

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2020



Analiza wykonana w ramach zadań ustawowych
Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2020 poz. 1219, z późn. zm.).



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

Warszawa 2021

Autorzy:

dr hab. inż. Joanna Strużewska

prof. dr hab. inż. Jacek W. Kamiński

mgr inż. Grzegorz Jeleniewicz

mgr inż. Paulina Jagiełło

inż. Aleksander Norowski

mgr Aneta Gienibor

dr inż. Marcin Kawka

lic. Wojciech Bagiński

mgr inż. Paweł Durka



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Data publikacji: Czerwiec 2021

Spis treści

Wstęp	4
1. Metodyka obliczeń	5
1.1 Opis modelu GEM-AQ	5
1.2 Konfiguracja modelu GEM-AQ	7
1.3 Dane emisyjne	8
2. Ocena sprawdzalności	11
3. Zakres analiz	14
4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń w skali kraju na podstawie wyników modelowania.....	16
4.1 Pył PM_{10}	16
4.2 Pył $PM_{2.5}$	19
4.3 Dwutlenek siarki SO_2	20
4.4 Dwutlenek azotu NO_2	25
4.5 Tlenki azotu NO_x	28
4.6 Ozon O_3	29
4.7 Benzo(a)piren	32
5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego.....	33
5.1 Pył PM_{10}	33
5.2 Dwutlenek siarki SO_2	35
5.3 Dwutlenek azotu NO_2	37
5.4 Ozon O_3	38
6. Podsumowanie	40
6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym	40
6.2 Dwutlenek siarki	41
6.3 Tlenki azotu	41
6.4 B[a]P	41
6.5 Ozon	42
6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych	42
Spis rysunków.....	44
Spis tabel	45

Wstęp

Matematyczne modelowanie transportu i przemian substancji w powietrzu zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy oraz Ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2020 poz. 1219, 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 2018 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 2020,
- 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 podstawą systemu modelowania wdrożonego w IOŚ-PIB do celów realizacji zadań zgodnie z zapisami Ustawy Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2020 r. poz. 1219). Ponadto, model GEM-AQ wykorzystywany jest 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).

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 uwzględnia 35 związków gazowych transportowanych w drodze adwekcji, głębokiej konwekcji i dyfuzji turbulencyjnej i 15 związków, które ze względu na bardzo szybki czas reakcji nie podlegających transportowi. 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 osiąganę poprzez rozwiązanie układu równań zachowania masy dla każdej z modelowanych substancji chemicznych. Procesy adwekcji i dyfuzji pionowej 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, 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 pozwala on na symulację reakcji heterogenicznej hydrolizy N_2O_5 prowadzącej do powstawania HNO_3 . Reakcja ta zachodzi na powierzchni

aerozolu atmosferycznego i ma 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 wewnątrzchmurowych, 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 reprezentowany jest w 12 przedziałach wielkości cząstek aerozolu 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.

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

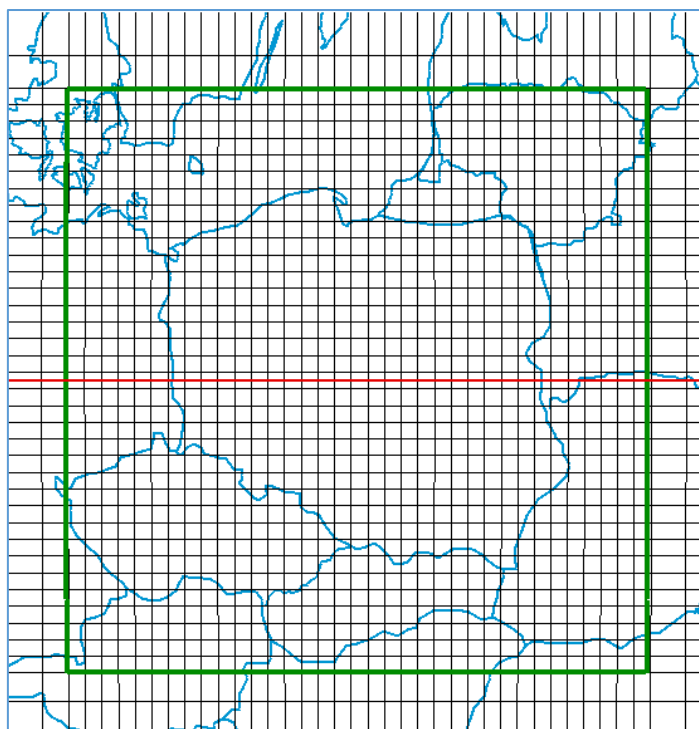
Numer przedziału	Zakres zmienności promienia aerodynamicznego [μm]	Średni promień aerodynamiczny [μm]	Frakcja pyłu
1	0.005 - 0.01	0.0075	Suma (1-8) = PM _{2.5}
2	0.01 - 0.02	0.015	
3	0.02 - 0.04	0.03	
4	0.04 - 0.08	0.06	
5	0.08 - 0.16	0.12	
6	0.16 - 0.32	0.24	
7	0.32 - 0.64	0.48	
8	0.64 - 1.28	0.96	
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 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 pola meteorologiczne w postaci analiz obiektywnych z roku 2020, stanowiące warunek początkowy, pobrane z Kanadyjskiego Centrum Meteorologicznego (Canadian Meteorological Centre - CMC). Warunki początkowe stężeń modelowanych zanieczyszczeń dla 1 stycznia 2020 pochodzą z Serwisu Obserwacji Atmosfery Copernicus.

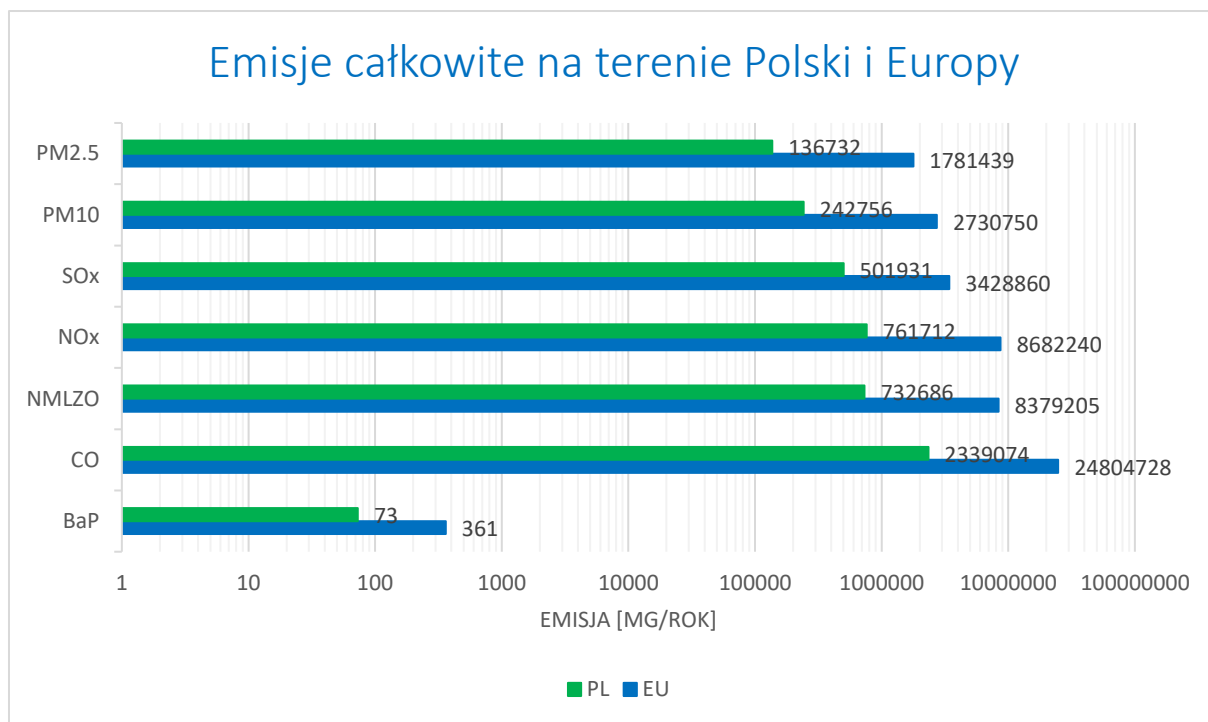


Rysunek 1. Konfiguracja siatki globalnej o zmiennej rozdzielczości: zielony kwadrat obejmuje obszar domeny obliczeniowej o stałej rozdzielczości 10 km, czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, kreślone są co 3 kwadraty siatki

1.3 Dane emisyjne

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2020 roku wykonano z wykorzystaniem aktualnej bazy emisji EMEP (2018) 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 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)¹.

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 9% (od 7,7% w przypadku $PM_{2.5}$ do 14,6% dla SO_2). Natomiast w przypadku B[a]P, udział emisji z terenu Polski stanowi aż 20% emisji w Europie, co przekłada się na znaczny udział emisji krajowych w kształtowaniu poziomów stężeń B[a]P na terenie naszego kraju.



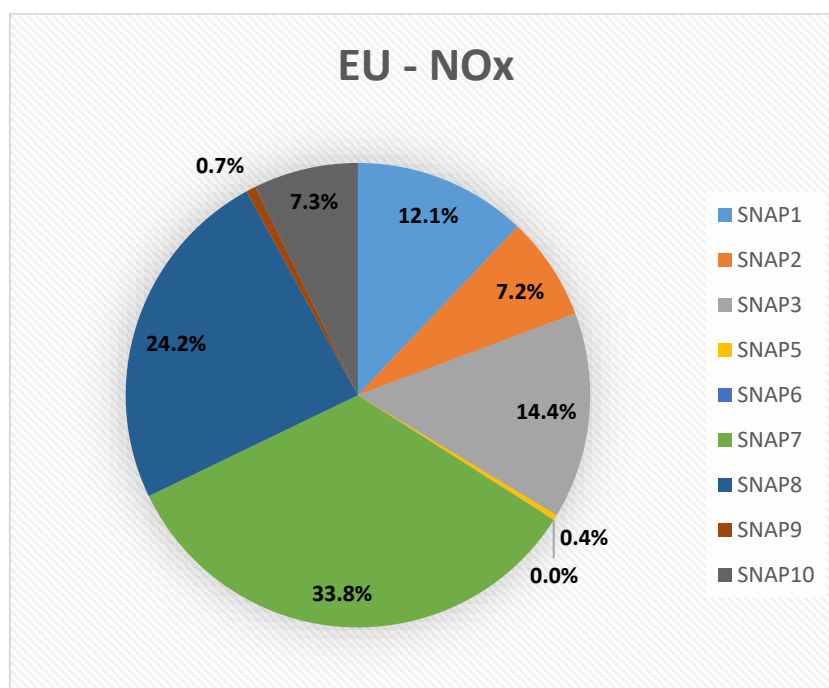
Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2018

¹ <https://www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions>

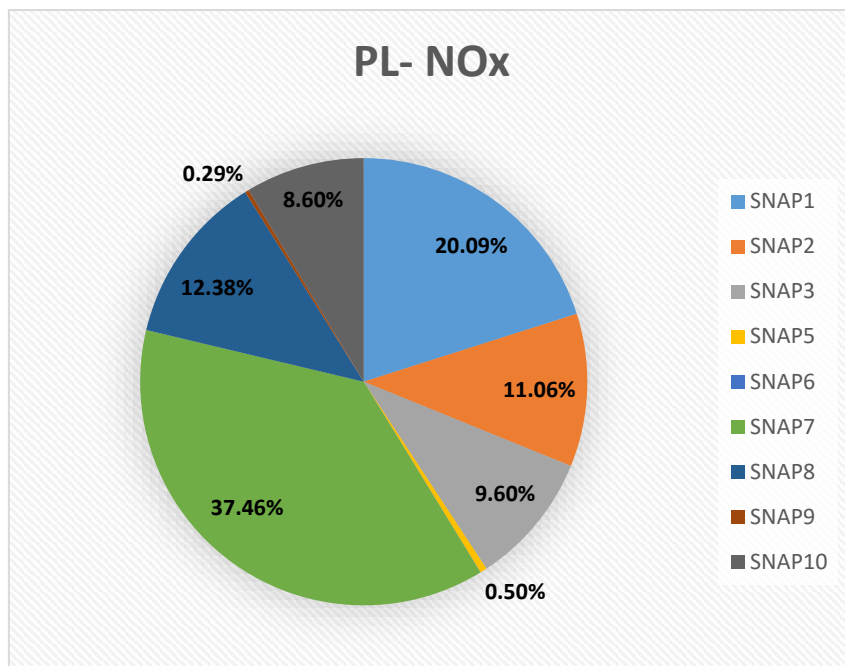
Dane emisyjne udostępniane są przez EMEP w podziale na kategorie źródeł emisji GNFR. Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń dane te zostały zreklasyfikowane na kategorie źródeł emisji SNAP. Poniżej przedstawiono porównanie udziału poszczególnych źródeł w emisji PM₁₀ i NO_x na terenie Polski i Europy.

