

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2019



Analiza wykonana w ramach zadań ustawowych
Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2018 poz. 799, z późn. zm.).



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

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

Warszawa 2020

Autorzy:

dr hab. inż. Joanna Strużewska

dr hab. inż. Jacek W. Kamiński

dr inż. Marcin Kawka

mgr inż. Paweł Durka

mgr inż. Grzegorz Jeleniewicz

mgr inż. Paulina Jagiełło

mgr Aneta Gienibor

inż. Aleksander Norowski



Data publikacji: Czerwiec 2020

Spis treści

Wstęp	4
1. Metodyka obliczeń	5
1.1 Opis modelu GEM-AQ	5
1.2 Konfiguracja modelu GEM-AQ	6
1.3 Dane emisyjne	7
2. Ocena sprawdzalności	11
3. Zakres analiz	12
4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń w skali kraju na podstawie wyników modelowania	14
4.1 Pył PM_{10}	14
4.2 Pył $PM_{2.5}$	17
4.3 Dwutlenek siarki SO_2	18
4.4 Dwutlenek azotu NO_2	22
4.5 Tlenki azotu NO_x	24
4.6 Ozon O_3	25
4.7 Benzo(a)piren	28
5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego	29
5.1 Pył PM_{10}	29
5.2 Dwutlenek siarki SO_2	30
5.3 Dwutlenek azotu NO_2	32
5.4 Ozon O_3	33
6. Podsumowanie	34
6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym	34
6.2 Dwutlenek siarki	35
6.3 Tlenki azotu	35
6.4 B[a]P	35
6.5 Ozon	36
6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych	36
Spis rysunków	38
7. Spis tabel	39

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. 2018 poz. 799, z późn. 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 2019 powierzona Instytutowi Ochrony Środowiska – Państwowemu Instytutowi Badawczemu. Zakres przedstawionych w raporcie wyników modelowania jest określony Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2018 r. w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2018 poz. 1020). 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 2019,
- 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, 2008). Model ten jest wykorzystywany w europejskim serwisie Copernicus (CAMS_50 Copernicus Atmosphere Monitoring Service – Regional Production) oraz w ramach inicjatywy europejskiej FAIRMODE (Forum for Air Quality Modelling in Europe). W Polsce model ten był wielokrotnie stosowany do prognoz i analiz zanieczyszczenia powietrza w skali kraju. Obecnie jest podstawą systemu modelowania wdrożonego w IOŚ-PIB do celów realizacji zadań zgodnie z zapisami Ustawy Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2018r. poz. 799).

1.1 Opis modelu GEM-AQ

Model GEM-AQ został opracowany na bazie numerycznego modelu prognoz pogody GEM (*Global Environmental Multiscale*), rozwijanego i eksploatowanego operacyjnie przez Kanadyjskie Centrum Meteorologiczne (Côté i inni, 1998a, 1998b). W ramach projektu MAQNet model meteorologiczny został rozbudowany przez wprowadzenie kompleksowego modułu chemii troposfery (Kamiński i inni, 2008). Model GEM-AQ może być stosowany w szerokim zakresie skal przestrzennych: od globalnej przez skalę meso-γ do skali aglomeracji.

Moduły jakości powietrza wprowadzane są *on-line* do modelu meteorologicznego. W odniesieniu do chemii fazy gazowej model posiada 35 związków gazowych transportowanych w drodze adwekcji, głębokiej konwekcji i dyfuzji turbulencyjnej i 15 niepodlegających transportowi ze względu na krótki czas życia. Mechanizm opisujący właściwości chemiczne fazy gazowej w modelu GEM-AQ oparty jest na modyfikacji modelu ADOM [*Acid Deposition and Oxidants Model* (Lurmann i inni, 1986)]. Model ten został rozszerzony o 4 dodatkowe związki (CH_3OOH , CH_3OH , CH_3O_2 , $\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$) i 22 reakcje chemiczne. Zmodyfikowany mechanizm zawiera 50 związków, 116 chemicznych i 19 fotochemicznych reakcji.

Obliczenie trójwymiarowych pól stężeń jest osiągane poprzez rozwiązanie układu równań zachowania masy dla każdej z modelowanych substancji chemicznych. Procesy adwekcji i dyfuzji pionowej dla substancji chemicznych są obliczane zgodnie z algorytmem używanym do adwekcji i dyfuzji dla pary wodnej – wykorzystany został schemat semi-lagranżowski. Do modelowania przemian dla niektórych substancji chemicznych wymagane są obliczenia dodatkowych wielkości zależnych od aktualnych wartości parametrów meteorologicznych, tj. prędkości depozycji suchej i współczynników fotolizy.

Integralną częścią modelu GEM-AQ jest moduł aerozolowy, który pozwala na symulację przemian fizyko-chemicznych aerozolu atmosferycznego oraz jego interakcje ze związkami chemicznymi fazy gazowej. W szczególności uwzględnia reakcję heterogeniczną hydrolizy N_2O_5 prowadzącą do powstawania HNO_3 . Reakcja ta zachodzi na powierzchni aerozolu atmosferycznego i ma bardzo duży wpływ na koncentrację ozonu troposferycznego (Jacob, 2000; Thornton i inni, 2003). Intensywność reakcji zależy zarówno od stężenia, jak i powierzchni aerozolu.

Procesy aerozolowe reprezentowane są poprzez parametryzację nukleacji, koagulacji, procesów wewnątrz-chmurowych, z uwzględnieniem chemii fazy ciekłej dla związków siarki i wymywania wewnątrz chmury, jak również sedymentacji oraz suchej i mokrej depozycji. Procesy transportu uwzględniają adwekcję, dyfuzję turbulentną oraz głęboką konwekcję.

Rozkład masy aerozolu reprezentowany jest w 12 przedziałach wielkości, opisujących logarytmiczny wzrost promienia cząstek (Tabela 1). Modelowane wartości stężeń pyłów PM₁₀ i PM_{2.5} są obliczane jako suma odpowiednich frakcji poszczególnych komponentów chemicznych, tj. siarczanów, aerozolu organicznego, sadzy, pyłu mineralnego oraz aerozolu morskiego.

Tabela 1. Rozkład wielkości aerozolu w module aerozolowym GEM-AQ.

Numer przedziału	Zakres zmienności promienia aerodynamicznego [μm]	Średni promień aerodynamiczny [μm]	Frakcja pyłu
1	0.005 - 0.01	0.0075	Suma (1-8) = PM _{2.5}
2	0.01 - 0.02	0.015	
3	0.02 - 0.04	0.03	
4	0.04 - 0.08	0.06	
5	0.08 - 0.16	0.12	
6	0.16 - 0.32	0.24	
7	0.32 - 0.64	0.48	
8	0.64 - 1.28	0.96	
9	1.28 - 2.56	1.92	Suma (1-11) = PM ₁₀
10	2.56 - 5.12	3.84	
11	5.12 - 10.24	7.68	
12	10.24 - 20.48	15.36	

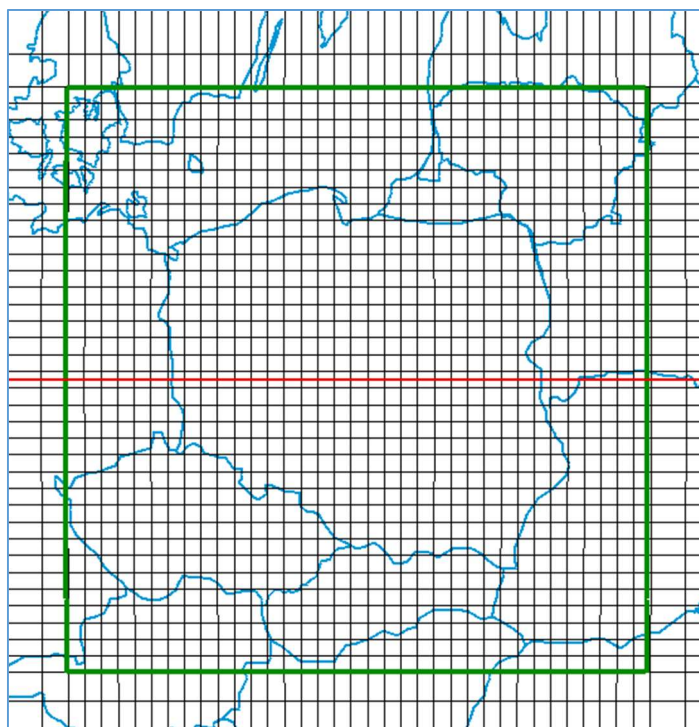
1.2 Konfiguracja modelu GEM-AQ

Modelowanie na potrzeby oceny udziału transgranicznego dotyczy stref zdefiniowanych jako aglomeracje o liczbie mieszkańców powyżej 250 tys., miasta o liczbie mieszkańców powyżej 100 tys. oraz pozostały obszar kraju w podziale na województwa. Listę stref definiuje Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 sierpnia 2012 r. w sprawie stref, w których dokonuje się oceny jakości powietrza (Dz.U. 2012 poz. 914).

Obliczenia modelem GEM-AQ oraz przeprowadzone analizy na potrzeby wsparcia oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce były wykonywane na siatce globalnej o zmiennej rozdzielczości, w obróconym układzie współrzędnych, skupionej nad obszarem Europy Środkowej z rozdzielczością 0.1° (ok. 10.0 km) (**Rysunek 1**). Konfiguracja taka zapewnia właściwe odtworzenie napływu transgranicznego.

Na potrzeby niniejszej analizy wykorzystano globalne pola meteorologiczne w postaci analiz obiektywnych z roku 2019, stanowiące warunek początkowy domeny globalnej,

pobrane z Kanadyjskiego Centrum Meteorologicznego (Canadian Meteorological Centre - CMC). Warunki początkowe dla 1 stycznia 2019 pochodzą z Serwisu Obserwacji Atmosfery Copernicus.



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

1.3 Dane emisyjne

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2019 roku wykonano z wykorzystaniem aktualnej bazy emisji EMEP dla Europy, w tym Polski, tworzonej w oparciu o dane raportowane przez kraje członkowskie w ramach Konwencji LRTAP. Pozwala to na zachowanie spójności metodyki oszacowania wielkości 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)¹.

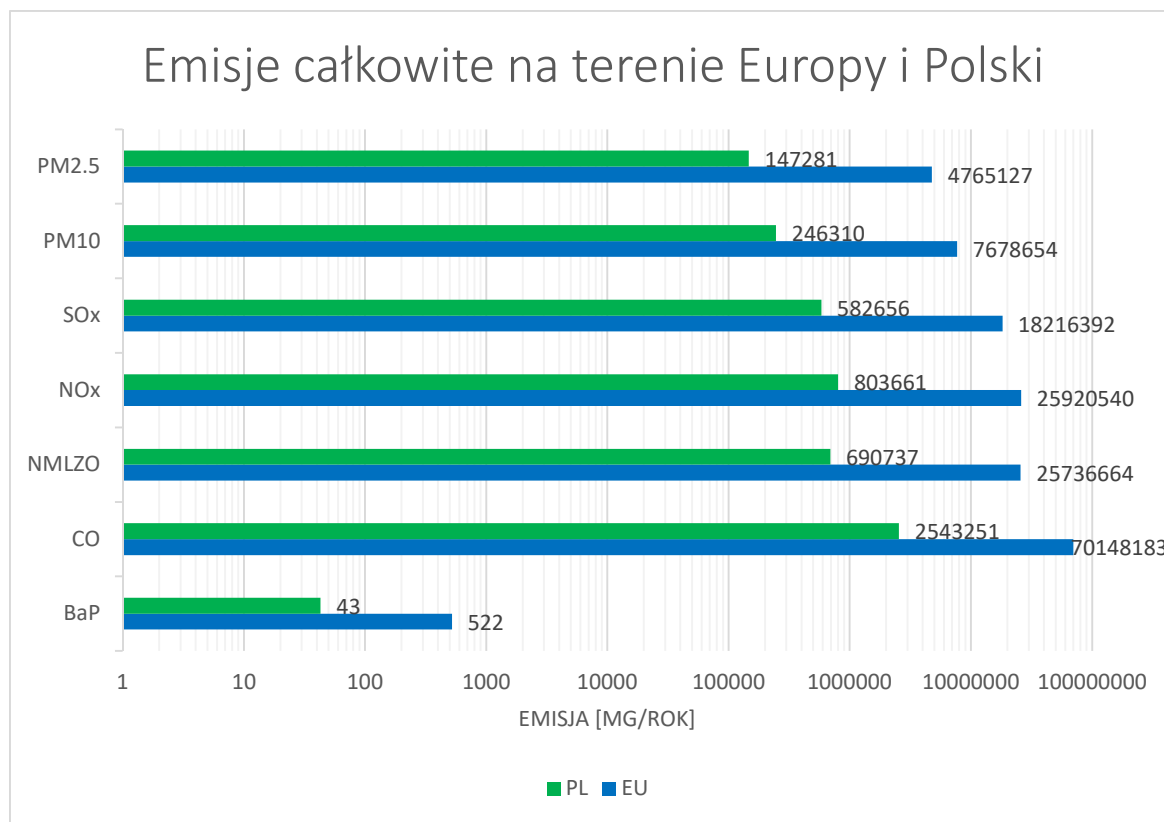
Poza obszarem Europy zastosowano emisje ECLIPSE przygotowane przez IIASA².

Wykres (**Rysunek 2**) przedstawia porównanie emisji całkowitych zanieczyszczeń powietrza na terenie Europy i Polski według wykorzystanych danych. W przypadku analizowanych zanieczyszczeń, z pominięciem B[a]P, udział procentowy emisji z terenu Polski w emisji z całej Europy wynosi około 3% (od 2,7% w przypadku NMLZO do 3,6% dla CO). Natomiast w przypadku B[a]P, udział emisji z terenu Polski stanowi aż 8,4% emisji w Europie, co przekłada

¹ https://www.ceip.at/new_emep-grid/01_grid_data

² <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/ECLIPSEv5.html>

się na znaczny udział emisji krajowych w kształtowaniu poziomów stężeń B[a]P na terenie naszego kraju.

