

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2021



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Analiza wykonana w ramach zadań ustawowych
Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2021 poz. 1973)



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

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

Warszawa 2022

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



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Data publikacji: Czerwiec 2022

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	7
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	21
4.4 Dwutlenek azotu NO_2	26
4.5 Tlenki azotu NO_x	29
4.6 Ozon O_3	30
4.7 Benzo(a)piren	33
5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego	34
5.1 Pył PM_{10}	34
5.2 Dwutlenek siarki SO_2	36
5.3 Dwutlenek azotu NO_2	38
5.4 Ozon O_3	40
6. Podsumowanie	42
6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym	42
6.2 Dwutlenek siarki	43
6.3 Tlenki azotu	43
6.4 B[a]P	43
6.5 Ozon	43
6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych	44
Spis rysunków	46
Spis tabel	47

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. 2021 poz. 1973) stanowi metodę uzupełniającą w stosunku do pomiarów zanieczyszczeń powietrza, a w szczególnych warunkach je zastępującą.

Realizacja modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce, zgodnie z zapisami Ustawy Prawo Ochrony Środowiska (art. 88 ust. 6 ustawy POŚ), została od roku 2018 powierzona Instytutowi Ochrony Środowiska – Państwowemu Instytutowi Badawczemu. Zakres przedstawionych w raporcie wyników modelowania jest określony Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 13 listopada 2020 r. w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2020 poz. 2221). 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 2021,
- 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. 2021 poz. 1973). Ponadto, model GEM-AQ wykorzystywany jest w europejskim serwisie Copernicus (CAMS2_40 Copernicus Atmosphere Monitoring Service - Regional Production) oraz w ramach inicjatywy europejskiej FAIRMODE (Forum for Air Quality Modelling in Europe).

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 krótki czas życia nie podlegają 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 osiągane 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, współczynnika wymywania oraz współczynników fotolizy.

Integralną częścią modelu GEM-AQ jest moduł aerozolowy, który pozwala na symulację, przemian fizyko-chemicznych aerozolu atmosferycznego oraz jego interakcji 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 i procesów wewnątrzcząsteczkowych, z uwzględnieniem chemii fazy ciekłej dla związków siarki, jak również sedymentacji oraz suchej i mokrej depozycji. Procesy transportu uwzględniają adwekcję, dyfuzję turbulencyjną oraz głęboką konwekcję.

Rozkład masy reprezentowany jest w 12 przedziałach wielkości cząstek aerozolu opisujących logarytmiczny wzrost promienia cząstek (**Tabela 1**). Modelowane wartości stężeń pyłów PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ są obliczane jako suma odpowiednich frakcji poszczególnych komponentów chemicznych.

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

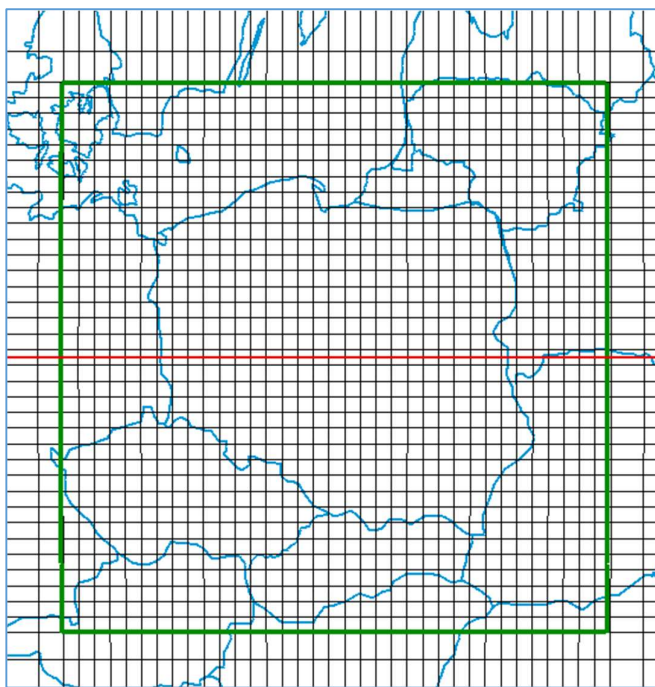
Numer przedziału	Zakres zmienności promienia aerodynamicznego [μm]	Średni promień aerodynamiczny [μm]	Frakcja pyłu
1	0.005 - 0.01	0.0075	Suma (1-8) = $\text{PM}_{2.5}$
2	0.01 - 0.02	0.015	
3	0.02 - 0.04	0.03	
4	0.04 - 0.08	0.06	
5	0.08 - 0.16	0.12	
6	0.16 - 0.32	0.24	
7	0.32 - 0.64	0.48	
8	0.64 - 1.28	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.

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 2021, stanowiące warunek początkowy, pobrane z Kanadyjskiego Centrum Meteorologicznego (Canadian Meteorological Centre - CMC). Warunki początkowe stężeń modelowanych zanieczyszczeń dla 1 stycznia 2021 pochodzą z Serwisu Obserwacji Atmosfery Copernicus.



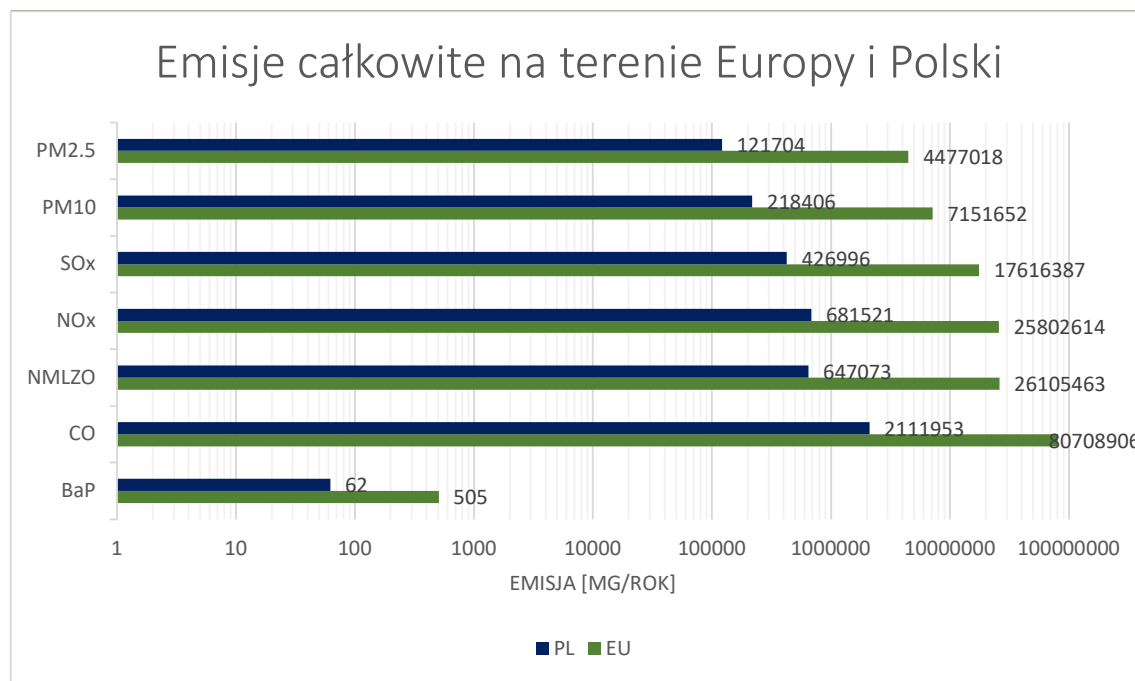
Rysunek 1. Konfiguracja siatki globalnej o zmiennej rozdzielczości: zielony kwadrat obejmuje obszar domeny obliczeniowej o stałej rozdzielczości 10 km, czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, kreślone są co 3 kwadraty siatki

1.3 Dane emisyjne

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2021 roku wykonano z wykorzystaniem aktualnej bazy emisji EMEP (2019) dla Europy, w tym Polski,

tworzonej w oparciu o dane raportowane przez kraje członkowskie w ramach Konwencji LRTAP. Pozwala to na zachowanie spójności oszacowania wielkości ładunku emisji w poszczególnych krajach, a w konsekwencji uniknięcia niedoszacowania lub przeszacowania transportu transgranicznego. Baza danych EMEP jest udostępniana w rozdzielczości $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (ok. 10 km)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 2,6% (od 2,4% w przypadku SO₂ do 3,1% dla PM₁₀). W przypadku B[a]P, udział emisji z terenu Polski stanowi aż 12,3% 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 2019