W przypadku emisji NO_x (**Rysunek 3** i **Rysunek 4**) największa część emisji pochodzi z transportu drogowego (SNAP7) i jest to odpowiednio 33,8% dla Europy oraz 37,5% dla Polski. Ponadto 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 Polski emisje z sektora komunalno-bytowego (11,06%) mają prawie dwukrotnie większy udział niż średnio na terenie Europy (7,2%).

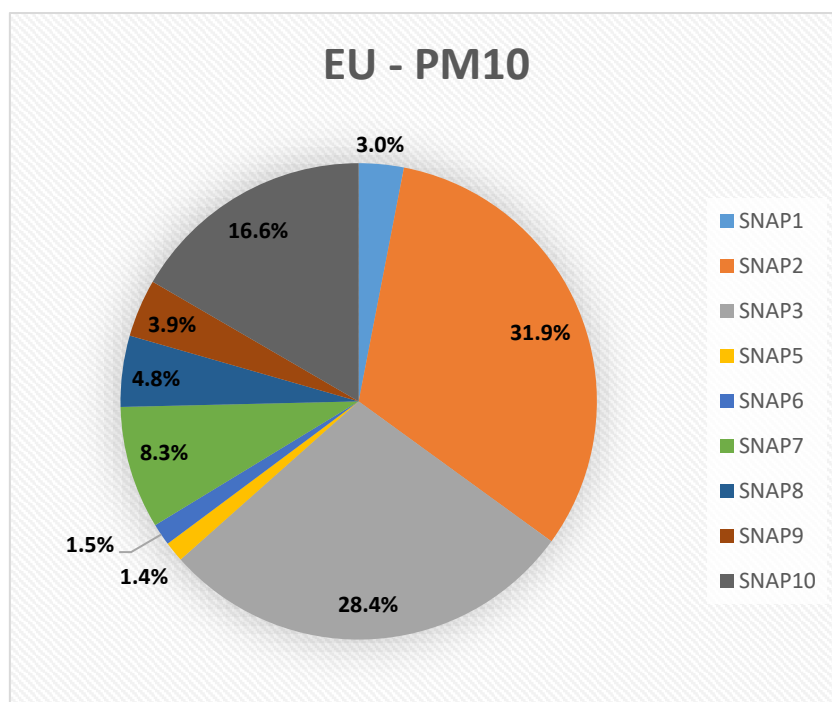
Struktura źródeł emisji PM₁₀ jest inna niż w przypadku NO_x. Zanieczyszczenie to zarówno w Europie jak i w Polsce pochodzi w dużej części z sektora komunalno-bytowego (SNAP2) i jest to odpowiednio 31,9% oraz 42,4%. Prawie 50% udział kategorii SNAP2 w emisjach PM₁₀, stanowi duży problem na terenie Polski. Pozostałymi kategoriami o znaczącym udziale są: procesy spalania w przemyśle (SNAP3), rolnictwo (SNAP10) oraz procesy spalania w sektorze produkcji energii (SNAP1).



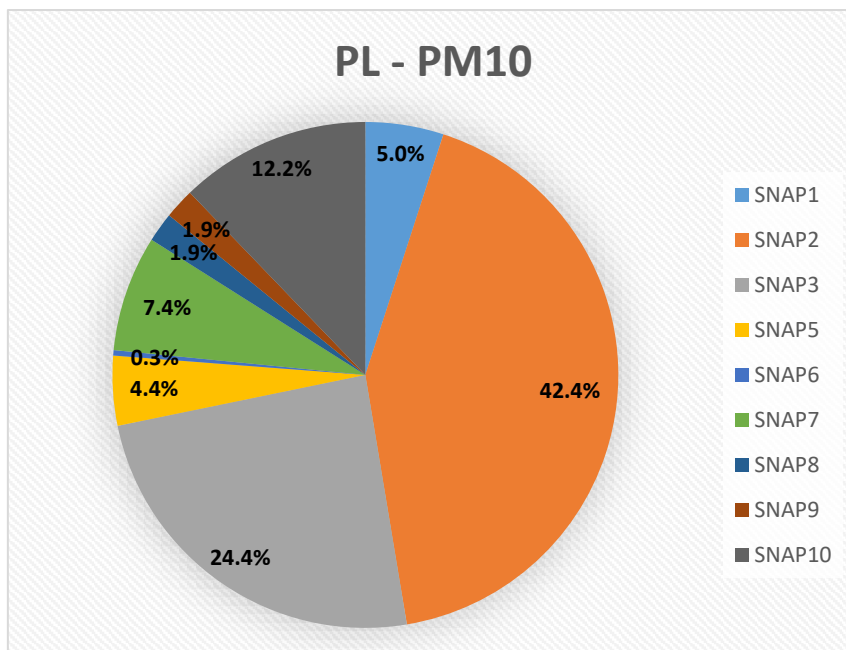
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Europy; EMEP 2018



Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Polski; EMEP 2018



Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM₁₀ na terenie Europy; EMEP 2018



Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM₁₀ na terenie Polski; EMEP 2018

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). Pomiaru 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. 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	72,7 %
2	Tlenki azotu (NO _x) – średnia roczna	67,9 %
3	Ozon (O ₃) – 8hmax	98,0 %
4	Pył zawieszony PM ₁₀ – średnia roczna	95,1%
5	Pył zawieszony PM _{2.5} – średnia roczna	95,1 %
6	Dwutlenek siarki (SO ₂) – średnia roczna	71,6 %
7	Benzo(a)piren (B(a)P) – średnia roczna	79,7 %

Do szczegółowej ewaluacji wyników modelowania wykorzystano narzędzie DELTA tool w dostępnej wersji (6.0.1, udostępniona we wrześniu 2020 r.). Analizie poddano wyniki modelowania uzyskane dla symulacji bazowej, dla roku 2020. 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 jakości. 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 z warunkiem zawartym w dyrektywie CAFE została spełniona. W przypadku sprawdzalności rocznych stężeń NO₂ oraz NO_x nie spełniono warunku zawartego w dyrektywie CAFE. Powodem są dość wysokie niedoszacowania. W przypadku ewaluacji modelowanych stężeń SO₂, pomimo dobrych wskaźników statystycznych, kryterium

dyrektywy CAFE nie zostało spełnione. Powodem takiej sytuacji jest dość duże przeszacowanie na niektórych stacjach.

Zgodność wyników modelowania z pomiarami dla symulacji bazowej roku 2020 wykazała sprawdzalność niższą od oczekiwanej w przypadku NO_2 , NO_x , SO_2 i B(a)P. Jest to łączny efekt dwóch aspektów:

- wykorzystane emisje EMEP oszacowane dla roku 2018 (najbardziej aktualne dostępne) nie odzwierciedlają sytuacji w roku 2020 w kontekście zmian związanych z ograniczeniami gospodarczymi
- ze względu na warunki termiczne oraz pozostawanie większości osób w domach w okresie wiosennym profil zmienności emisji zastosowany w przetwarzaniu danych nie odzwierciedlał sytuacji w roku 2020 i przedłużonego okresu grzewczego.

W celu lepszego zaadresowania zmienności emisji związanej z temperaturą planowane jest wdrożenie od następnego roku przetwarzania bazującego na indeksie HDD (ang. Heating Degree Days) i wartościach temperatur średniodobowych.

Wykonano także analizę struktury emisji w lokalizacjach stacji odstających. Za znaczące przeszacowania PM_{10} odpowiada głównie sektor wydobywania paliw (SNAP5), gospodarki odpadami (SNAP9) i spalania paliw w przemyśle (SNAP3). Przeszacowania SO_2 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/NO_2 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 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 2020 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
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

	Substancja	Parametr statystyczny
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
16	Ozon (O ₃)	Wartość percentyl 93,2 w rocznej serii maksimów dobowych stężenia ośmiogodzinnego 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 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

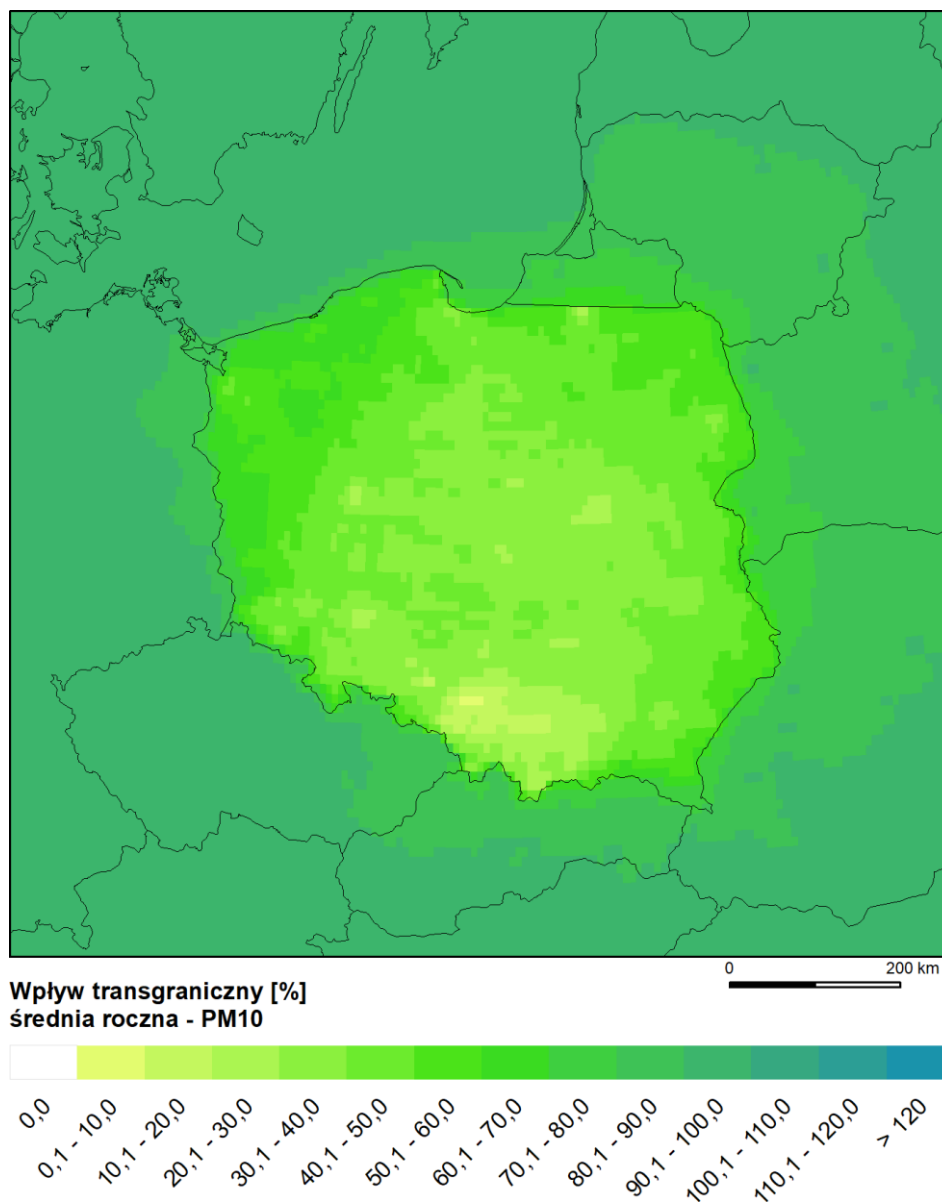
Wyniki modelowania zostały wykorzystane do analizy rozkładu przestrzennego procentowego udziału transportu transgranicznego w poziomie stężeń zanieczyszczeń i diagnostyk narażenia na podwyższone wartości zanieczyszczeń na obszarze Polski w roku 2020.