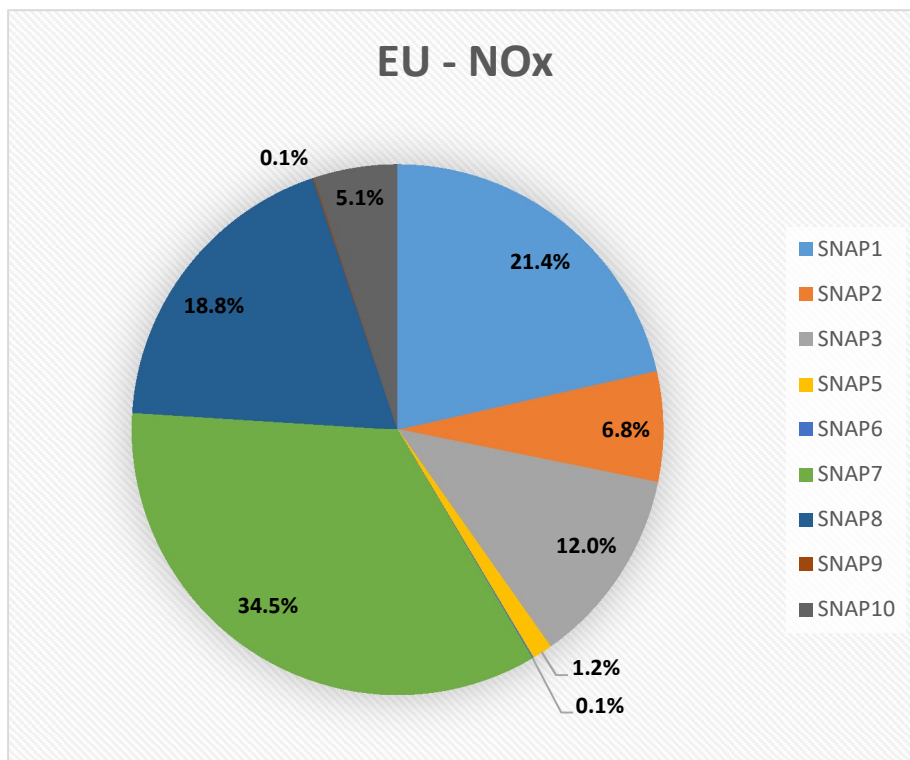


Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Europy i Polski. Źródło: EMEP 2017

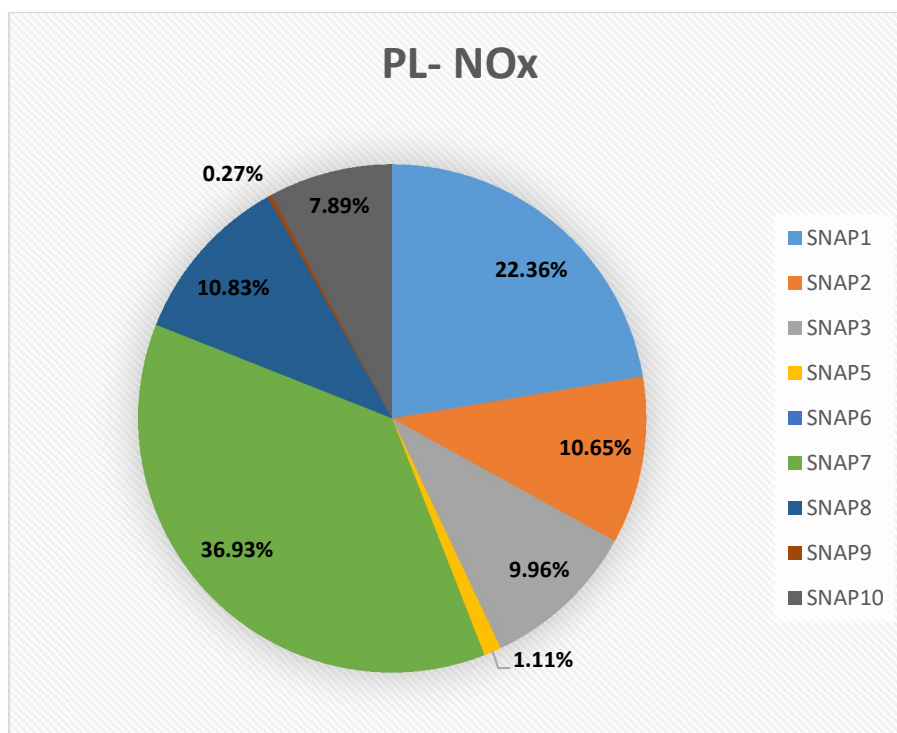
Dane emisyjne udostępniane są przez EMEP w podziale na kategorie źródeł emisji GNFR. Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń dane te zostały zreklasyfikowane na kategorie źródeł emisji SNAP. Poniżej przedstawiono porównanie udziału poszczególnych źródeł w emisji PM₁₀ i NO_x na terenie Polski i Europy.

W przypadku emisji NO_x (**Rysunek 3** i **Rysunek 4**) największa część emisji pochodzi z transportu drogowego (SNAP7) i jest to odpowiednio 34,5% dla Europy oraz 36,9% dla Polski. Ponadto źródłami o znaczącym udziale w 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 Polski emisje z sektora komunalno-bytowego (10,65%) mają prawie dwukrotnie większy udział niż średnio na terenie Europy (6,8%).

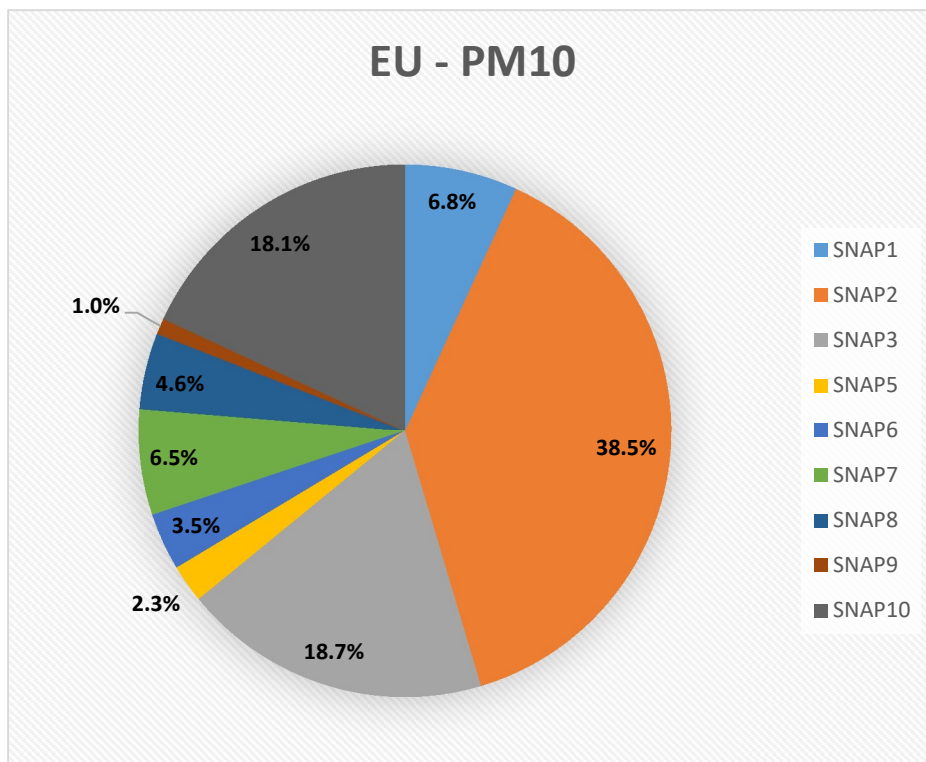
Struktura źródeł emisji PM₁₀ jest inna niż w przypadku NO_x. Zanieczyszczenie to zarówno w Europie jak i w Polsce pochodzi w dużej części z sektora komunalno-bytowego (SNAP2) i jest to odpowiednio 38,5% oraz 46,6%. Prawie 50% udziału kategorii SNAP2 w emisjach PM₁₀, stanowi duży problem na terenie Polski. Pozostałymi kategoriami o znaczącym udziale są: procesy spalania w przemyśle (SNAP3), rolnictwo (SNAP10) oraz procesy spalania w sektorze produkcji energii (SNAP1).



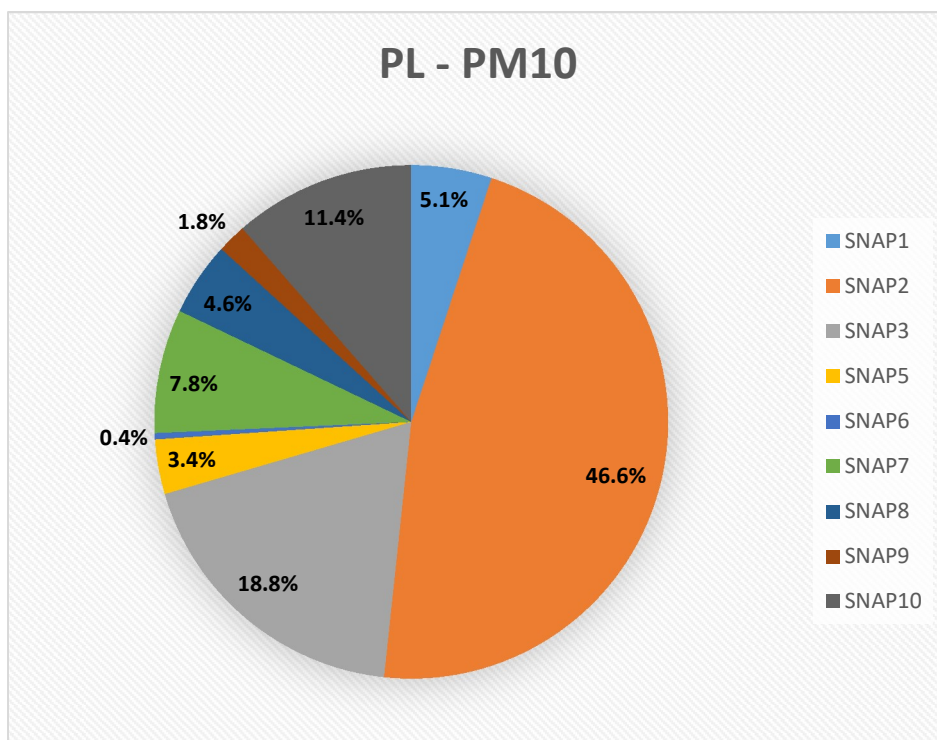
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Europy; EMEP 2017.



Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Polski; EMEP 2017.



Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM10 na terenie Europy; EMEP 2017.



Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM10 na terenie Polski; EMEP 2017.

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 w przypadku ozonu), z pominięciem sytuacji szczególnych. 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”.

Takie same kryteria zostały przyjęte do oceny jakości i wiarygodności wyników modelowania scenariusza bazowego, mającego na celu odtworzenie rozkładu zanieczyszczenia w Europie Środkowej. Ze względu na brak danych z krajów ościennych, analizę wykonano wyłącznie w oparciu o pomiary ze stacji monitoringowych PMŚ

Poziom zgodności wyników modelowania dla poszczególnych zanieczyszczeń podano w tabeli (**Tabela 2**).

Tabela 2. Procentowy udział stacji, dla których spełniono kryterium niepewności zgodnie z dyrektywą CAFE i Rozporządzeniem Ministra 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	91,4 %
2	Tlenki azotu (NO _x) – średnia roczna	92,9 %
3	Ozon (O ₃) – 8hmax	100 %
4	Pył zawieszony PM ₁₀ – średnia roczna	96,2 %
5	Pył zawieszony PM _{2.5} – średnia roczna	98,2 %
6	Dwutlenek siarki (SO ₂) – średnia roczna	89,0 %
7	Benzo(a)piren (B(a)P) – średnia roczna	95,0 %

Do szczegółowej ewaluacji wyników modelowania wykorzystano narzędzie DELTA_Tool w najnowszej dostępnej wersji (5.6.1, udostępniona w lipcu 2018 r.). Analizie poddano wyniki modelowania uzyskane dla symulacji bazowej, dla roku 2019. Obecnie w narzędziu DELTA_Tool pełną analizę modelowania, wraz z uzyskaniem Diagramu Celu uzyskać można dla pyłu PM₁₀, pyłu PM_{2.5}, ozonu i dwutlenku azotu. Diagramy celu zostały przedstawione dla wszystkich stacji w rozdzielczości 10 km.

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 dobrą lub bardzo 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 jakościowego. Wyjątek stanowi MQI dla rocznej sprawdzalności PM₁₀ oraz NO₂. Sposób obliczania rocznego wskaźnika MQI będzie jeszcze dyskutowany na forum FAIRMODE, gdyż sprawdzalność rocznych stężeń pyłu PM₁₀ oraz dwutlenku azotu z warunkiem zawartym w dyrektywie CAFE została spełniona. Pomimo dobrych wskaźników statystycznych dla ewaluacji modelowanych stężeń SO₂ kryterium dyrektywy CAFE nie zostało spełnione, zabrakło jednego punktu procentowego. Powodem takiej sytuacji jest dość duże przeszacowanie na niektórych stacjach. Należy sprawdzić emisję SO₂ w obszarach reprezentatywnych dla tych stanowisk.

Ewaluację poszerzono o wykresy słupkowe korelacji i raporty podsumowując wykonane w DELTA_Tool, które również potwierdziły 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 poziomy niepewności wyników modelowania dla poszczególnych stacji pomiarowych dostępne są w Załączniku 1 do niniejszego raportu.

3. Zakres analiz

Na podstawie 1-godzinnych wyników modelowania wykonanego na potrzeby oceny wpływu transgranicznego w Polsce w roku 2019 obliczono parametry statystyczne zgodnie z Załącznikiem nr 8 do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2018r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2018 poz. 1018).