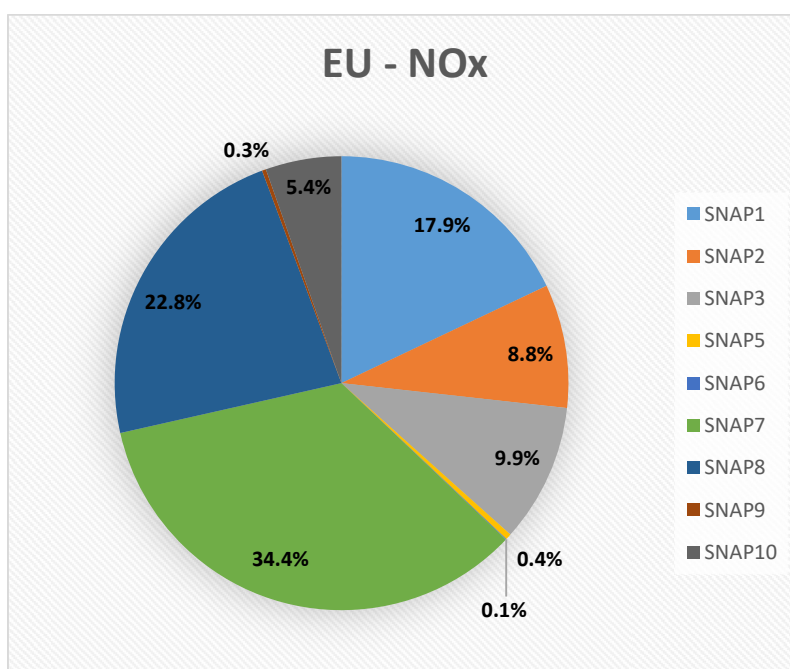
Dane emisyjne udostępniane są przez EMEP w podziale na kategorie źródeł emisji GNFR. Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń dane te zostały zreklasyfikowane na kategorie źródeł

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

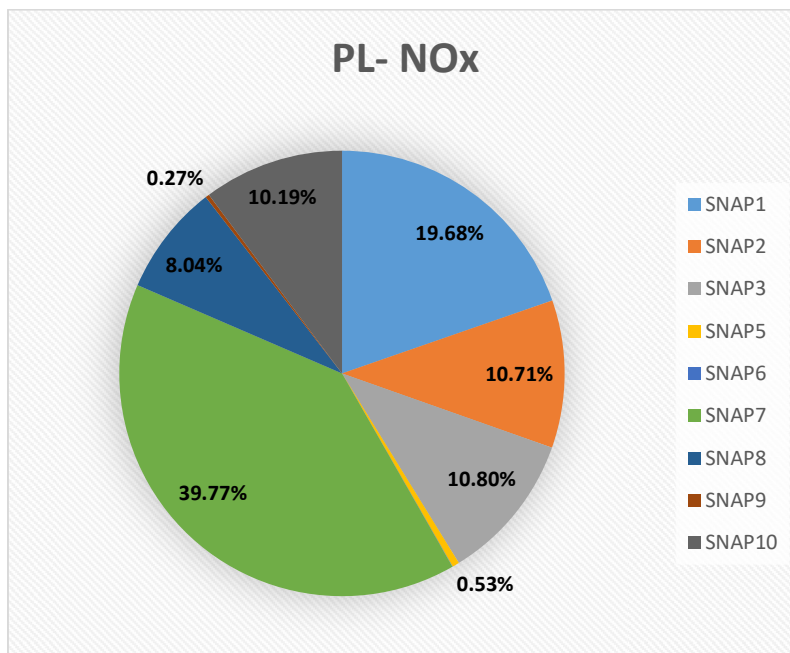
emisji SNAP. Poniżej przedstawiono porównanie udziału poszczególnych źródeł w emisji PM₁₀ i NO_x na terenie Polski i Europy.

W przypadku emisji NO_x (**Rysunek 3** i **Rysunek 4**) największa część emisji pochodzi z transportu drogowego (SNAP7) i jest to odpowiednio 34,4% dla Europy oraz 39,8% 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 większości sektorów udział poszczególnych SNAP w Polsce jest podobny jak na terenie Europy, wyjątkiem jest SNAP8 (EU - 22,8%, PL - 8%) i SNAP10 (EU - 5,4%, PL - 10,2%).

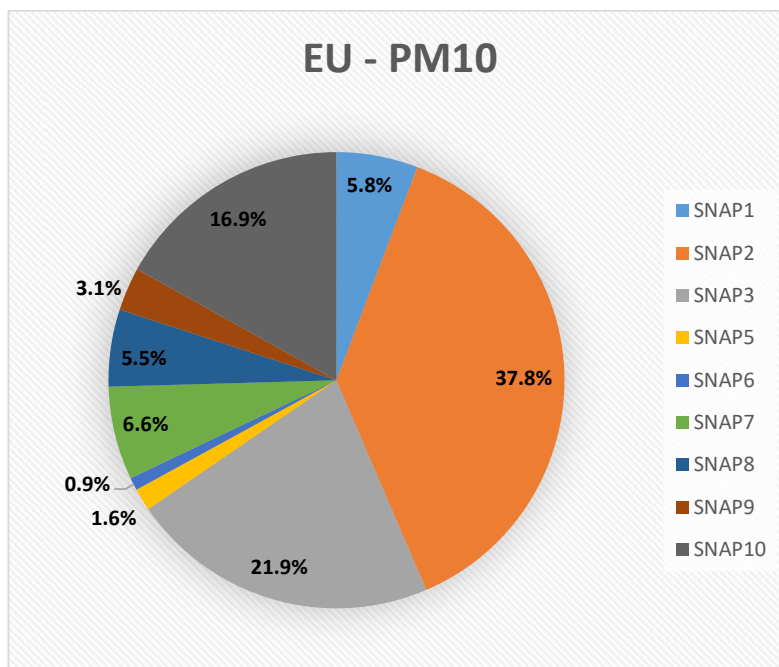
Struktura źródeł emisji PM₁₀ jest inna niż w przypadku NO_x. Zanieczyszczenie to zarówno w Europie jak i w Polsce pochodzi w dużej części z sektora komunalno-bytowego (SNAP2) i jest to odpowiednio 37,8% oraz 40,2%. Tak wysoki udział kategorii SNAP2 w emisjach PM₁₀, stanowi duży problem na terenie Polski. Pozostałymi kategoriami o znaczącym udziale są: procesy spalania w przemyśle (SNAP3) oraz rolnictwo (SNAP10).



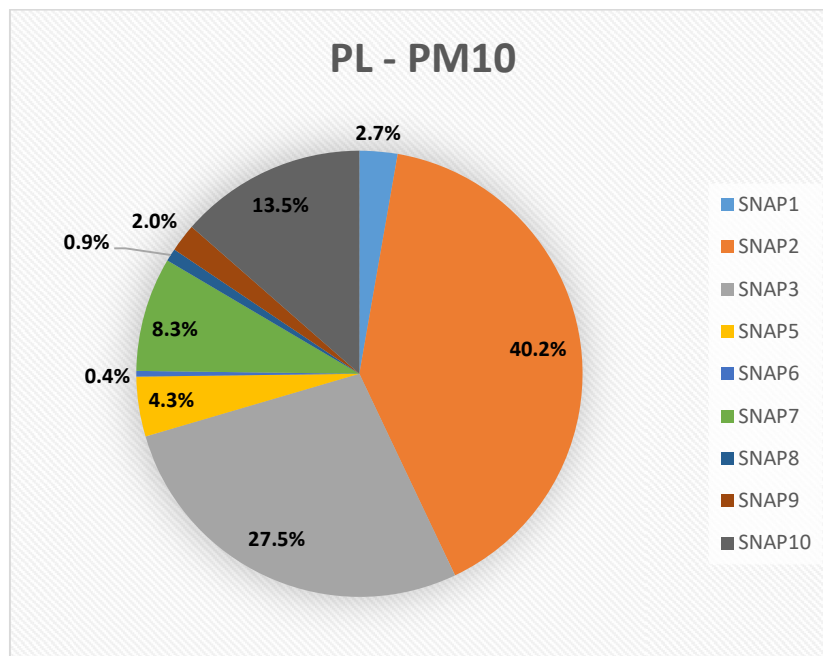
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Europy; EMEP 2019



Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Polski; EMEP 2019



Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM₁₀ na terenie Europy; EMEP 2019



Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM₁₀ na terenie Polski; EMEP 2019

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 stacji niespełniających warunków ewaluacji Delta Tool. Niepewność modelowania interpretuje się jako mającą zastosowanie w zakresie stężeń zbliżonych do odpowiedniej wartości dopuszczalnej (lub wartości docelowej w przypadku ozonu). Pomiary stałe, które należy wybrać dla porównania z wynikami modelowania, muszą być reprezentatywne dla skali objętej modelem”. Ze względu na ten warunek w analizach sprawdzalności pominięto stacje komunikacyjne, niereprezentatywne w przypadku rozdzielczości siatki obliczeniowej ok. 10km.

