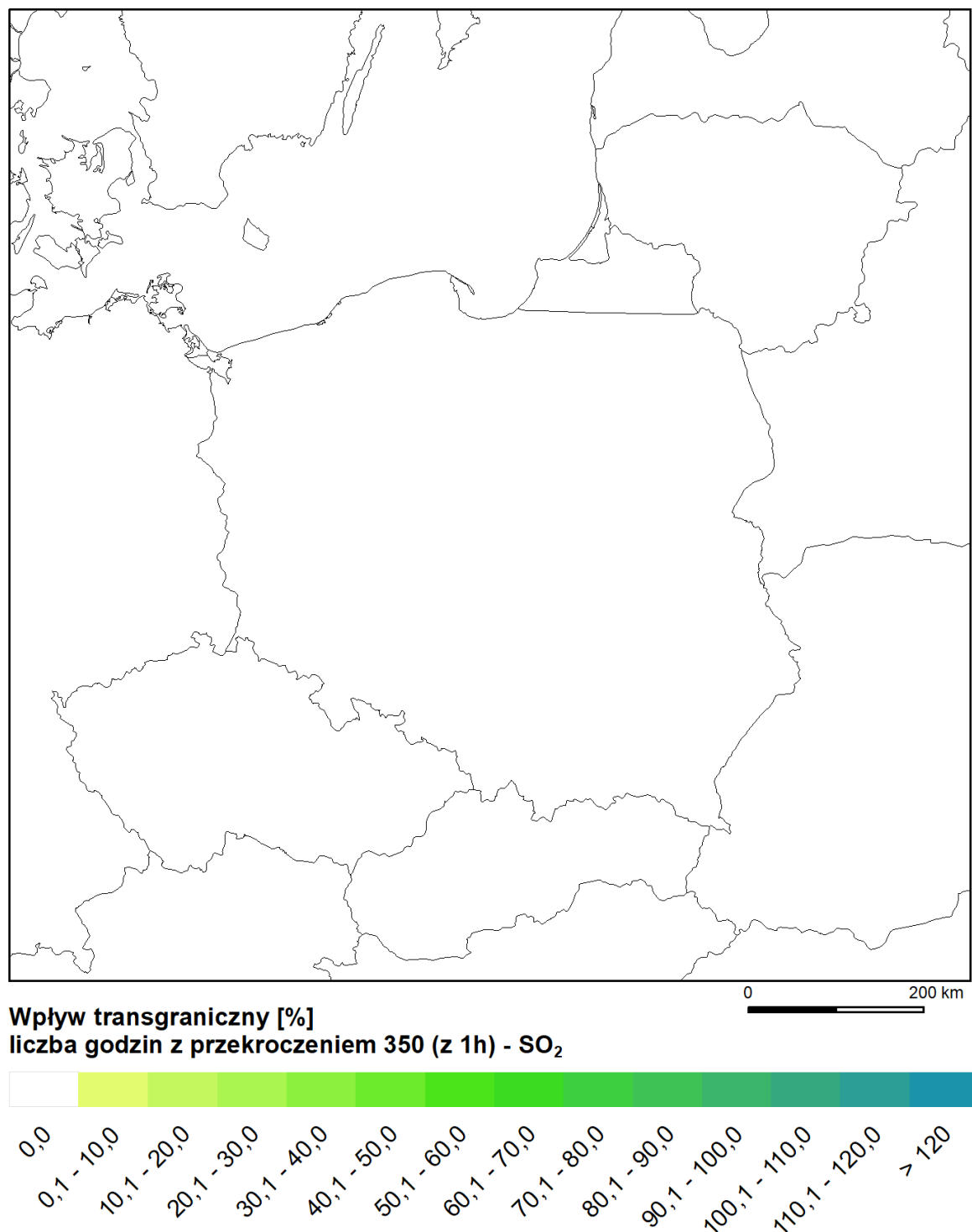
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2023

Wyniki modelowania w 2023 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 12**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.



Rysunek 12. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2023 roku

Wyniki modelowania w 2023 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia przypadków przekroczeń wartości jednogodzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 13**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.



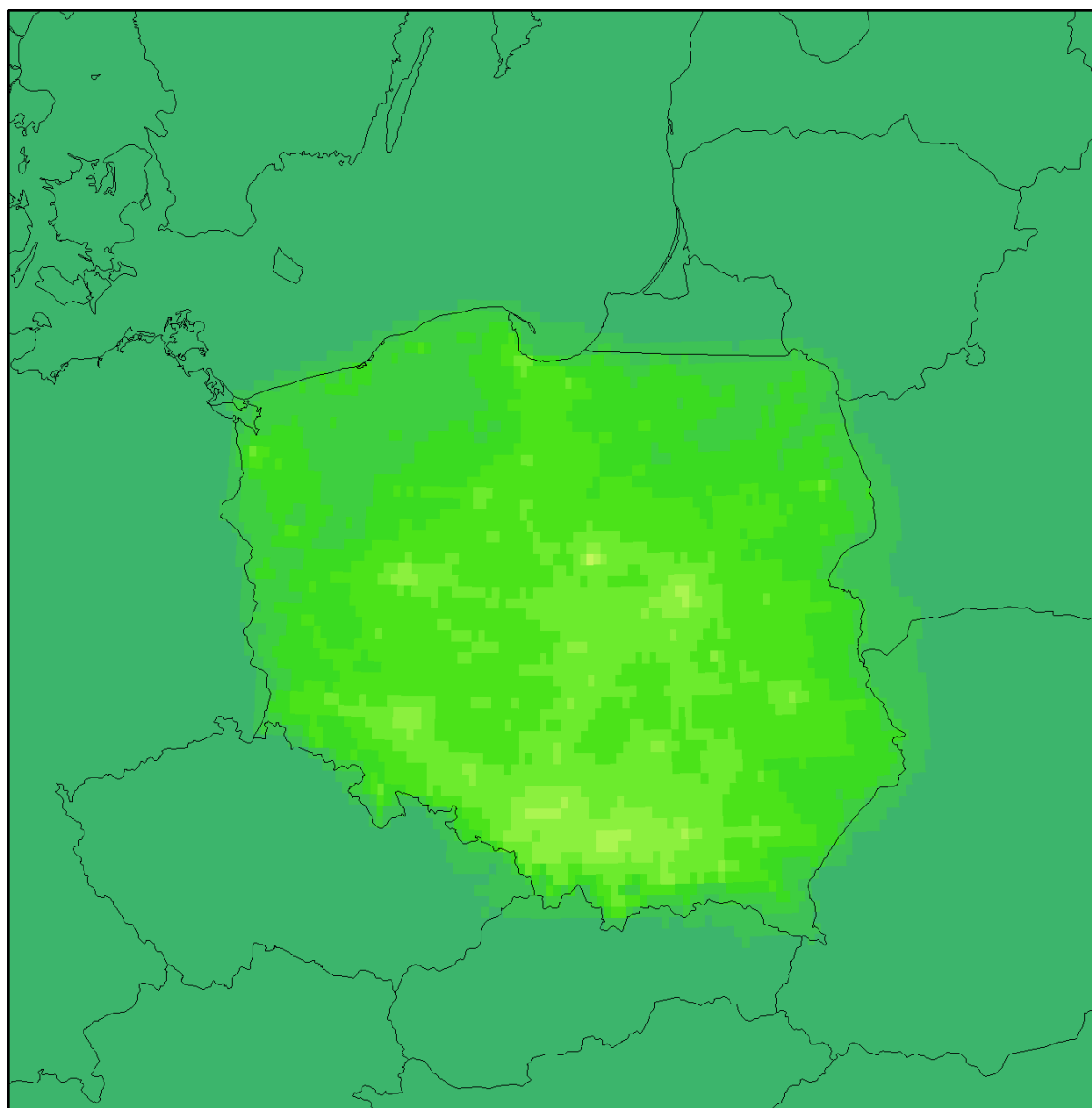
Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2023 roku

4.4 Dwutlenek azotu NO₂

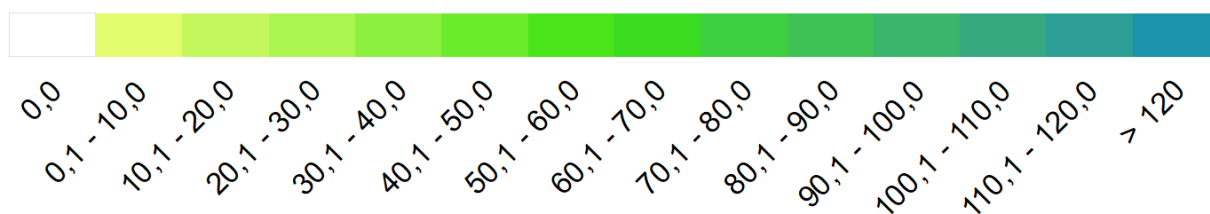
Analiza udziału źródeł transgranicznych dwutlenku azotu w 2023 roku dotyczy rozkładu przestrzennego:

- Stężeń średnich rocznych,
- Liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej powyżej 200 µg/m³.