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}

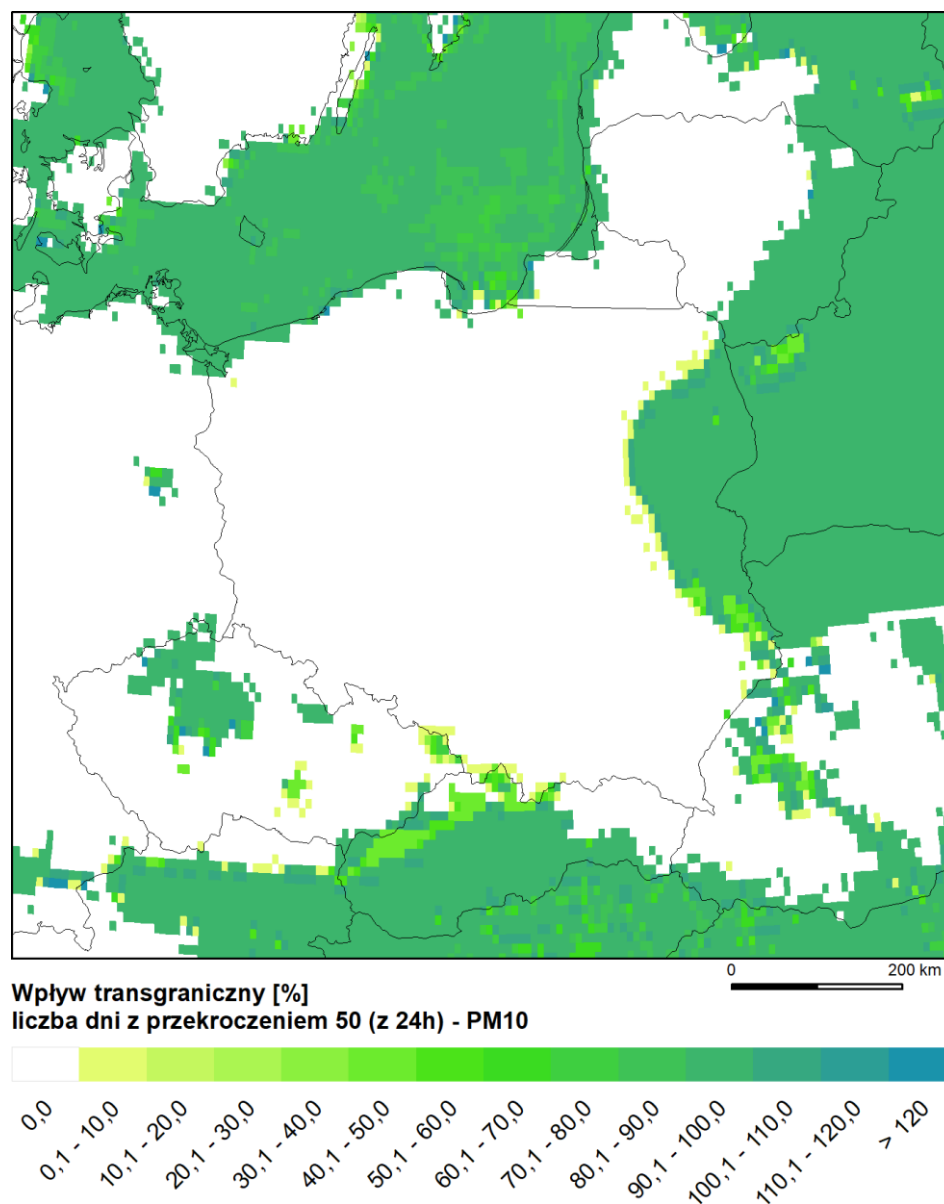
Rysunek 7 i **Rysunek 8** przedstawiają rozkłady przestrzenne udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM_{10} oraz w liczbie dni z przekroczeniem poziomu $50 \mu g/m^3$ ze względu na średniodobowe stężenie pyłu PM_{10} .

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 na obszarach dużych miast, w okolicach Bełchatowa oraz na południu, około 20-30%, 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 2020 roku

Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni ze średniodobowym stężeniem pyłu PM_{10} wyższym niż $50 \mu g/m^3$, był mało zróżnicowany na obszarze Polski (**Rysunek 8**). Na przeważającym obszarze kraju przekroczenia $50 \mu g/m^3$ stężenia średniodobowego nie wystąpiły. Wyjątkiem jest wschodnia część kraju, obszary pobrzeża Morza Bałtyckiego oraz południowe krańce Polski, gdzie wpływ transgraniczny, wynikający przede wszystkim z oddziaływania źródeł naturalnych, powodujących napływ pyłu pustynnego oraz aerozolu morskiego, wynosi nawet 100%.

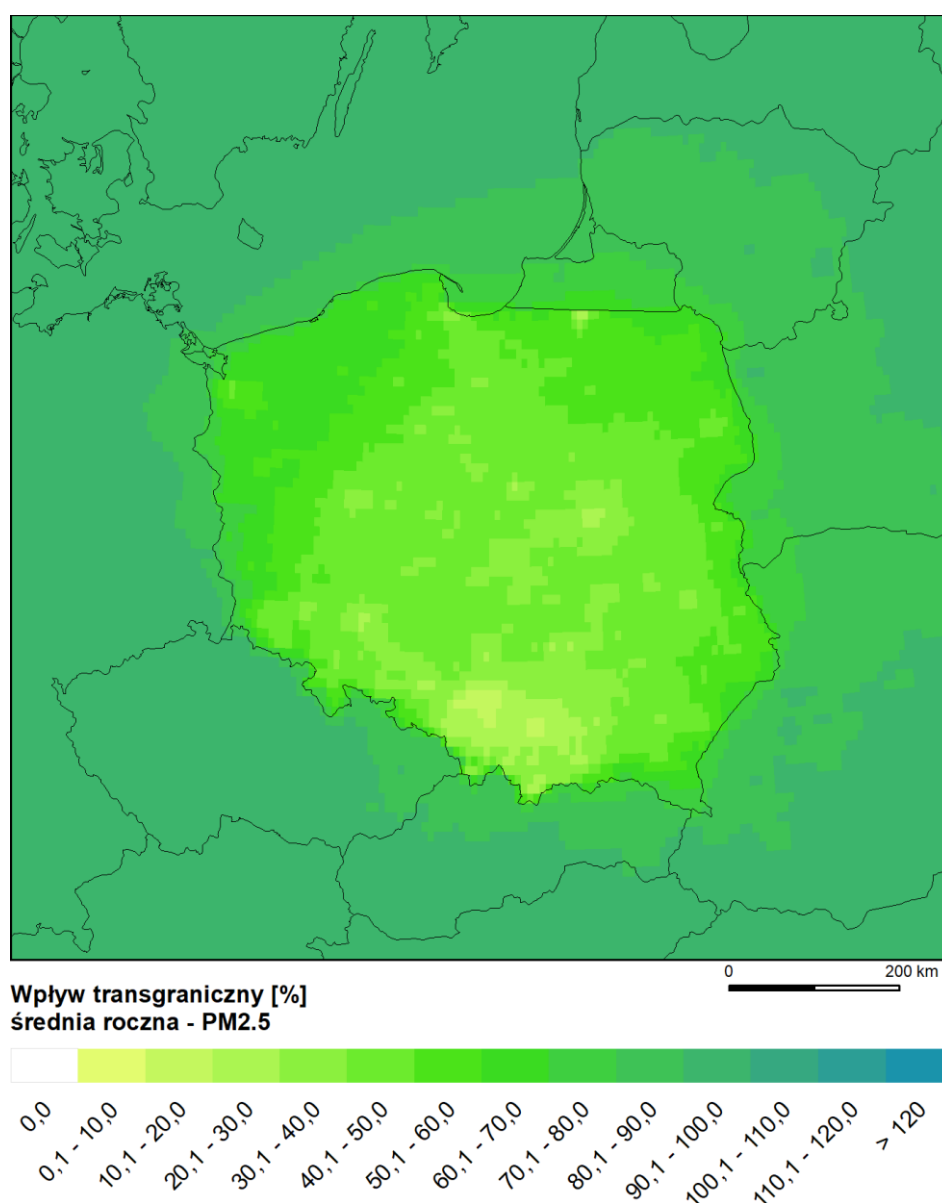


Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu g/m^3$ ze względu na średniodobowe stężenia pyłu PM_{10} na obszarze Polski w 2020 roku.

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 2020.

W 2020 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 napływu spoza granic był niższy, wahał się od 20 do 40%, co spowodowane jest wysoką emisją krajową.

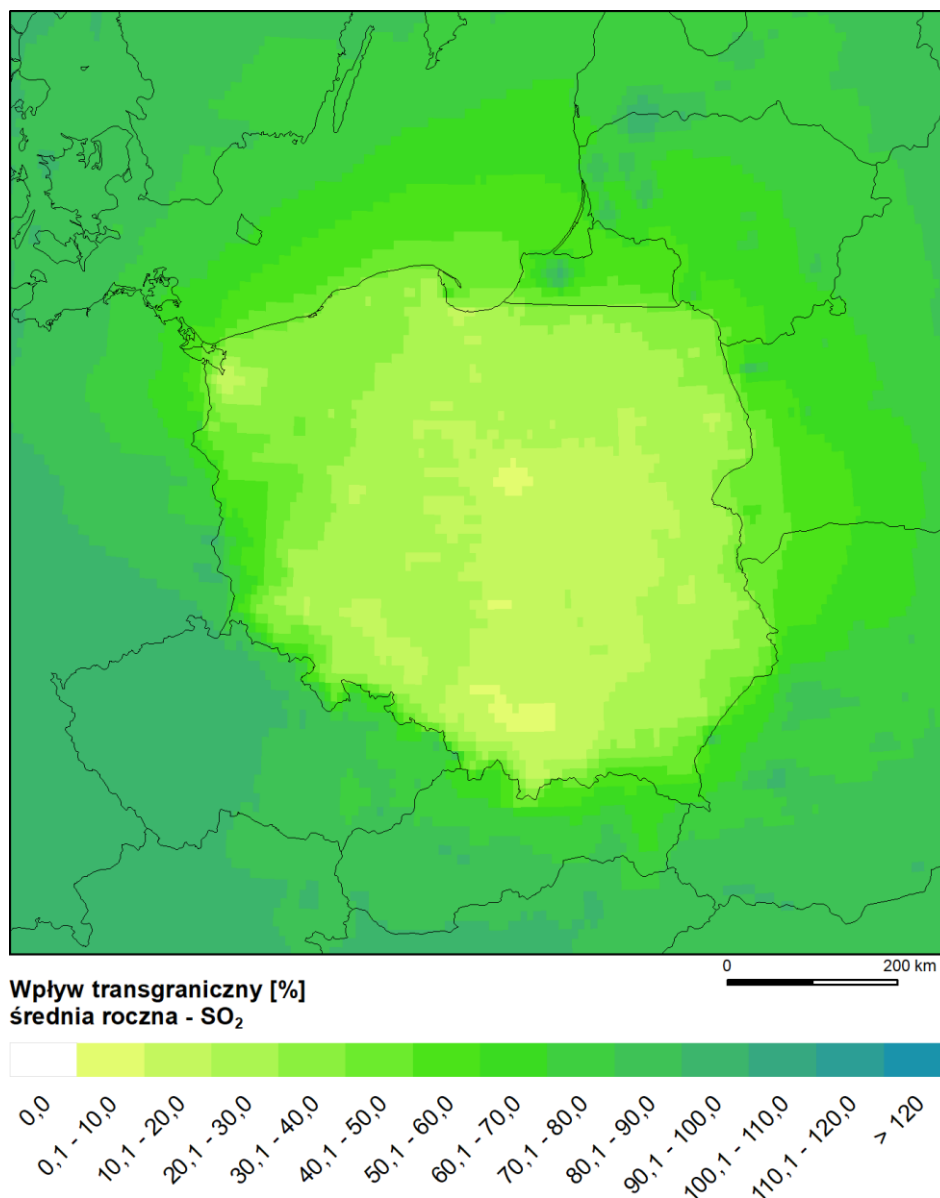


Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM_{2.5} na obszarze Polski w 2020 roku