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

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	86,7%
2	Tlenki azotu (NO _x) – średnia roczna	70,6%
3	Ozon (O ₃) – 8hmax	100,0%
4	Pył zawieszony PM ₁₀ – średnia roczna	97,6%
5	Pył zawieszony PM _{2.5} – średnia roczna	94,6%
6	Dwutlenek siarki (SO ₂) – średnia roczna	69,6%
7	Benzo(a)piren (B(a)P) – średnia roczna	70,6%

Do szczegółowej ewaluacji wyników modelowania wykorzystano narzędzie DELTA tool w dostępnej wersji (7.0, udostępniona w kwietniu 2022 r.). Analizie poddano wyniki modelowania uzyskane dla symulacji bazowej, dla roku 2021. 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 PM_{2.5}. Sposób obliczania rocznego wskaźnika MQI będzie jest ciągle dyskutowany w

dedykowanych grupach roboczych FAIRMODE, gdyż sprawdzalność rocznych stężeń pyłu z warunkiem zawartym w dyrektywie CAFE została spełniona. Ponadto zauważono problem dla stacji w województwie Śląskim, co znacząco wpływa na wartości wskaźnika jednak nie odzwierciedla w pełni efektywności modelowania. W przypadku sprawdzalności rocznych stężeń NO₂ oraz NO_x nie spełniono warunku zawartego w dyrektywie CAFE. Powodem są dość wysokie przeszacowania na pojedynczych stacjach. Jednak wyniki dla NO₂ uległy znacznej poprawie względem roku poprzedniego. W przypadku ewaluacji modelowanych stężeń SO₂, pomimo dobrych wskaźników statystycznych, kryterium dyrektywy CAFE nie zostało spełnione. Podobnie jak w poprzednim roku powodem takiej sytuacji jest dość wysokie przeszacowanie na pojedynczych stacjach. Natomiast zgodność wyników modelowania z pomiarami dla symulacji bazowej roku 2021, podobnie jak w roku poprzednim, wykazała sprawdzalność niższą od oczekiwanej w przypadku NO₂, NO_x, SO₂ i B(a)P. Powodem może być wykorzystana baza emisji, która może budzić wątpliwości ze względu na powtarzające się w kolejnych latach rozbieżności w niektórych częściach kraju. W celu zobrazowania i ułatwienia podjęcia dalszej analizy problemu, w następnych latach zostanie poprawiony system wizualizacji stacji niespełniających warunków dyrektywy względem ich lokalizacji.

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

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

Pełna analiza z wykorzystaniem narzędzia DELTA tool oraz 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 2021 obliczono parametry statystyczne zgodnie z Załącznikiem nr 4 do Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 13 listopada 2020 r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2020 poz. 2221).

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 4, podającego alternatywne formuły obliczania udziałów, procentowy udział transportu transgranicznego zdefiniowano jako:

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

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

Dla każdej strefy obliczono średni udział procentowy napływu transgranicznego dla poszczególnych zanieczyszczeń. Wartość dla danej strefy jest obliczana jako średnia z oczek siatki, których środek leży w granicach strefy. Wyniki tych obliczeń zawarto w Załączniku 2.

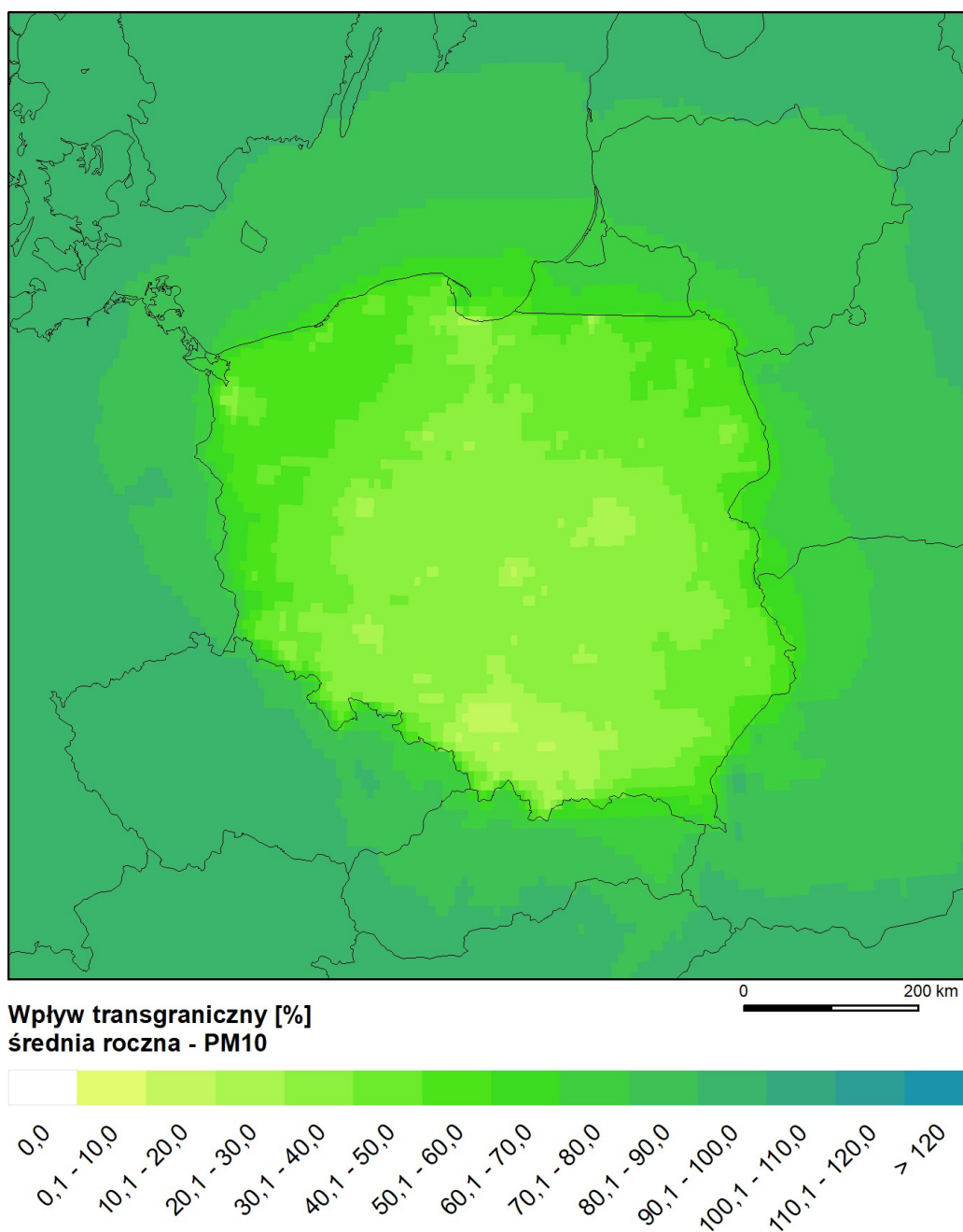
4. Ocena udziału napływu transgranicznego zanieczyszczeń w skali kraju na podstawie wyników modelowania

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 2021.