Tabela 3 prezentuje pełne 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 3. Zestawienie parametrów

	Substancja	Parametr statystyczny
1	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
2	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego w okresie zimowym (01.10-31.03)
3	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniami wartości dobowej 125 µg/m ³ w roku kalendarzowym

	Substancja	Parametr statystyczny
4	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniami wartości jednogodzinnej 350 µg/m ³ w roku kalendarzowym;
5	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Wartość percentyla 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dla napływu transgranicznego
6	Dwutlenek siarki (SO ₂)	Wartość percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych dla napływu transgranicznego
7	Dwutlenek azotu (NO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
8	Dwutlenek azotu (NO ₂)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniami wartości jednogodzinnej 200 µg/m ³ w roku kalendarzowym
9	Dwutlenek azotu (NO ₂)	Wartość percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń godzinnych dla napływu transgranicznego
10	Tlenki azotu (NO _x)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
11	Pył zawieszony PM ₁₀	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
12	Pył zawieszony PM ₁₀	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniami wartości dobowej 50 µg/m ³ w roku kalendarzowym
13	Pył zawieszony PM ₁₀	Wartość percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych dla napływu transgranicznego
14	Pył zawieszony PM _{2,5}	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
17	Ozon (O ₃)	Wartość percentyl 93,2 w rocznej serii maksimów dobowych stężenia ośmiogodzinne kroczącego dla napływu transgranicznego
18	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
21	Benzo(a)piren (B(a)P)	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego.

Zgodnie z treścią Załącznika 8, 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.

4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń w skali kraju na podstawie wyników modelowania

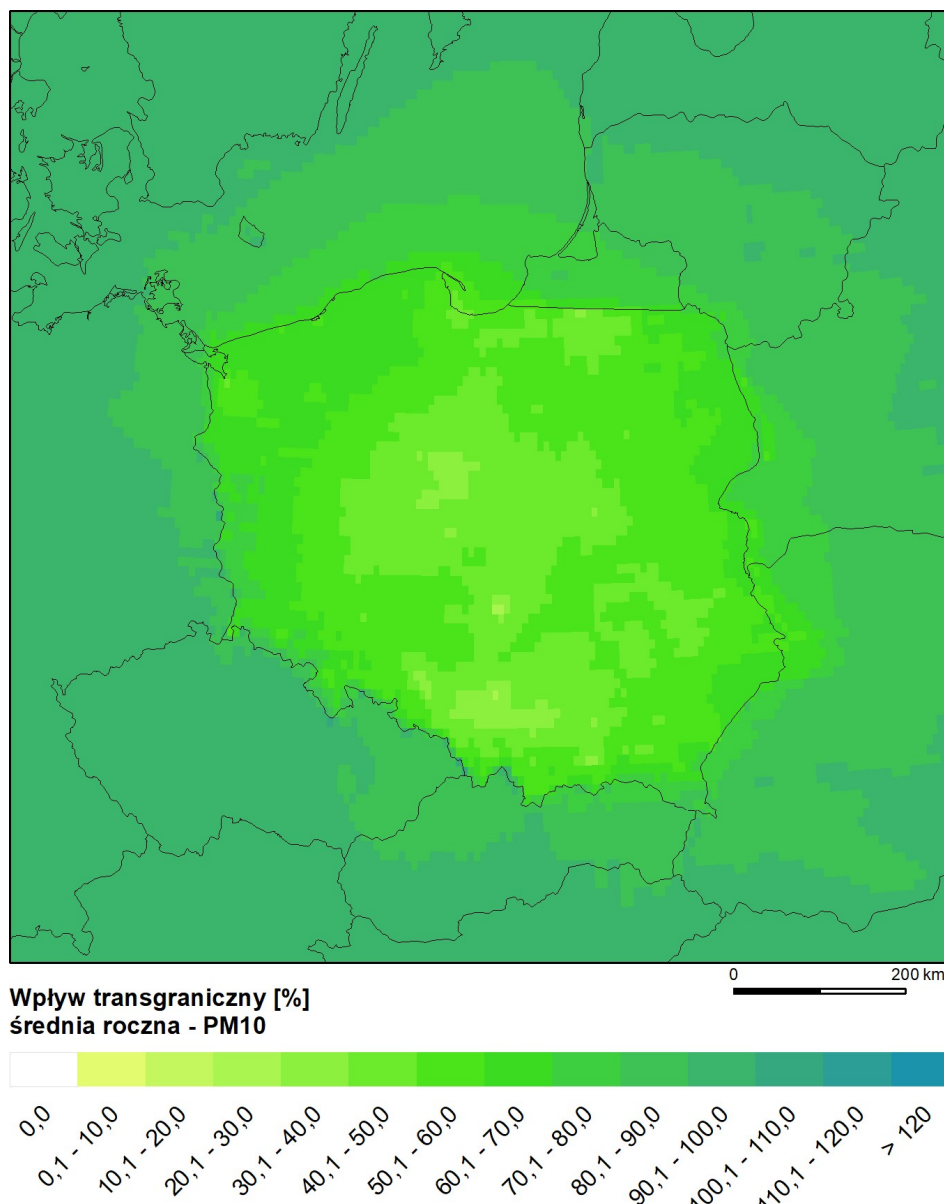
Wyniki modelowania zostały wykorzystane do analizy rozkładu przestrzennego procentowego udziału transportu transgranicznego w poziomie stężeń zanieczyszczeń i diagnostyk narażenia na podwyższone wartości zanieczyszczeń na obszarze Polski w roku 2019.

Ponadto, dla każdej strefy obliczono średni udział procentowy napływu transgranicznego dla poszczególnych zanieczyszczeń. Wyniki tych obliczeń zawarto w Załączniku 2.

4.1 Pył PM_{10}

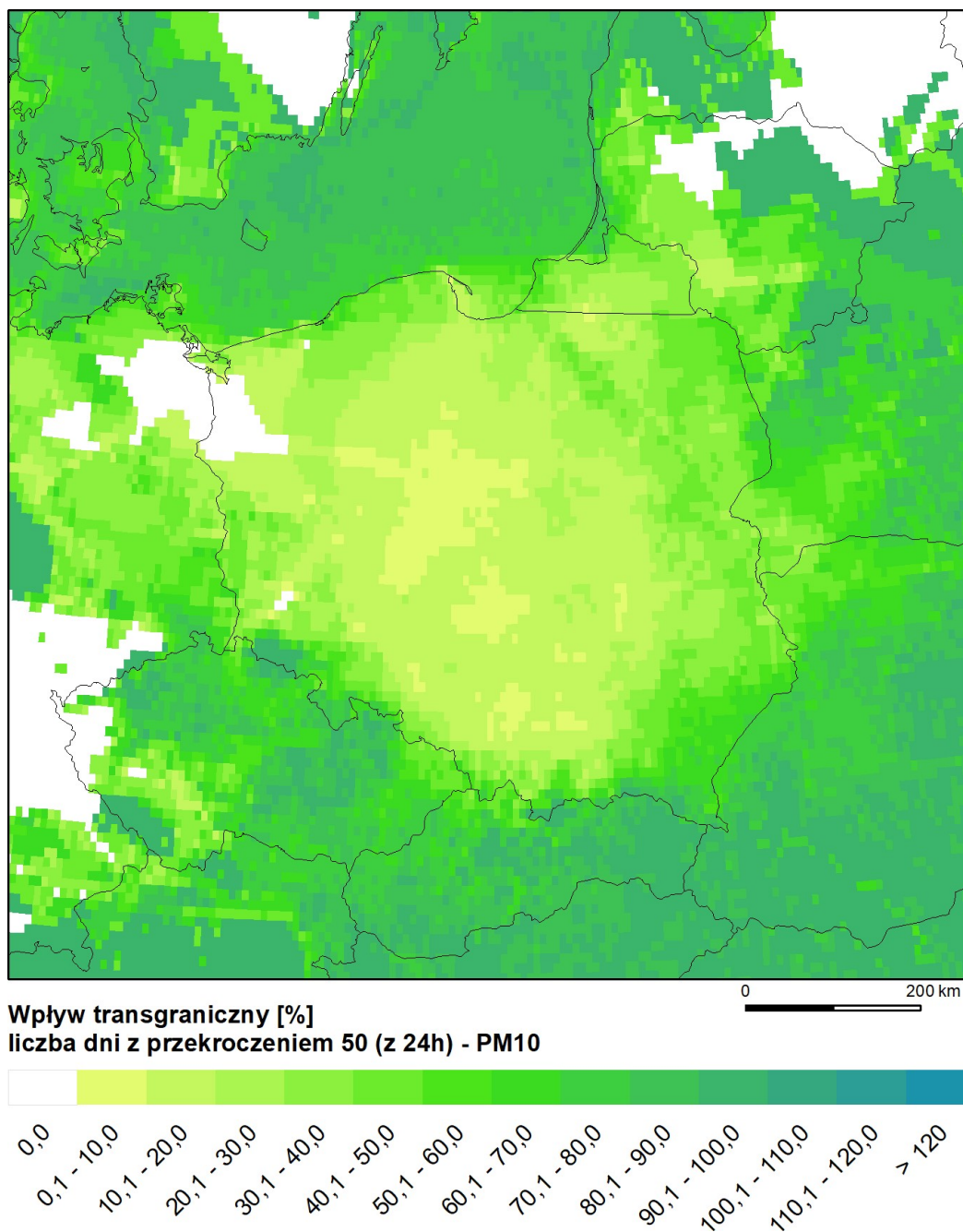
Rysunek 7 i **Rysunek 8** przedstawiają rozkłady przestrzenne udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM_{10} oraz w liczbie dni z przekroczeniem poziomu $50 \mu g/m^3$ dla średniodobowych stężeń pyłu PM_{10}

Udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM_{10} na obszarze Polski wahał się w zakresie od 10 do 60% (**Rysunek 7**). Najniższy wpływ zanieczyszczeń napływających występuje w centrum kraju, w okolicach Bełchatowa oraz na południu, około 20%, co świadczy o wysokim udziale źródeł krajowych. Im bliżej granic kraju, tym wpływ transgraniczny rośnie. Najwyższe wartości napływu transgranicznego występowały wzdłuż wschodniej i zachodniej granicy - do 60%, przy czym ze względu na przeważający kierunek wiatru, udział transgraniczny wzdłuż granicy zachodniej jest wyższy.



Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM₁₀ na obszarze Polski w 2019 roku.

Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni ze średniodobowym stężeniem pyłu PM₁₀ wyższym niż 50 µg/m³, był bardzo zróżnicowany na obszarze Polski (**Rysunek 8**). Wyższy udział zanieczyszczeń napływających, od 30 do 60% wystąpił na wschodzie oraz miejscowo na północy i południu Polski. Wiąże się to z faktem, iż w okresie zimowym najwyższe stężenia pojawiają się w warunkach rozbudowywania się układów wyżowych, związanych najczęściej z cyrkulacją ze wschodu. W centrum kraju, okolicach Bełchatowa oraz Okręgu Górnośląskiego wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był niższy, wahał się od 10 do 30%.

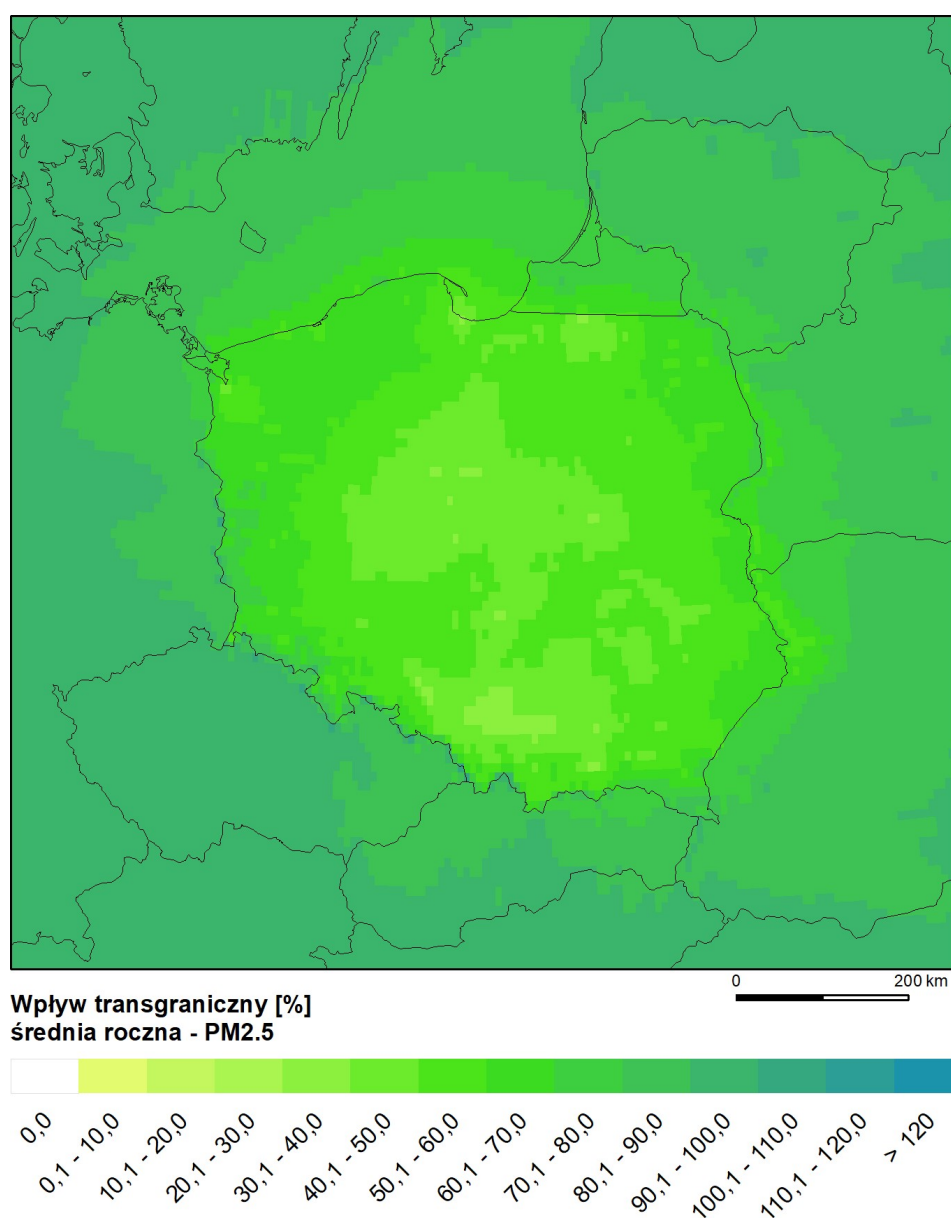


Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ze względu na średniodobowe stężenia pyłu PM_{10} na obszarze Polski w 2019 roku.