4.3 Dwutlenek siarki SO₂

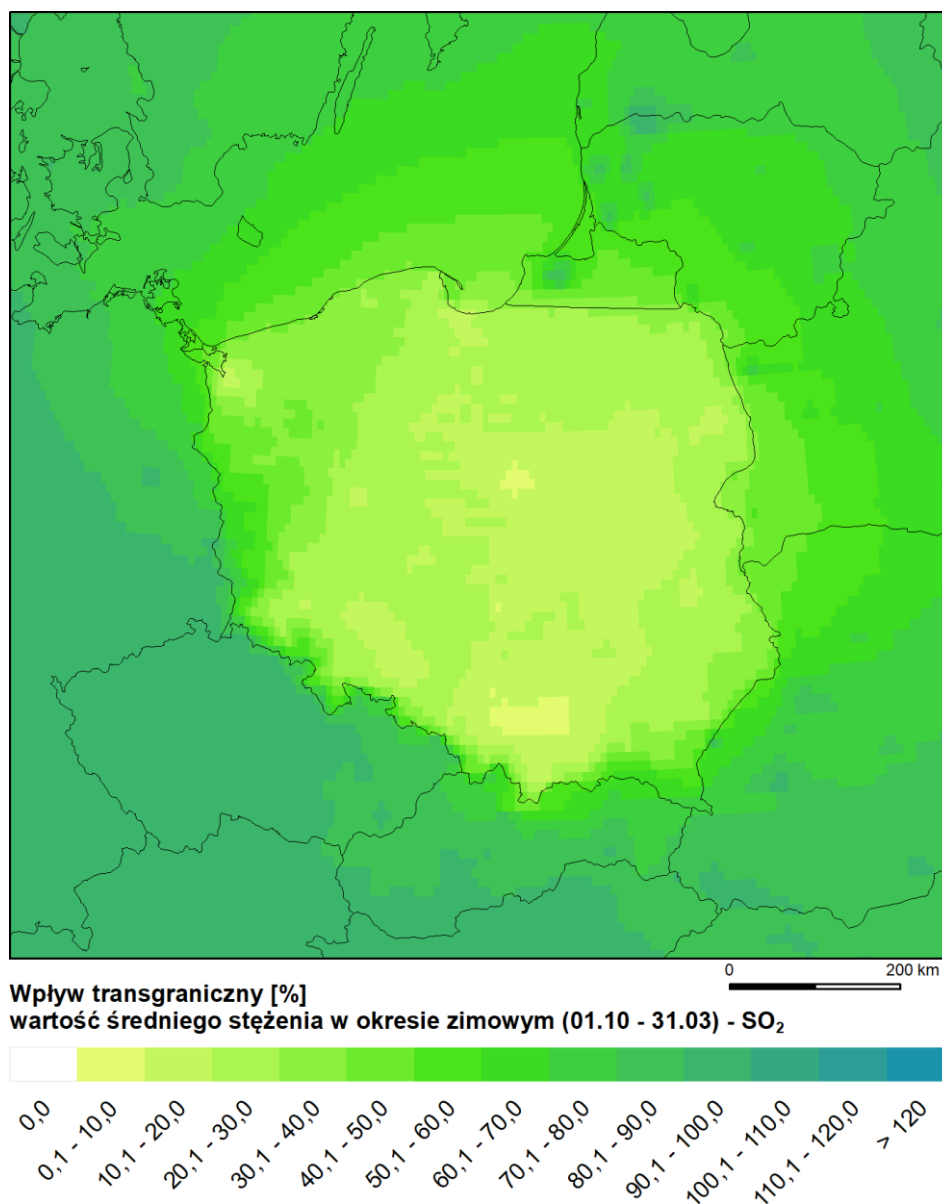
Rysunek 10, Rysunek 11, Rysunek 12 i Rysunek 13 przedstawiają odpowiednio rozkłady przestrzenne procentowego udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu SO₂, średnich stężeniach SO₂ w okresie zimowym, w liczbie dni z przekroczeniem wartości średniodobowej 125 µg/m³ oraz w liczbie godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej powyżej 350 µg/m³ na obszarze Polski w 2020 roku.

W 2020 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 wynosił około 10-20%.



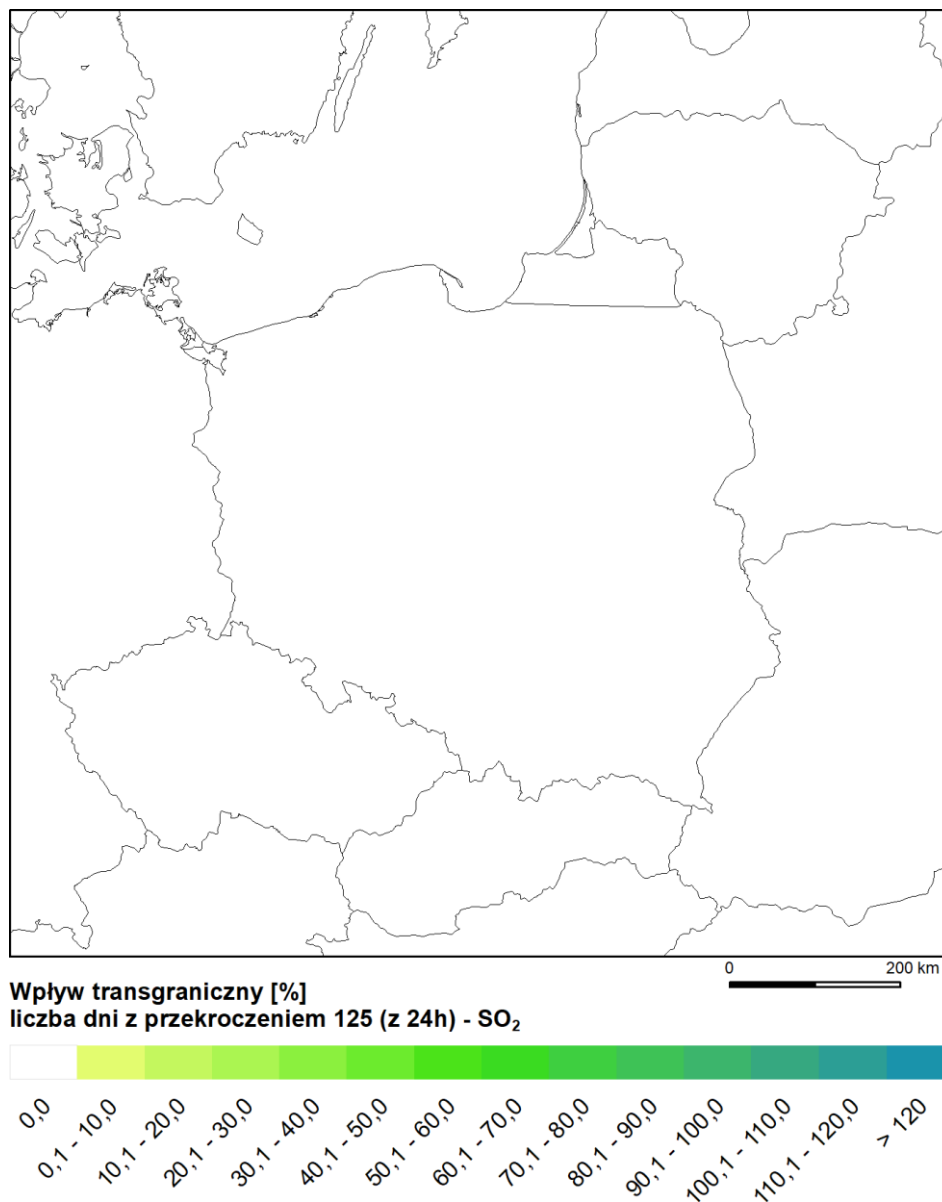
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2020 roku

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%. Natomiast niższy udział źródeł transgranicznych, do 20% wystąpił w centrum Polski oraz na części obszaru województwa śląskiego, opolskiego i małopolskiego, ze względu na dominację źródeł krajowych.



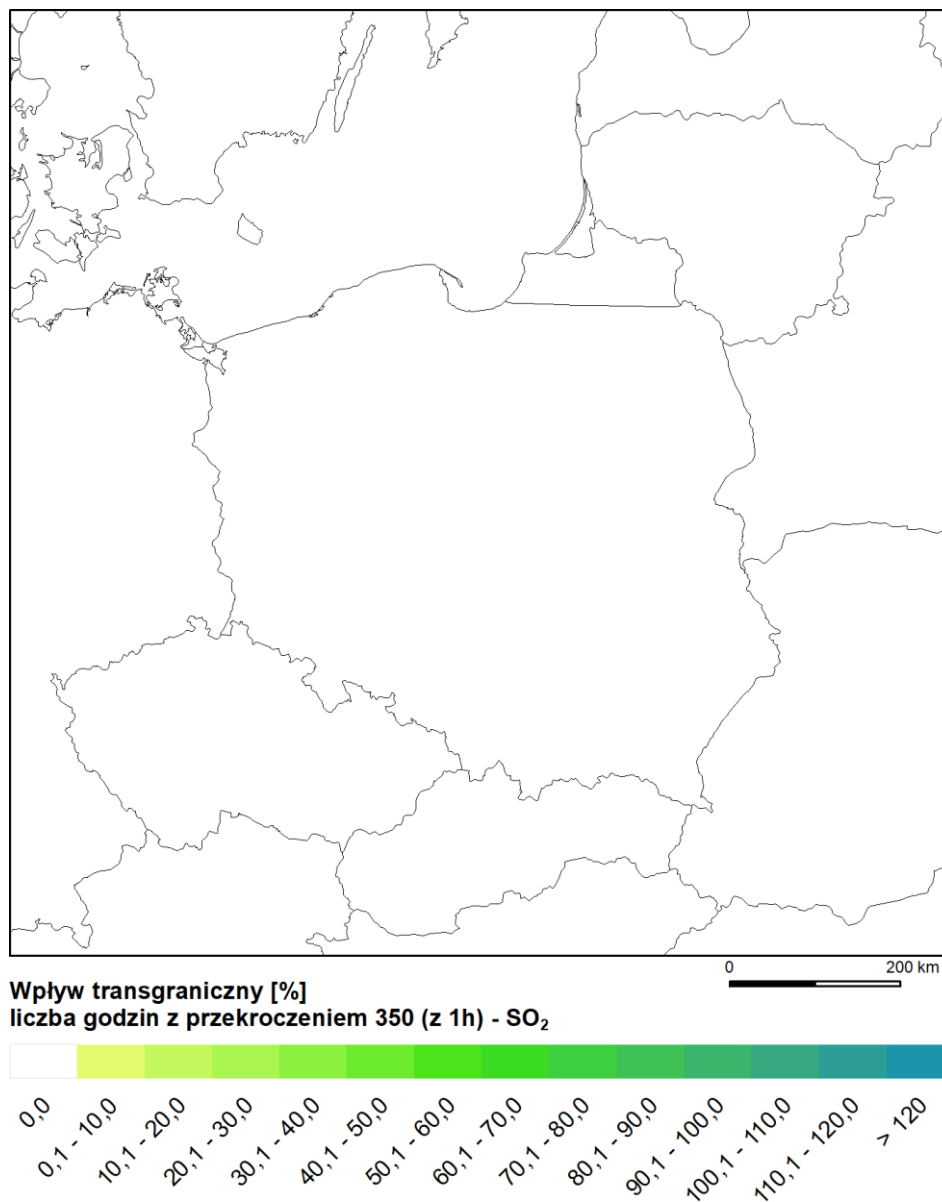
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2020

Na obszarze Polski w 2020 roku 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 2020 roku

Na obszarze Polski w 2020 nie wystąpiły godziny z przekroczeniem wartości godzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 13**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.