W 2023 roku na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu zawierał się w przedziale od 15 do około 95% (**Rysunek 14**). Najwyższy wpływ zanieczyszczeń napływających, w zakresie od 80 do 95% wystąpił głównie na wybrzeżu Morza Bałtyckiego, a także wzdłuż granic Polski, szczególnie na zachodzie i południu. Wartości w granicach 60-80% wystąpiły na znacznym obszarze północno-wschodniej oraz północno-zachodniej części Polski, a także na krańcach wschodnich, południowych i zachodnich. Na przeważającym obszarze kraju, głównie w centrum, udział źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu NO₂ wynosił od 40 do 60%. Wartości z zakresu od 30 do 40% wystąpiły na znacznym obszarze województwa śląskiego i małopolskiego oraz w rejonie dużych miast kraju. Najniższy wpływ zanieczyszczeń napływających, do 30 % wystąpił w rejonie Warszawy, Płocka, Krakowa, Tarnowa i aglomeracji górnośląskiej. W rozkładzie udziału procentowego wpływu transgranicznego zaznaczają się obszary dużych miast, głównych dróg i ważnych węzłów komunikacyjnych.



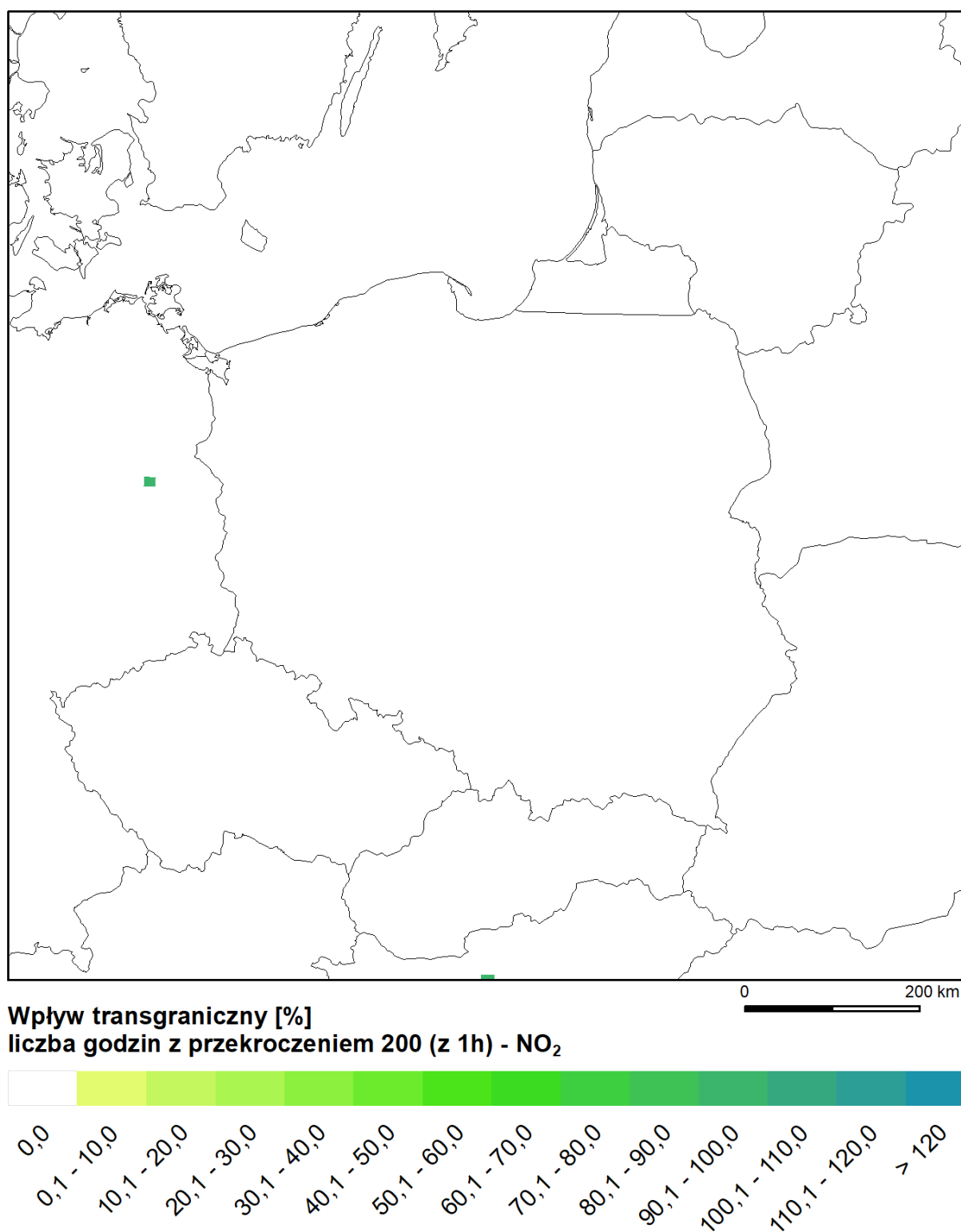
**Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - NO₂**



Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2023 roku

Wyniki modelowania w 2023 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych przekroczeń poziomu 200 µg/m³ dla wartości

jednogodzinnej stężeń dwutlenku azotu (**Rysunek 15**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.

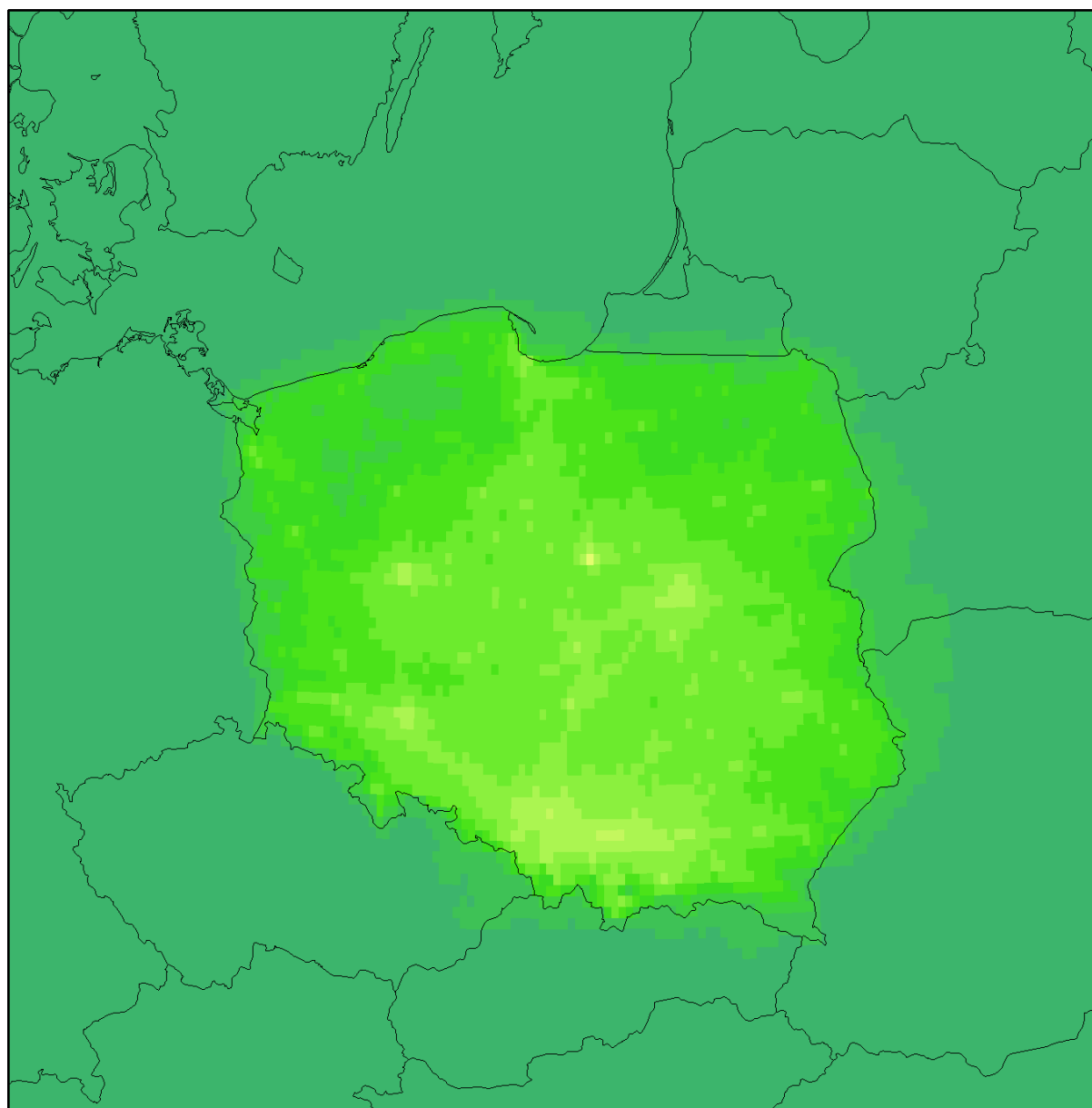


Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej wartości stężeń NO₂ powyżej 200 µg/m³ na obszarze Polski w 2023 roku