4.1 Pył PM_{10}

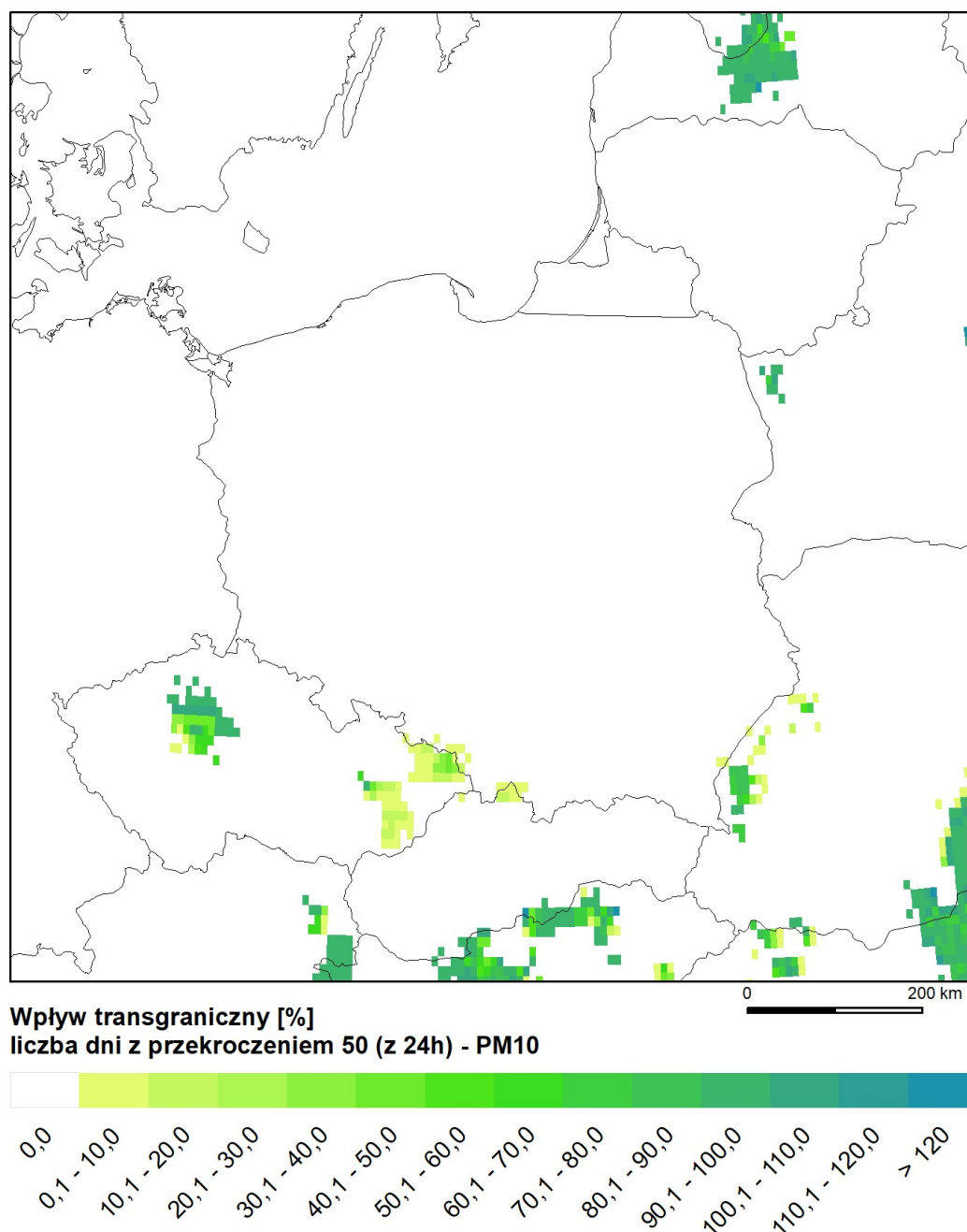
Rysunek 7 i Rysunek 8 przedstawiają rozkłady przestrzenne udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM_{10} oraz w liczbie dni z przekroczeniem poziomu $50 \mu g/m^3$ ze względu na średniodobowe stężenie pyłu PM_{10} .

Udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM_{10} na obszarze Polski wahał się w zakresie od 13 do 80% (**Rysunek 7**). Najniższy wpływ transportu spoza granic kraju (do 30%) wystąpił na obszarach dużych miast, głównie Warszawy, Łodzi, Gdańska, Bydgoszczy, Poznania, Wrocławia, Opola, Kielc, Kalisza oraz na znacznym obszarze Śląska i Małopolski - co świadczy o wysokim udziale źródeł krajowych. Im bliżej granic kraju, tym wpływ transgraniczny rośnie. Na przeważającym obszarze Polski napływ transgraniczny waha się od 30 do 50%. Najwyższe wartości napływu transgranicznego występowały wzdłuż wschodniej i zachodniej granicy – głównie od 50 do 70%, przy czym ze względu na przeważający kierunek wiatru, udział transgraniczny wzdłuż granicy zachodniej był wyższy - lokalnie nawet do 80%.



Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM₁₀ na obszarze Polski w 2021 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 zależne od napływu transgranicznego nie wystąpiło. Wyjątkiem są okolice Raciborza, Jastrzębie Zdroju, Przemyśla, gdzie wpływ transgraniczny wynosi do 10%.

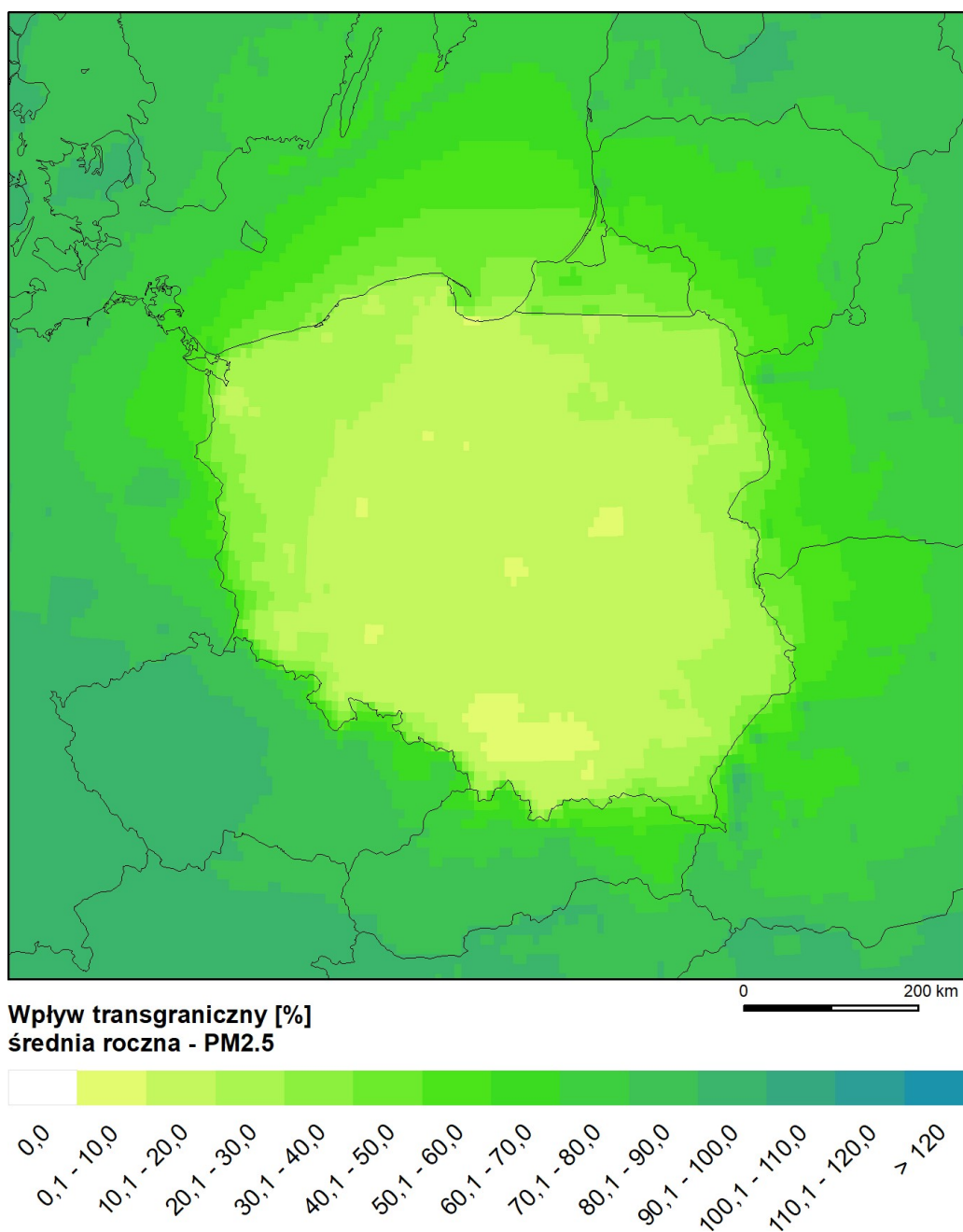


Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu g/m^3$ ze względu na średniodobowe stężenia pyłu PM_{10} na obszarze Polski w 2021 roku

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 2021.

W 2021 roku na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu $PM_{2.5}$ zawierał się w przedziale od 5 do około 70%. Wyższe udziały źródeł transgranicznych występujące wzdłuż wschodniej, zachodniej i południowo-zachodniej granicy Polski, wahały się głównie w przedziale od 30 do 60%, a w kilku lokalizacjach były wyższe od 60%. Na przeważającym obszarze kraju napływ transgraniczny wynosi od 10 do 30%. Najniższy wpływ zanieczyszczeń napływających, do 10% wystąpił na obszarach Śląska i Małopolski oraz w rejonie Warszawy, Łodzi, Wrocławia, Poznania, Bydgoszczy i Trójmiasta.