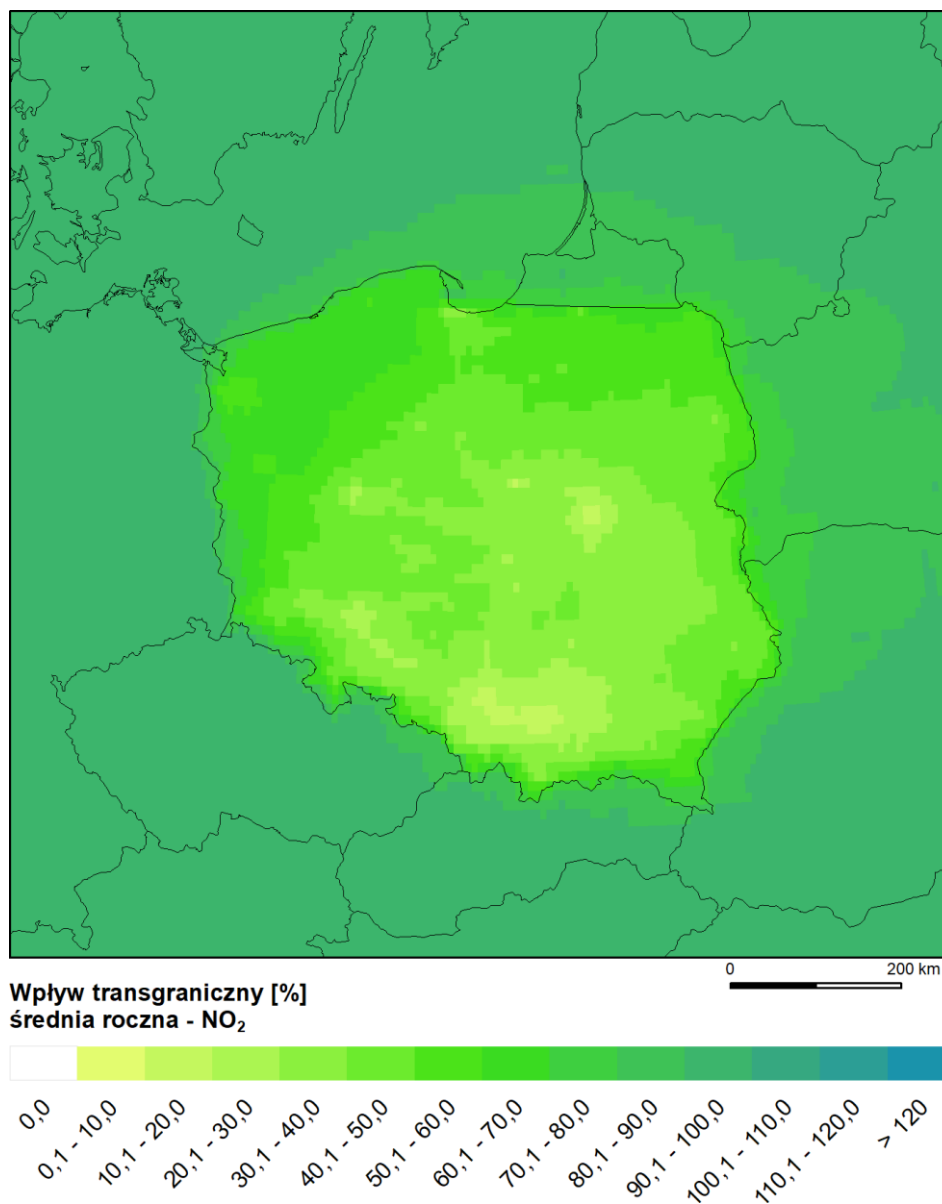


Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2020 roku

4.4 Dwutlenek azotu NO₂

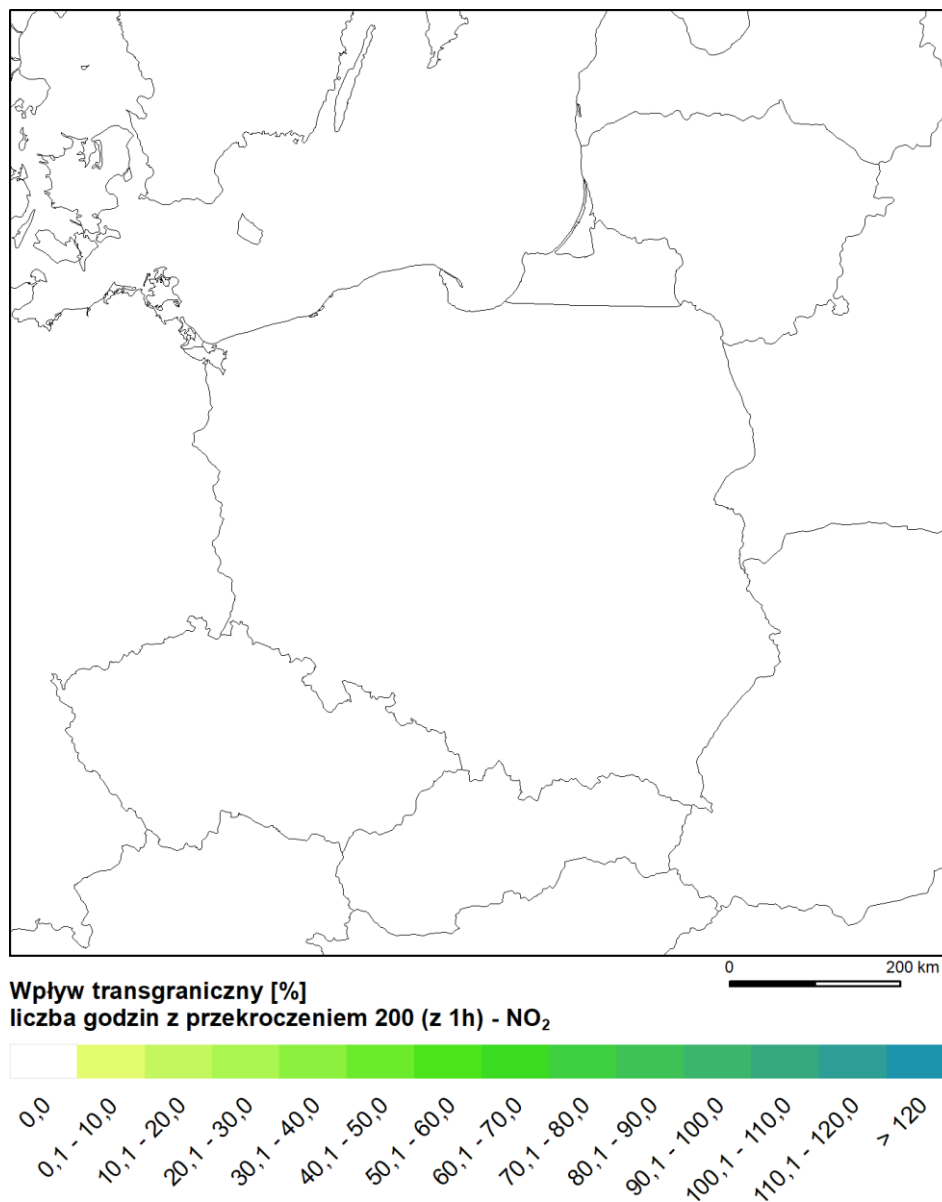
Rysunek 14 i **Rysunek 15** przedstawiają odpowiednio udział procentowy źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu oraz w liczbie godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej powyżej 200 µg/m³ na obszarze Polski w roku 2020.

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 maleje wraz ze wzrostem odległości od granic kraju. Najniższy udział zanieczyszczeń transgranicznych wystąpił w centrum kraju, okolicach Warszawy, Poznania, Gdańska, Wrocławia i na obszarze województwa śląskiego i małopolskiego, gdzie napływ transgraniczny wynosił do 20% (**Rysunek 14**).



Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2020 roku

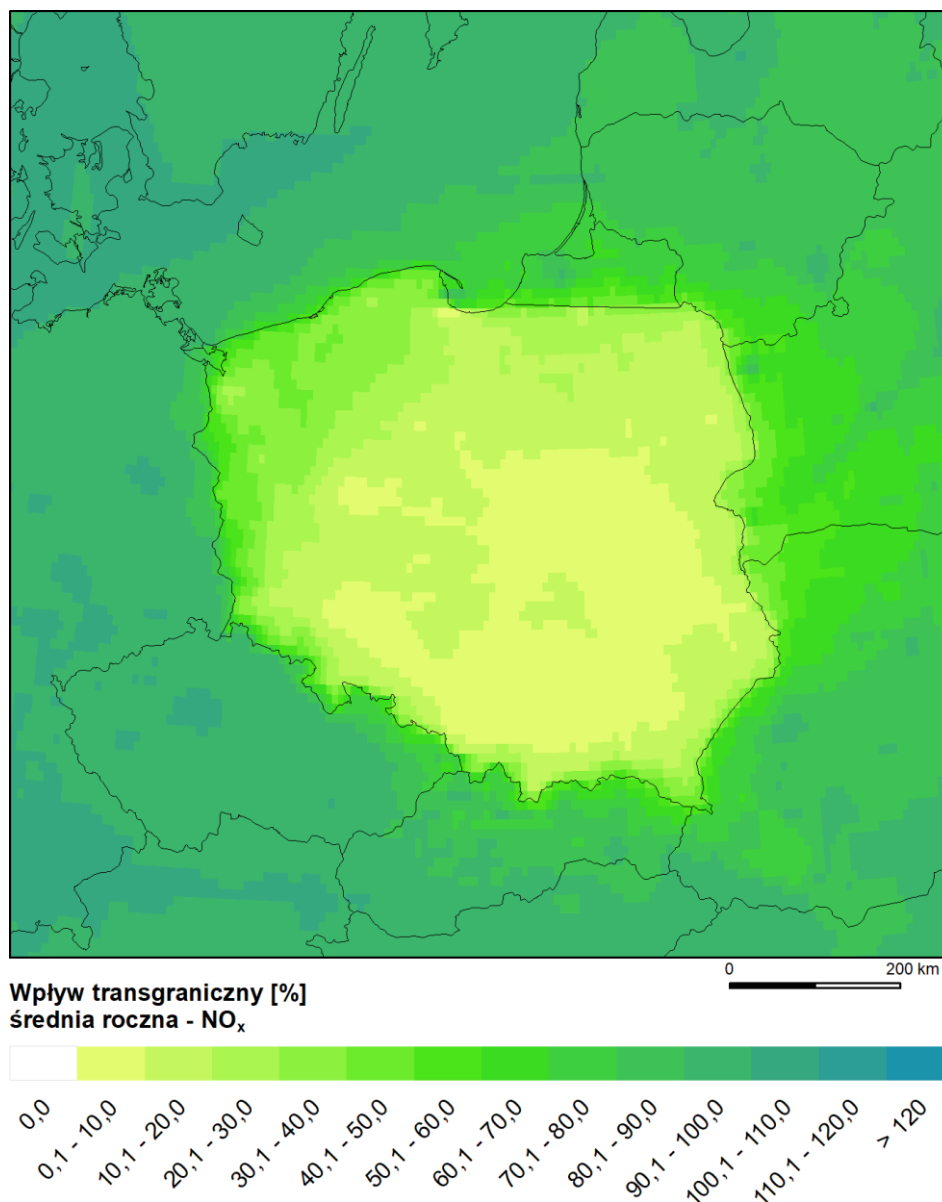
Na obszarze Polski w 2020 roku w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych nie wystąpiły przekroczenia poziomu $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla wartości 1 - godzinnej stężeń dwutlenku azotu (**Rysunek 15**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.



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 2020 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 2020 roku. Najniższy wpływ źródeł transgranicznych, do 20% wystąpił w centrum i na południu Polski oraz w okolicach Białegostoku, Poznania, Wrocławia i Trójmiasta. Natomiast im bliżej granic kraju, tym wpływ zanieczyszczeń napływających był wyższy, szczególnie na zachodzie i północnym zachodzie Polski, do 60%.



Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2020 roku

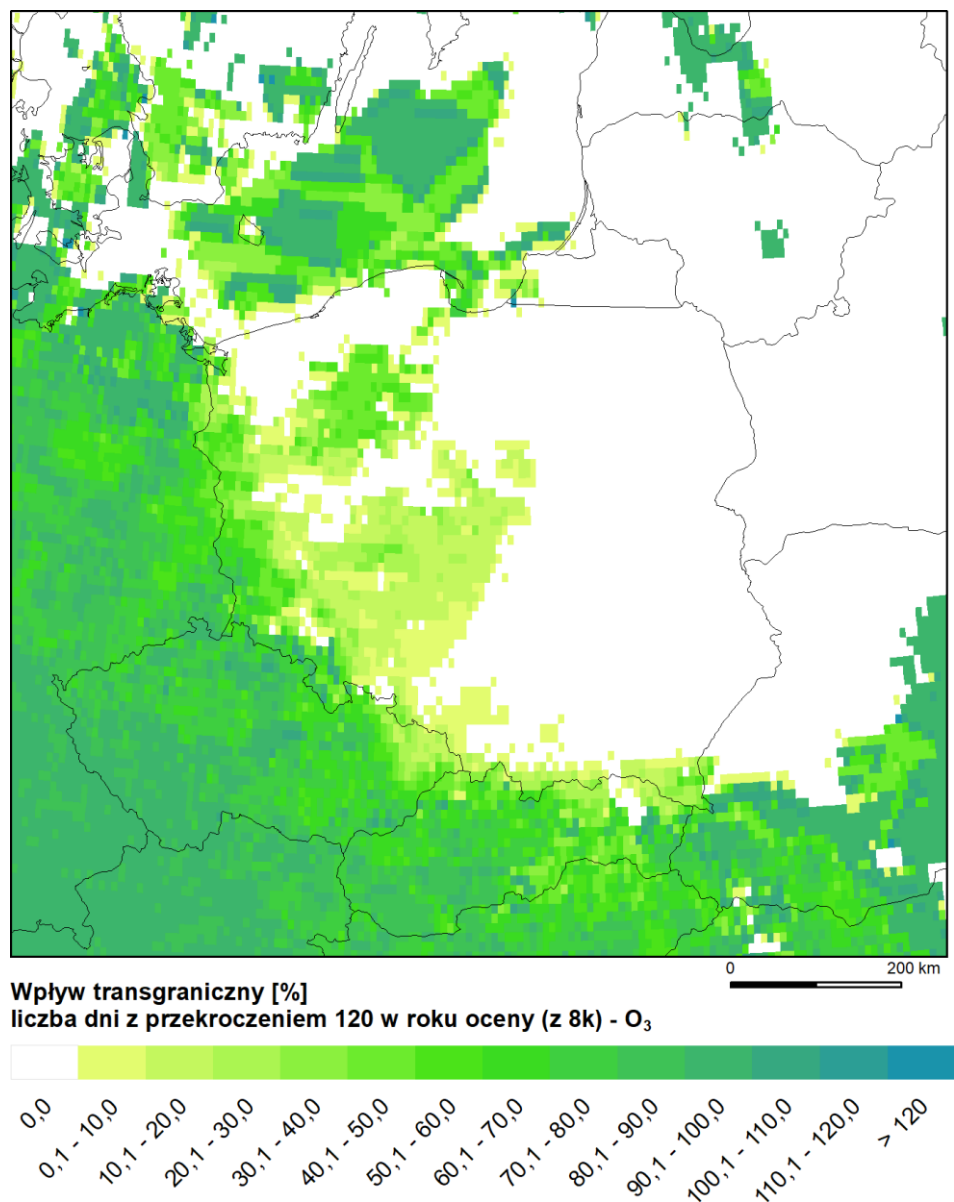
4.6 Ozon O₃

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 AOT40² na obszarze Polski w roku 2020.

W 2020 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 we wschodniej, północnej i południowo-wschodniej części Polski. W centrum kraju udział transgraniczny wahał się od 10 do 30%. Najwyższy wpływ źródeł transgranicznych wystąpił miejscowo na obszarach portów morskich, na południowych krańcach kraju oraz wzdłuż zachodniej granicy. Udział źródeł transgranicznych powyżej 100% wystąpił miejscowo na krańcach południowych Polski. Fakt wzrostu poziomu stężeń ozonu, na skutek oddziaływania wyłącznie emisji granic kraju, w obszarach, w których jest wysoka emisja ze źródeł krajowych wynika z faktu ograniczenia reakcji $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Wzrost stężeń O₃ wynika zatem z faktu braku dodatkowych emisji tlenków azotu z obszaru Polski, nie zaś ściśle z oddziaływania emisji transgranicznych.

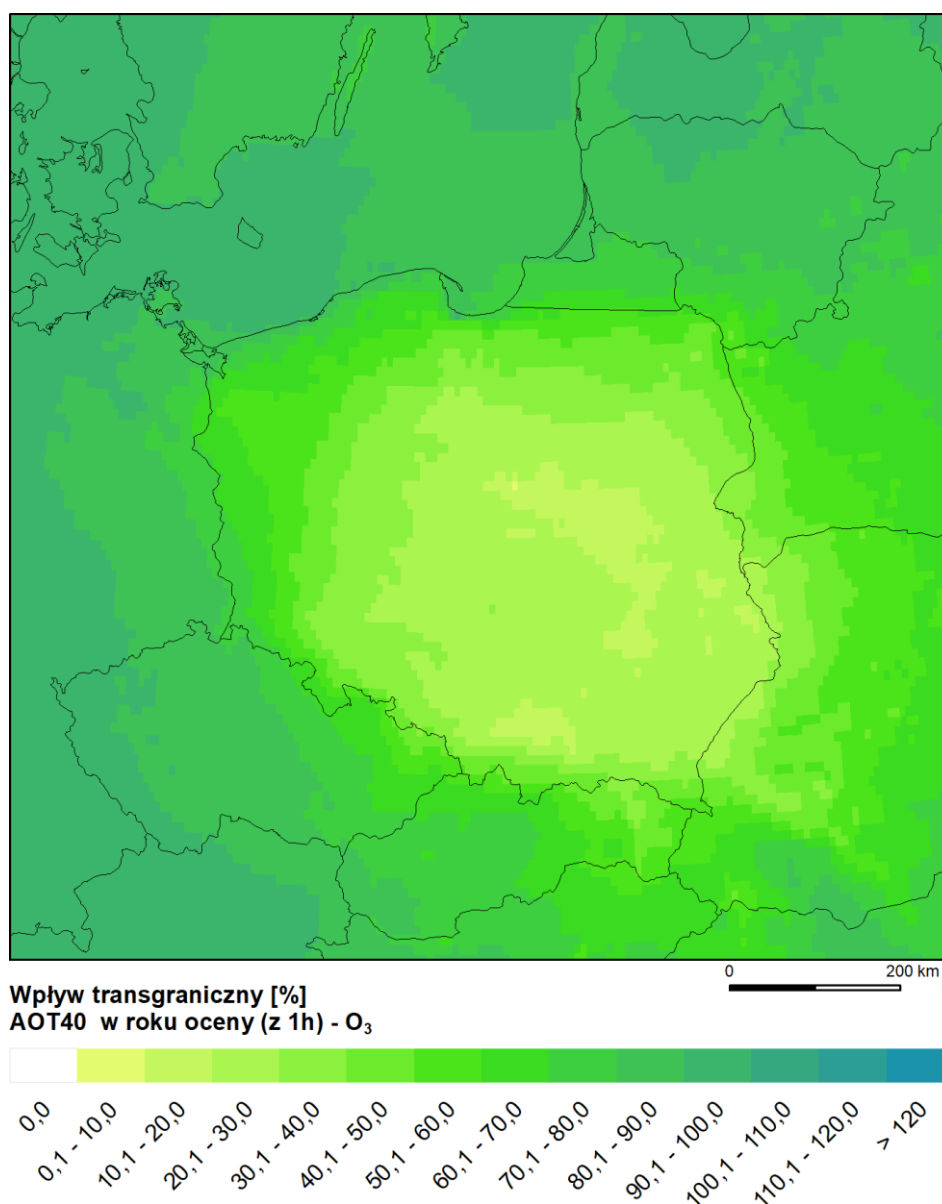
² Wskaźnik ten, obliczany na podstawie stężeń 1-godzinnych, definiowany jest jako zakumulowana ekspozycja na stężenia większe niż 40 ppbv (ok. 80 µg/m³) w okresie od 1 maja do 31 lipca, w godzinach od 8:00 do 20:00 czasu lokalnego:

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



Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężenia ozonu przekraczała 120 µg/m³ na obszarze Polski w 2020 roku

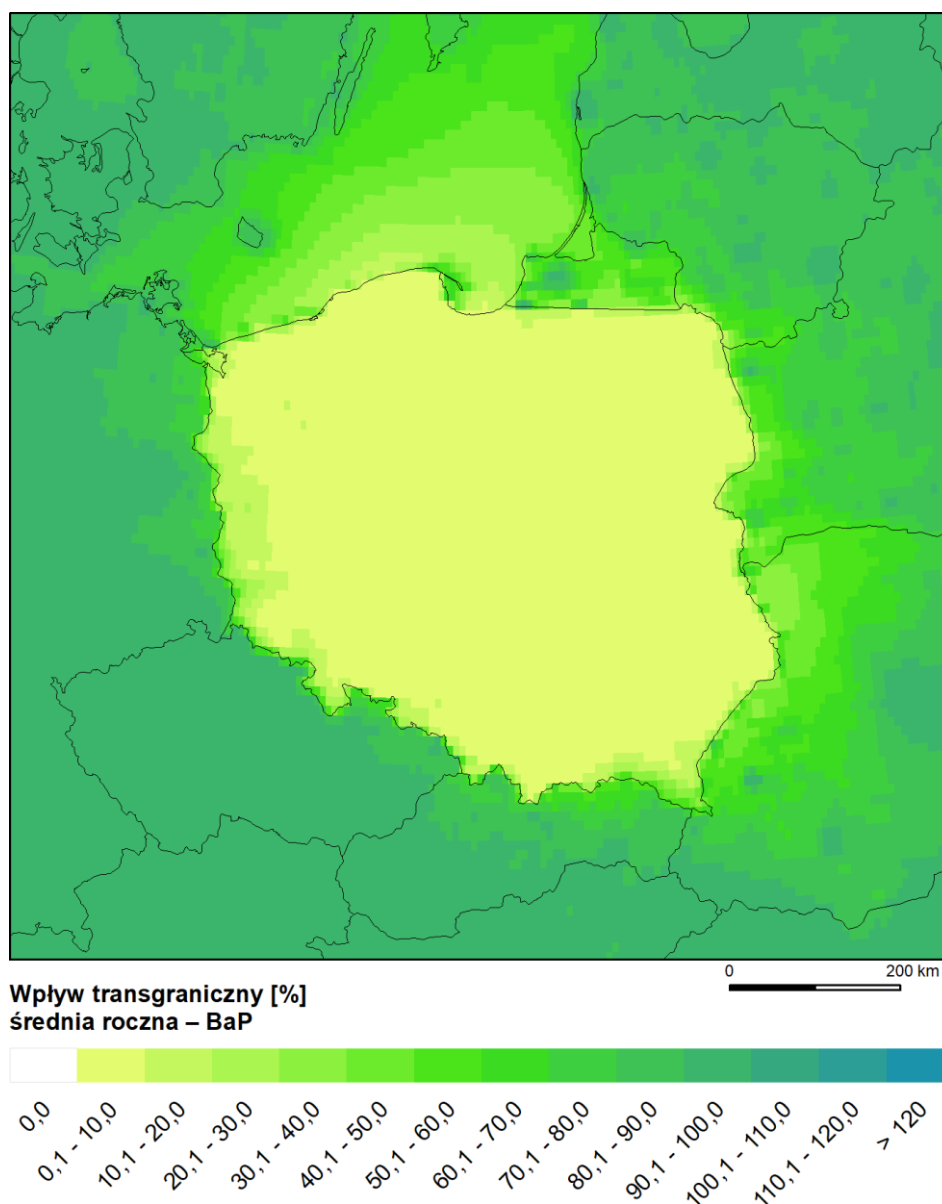
Udział procentowy źródeł transgranicznych w kształtowaniu się wartości wskaźnika AOT40 na obszarze Polski wykazuje nieznaczne zróżnicowanie przestrzenne (**Rysunek 18**). Najwyższy udział zanieczyszczeń napływających spoza kraju wystąpił na północy Polski oraz wzdłuż zachodniej granicy - do 80%. W centrum kraju udział zanieczyszczeń napływających wynosił około 30-50%. Najniższe wartości udziału zanieczyszczeń transgranicznych wystąpiły wzdłuż doliny Wisły- 10-20%.



Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2020 roku

4.7 Benzo(a)piren

Rysunek 19 przedstawia rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2020 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.