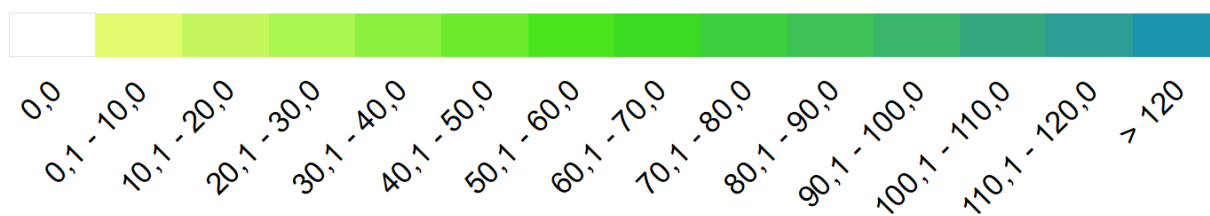
4.5 Tlenki azotu NO_x

Analiza udziału źródeł transgranicznych dwutlenków azotu w 2023 roku dotyczy rozkładu przestrzennego stężeń średnich rocznych.

W 2023 roku udział zanieczyszczeń transgranicznych w średnim rocznym stężeniu tlenków azotu wahał się od 10 do około 94% (**Rysunek 16**). Najwyższy wpływ źródeł napływających wystąpił wzdłuż granic oraz lokalnie w północno-zachodniej części Polski- od 70 do 94%. W północnej, wschodniej i zachodniej części kraju oraz na krańcach południowych udział źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu NO_x wahał się między 50 a 70%. Im dalej od granic, tym wpływ zanieczyszczeń napływających był niższy, w centralnej oraz południowej części Polski wartości wahały się w zakresie od 30 do 50%. Udział źródeł transgranicznych poniżej 30% wystąpił w rejonie Płocka, Warszawy, Poznania, Łodzi, Wrocławia, Grójca, elektrowni Bełchatów oraz na znacznym obszarze województwa śląskiego i małopolskiego.



Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - NO_x



Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2023 roku

4.6 Ozon O₃

Analiza udziału źródeł transgranicznych ozonu w 2023 roku dotyczy rozkładu przestrzennego:

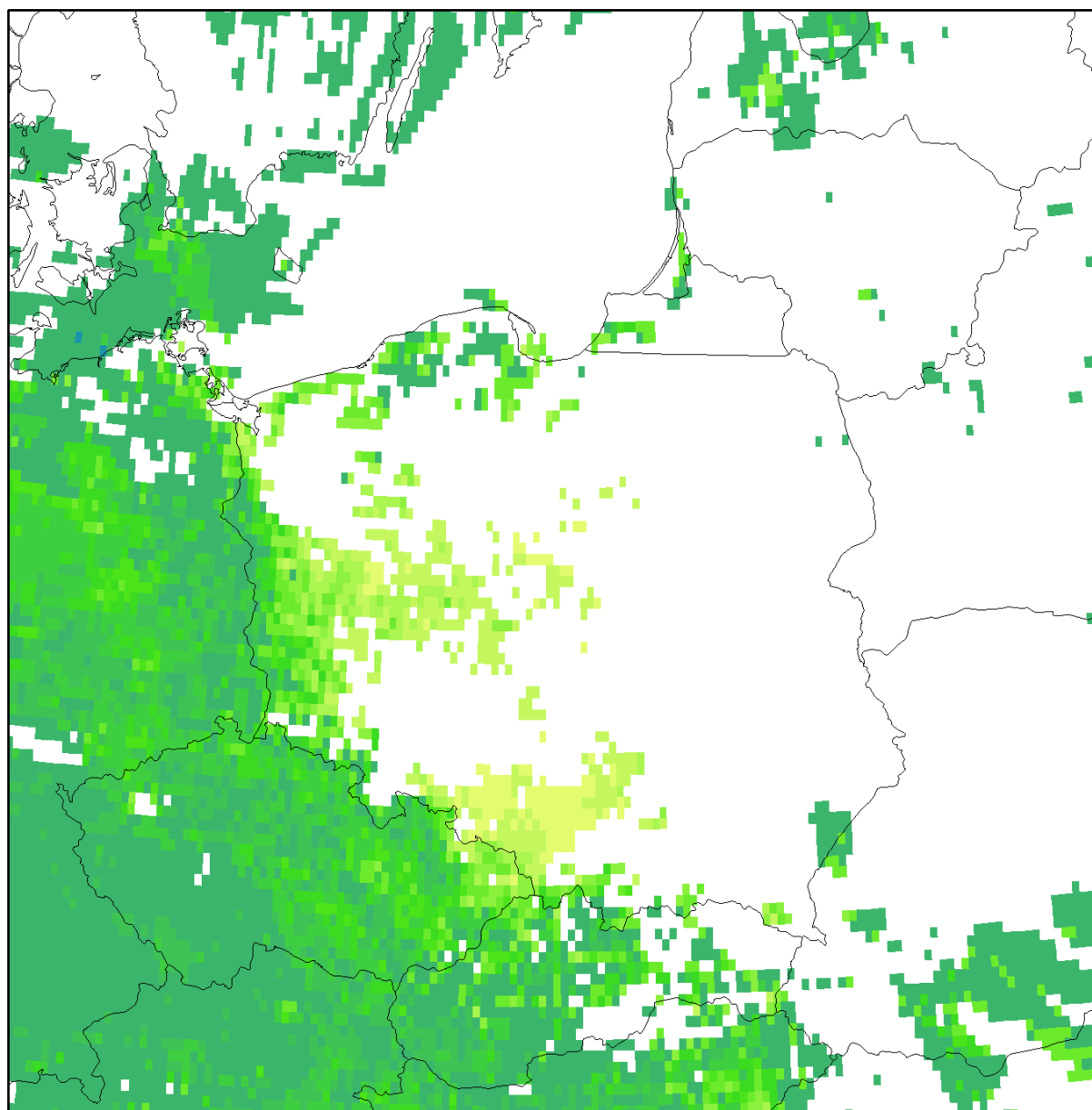
- Liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m³,
- Wartości wskaźnika AOT40³.

W 2023 roku rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w kształtowaniu liczby dni, z najwyższą ośmiogodzinną średnią krocząca stężeń ozonu większą od 120 µg/m³ był mało zróżnicowany (**Rysunek 17**). Brak wpływu źródeł transgranicznych, oznaczający brak wystąpienia dni z przekroczeniem progu 120 µg/m³ w wyniku oddziaływania wyłącznie emisji spoza granic kraju, wystąpił na przeważającym obszarze Polski, głównie we wschodniej i centralnej części. Udział źródeł transgranicznych z zakresu od 50 do nawet 100% wystąpił w rejonie zachodniej i południowej granicy kraju oraz lokalnie na wschodzie i północy Polski. Natomiast udział źródeł napływających poniżej 50% wystąpił miejscowo na południu, północy, zachodzie i w centrum kraju. Fakt wzrostu poziomu stężeń ozonu, na skutek oddziaływania wyłącznie emisji z granic kraju, w obszarach, w których jest wysoka emisja ze źródeł krajowych wynika z ograniczenia reakcji $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. W scenariuszu wzrost stężeń O₃ wynika zatem z faktu braku dodatkowych emisji tlenków azotu z obszaru Polski, nie zaś ściśle z oddziaływania emisji transgranicznych.

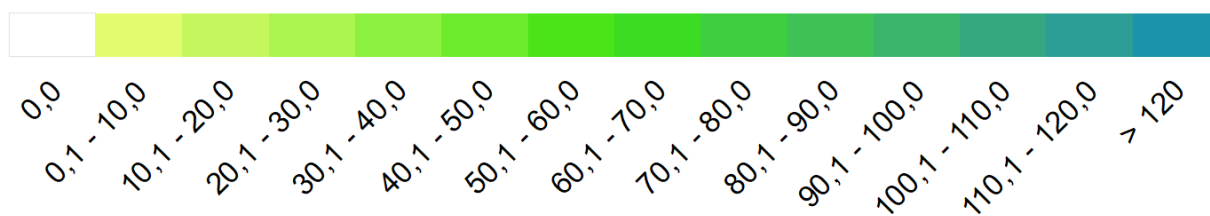
Jednocześnie należy wziąć pod uwagę, że scenariusz transgraniczny zakłada brak jedynie emisji antropogenicznych. Emisje biogenne (NMLZO z lasów i NO_x z gleb) są nadal aktywne, ponieważ są poza możliwością zarządzania i planowania działań redukcyjnych.