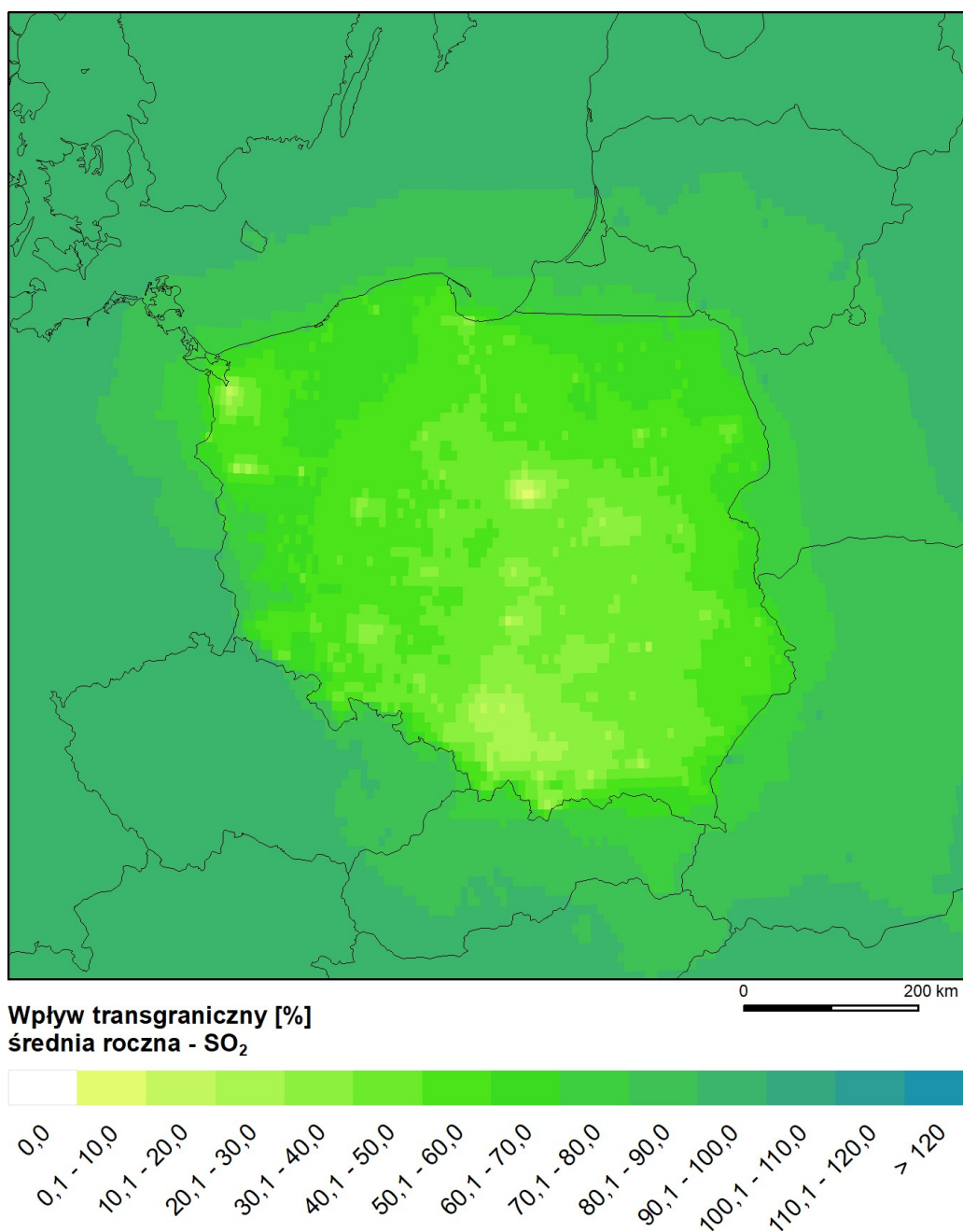


Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM_{2.5} na obszarze Polski w 2021 roku

4.3 Dwutlenek siarki SO₂

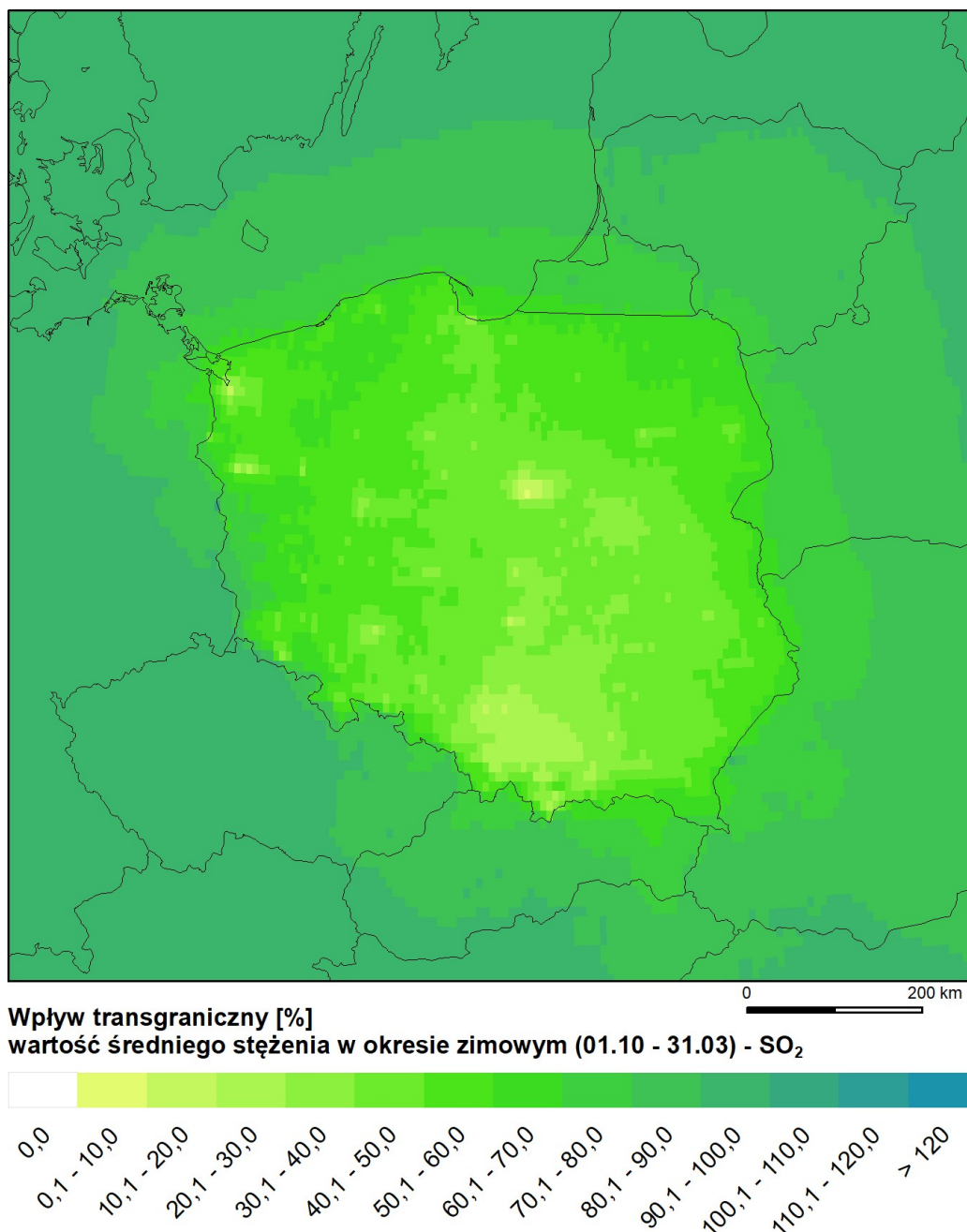
Rysunek 10, Rysunek 11, Rysunek 12 i Rysunek 13 przedstawiają odpowiednio rozkłady przestrzenne procentowego udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu SO₂, średnich stężeniach SO₂ w okresie zimowym, w liczbie dni z przekroczeniem wartości średniodobowej 125 µg/m³ oraz w liczbie godzin z przekroczeniem wartości jednogodzinnej powyżej 350 µg/m³ na obszarze Polski w 2021 roku.

W 2021 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku siarki na obszarze Polski był bardzo zróżnicowany, wahał się od 3 do 90% (**Rysunek 10**). Najwyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic oraz w północno-wschodniej i północno-zachodniej części kraju – głównie od 60 do 70%, jednakże w kilku lokalizacjach na zachodzie kraju wzrasta nawet do 90%. Im bliżej centrum Polski, tym wpływ źródeł transgranicznych był niższy. Na części obszaru województwa małopolskiego i śląskiego oraz lokalnie w pobliżu dużych źródeł emisji udział źródeł transgranicznych wynosił około 10-30%, najniższy wystąpił w okolicach Płocka i Szczecina.