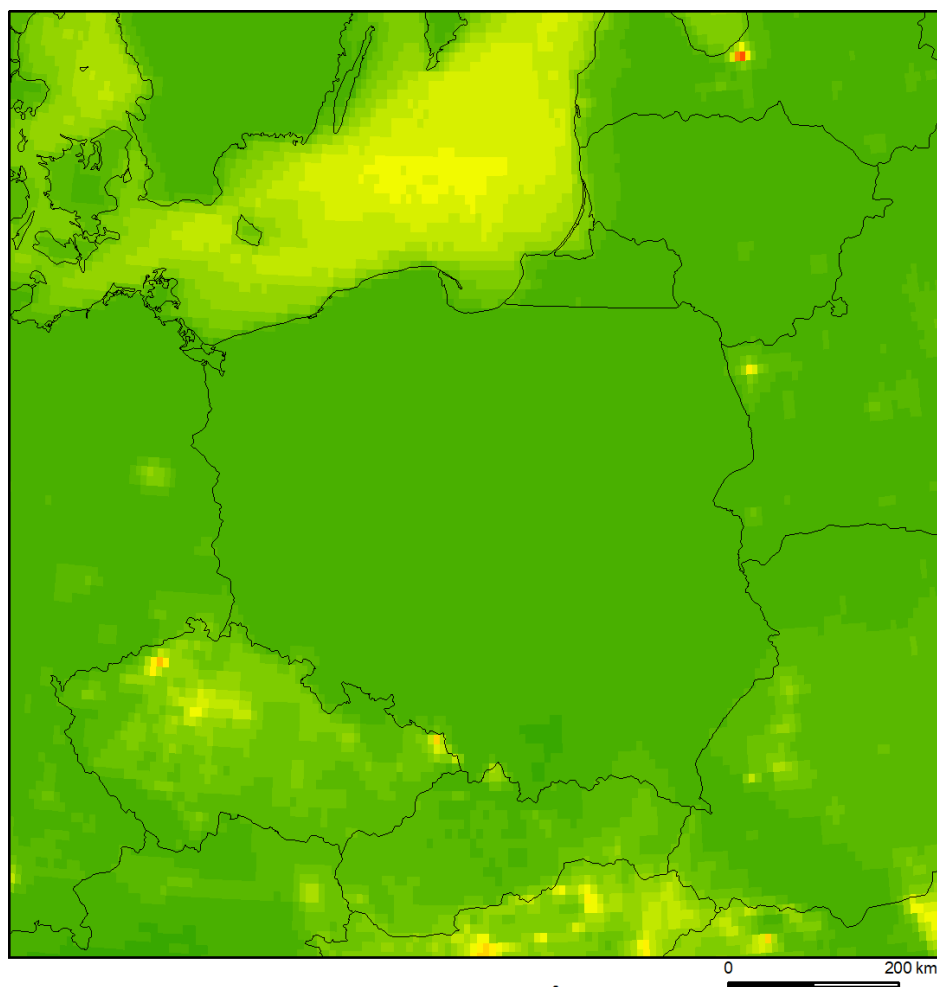
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2020 roku

5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego

Zgodnie z Załącznikiem 8 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2018 r., 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, wykazywał wartości głównie w przedziale od 10 do 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 20**). Wyjątkiem jest centralna część województwa małopolskiego, gdzie udział zanieczyszczeń transgranicznych był niższy, w zakresie od 0 do 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oraz południowe krańce kraju i obszary nadmorskie, gdzie poziom stężeń w wyniku transgranicznego napływu zanieczyszczeń był wyższy, od 30 do 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wyższe wartości percentyla nad obszarem Morza Bałtyckiego wynikają z emisji naturalnej aerozolu morskiego. Na terenie Polski na skutek wpływu zanieczyszczeń transgranicznych nigdzie nie nastąpiło przekroczenie poziomu 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



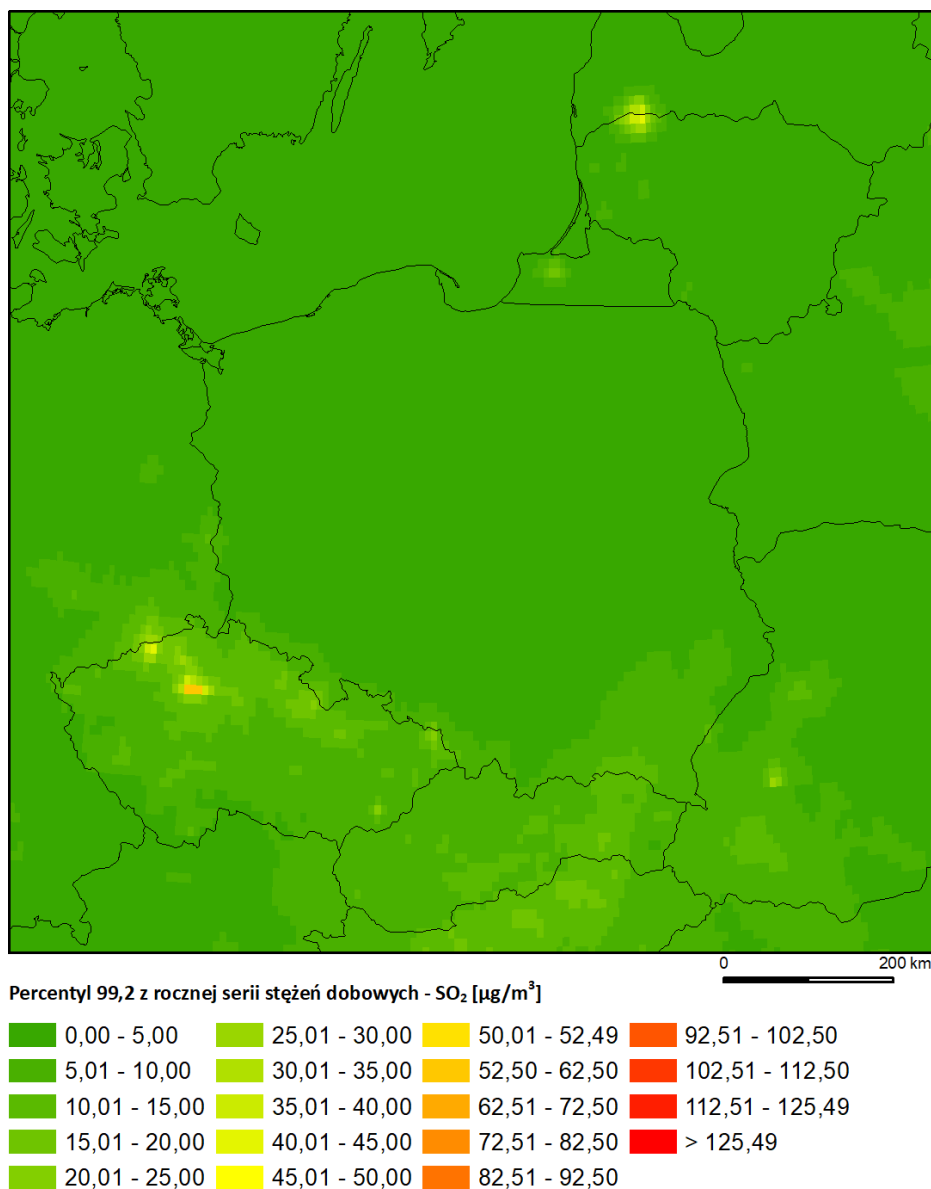
Percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych - PM₁₀ [µg/m³]

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 2020 roku

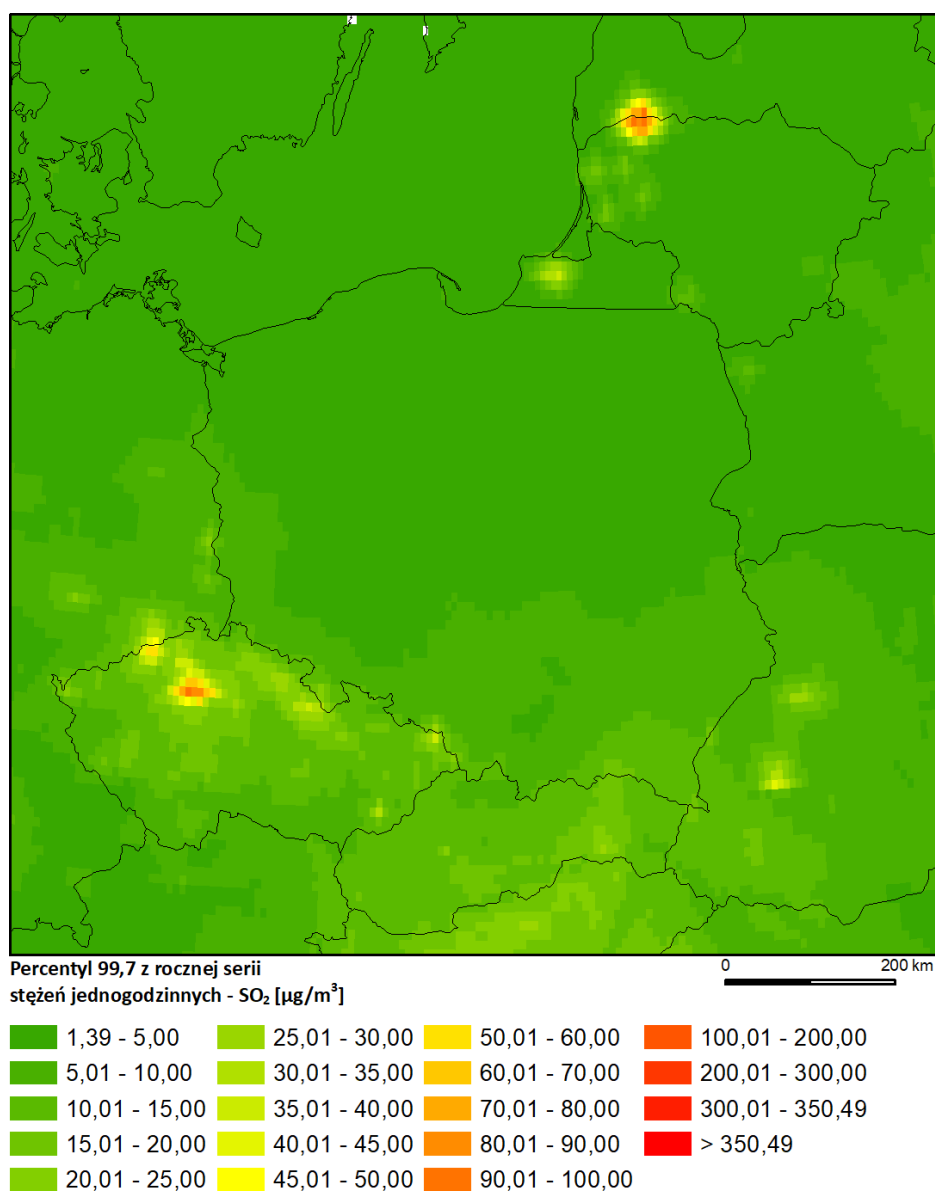
5.2 Dwutlenek siarki SO₂

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 w zakresie od 0 do 5 µg/m³ (**Rysunek 21**). Wyższe wartości percentyla wystąpiły jedynie w południowej i południowo-wschodniej części Polski - do 25 µg/m³.