³ Wskaźnik obliczany na podstawie stężeń jednogodzinnych, definiowany jest jako zakumulowana ekspozycja na stężenia większe niż 40 ppbv (ok. 80 µg/m³) w okresie od 1 maja do 31 lipca, w godzinach od 8:00 do 20:00 czasu lokalnego:

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

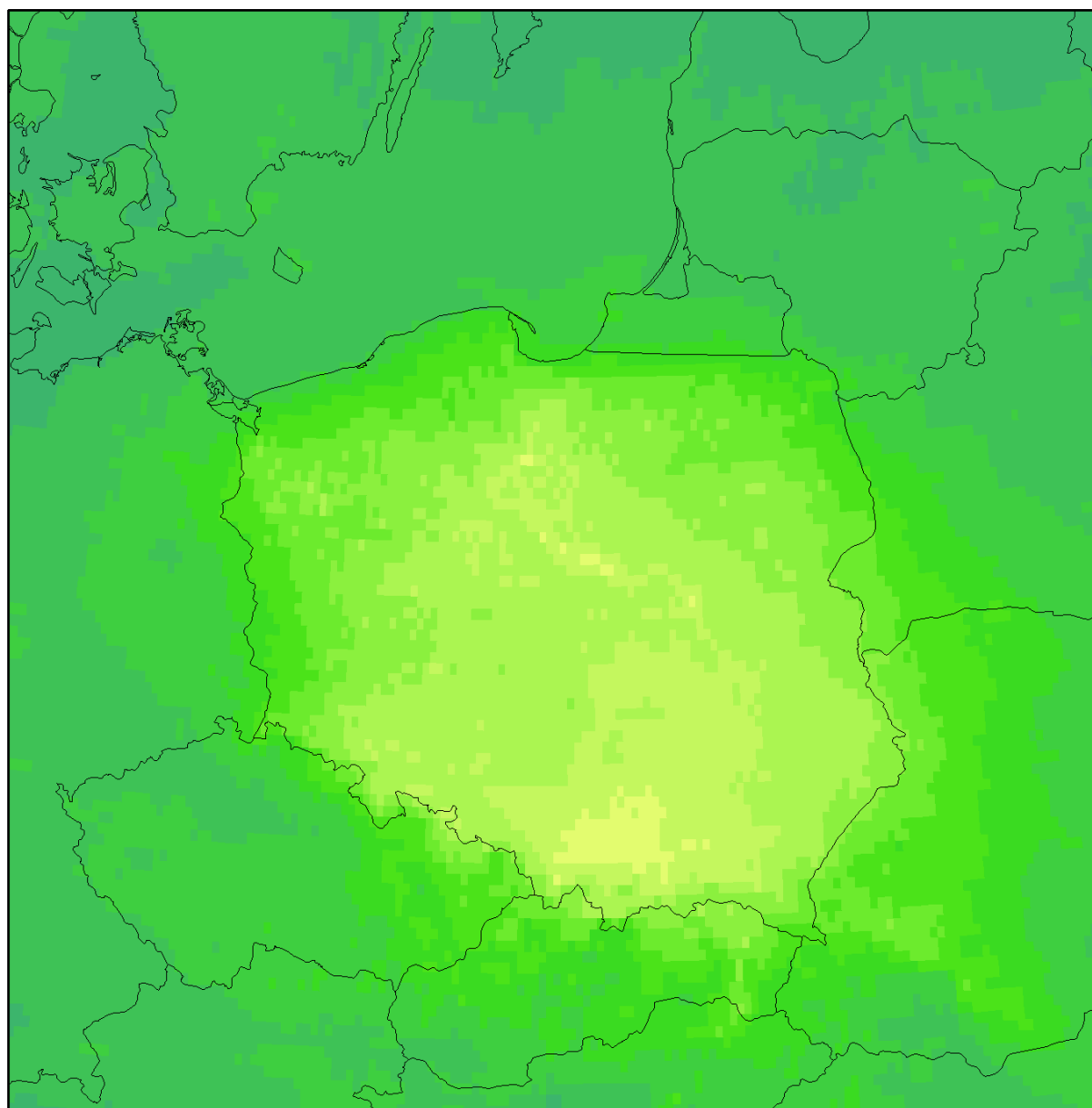


Wpływ transgraniczny [%]
liczba dni z przekroczeniem 120 w roku oceny (z 8k) - O₃

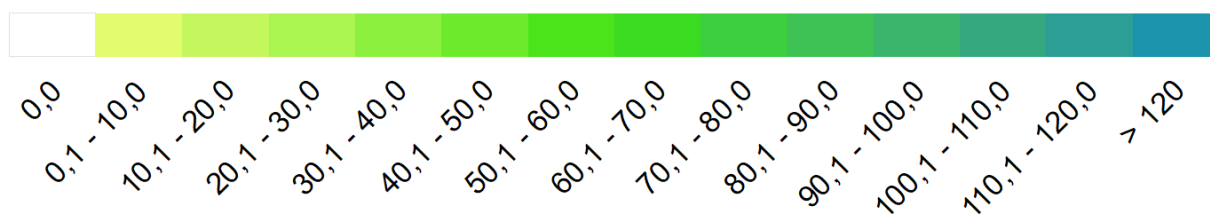


Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m³ na obszarze Polski w 2023 roku

W 2023 roku, udział procentowy źródeł transgranicznych w kształtowaniu się wartości wskaźnika AOT40 na obszarze Polski wykazuje duże zróżnicowanie przestrzenne (**Rysunek 18**). Najwyższy udział zanieczyszczeń napływających spoza kraju wystąpił na północy Polski oraz wzdłuż zachodniej granicy - od 50 do 70%, natomiast wzdłuż wybrzeża Morza Bałtyckiego wpływ zanieczyszczeń transgranicznych sięgał do około 84%. Im dalej od granicy kraju tym wartości są niższe - w zachodniej i północno-wschodniej części Polski oraz na krańcach południowych i wschodnich kraju udział źródeł transgranicznych wahał się od 30 do 50%. W centrum i na południu, wartości udziału źródeł napływających wystąpiły w zakresie od 10 do 30%. Najniższe wartości, poniżej 10% wystąpiły na znacznym obszarze województwa małopolskiego i w rejonie Żywca, Pilzna oraz lokalnie wzdłuż doliny rzeki Wisły.



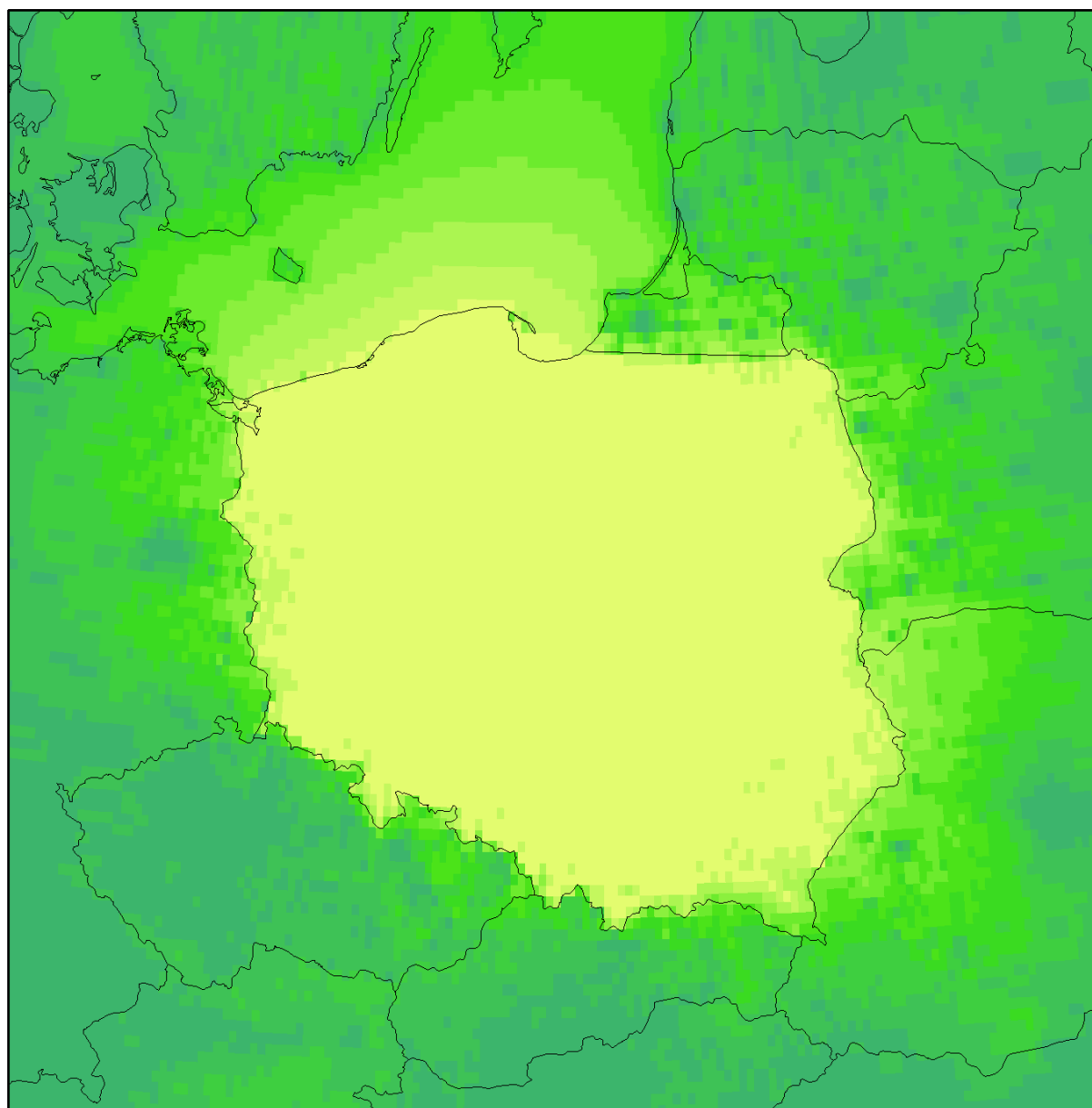
**Wpływ transgraniczny [%]
AOT40 w roku oceny (z 1h) - O₃**