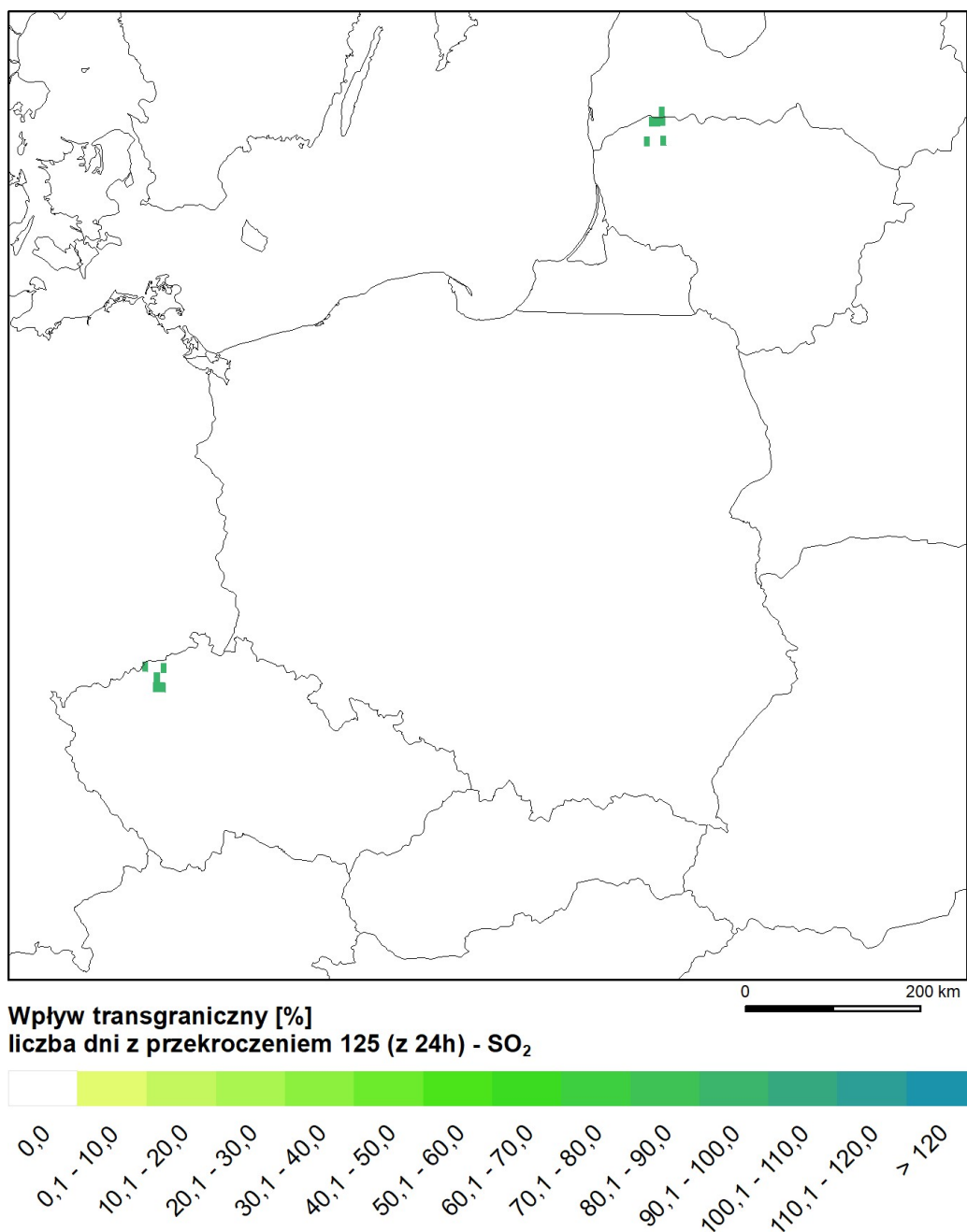
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2021 roku

Udział źródeł transgranicznych w stężeniach dwutlenku siarki w okresie zimowym ma podobny rozkład przestrzenny jak w przypadku wartości średniorocznych (**Rysunek 11**). Wzdłuż granic kraju oraz w północno-wschodniej i północno-zachodniej części Polski udział źródeł transgranicznych wahał się głównie od 60 do 80%, a miejscowo wzrastał do około 90%. Niższy udział źródeł transgranicznych, od 10 do 30% wystąpił na obszarze Śląska i Małopolski oraz w pobliżu dużych źródeł emisji.



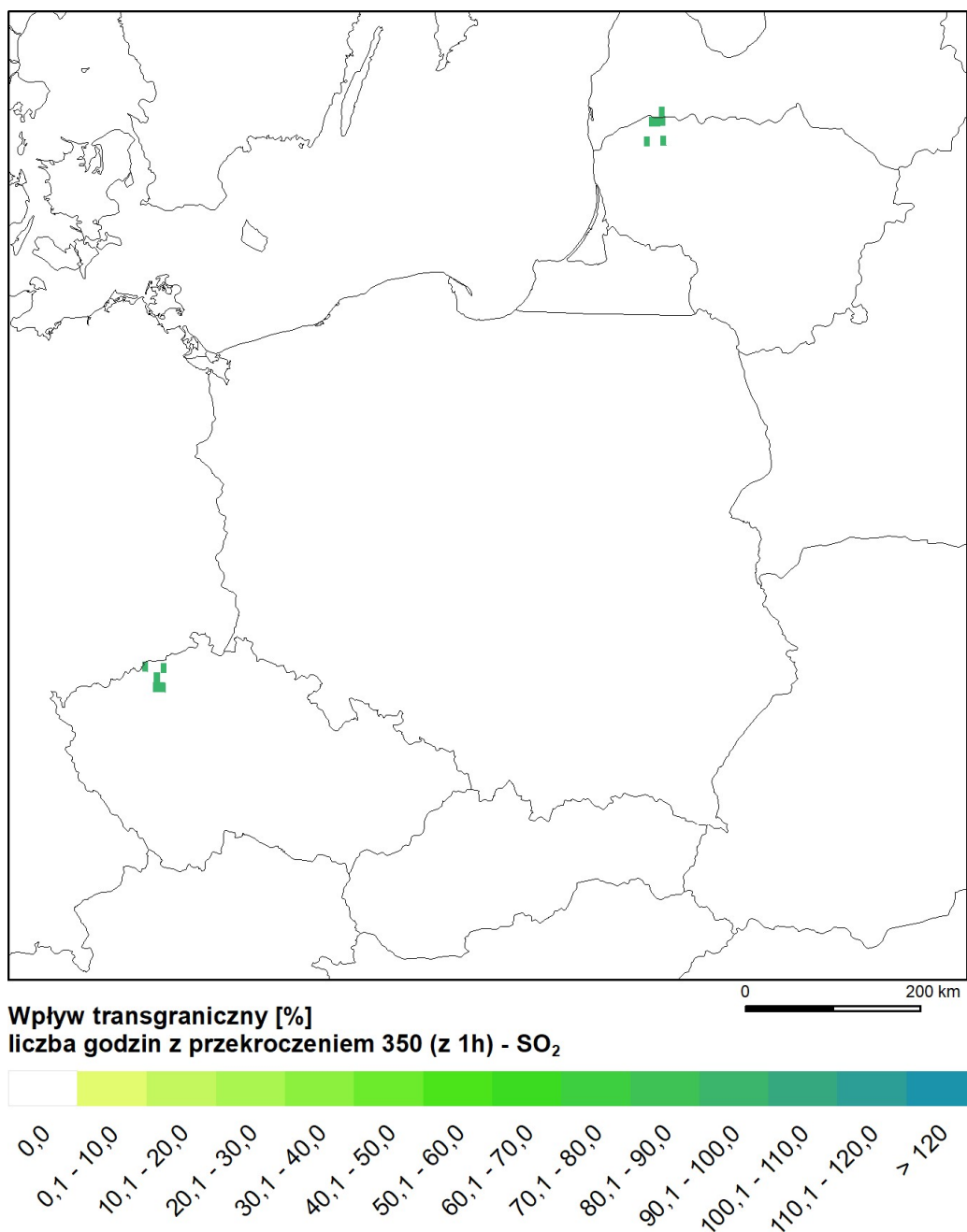
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2021

W 2021 roku na obszarze Polski 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 2021 roku

W 2021 roku na obszarze Polski 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%.