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 2020 roku

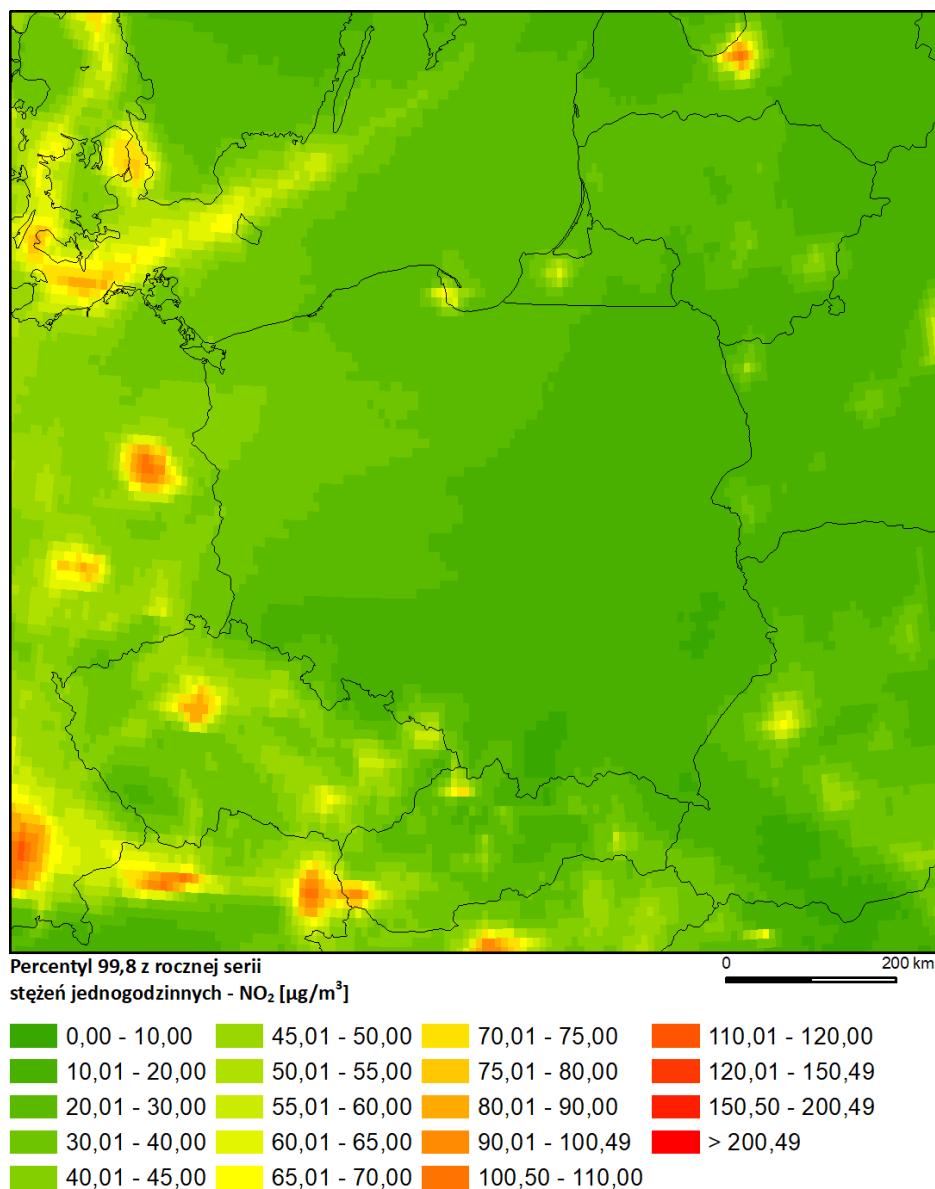
W 2020 roku na przeważającym obszarze Polski wartości udziału źródeł transgranicznych stężeń SO_2 wyrażonych jako percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, wahały się od 1 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 22**). Wyższe stężenia, do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły w południowej i południowo-zachodniej i południowo-wschodniej części Polski. 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 2020 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 20 µg/m³ wystąpiły na wschodzie i południu Polski. Wartości wpływu transgranicznego rosną w kierunku północno-zachodnim. Wyższe wartości, do 70 µg/m³ wystąpiły na obszarach północno zachodnich, Brama Morawskiej oraz na obszarze Trójmiasta. 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.

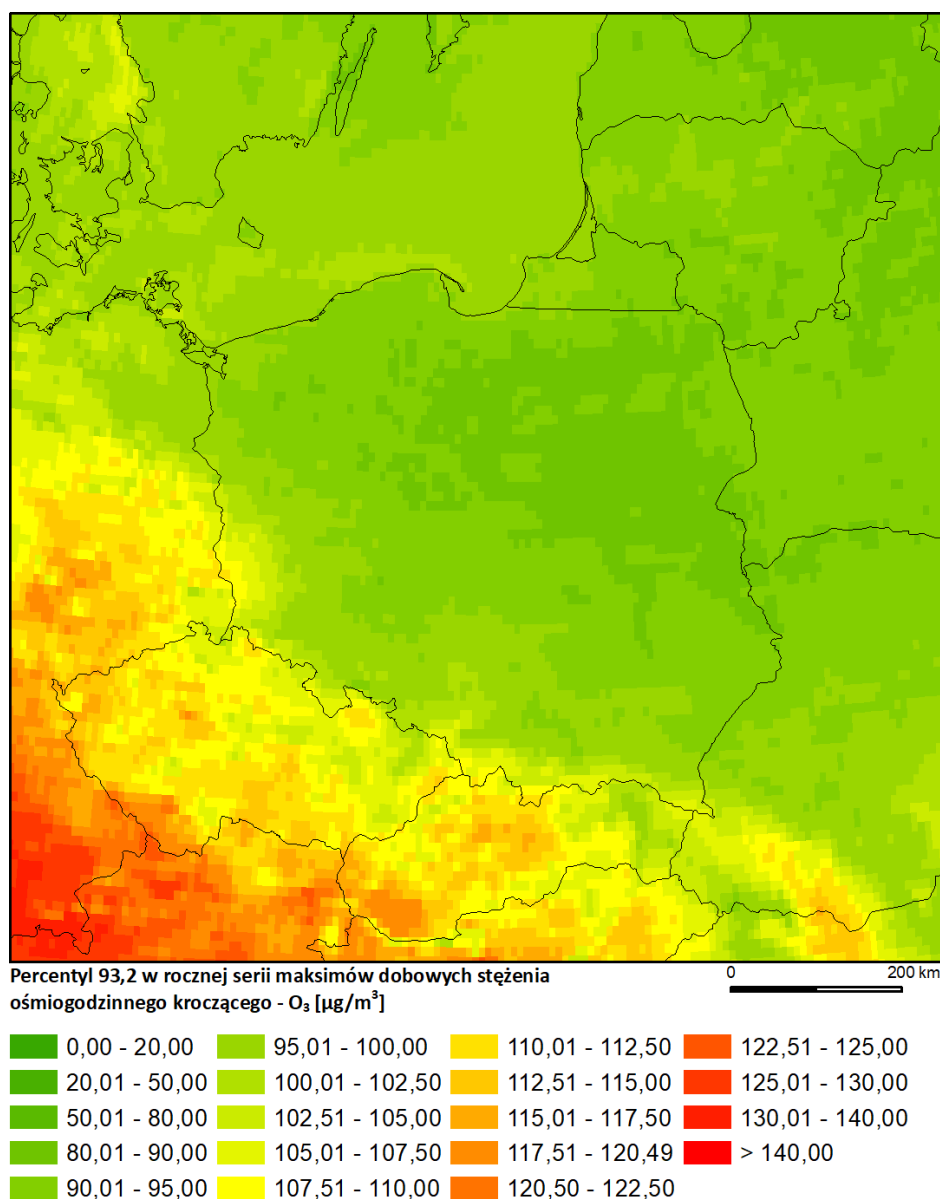


Rysunek 23. Rozkład przestrzenny percentyla 99.8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku azotu NO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2020 roku

5.4 Ozon O₃

W 2020 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w stężeniu ozonu wyrażony 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 północno- wschodniej części Polski oraz na obszarach przy wschodniej granicy kraju wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był najniższy, a wartość percentyla wynosiła do około 80 µg/m³. Wartości udziału źródeł emisji granic kraju rosną w kierunku południowo-zachodnim. W centrum, na północy oraz w południowo-wschodniej Polsce wartości percentyla wahały się od 80 do 100 µg/m³. Najwyższe wartości

percentyla związane z wpływem zanieczyszczenia transgranicznego wystąpiły na południu kraju oraz wzdłuż zachodniej granicy.



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 2020 roku

6. Podsumowanie

W przypadku wpływu transportu transgranicznego na poziom stężeń zanieczyszczeń w Polsce, wielkość procentowa udziału źródeł zagranicznych 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 ciszy atmosferycznych mogą się różnić. Rok 2020 był pod względem warunków meteorologicznych anormalny na tle ostatniego pięciolecia, z wyraźnie wyższymi temperaturami okresu zimowego i chłodnym okresem wiosennym.

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 10 do 60% (średnio 40%). Udział źródeł transgranicznych w występowaniu dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu g/m^3$ wystąpił jedynie we wschodniej części kraju i wahał się w granicach od 60 do 100% (średnio 57%). Miało to związek z napływem aerozoli pochodzenia naturalnego. W pozostałej części kraju przekroczenia dopuszczalnej normy dla wartości $50 \mu g/m^3$ w stężeniach średniodobowych nie wystąpiło. Jest to istotna informacja z punktu widzenia podejścia do problemu redukcji PM_{10} na terenie Polski. Konkluzja wynikająca z przedstawione 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 dobowej wartości dopuszczalnej.

Dla wartości stężeń średniorocznych $PM_{2.5}$ wielkość udziału transgranicznego jest bardzo zbliżona jak dla PM_{10} . Najwyższy wpływ źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż zachodniej i wschodniej granicy kraju, gdzie zawierał się w przedziale 50 - 60%. Natomiast najwyższy

udział źródeł krajowych wystąpił w centrum Polski oraz na terenie województwa śląskiego 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.

6.2 Dwutlenek siarki

udział procentowy wpływu transgranicznego, ze względu na stężenia średnioroczne i w okresie zimowym SO₂, kształtuje się na zbliżonym poziomie – uśredniony dla stref od ok. 2 do około 55% (średnio 23%). 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 8%). 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 NO₂ i NO_x udział transgraniczny uśredniony dla stref wynosi odpowiednio od 5 do 60% (średnio 41%) dla NO₂ i od 2 do 50% (średnio 15%) dla NO_x. Wyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju, w przypadku NO_x głównie wzdłuż południowej i zachodniej granicy. Im dalej od granic państwa, 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 NO₂ i NO_x znaczącym źródłem emisji jest sektor transportu (SNAP 7 i 8 łącznie stanowią około 50% 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 wahał się od 10 do 30 %. Świadczy to o znaczącej transgranicznej wymianie zanieczyszczonych mas powietrza w rejonach przygranicznych oraz 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 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 wystąpił w zachodniej i południowej części kraju na poziomie około 30% ze względu na liczbę dni z przekroczeniami progu $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla najwyższej 8-godzinnej średniej kroczącej w ciągu doby. Natomiast wartość indeksu AOT40 uśredniona dla stref wyniosła około 36%.

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 po usunięciu źródeł krajowych NO_x. 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 południowym-wschodzie 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 PM₁₀ na przeważającym obszarze kraju nie przekroczył $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- W przypadku percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych dwutlenku siarki wartości zawierały się głównie w przedziale od 0 do $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
- Percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dwutlenku siarki w przeważającej części Polski wahał się od 1 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyższe wartości, do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły na południu kraju.
- Wartości percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych dwutlenku azotu na przeważającym obszarze Polski wystąpiły w przedziale od 1 do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Niższe

wartości percentyla wystąpiły w północno- wschodnie części Polski, 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 procesie modelowania nie uwzględniono zmian emisji spowodowanych ograniczeniami gospodarczymi związanymi z pandemią Covid 19 w Polsce i w krajach ościennych. Mogło mieć to wpływ na dokładność modelowania zwłaszcza w odniesieniu do tlenków azotu. Dynamika sektora transportu, odpowiedzialnego w dużym stopniu za poziom stężeń NO_x i NO_2 przy powierzchni ziemi została w znacznym stopniu zahamowana w 2020 r. zwłaszcza w okresach ograniczeń gospodarczych. Biorąc jednakże pod uwagę fakt że podobne ograniczenia były wprowadzane we wszystkich państwach europejskich, należy uznać że udział względny napływu został oszacowanym prawidłowo.

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, kreśloną są co 3 kwadraty siatki.....	7
Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2018.....	8
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Europy; EMEP 2018	9
Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Polski; EMEP 2018	10
Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Europy; EMEP 2018.....	10
Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Polski; EMEP 2018	11
Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM ₁₀ na obszarze Polski w 2020 roku	17
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 2020 roku.	18
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM _{2.5} na obszarze Polski w 2020 roku.....	19
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2020 roku	21
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2020	22
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 2020 roku	23
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 2020 roku .	24
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2020 roku.....	26

Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej wartości stężeń NO_2 powyżej $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2020 roku	27
Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2020 roku	28
Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2020 roku	30
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2020 roku	31
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2020 roku	32
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 2020 roku	34
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 2020 roku	35
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 2020 roku	36
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 2020 roku	38
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 2020 roku	39

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	12
Tabela 3. Zestawienie parametrów	14