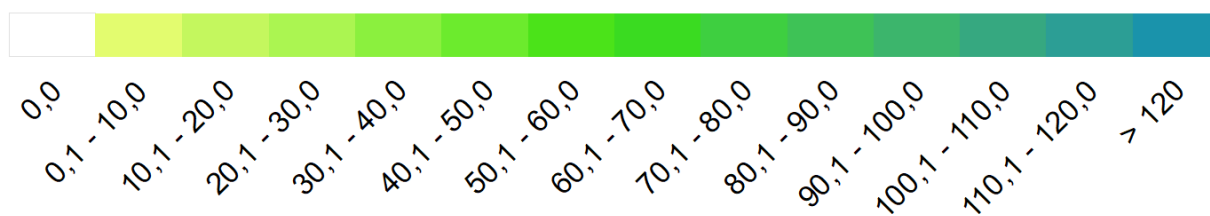
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2023 roku

4.7 Benzo(a)piren

Rysunek 19 przedstawia rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średnim rocznym stężeniu benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2023 roku. Na przeważającym obszarze Polski udział zanieczyszczeń napływających był niższy niż 10%, co świadczy o przeważającym udziale emisji krajowej. Wzdłuż południowej i zachodniej granicy kraju udział zanieczyszczeń napływających był wyższy, wahał się głównie od 20 do 50%, a miejscowo do około 85%.



**Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna – BaP**



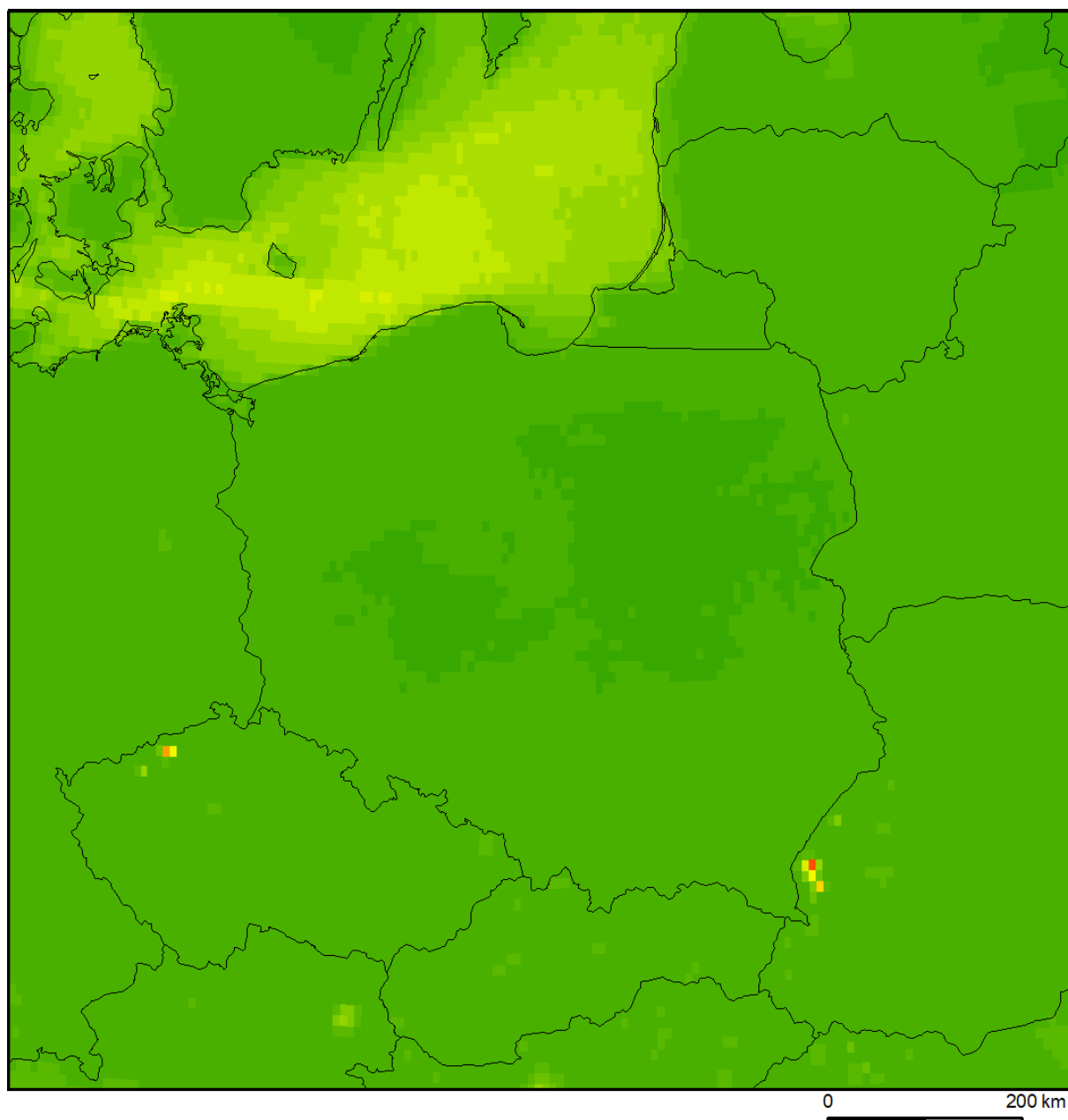
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2023 roku

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 2023 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 obszarach wybrzeża Morza Bałtyckiego oraz krańcach południowych kraju. Na przeważającym obszarze Polski wartości wahały się między 10 a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Natomiast lokalnie w centralnej i północno-wschodniej części kraju stężenia były niższe od 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



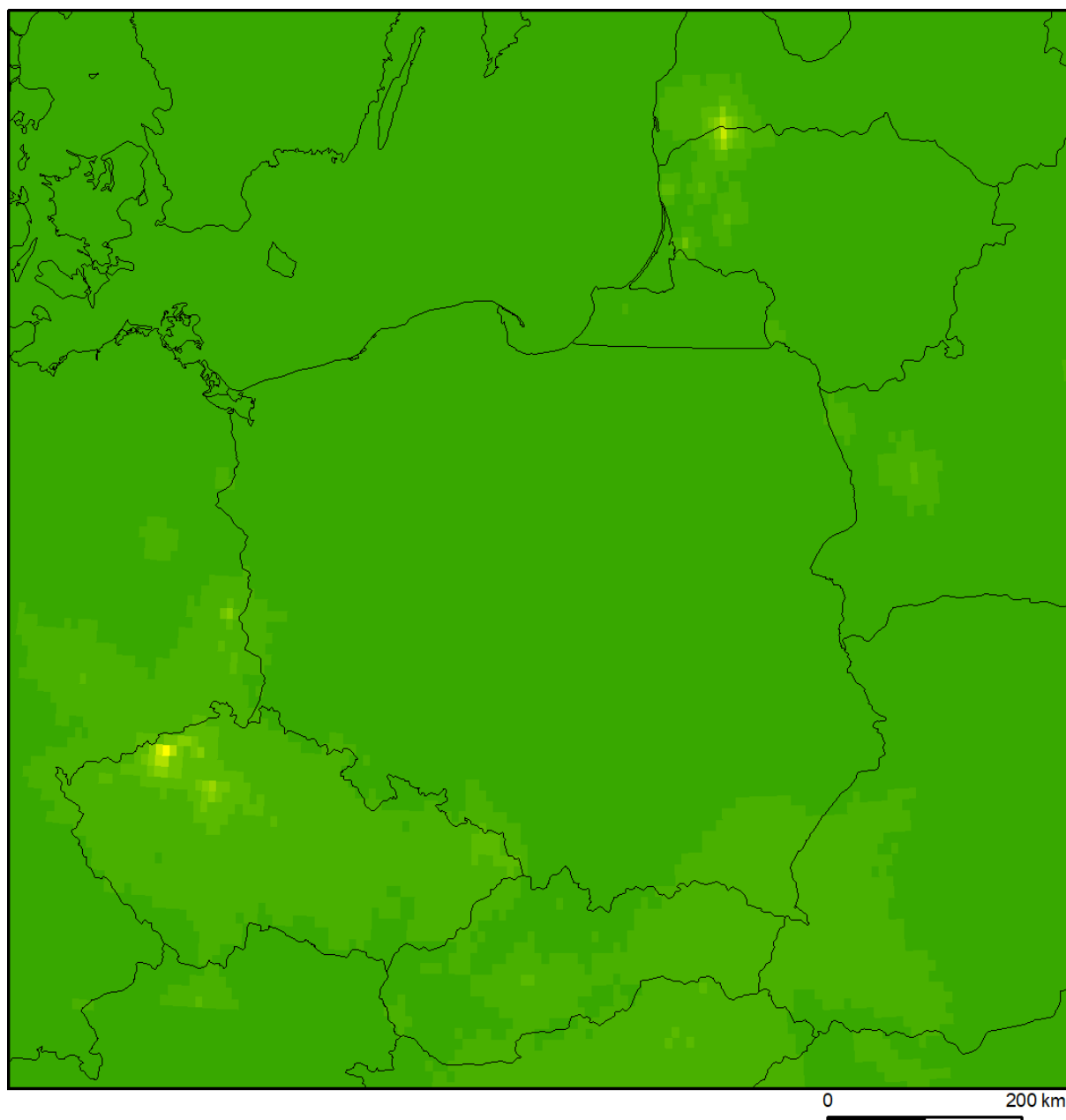
Percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych - PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