4.2 Pył $PM_{2.5}$

Rysunek 9 przedstawia rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu $PM_{2.5}$ na obszarze Polski w roku 2019.

W 2019 roku na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu $PM_{2.5}$ zawierał się w przedziale od 20 do 60 %. Wyższe udziały źródeł transgranicznych wystąpiły wzdłuż wschodniej, zachodniej i południowo-zachodniej granicy Polski, od 40 do 60%. W centrum oraz na obszarach Śląska udział źródeł napływających był niższy, wahał się od 20 do 40%, co spowodowane jest wysoką emisją krajową.

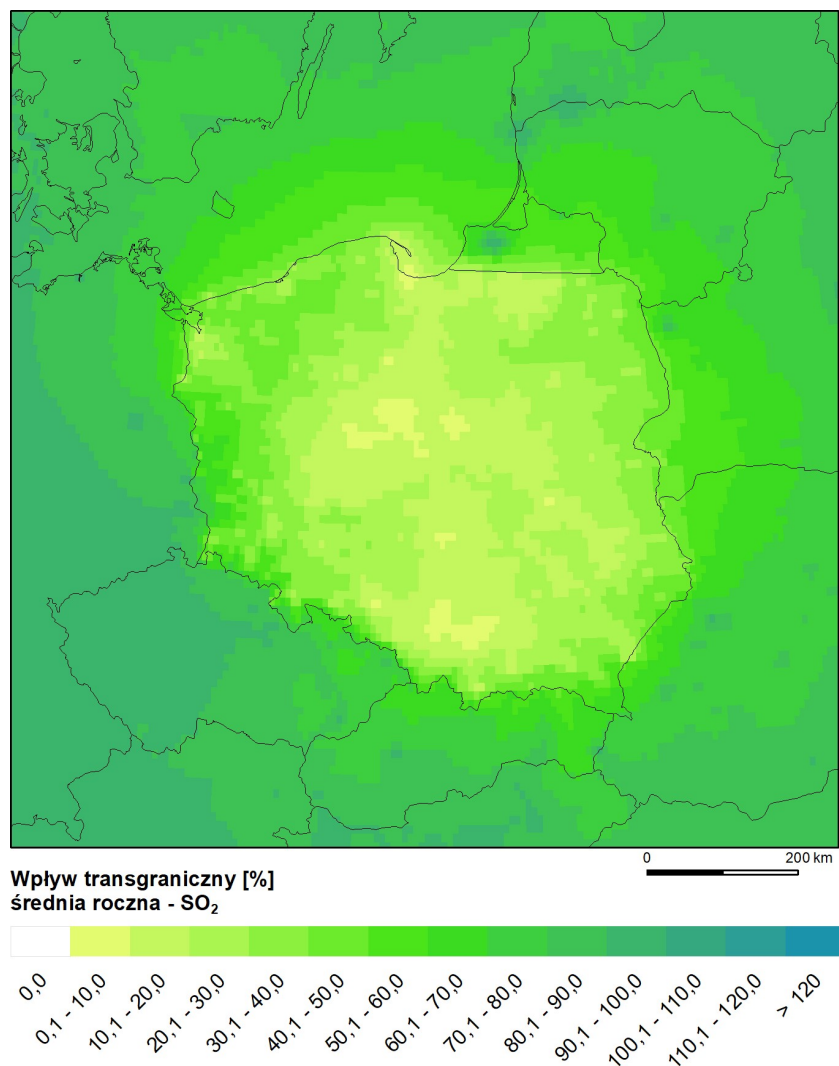


Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu $PM_{2.5}$ na obszarze Polski w 2019 roku.

4.3 Dwutlenek siarki SO₂

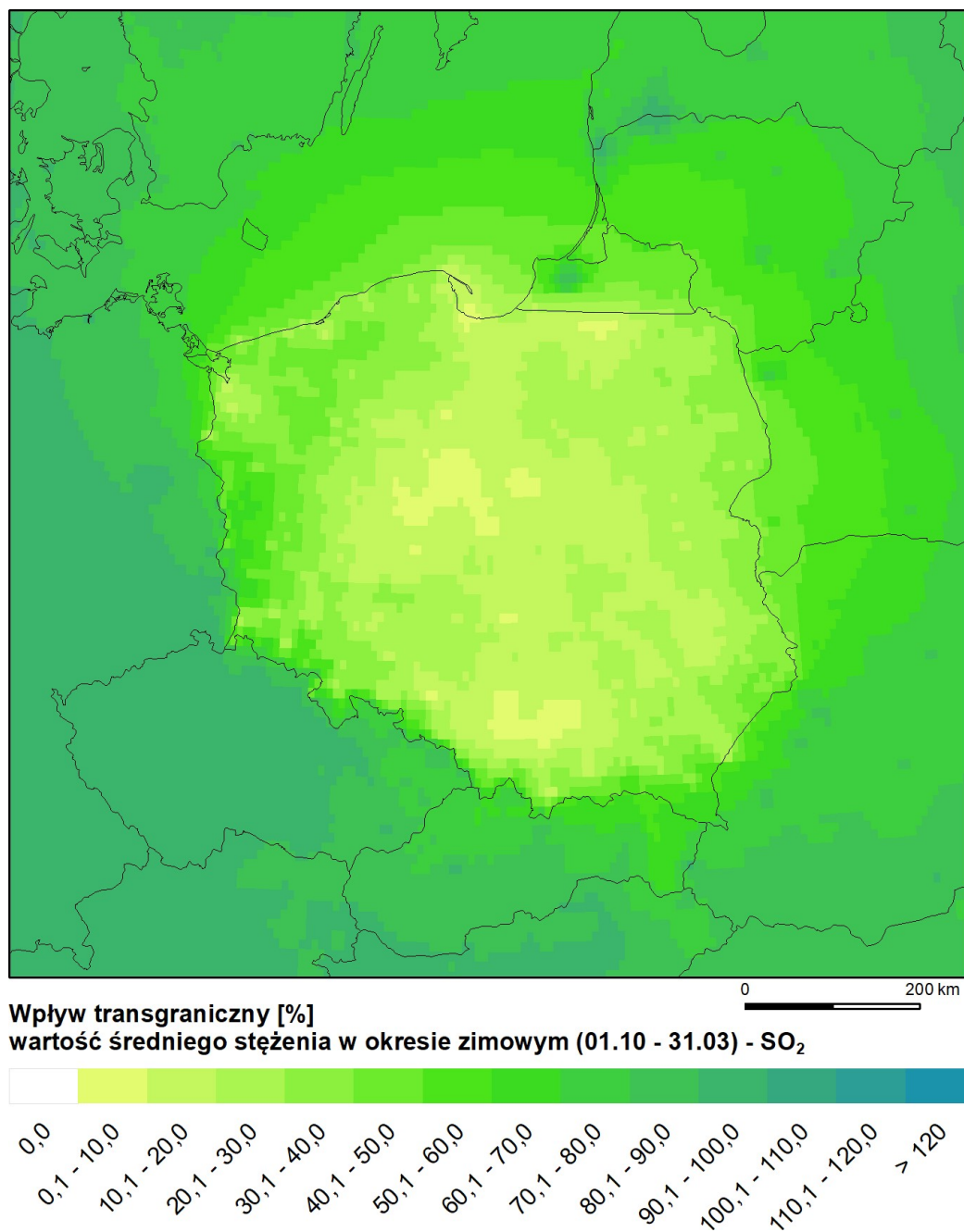
Rysunek 10, Rysunek 11, Rysunek 12 i Rysunek 13 przedstawiają odpowiednio rozkłady przestrzenne udziału procentowego źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu SO₂, średnich stężeniach SO₂ w okresie zimowym, w liczbie dni z przekroczeniem wartości średniodobowej 125 µg/m³ oraz w liczbie godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej powyżej 350 µg/m³ na obszarze Polski w 2019 roku.

W 2019 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku siarki na obszarze Polski był zróżnicowany (**Rysunek 10**). Najwyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju - od 50 do 70%. Im bliżej centrum Polski, tym wpływ źródeł transgranicznych był niższy. W centrum kraju, na części obszaru województwa małopolskiego i śląskiego oraz lokalnie w pobliżu dużych źródeł emisji udział źródeł transgranicznych wystąpił na poziomie 10-20%.



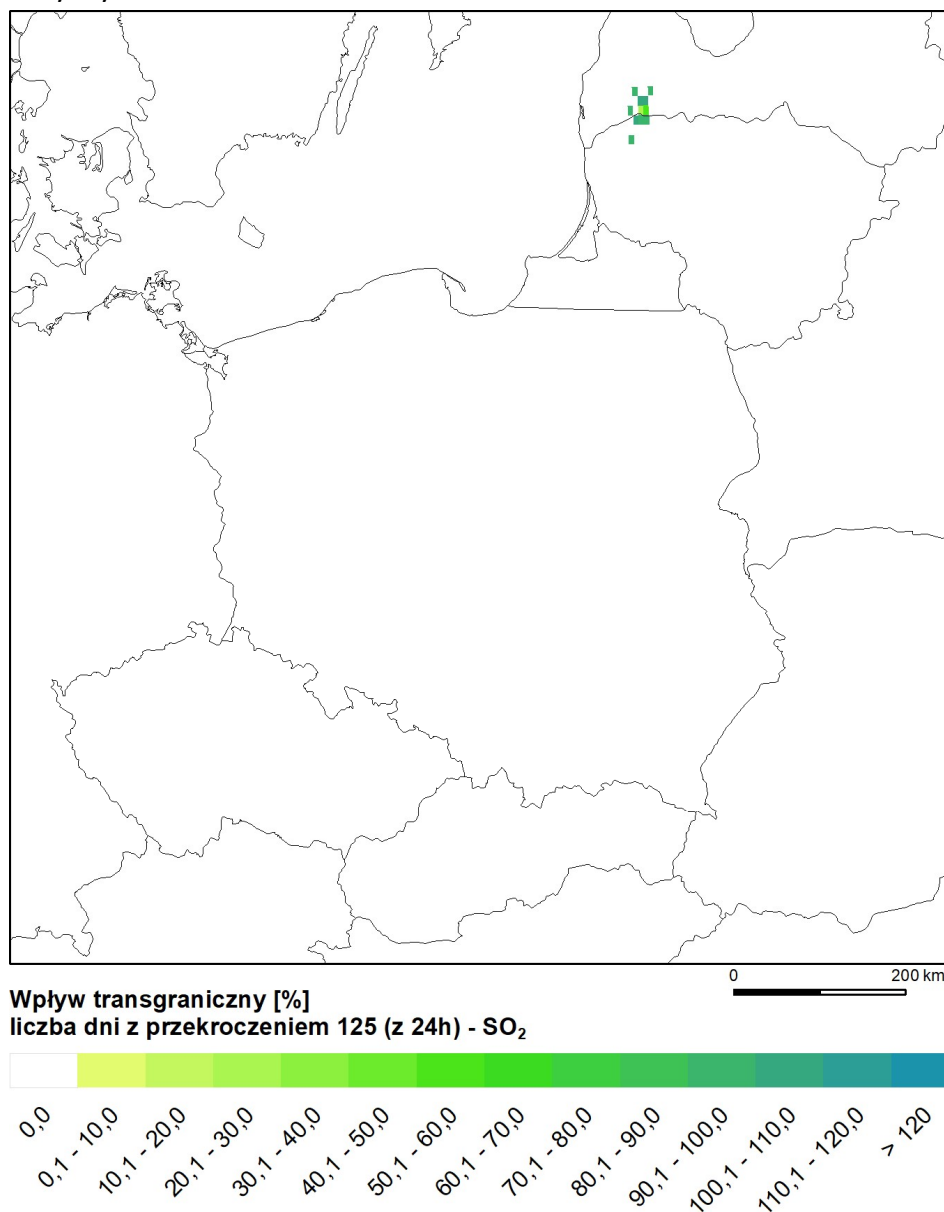
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2019 roku.

Udział źródeł transgranicznych w stężeniach dwutlenku siarki w okresie zimowym ma podobny rozkład przestrzenny jak w przypadku wartości średniorocznych, co wynika z faktu, że rozkład stężeń SO_2 w okresie zimowym w znacznym stopniu determinuje rozkład stężeń średniorocznych (**Rysunek 11**). Wzdłuż granic kraju udział źródeł transgranicznych wahał się od 50 do 70%. Niższy udział źródeł transgranicznych, do 20% wystąpił w centrum Polski oraz na części obszaru województwa śląskiego i małopolskiego, ze względu na dominację źródeł krajowych.