0,00 - 10,00	35,50 - 40,00	50,50 - 55,00	75,01 - 100,00
10,01 - 20,00	40,01 - 42,50	55,01 - 60,00	100,01 - 120,00
20,01 - 25,49	42,51 - 45,00	60,01 - 65,00	120,01 - 140,00
25,50 - 30,00	45,01 - 47,50	65,01 - 70,00	> 140,00
30,01 - 35,49	47,51 - 50,49	70,01 - 75,00	

Rysunek 20. Rozkład przestrzenny percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń pyłu PM10 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 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 21**). Wyższa wartość percentyla wystąpiła lokalnie na południu, zachodzie oraz wschodzie kraju - do 10 µg/m³.

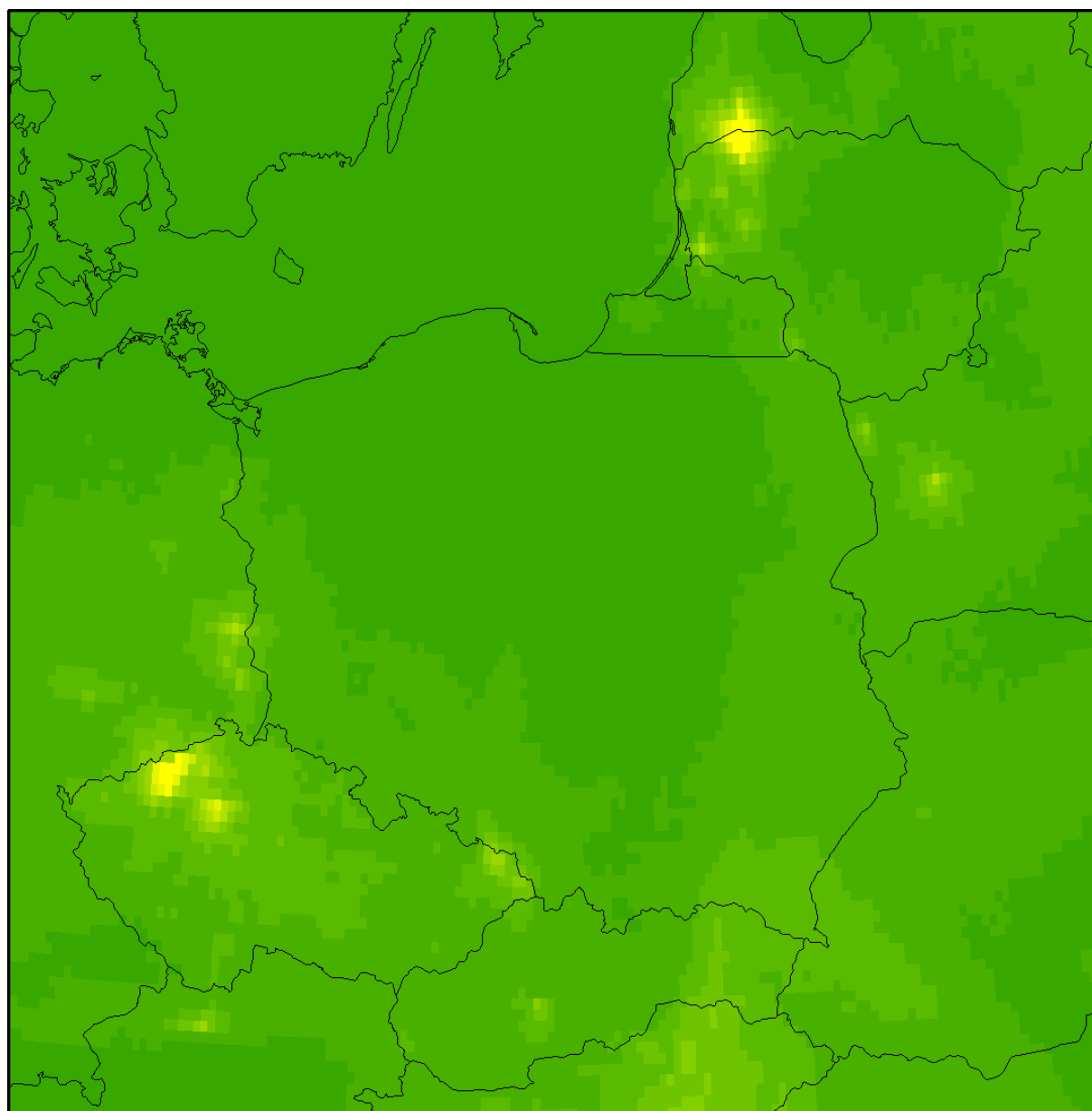


Percentyl 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych - SO₂ [µg/m³]

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 21. Rozkład przestrzenny percentyla 99.2 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń dwutlenku siarki SO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 roku

W 2023 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 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 22**). Wartości percentyla poniżej $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły w północnej i centralnej części kraju oraz lokalnie na wschodzie, południu i zachodzie. Stężenia z zakresu od 5 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły na znacznym obszarze wschodniej, zachodniej i południowej części Polski. Natomiast w kilku lokalizacjach na krańcach zachodnich, południowych i północno-wschodnich Polski wartości percentyla 99,7 z serii stężeń jednogodzinnych SO_2 były wyższe, z zakresu od 10 do $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 99,7 z rocznej serii
stężeń jednogodzinnych - SO₂ [µg/m³]

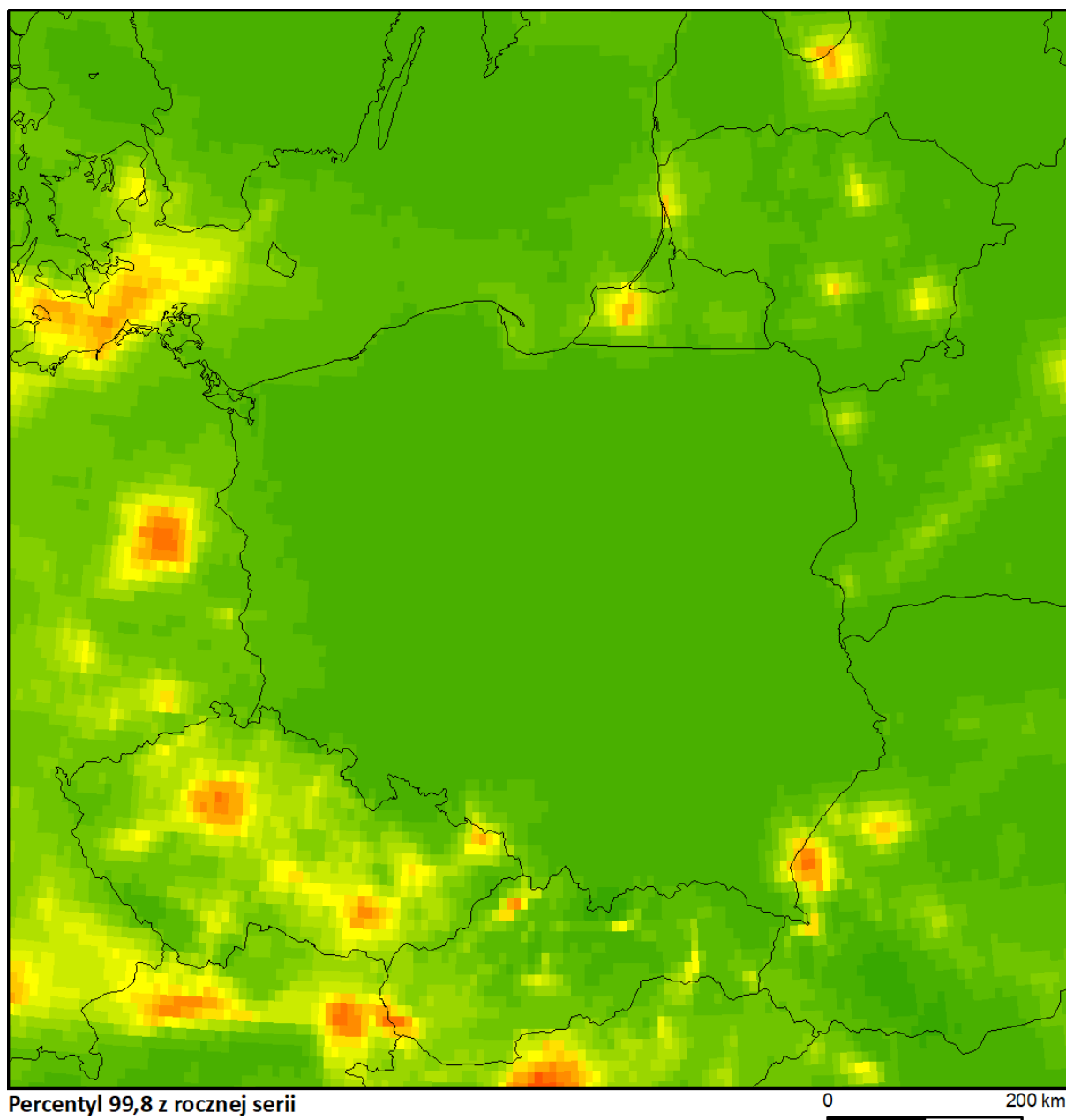
0 200 km

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 22. Rozkład przestrzenny percentyla 99.7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku siarki SO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 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 mało zróżnicowany na obszarze kraju w 2023 roku (**Rysunek 23**). Na przeważającym obszarze Polski wartości percentyla 99,8 były niższe od 20 µg/m³. Lokalnie na krańcach wschodnich, północnych i południowych oraz miejscowo wzdłuż zachodniej granicy kraju wartości wahały się od 20 do 30 µg/m³. Najwyższe stężenia wystąpiły w rejonie Trójmiasta, Przemyśla oraz lokalnie przy wschodniej, zachodniej i południowej granicy kraju, do około 78 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, nie tylko ze względu na klimatologicznie przeważające kierunki wiatrów, ale także ze względu na wielkość strumienia emisji raportowanego w krajach ościennych.



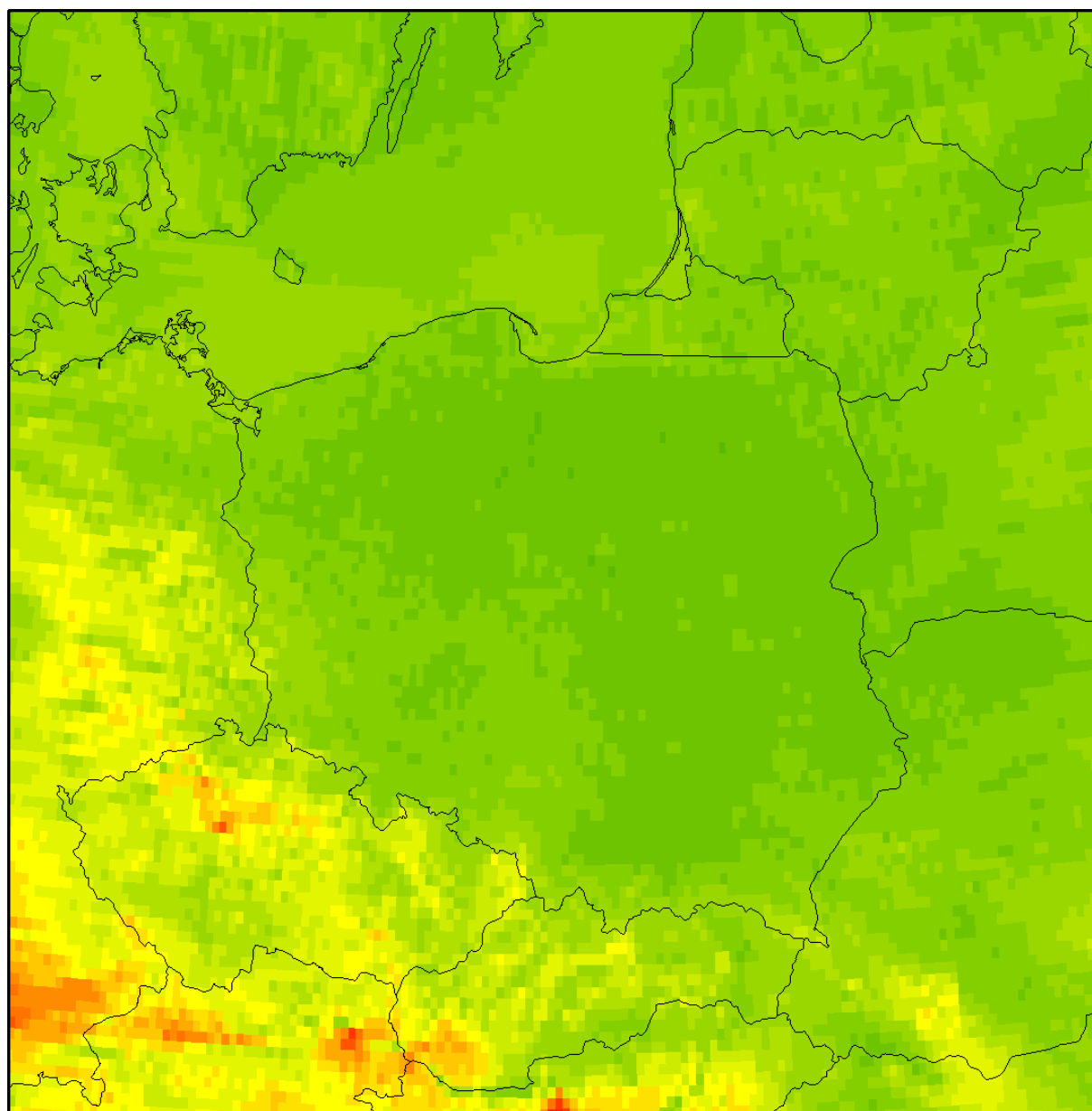
Percentyl 99,8 z rocznej serii
stężeń jednogodzinnych - NO₂ [µg/m³]

0,00 - 10,00	45,01 - 50,00	70,01 - 75,00	110,01 - 120,00
10,01 - 20,00	50,01 - 55,00	75,01 - 80,00	120,01 - 150,49
20,01 - 30,00	55,01 - 60,00	80,01 - 90,00	150,50 - 200,49
30,01 - 40,00	60,01 - 65,00	90,01 - 100,49	> 200,49
40,01 - 45,00	65,01 - 70,00	100,50 - 110,00	

Rysunek 23. Rozkład przestrzenny percentyla 99.8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku azotu NO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 roku

5.4 Ozon O₃

W 2023 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 24**). W północnej i wschodniej części kraju oraz częściowo w południowej i zachodniej, wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był najniższy, a wartości percentyla wynosiły od 78 do 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Udział źródeł transgranicznych rośnie w kierunku południowo-zachodnim. W centrum, na zachodzie i południu oraz lokalnie na północy i wschodzie wartości percentyla wahały się od 90 do 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Najwyższe wartości percentyla związane z wpływem zanieczyszczenia transgranicznego wystąpiły na krańcach południowych i zachodnich kraju – do 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla ośmiogodzinnej najwyższej średniej kroczącej stężeń jest wysoka.



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

0 200 km

0,00 - 20,00	95,01 - 100,00	110,01 - 112,50	122,51 - 125,00
20,01 - 50,00	100,01 - 102,50	112,51 - 115,00	125,01 - 130,00
50,01 - 80,00	102,51 - 105,00	115,01 - 117,50	130,01 - 140,00
80,01 - 90,00	105,01 - 107,50	117,51 - 120,49	> 140,00
90,01 - 95,00	107,51 - 110,00	120,50 - 122,50	

Rysunek 24. Rozkład przestrzenny percentyla 93.2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu O_3 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 roku

6. Podsumowanie

W przypadku wpływu transportu transgranicznego na poziom stężeń zanieczyszczeń w Polsce, wielkość procentowa udziału źródeł zagranicznych różni się w zależności od zanieczyszczenia oraz od analizowanego parametru. Ze względu na różnice struktury emisji w Polsce i poza jej granicami wartości udziałów wzdłuż granic Polski różnią się nieco w zależności od zanieczyszczenia. W odniesieniu do tego samego zanieczyszczenia istotne jest czy analiza odnosi się do stężeń średniorocznych, na których wartości ma wpływ cyrkulacja i warunki meteorologiczne w ciągu całego roku czy wartości ekstremalnych, które np. w przypadku epizodów pyłowych występują przeważnie w chłodnej porze roku. Należy podkreślić, że analiza oddziaływania transgranicznego jest uzależniona od wyboru roku bazowego do obliczeń, ponieważ klimatologia w kolejnych latach w odniesieniu do układów cyrkulacyjnych a w szczególności wartości prędkości i kierunku wiatru oraz występowania ciszy atmosferycznych mogą się różnić.