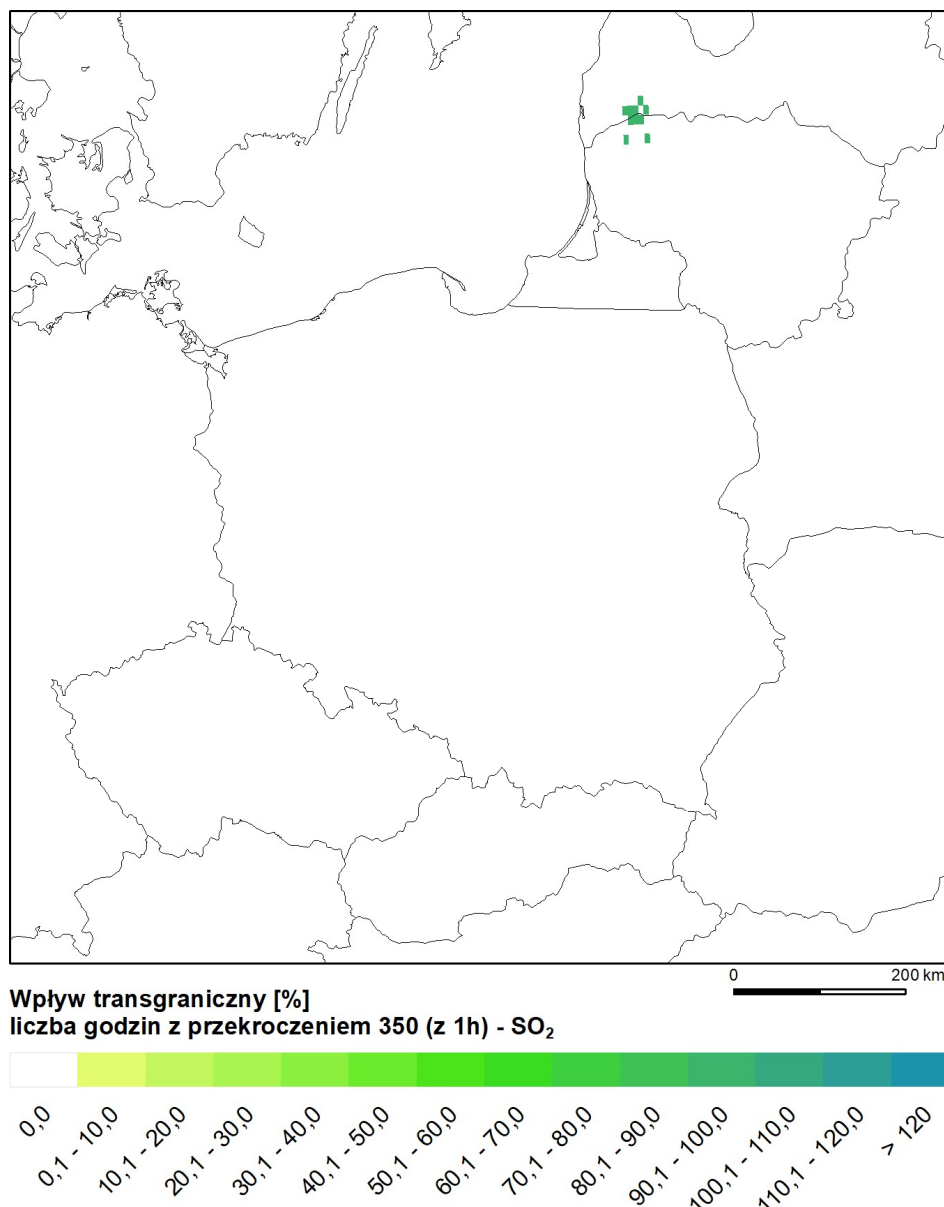
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2019.

Na obszarze Polski w 2019 roku w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych nie wystąpiły 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 2019 roku.

Na obszarze Polski w 2019 roku w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych nie wystąpiły godziny z przekroczeniem wartości jednogodzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 13**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.

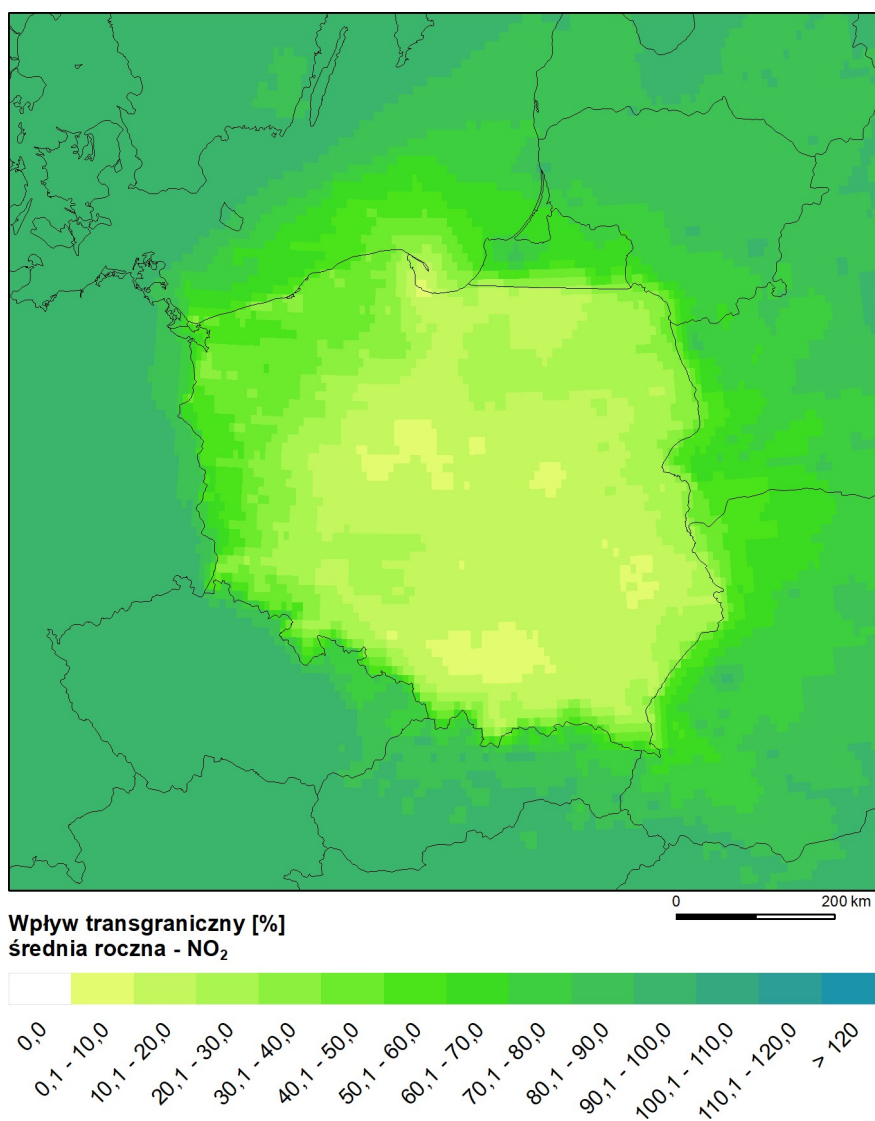


Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej dwutlenku siarki powyżej 350 µg/m³ na obszarze Polski w 2019 roku.

4.4 Dwutlenek azotu NO₂

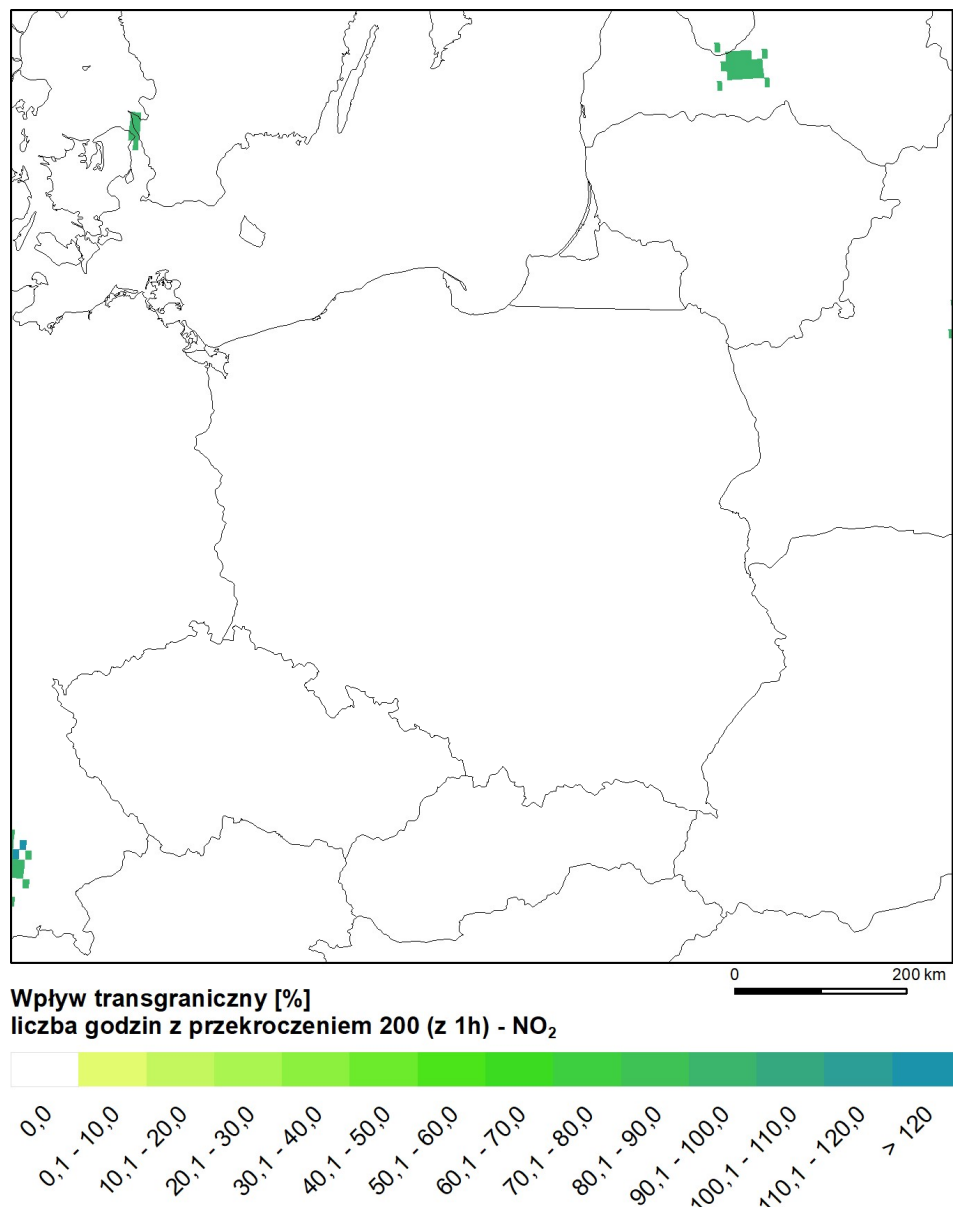
Rysunek 14 i **Rysunek 15** przedstawiają odpowiednio udział procentowy źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu oraz w liczbie godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej powyżej 200 µg/m³ na obszarze Polski w roku 2019.

Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu na obszarze Polski był dość zróżnicowany. Najwyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż zachodnich granic kraju - do 60%. Wpływ zanieczyszczeń napływających spada wraz ze wzrostem odległości od granic kraju. Najniższy udział zanieczyszczeń transgranicznych wystąpił w centrum kraju, okolicach Warszawy, Lublina i na obszarze województwa śląskiego i małopolskiego, gdzie napływ transgraniczny wynosił do 10% (**Rysunek 14**).



Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2019 roku.

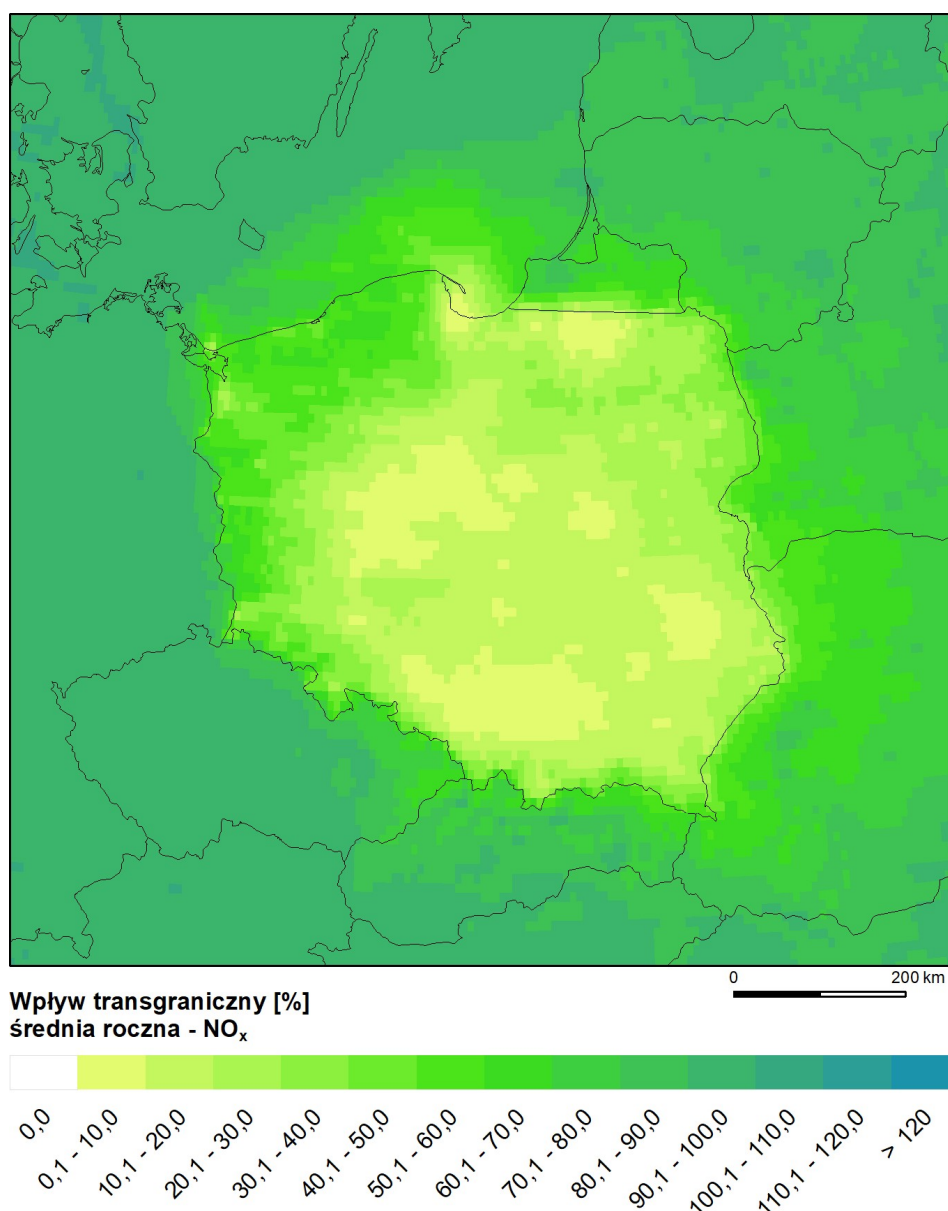
Na obszarze Polski w 2019 roku w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych nie wystąpiły przekroczenia poziomu $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla wartości 1 - godzinnej stężeń dwutlenku azotu (**Rysunek 15**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.



Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej wartości stężeń NO₂ powyżej $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2019 roku.

4.5 Tlenki azotu NO_x

Rysunek 16 przedstawia rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu NO_x na obszarze Polski w 2019 roku. Najniższy wpływ źródeł transgranicznych, do 20% wystąpił w centrum i na południu Polski oraz w okolicach Lublina i Trójmiasta. Natomiast im bliżej granic kraju, tym wpływ zanieczyszczeń napływających był wyższy, szczególnie na zachodzie i północnym zachodzie Polski, nawet do 60%.



Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2019 roku.

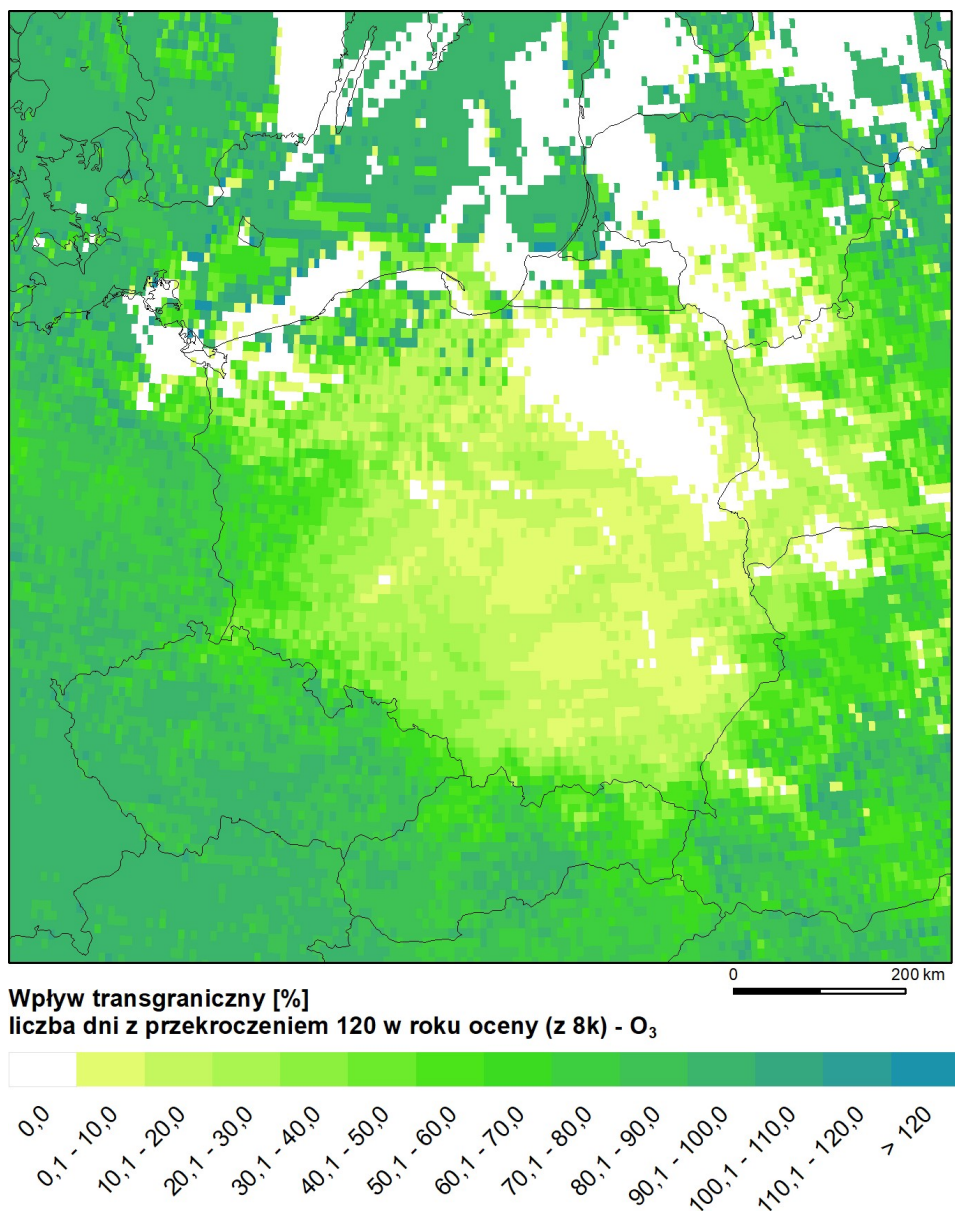
4.6 Ozon O₃

Rysunek 17 i Rysunek 18 przedstawiają odpowiednio rozkłady przestrzenne udziału procentowego źródeł transgranicznych w liczbie dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m³ oraz udział źródeł transgranicznych w wartości wskaźnika AOT40³ na obszarze Polski w roku 2019.

W 2019 roku rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w kształtowaniu liczby dni, z najwyższą 8-godzinną średnią krocząca stężeń ozonu większą od 120 µg/m³ był 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 głównie w północnej oraz w północno-wschodniej części Polski. W centrum kraju udział transgraniczny wahał się od 20 do 40%. Najwyższy wpływ źródeł transgranicznych wystąpił miejscowo na obszarach portów morskich, na południu kraju oraz wzdłuż zachodniej i południowej granicy. Udział źródeł transgranicznych powyżej 100% wystąpił miejscowo na krańcach południowych Polski oraz obszarach nadmorskich. Fakt wzrostu poziomu stężeń ozonu, na skutek oddziaływania wyłącznie emisji spoza granic kraju, w obszarach, w których jest wysoka emisja ze źródeł krajowych wynika z faktu ograniczenia reakcji NO + O₃. Wzrost stężeń O₃ wynika zatem z faktu braku dodatkowych emisji tlenków azotu z obszaru Polski, nie zaś ściśle z oddziaływania emisji transgranicznych.

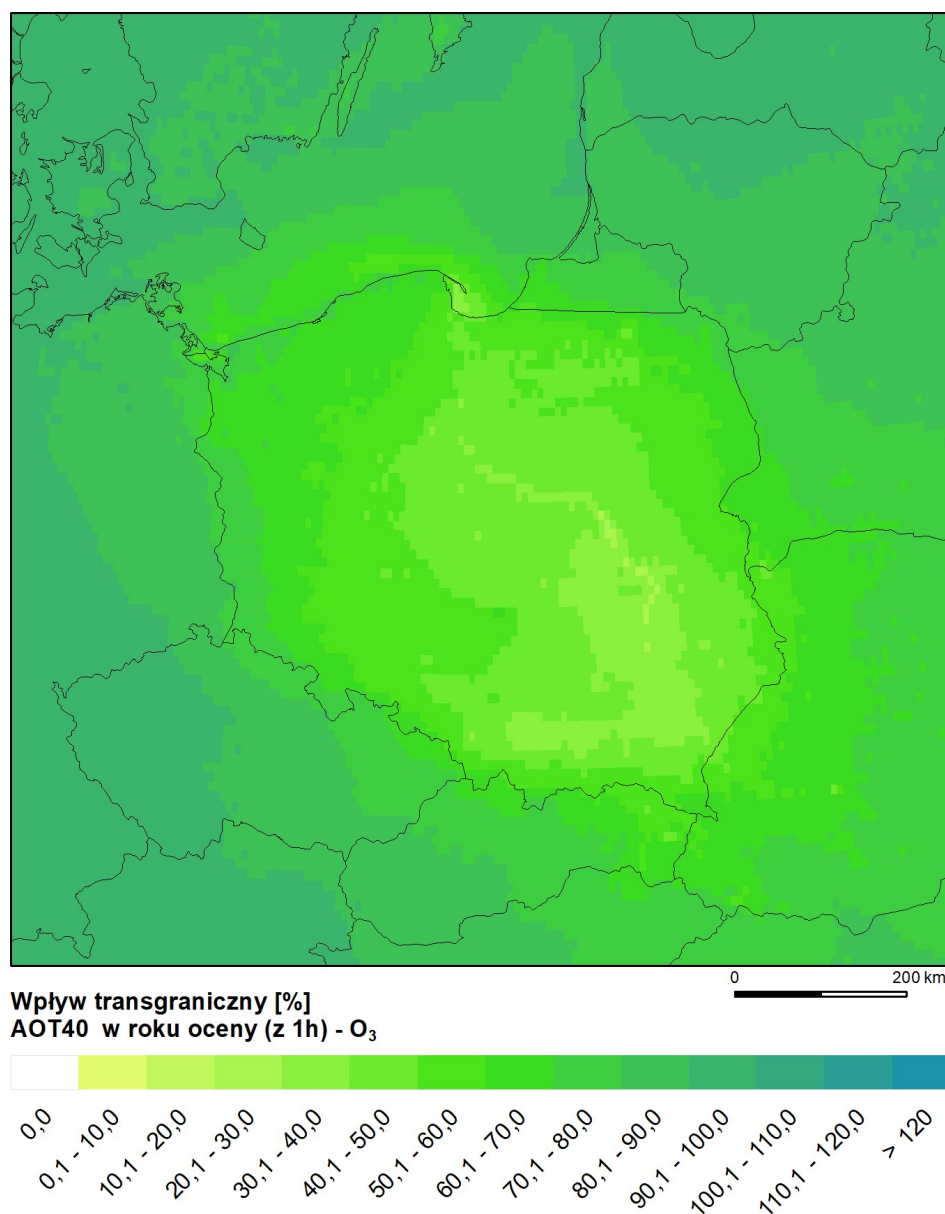
³ Wskaźnik ten, obliczany na podstawie stężeń 1-godzinnych, definiowany jest jako zakumulowana ekspozycja na stężenia większe niż 40 ppbv (ok. 80 µg/m³) w okresie od 1 maja do 31 lipca, w godzinach od 8:00 do 20:00 czasu lokalnego:

$$AOT40 = \int_{t=8,0\text{ godz} / 1-\text{maja}}^{20\text{ godz} / 31-\text{lipca}} \max[(O_3^{1h}(t) - 80\mu\text{g} / \text{m}^3), 0.0] \cdot \text{godzina}$$



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 2019 roku.

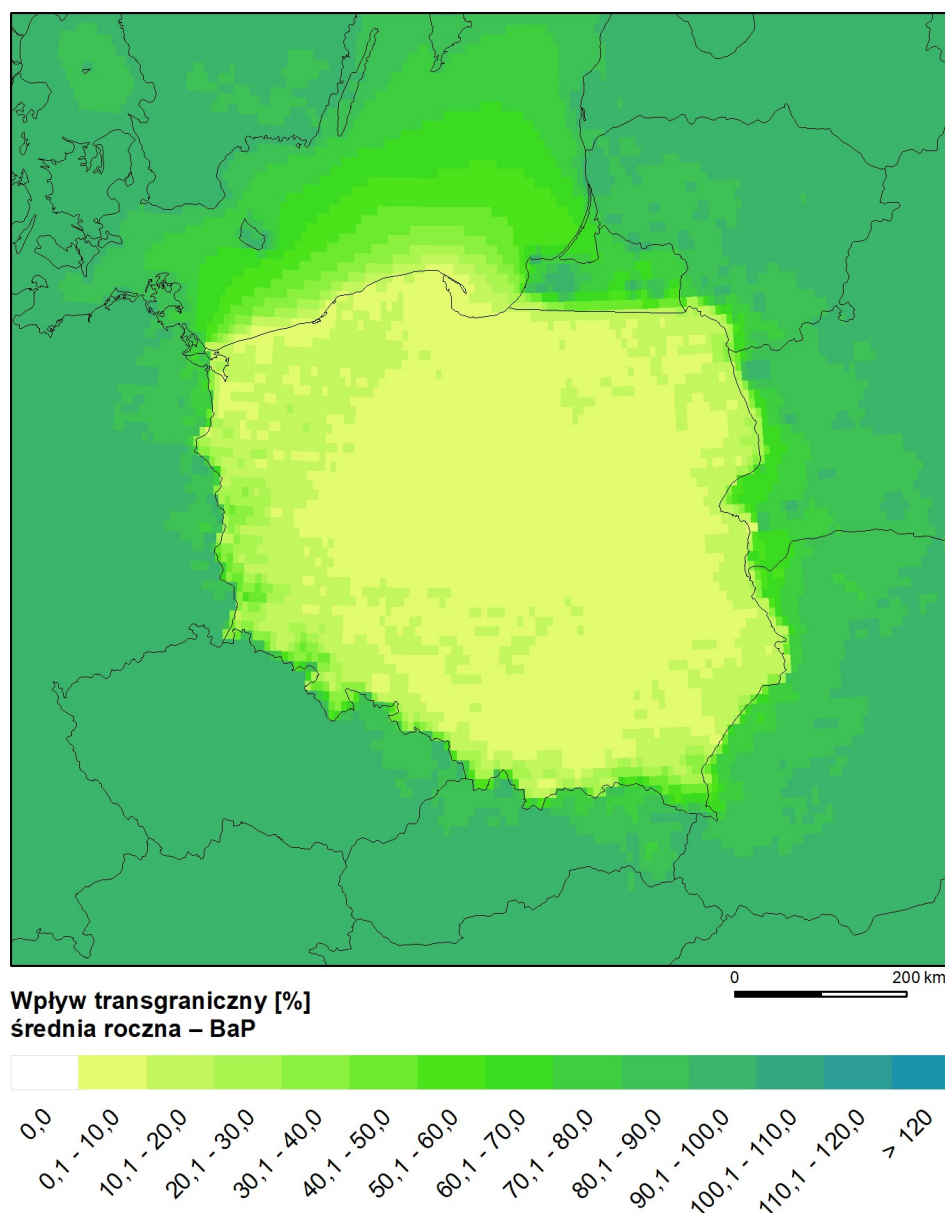
Udział procentowy źródeł transgranicznych w kształtowaniu się wartości wskaźnika AOT40 na obszarze Polski wykazuje nieznaczne zróżnicowanie przestrzenne (**Rysunek 18**). Najwyższy udział zanieczyszczeń napływających spoza kraju wystąpił na północy Polski oraz wzdłuż zachodniej granicy - do 60%. W centrum kraju udział zanieczyszczeń napływających wynosił około 30-50%. Najniższe wartości udziału zanieczyszczeń transgranicznych wystąpiły wzdłuż doliny Wisły i na południowym-wschodzie kraju- 10-20%.



Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2019 roku.

4.7 Benzo(a)piren

Rysunek 19 przedstawia rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2019 roku. Na przeważającym obszarze Polski udział zanieczyszczeń napływających był niższy niż 10%, co świadczy o dużym udziale emisji krajowej. Wyższy udział, do 50% wystąpił wzdłuż południowej i zachodniej granicy kraju.



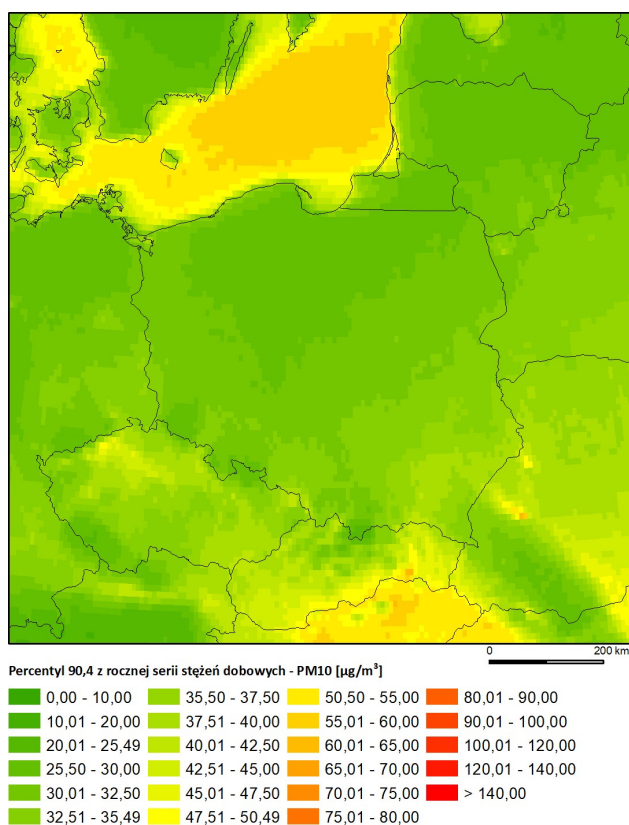
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2019 roku.

5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego

Zgodnie z Załącznikiem 8 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2018r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2018 poz. 1018) 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

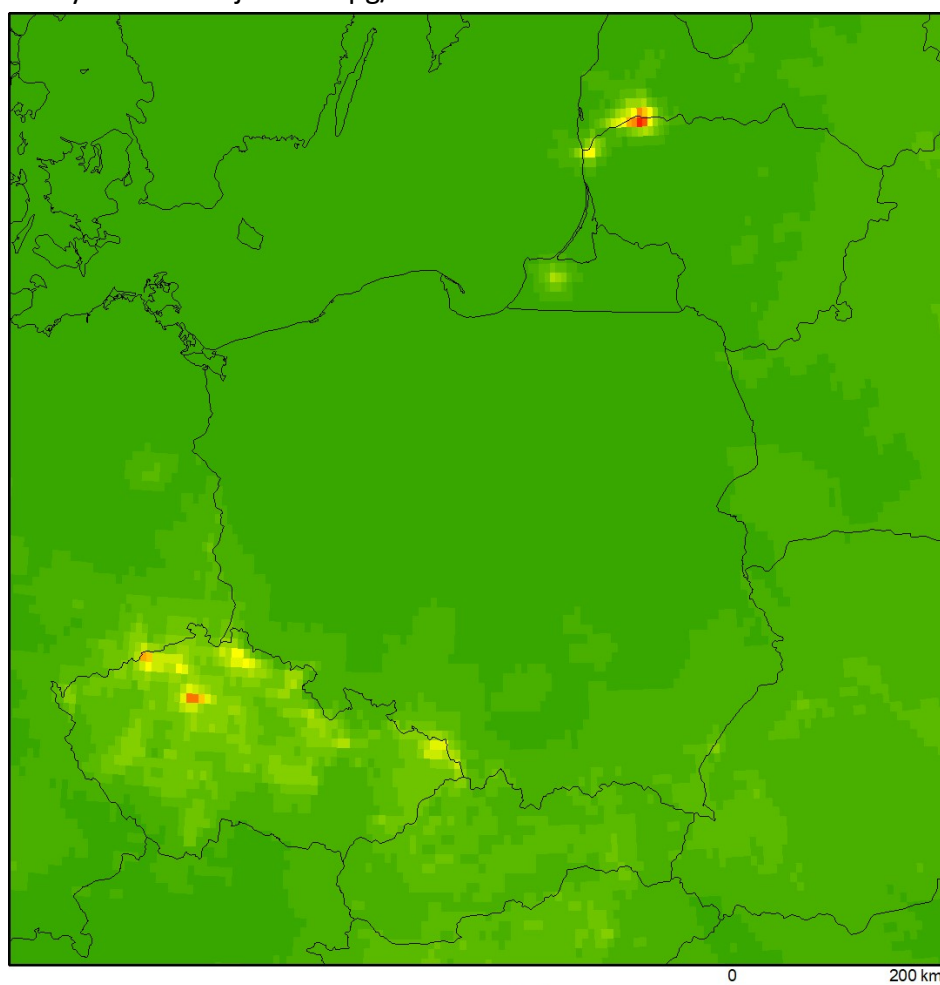
Na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w stężeniu pyłu PM₁₀ wyrażonego jako percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych z obszaru Polski, znajdowało się głównie w przedziale od 0 do 30 µg/m³ (**Rysunek 20**). Najniższe wartości percentyla wystąpiły w północnej części kraju oraz obszarach górskich - 0-10µg/m³. Wyższy udział zanieczyszczeń napływających- około 40 µg/m³ wystąpił w południowo-wschodniej części Polski. Wysokie wartości nad obszarem Morza Bałtyckiego wynikają z emisji naturalnej aerozolu morskowego. Wyższe wartości części południowej domeny (poza obszarem Polski) związane są z napływem pyłu mineralnego znad Północnej Afryki. Na terenie Polski na skutek wpływu zanieczyszczeń transgranicznych nigdzie nie nastąpiło przekroczenie poziomu 50 µg/m³.



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 2019 roku.

5.2 Dwutlenek siarki SO₂

Wartości 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 wystąpiły na poziomie od 0 do 10 µg/m³ (**Rysunek 21**). Wyższe wartości percentyla wystąpiły jedynie w południowej części Polski w rejonie Bramy Morawskiej - do 25 µg/m³.

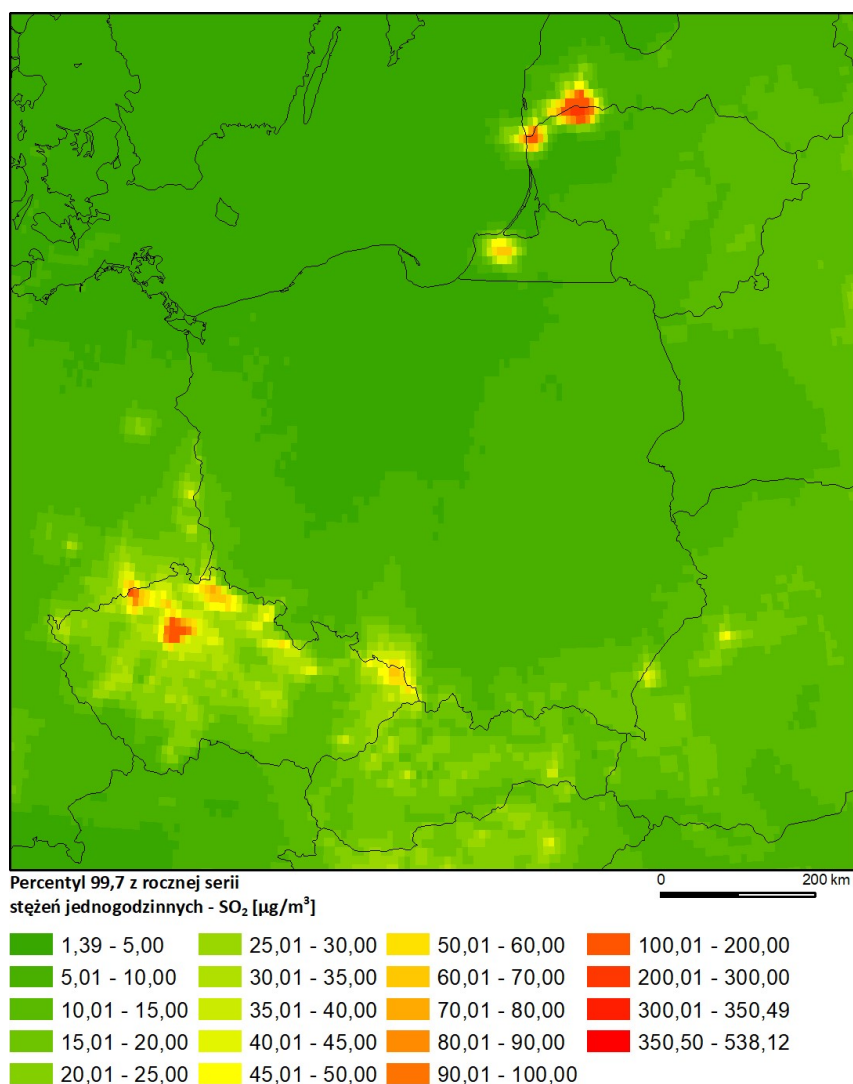


Percentyl 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych - SO₂ [µg/m³]

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 2019 roku.

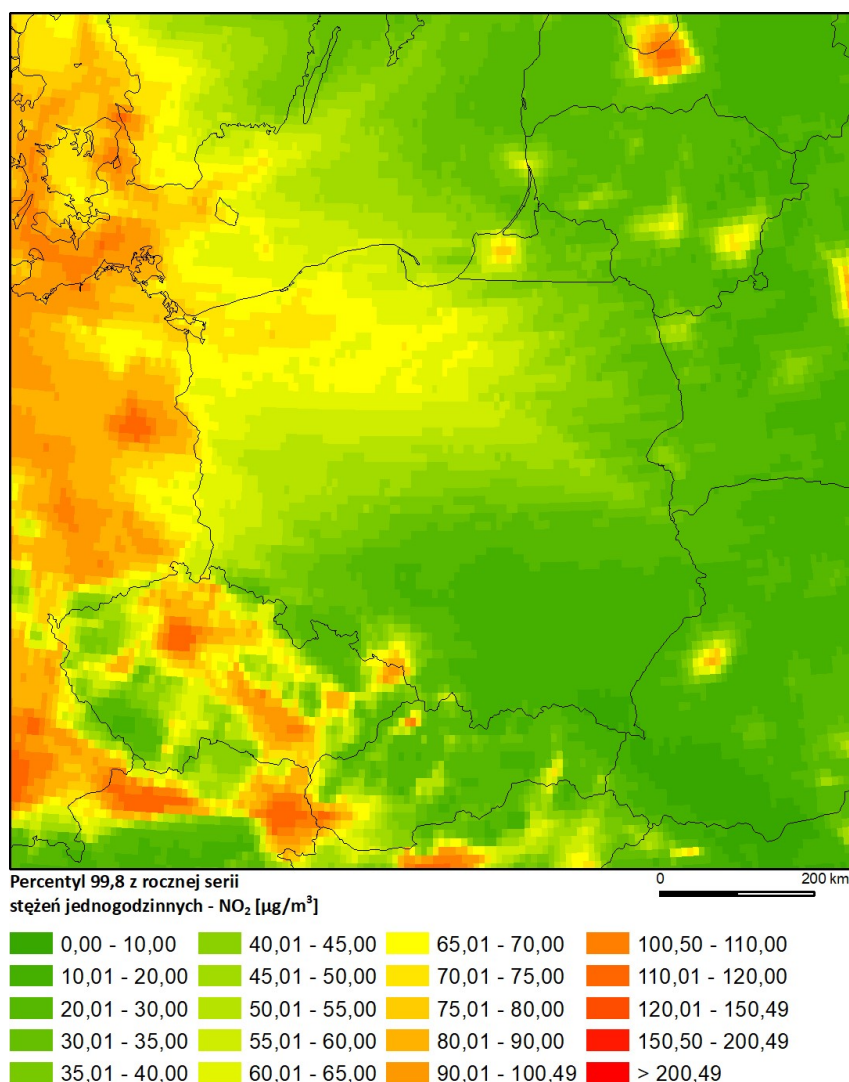
W 2019 roku na przeważającym obszarze Polski wartości udziału źródeł transgranicznych stężeń SO_2 wyrażonych jako percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, wahały się od 1 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 22**). Wyższe stężenia wystąpiły na południu kraju, do $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Natomiast w okolicach Bramy Morawskiej i Przemyśla wartości stężeń wynosiły do $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Jednocześnie wyraźnie zaznaczają się główne obszary emisyjne poza Polską.