6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym

Dla wartości średnich rocznych pyłu PM₁₀ udział zanieczyszczeń pochodzących spoza Polski dla stref i waha się w granicach od 23 do 73%. Udział źródeł transgranicznych w występowaniu dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej 50 µg/m³ wystąpił głównie na południu, wschodzie i w centrum kraju – do 100%. Na znacznym obszarze północnej i zachodniej części kraju przekroczenia dopuszczalnej normy dla wartości 50 µg/m³ w stężeniach średniodobowych nie wystąpiło. Konkluzja wynikająca z przedstawionej analizy jest następująca:

- w odniesieniu do wartości średniorocznej udział transgraniczny jest zdecydowanie wyższy,
- za kształtowanie się stężeń o wartościach średniodobowych przekraczających 50 µg/m³ w przypadku niewielkich przekroczeń wartości progowej, wpływ transgraniczny może zadecydować o przekroczeniu choć relatywnie nie jest duży. Konieczne jest uzgodnienie interpretacji takich sytuacji.

Dla wartości stężeń średnich rocznych pyłu PM_{2,5} wielkość udziału transgranicznego jest bardzo zbliżona do pyłu PM₁₀. Najwyższy wpływ źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju, szczególnie w południowej i zachodniej części, do około 90%. Natomiast najwyższy udział źródeł krajowych wystąpił na terenie Śląska i Małopolski oraz w rejonie głównych miast kraju. Świadczy to o tym, że to właśnie pył drobny jest w skali rocznej efektywnie transportowany na dalekie odległości.

6.2 Dwutlenek siarki

Udział procentowy wpływu transgranicznego, ze względu na stężenia średnioroczne i w okresie zimowym SO_2 , kształtuje się na zbliżonym poziomie – uśredniony dla stref od około 6 do około 50% (średnio 30%). Świadczy to o przeważającym udziale źródeł krajowych i dużej roli struktury emisji na terenie kraju (np. udział transgraniczny w rejonie Płocka i Szczecina na poziomie niższym niż 10%). Udział procentowy wpływu źródeł transgranicznych w odniesieniu do średniej rocznej oraz średniej w okresie zimowym dwutlenku siarki ma również zbliżony rozkład przestrzenny. Najwyższy wpływ źródeł napływających wystąpił wzdłuż granic kraju. Na obszarach uprzemysłowionych i większych miast udział źródeł transgranicznych był niski, do 20%.

6.3 Tlenki azotu

W przypadku średniej rocznej NO_2 i NO_x udział transgraniczny uśredniony dla stref wynosił odpowiednio od 25 do 72% (średnio 49%) dla NO_2 i od 18 do 68% (średnio 43%) dla NO_x . Wyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju i Wybrzeża Morza Bałtyckiego. Im dalej od granic państwa, tym wpływ zanieczyszczeń napływających jest niższy. Najniższe udziały transportu transgranicznego dla tych zanieczyszczeń występują na obszarach Śląska i Małopolski oraz na terenie dużych miast: Warszawy, Trójmiasta, Płocka, Poznania, Łodzi i Wrocławia. W przypadku NO_2 i NO_x znaczącym źródłem emisji jest sektor transportu (SNAP7 i SNAP8 łącznie stanowią około 40% ładunku emisji).

6.4 B(a)P

Dla B(a)P udziały transgraniczne są niewielkie co wynika z dużej różnicy oszacowań ładunków emisji na terenie Polski i w Europie. Na przeważającym obszarze Polski udział napływu transgranicznego dla stref był niższy od 10%. Wyjątkiem są obszary wzdłuż granic kraju, gdzie udział źródeł napływających sięgał miejscowo do 85% w obszarach charakteryzujących się niewielką emisją tego związku. Ogólnie rozkład przestrzenny udziału transportu transgranicznego B(a)P jest odmienny od pozostałych zanieczyszczeń i świadczy to o bardzo dużej emisji krajowej.

6.5 Ozon

Ozon jest jedynym zanieczyszczeniem wtórnym uwzględnionym w analizie, a poziom stężeń i indeksów narażenia ze względu na ochronę zdrowia i ochronę roślin nie zależy liniowo od redukcji emisji prekursorów (w tym przypadku najważniejszymi prekursorami są tlenki azotu i niemetanowe lotne związki organiczne pochodzenia zarówno antropogenicznego jak i naturalnego). Udział zanieczyszczeń transgranicznych w kształtowaniu się podwyższonych stężeń ozonu wystąpił w zachodniej i południowej części kraju oraz lokalnie w centrum i na północy - na poziomie około 20-40%, a lokalnie sięgał nawet 100% ze względu na liczbę dni

z przekroczeniami progu $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla najwyższej ośmiogodzinnej średniej kroczącej w ciągu doby. Natomiast w przypadku wartości indeksu AOT40 udział transportu transgranicznego dla stref wahał się od 4 do 68%, uśrednione dla stref - 28%. Napływ ozonu oraz jego prekursorów na poziom narażenia roślin wyrażony indeksem AOT40, ma najwyższe znaczenie wzdłuż zachodniej, północnej oraz wschodniej granicy kraju. W centrum i na południu Polski udział zanieczyszczeń transgranicznych jest niższy.

6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych

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

- Wartość percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych pyłu PM10 lokalnie w centrum oraz północno-wschodniej części kraju nie przekroczyła $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast na przeważającym obszarze Polski wahały się od 10 do $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wyższe stężenia, do $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły na wybrzeżu Morza Bałtyckiego.
- W przypadku percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych dwutlenku siarki wartości były niższe od $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyjątkiem jest kilka lokalizacji na południu, wschodzie i zachodzie kraju, gdzie wartości dochodziły do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dwutlenku siarki w przeważającej części Polski był niższy od $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyższe wartości wystąpiły w kilku lokalizacjach na południu i zachodzie kraju- do $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Wartości percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dwutlenku azotu na przeważającym obszarze Polski wystąpiły w zakresie od 1 do $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyższe wartości wystąpiły wzdłuż północnej i zachodniej granicy kraju oraz lokalnie na południu Polski.
- Rozkład przestrzenny wartości percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących ozonu jest bardziej zróżnicowany przestrzennie niż pozostałych zanieczyszczeń. Wartości wahały się od 78 do ponad $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wysokie wartości – powyżej $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ świadczą o możliwej znaczącej roli transportu transgranicznego w powstawaniu przekroczeń wartości dopuszczalnej. Niższe wartości percentyla wystąpiły w północnej i wschodniej części Polski, natomiast wyższe na południu, południowym zachodzie i krańcach północnych kraju.

Na podstawie rozkładu percentyli można stwierdzić, że przy przeważającym transporcie z kierunków zachodnich i południowo zachodnich, wielkość wpływu transgranicznego jest silnie uzależniona od wielkości źródeł poza granicami kraju oraz od udziału źródeł naturalnych.

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	6
Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2021	7
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Europy; EMEP 2021	8
Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Polski; EMEP 2021	8
Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Europy; EMEP 2021	9
Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Polski; EMEP 2021	9
Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM ₁₀ na obszarze Polski w 2023 roku	16
Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej 50 µg/m ³ ze względu na średniodobowe stężenia pyłu PM ₁₀ na obszarze Polski w 2023 roku	18
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM _{2,5} na obszarze Polski w 2023 roku	20
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2023 roku	22
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2023	23
Rysunek 12. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej 125 µg/m ³ na obszarze Polski w 2023 roku	24
Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej dwutlenku siarki powyżej 350 µg/m ³ na obszarze Polski w 2023 roku	25
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2023 roku	27

Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej wartości stężeń NO ₂ powyżej 200 µg/m ³ na obszarze Polski w 2023 roku	28
Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2023 roku	30
Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m ³ na obszarze Polski w 2023 roku	32
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2023 roku	34
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2023 roku	36
Rysunek 20. Rozkład przestrzenny percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń pyłu PM10 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 roku	38
Rysunek 21. 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 2023 roku	40
Rysunek 22. 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 2023 roku	42
Rysunek 23. 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 2023 roku	44
Rysunek 24. Rozkład przestrzenny percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu O ₃ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2023 roku	46

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	10
Tabela 2. Zestawienie parametrów	12