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 2019 roku.

5.3 Dwutlenek azotu NO₂

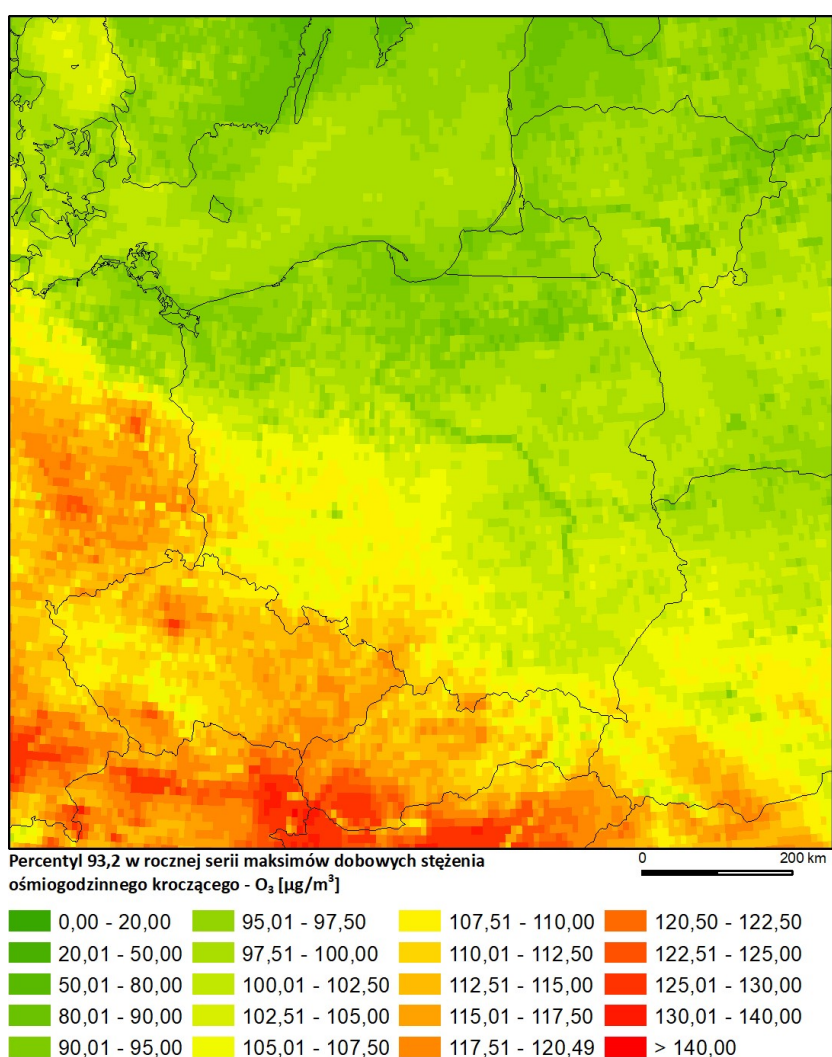
Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych stężeń NO₂ wyrażonych jako percentyl 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, był zróżnicowany na obszarze kraju (**Rysunek 23**). Najniższe wartości związane z wpływem źródeł transgranicznych, do 30 µg/m³ wystąpiły na wschodzie i południowym wschodzie Polski. Wartości wpływu transgranicznego rosną w kierunku północno-zachodnim. Najwyższe wartości, do 75 µg/m³ wystąpiły na obszarach północno-zachodnich, Bramy Morawskiej oraz wzdłuż zachodniej granicy. 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.



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 2019 roku.

5.4 Ozon O₃

W 2019 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w stężeniu ozonu wyrażonym jako percentyl 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, na obszarze Polski był bardzo zróżnicowany (**Rysunek 24**). Na północy Polski oraz wzdłuż doliny Wisły wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był najniższy, a wartość percentyla wynosiła do około 80 µg/m³. W centrum oraz na wschodzie Polski wartości percentyla wahały się od 90 do 105 µg/m³. Najwyższe wartości percentyla związane z wpływem zanieczyszczenia transgranicznego wystąpiły na południu kraju oraz wzdłuż zachodniej granicy. Wpływ transgraniczny zaznacza się najsilniej w południowo zachodniej części kraju. Poziom 120 µg/m³ nie został przekroczony na całym obszarze Polski.



Rysunek 24. Rozkład przestrzenny percentyla 93.2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu O₃ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2019 roku.

6. Podsumowanie

W przypadku udziału transportu transgranicznego wielkość procentowa udziału wpływ emisji spoza Polski waha 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 cisz atmosferycznych mogą się różnić.

Przedstawiona analiza dotyczy udziału transportu transgranicznego w roku 2019. Zauważalne jest zróżnicowanie geograficzne wpływu transgranicznego.

6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym

Dla wartości średniorocznych pyłu PM_{10} udział zanieczyszczeń pochodzących spoza Polski jest dość wysoki i uśredniony dla stref waha się w granicach od 36 do 70% (średnio 51%). Jednocześnie udział źródeł transgranicznych w występowanie dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu g/m^3$ jest znacznie niższy i uśredniony dla stref waha się w granicach od 0 do 71% (średnio 22%). Jest to istotna informacja z punktu widzenia podejścia do problemu redukcji PM_{10} na terenie Polski. Konkluzja wynikająca z przedstawionej analizy jest następująca:

- za kształtowanie się stężeń o wartościach średniodobowych przekraczających $50 \mu g/m^3$ w przeważającym stopniu odpowiedzialne są źródła krajowe, podczas gdy w odniesieniu do wartości średniorocznej udział transgraniczny jest zdecydowanie wyższy
- działania podejmowane w kierunku obniżenia narażenia średnioroczного mogą nie być tożsame z koniecznymi do pojęcia działaniami w celu zredukowania przekroczenia wartości dopuszczalnej dobowej.

Dla wartości stężeń średniorocznych $PM_{2.5}$ wielkość udziału transgranicznego jest bardzo zbliżona jak dla PM_{10} . Najwyższy udział procentowy wpływu źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż zachodniej i wschodniej granicy kraju, gdzie zawierał się w przedziale 60 - 70%. Natomiast najwyższy udział źródeł własnych wystąpił w centrum Polski oraz na terenie województwa śląskiego, opolskiego i małopolskiego. Świadczy to o tym, że to właśnie pył drobny jest w skali rocznej efektywnie transportowany na dalekie odległości. Działania podejmowane dla poprawy wartości stężeń średniorocznych $PM_{2.5}$ powinny uwzględniać

ocenę udziału pyłu naturalnego w całkowitym stężeniu oraz udział ze źródeł antropogenicznych z zagranicy.

Jednocześnie uwzględnienie źródeł spoza granic kraju w żadnym punkcie nie powoduje powstania przekroczeń wartości dopuszczalnych.

6.2 Dwutlenek siarki

Ze względu na stężenia średnioroczne i w okresie zimowym dla SO_2 , udział procentowy wpływu transgranicznego kształtuje się na zbliżonym poziomie – uśredniony dla stref od ok. 2 do 50% (średnio 22%). Świadczy to o przeważającym udziale źródeł krajowych i dużej roli struktury emisji na terenie kraju (np. udział transgraniczny dla miasta Płock na poziomie 2-3%, zaś dla aglomeracji krakowskiej ok 7%). Udział procentowy wpływu źródeł transgranicznych w odniesieniu do średniej rocznej oraz średniej w okresie zimowym dwutlenku siarki ma również zbliżony rozkład przestrzenny. Najwyższe wpływy źródeł napływających występowały wzdłuż granic kraju. W centrum Polski oraz na obszarach uprzemysłowionych udział źródeł napływających jest niski - 10-20%.

6.3 Tlenki azotu

W przypadku średniej rocznej NO_2 i NO_x udział transgraniczny uśredniony dla stref wynosi odpowiednio od 5 do 50% (średnio 20%) dla NO_2 i od 2 do 54% (średnio 19%) dla NO_x . Wyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju. Im dalej od granic terytorialnych, tym wpływ zanieczyszczeń napływających jest niższy. Najniższe udziały transportu transgranicznego dla tych zanieczyszczeń występują na obszarach aglomeracji i stref będących miastami powyżej 100 tys. mieszkańców. W przypadku NO_2 i NO_x znaczącym źródłem emisji jest sektor transportu (SNAP 7 i 8 łącznie stanowią ponad 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. Udział napływu transgranicznego dla stref waha się od 2 do 37% (średnio ok. 10%). Aż dla 12 stref będących aglomeracjami i miastami powyżej 100 tys. mieszkańców modelowanie wykazuje udział transgraniczny poniżej 5%, zaś dla 33 stref udział wynosi poniżej 10%. Zaskakujący może być fakt, że w silnie zurbanizowanych i uprzemysłowionych strefach położonych wzdłuż południowej granicy kraju udział transgraniczny jest wyższy (np. strefa śląska – 14%, aglomeracja rybnicko-jastrzębska 11,5%, strefa podkarpacka 19%, miasto Wałbrzych 37,5%). Świadczy to o znaczącej transgranicznej wymianie zanieczyszczonych mas powietrza w rejonach przygranicznych.

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 prekursorów (w tym przypadku najważniejszymi prekursorami są tlenki azotu i niemetanowe lotne związki organiczne pochodzenia zarówno antropogenicznego jak i naturalnego). Udział zanieczyszczenia transgranicznego w kształtowaniu się podwyższonych stężeń ozonu uśredniony dla wszystkich stref wynosi ok. 23% ze względu na liczbę dni z przekroczeniami progu $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla najwyższej 8-godzinnej średniej kroczącej w ciągu doby i ok 50% ze względu na wartości indeksu AOT40.

Ze względu na ochronę zdrowia najwyższy udział zanieczyszczeń napływających wystąpił wzdłuż zachodniej i południowej granicy kraju. Miejscowo na południu i zachodzie kraju wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był wyższy niż 100%, co należy interpretować jako efekt zredukowania intensywności destrukcji ozonu w reakcjach z NO, na skutek zmniejszenia strumienia emisji bez uwzględnienia źródeł krajowych. Wpływ udziału zanieczyszczeń napływających na stężenie ozonu, wyrażone indeksem AOT40, uwzględniającym ochronę roślin, ma najwyższe znaczenie wzdłuż zachodniej i wschodniej granicy kraju oraz na północy Polski. W centrum i na południu udział zanieczyszczeń transgranicznych jest niższy.

6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych

Analizie poddano również 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 PM_{10} na przeważającym obszarze kraju nie przekroczył $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- W przypadku percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych dwutlenku siarki wartości zawierały się w przedziale od 5 do $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
- Percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych wahał się od 10 do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Wartości percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dwutlenku azotu na przeważającym obszarze Polski wystąpiły w przedziale od 10 do $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyższe wartości wystąpiły na północnym zachodzie kraju.
- Rozkład przestrzenny wartości percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących ozonu jest bardziej zróżnicowany przestrzennie niż pozostałych zanieczyszczeń. Wartości wahały się od 50 do $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Niższe wartości percentyla wystąpiły na północy Polski oraz w dolinie Wisły, natomiast wyższe na południu i południowym zachodzie 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.

W kolejnych latach rozważana jest zmiana sposobu obliczania udziału transgranicznego dla pyłów i wyodrębnianie komponentu związanego z emisją naturalną aerozolu morskiego oraz pyłu mineralnego. Pozwoli to na porównanie udziału emisji antropogenicznych krajowych do emisji antropogenicznych spoza kraju. Obecnie komponent naturalny może powodować zmianę bilansu dla pyłów PM_{10} i $PM_{2.5}$, w porównaniu z zanieczyszczeniami nieemitowanymi ze źródeł naturalnych (lub emitowanymi w niewielkim stopniu). Tego typu podejście spowodować by mogło brak metodycznej spójności dla obliczeń O_3 , w przypadku którego komponent naturalny emisji NMLZO jest konieczny dla prawidłowego odtworzenia rozkładu i poziomu stężeń O_3 .

Spis rysunków

Rysunek 1. Konfiguracja siatki globalnej o zmiennej rozdzielczości: zielony kwadrat obejmuje obszar domeny obliczeniowej o stałej rozdzielczości 10 km, czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, kreślone są co 10 kwadratów siatki.....	7
Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Europy i Polski. Źródło: EMEP 2017.....	8
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Europy; EMEP 2017.....	9
Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Polski; EMEP 2017.....	9
Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Europy; EMEP 2017.....	10
Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Polski; EMEP 2017.....	10
Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM ₁₀ na obszarze Polski w 2019 roku.....	15
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 2019 roku.....	16
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM _{2.5} na obszarze Polski w 2019 roku.....	17
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2019 roku.....	18
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2019.....	19
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 2019 roku.....	20
Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej dwutlenku siarki powyżej 350 µg/m ³ na obszarze Polski w 2019 roku.....	21
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2019 roku.....	22
Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej wartości stężeń NO ₂ powyżej 200 µg/m ³ na obszarze Polski w 2019 roku.....	23
Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2019 roku.....	24
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 2019 roku.....	26
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2019 roku.....	27
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2019 roku.....	28

Rysunek 20. Rozkład przestrzenny percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń pyłu PM ₁₀ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2019 roku.	29
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 2019 roku.	30
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 2019 roku.	31
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 2019 roku.	32
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 2019 roku.	33

7. Spis tabel

Tabela 1. Rozkład wielkości aerozolu w module aerozolowym GEM-AQ.	6
Tabela 2. Procentowy udział stacji, dla których spełniono kryterium niepewności zgodnie z dyrektywą CAFE i Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu. ...	11
Tabela 3. Zestawienie parametrów	12