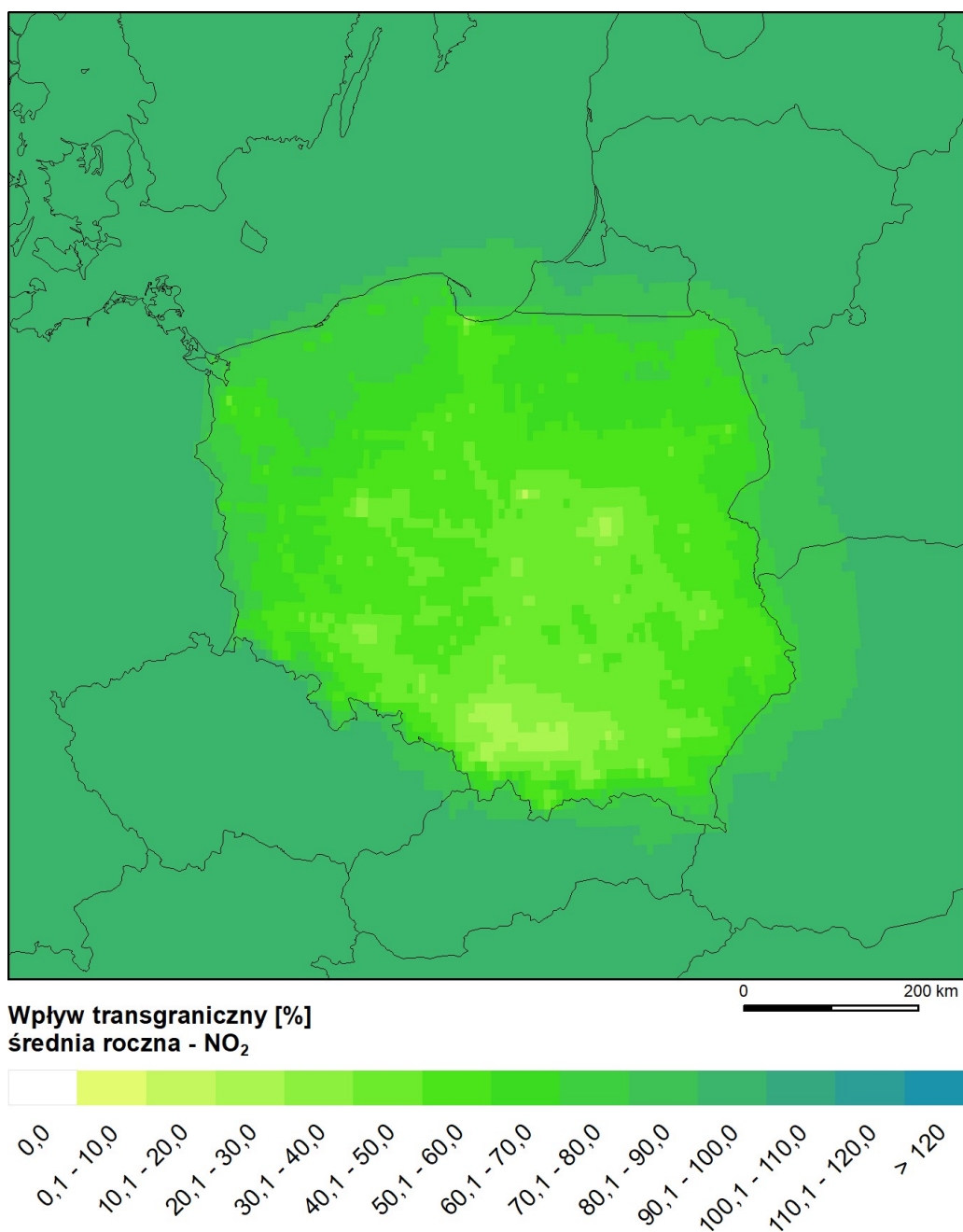


Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2021 roku

4.4 Dwutlenek azotu NO₂

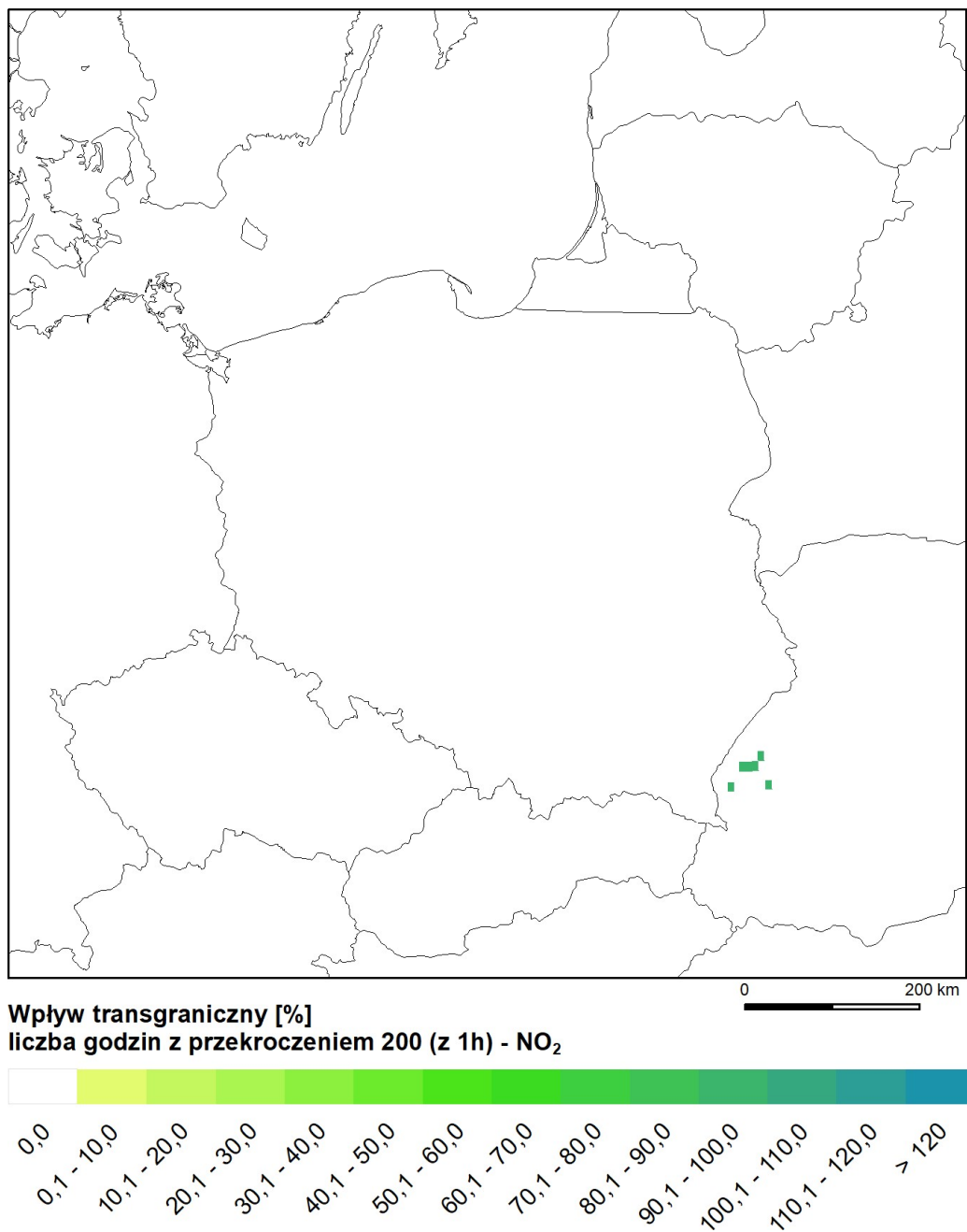
Rysunek 14 i **Rysunek 15** przedstawiają odpowiednio udział procentowy źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu oraz w liczbie godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej powyżej 200 µg/m³ na obszarze Polski w roku 2021.

Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2021 roku był dość zróżnicowany. Najwyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż zachodnich granic kraju - do ponad 80%. Wzdłuż wschodnich i południowych granic kraju oraz na północy Polski wpływ zanieczyszczeń napływających wahał się przeważnie w granicach od 60 do 80%. Na przeważającym obszarze kraju, głównie w centralnej jego części wpływ zanieczyszczeń napływających z zagranicy wahał się przeważnie od 30 do 60%. Najniższy udział zanieczyszczeń transgranicznych, do 30%, wystąpił w rejonie Warszawy, Płocka, Tarnowa, Krakowa, Bielsko-Białej oraz aglomeracji górnośląskiej (**Rysunek 14**).



Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2021 roku

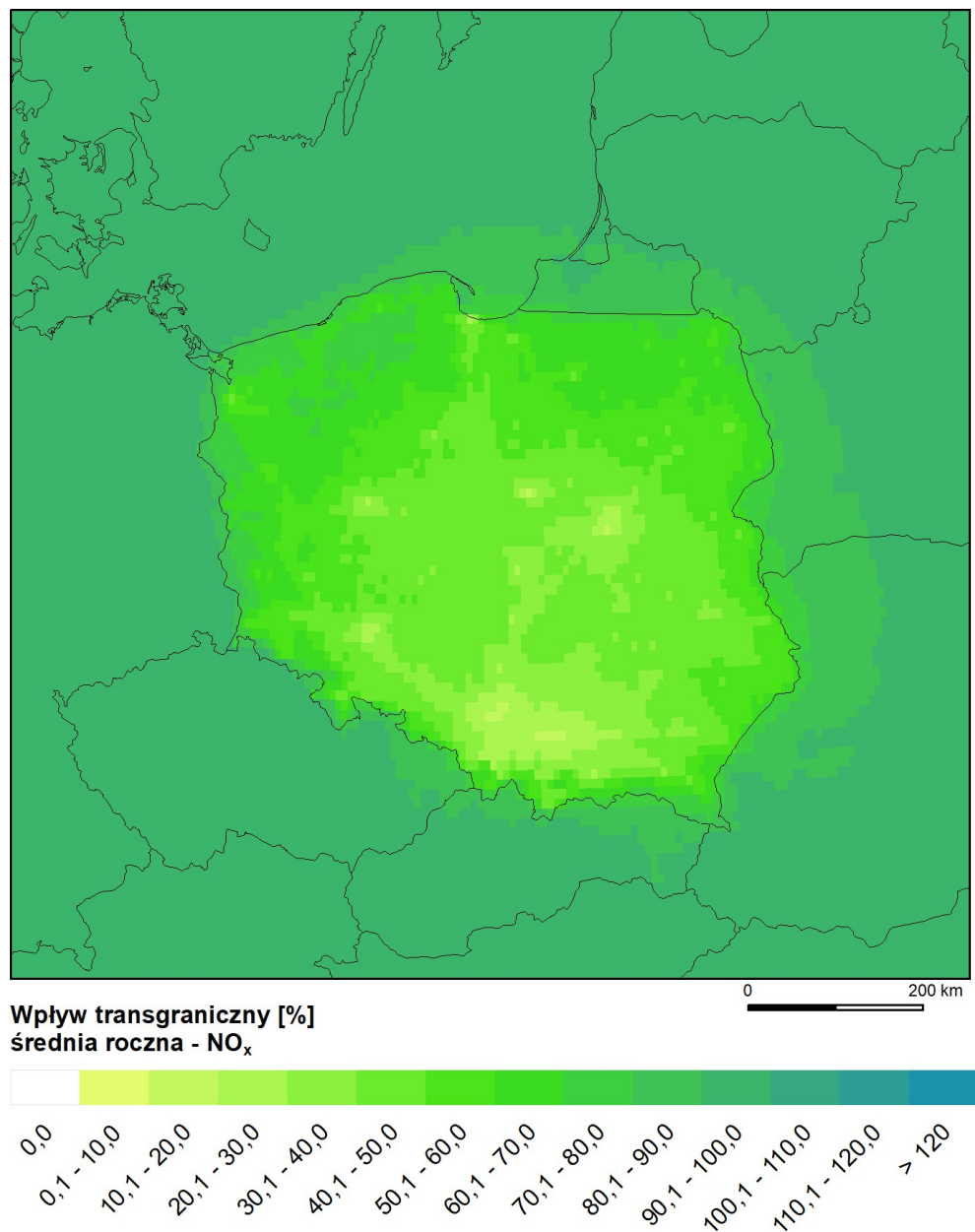
W 2021 roku na obszarze Polski w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych nie wystąpiły przekroczenia poziomu $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla wartości 1 - godzinnej stężeń dwutlenku azotu (**Rysunek 15**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.



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 2021 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 2021 roku. Najniższy wpływ źródeł transgranicznych, do 30%, wystąpił na znacznym obszarze Śląska i Małopolski oraz w okolicach Trójmiasta, Płocka, Warszawy, Poznania, Łodzi, Wrocławia i Tarnowa. Na przeważającym obszarze Polski wpływ zanieczyszczeń napływających wahał się głównie od 30 do 60%. Im bliżej granic kraju, tym wpływ zanieczyszczeń napływających był wyższy, szczególnie na zachodzie i północnym zachodzie Polski, nawet do 90%.



Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2021 roku

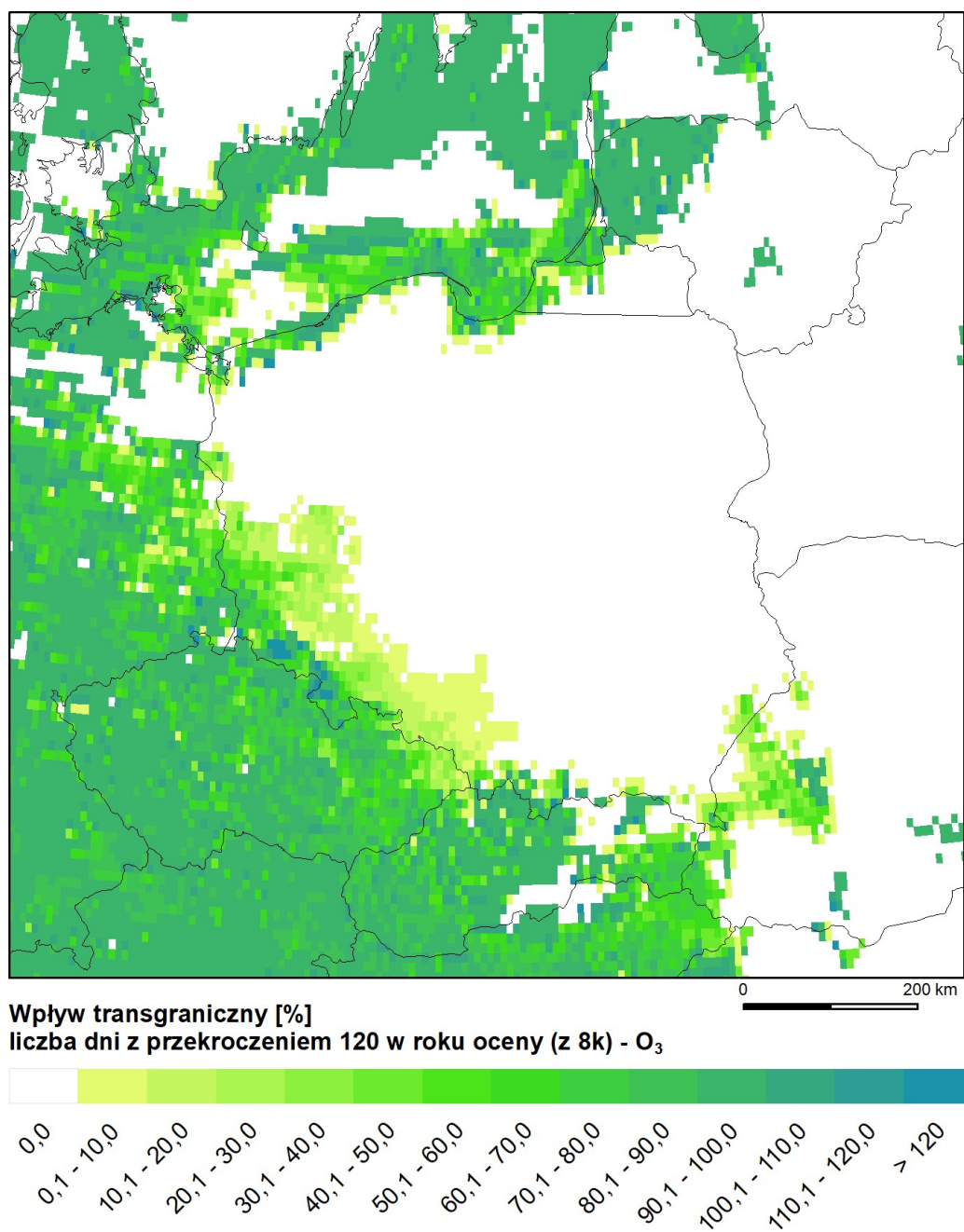
4.6 Ozon O₃

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 2021.

W 2021 roku rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w kształtowaniu liczby dni, z najwyższą 8-godziną średnią krocząca stężeń ozonu większą od 120 µg/m³ był mało zróżnicowany (**Rysunek 17**). Brak wpływu źródeł transgranicznych, oznaczający brak wystąpienia dni z przekroczeniem progu 120 µg/m³ w wyniku oddziaływania wyłącznie emisji spoza granic kraju, wystąpił na przeważającym obszarze kraju. Wpływ zanieczyszczeń transgranicznych zaznaczał się przede wszystkim na krańcach północnych oraz na południu i zachodzie Polski, gdzie miejscowo sięgał nawet 100%. Udział źródeł transgranicznych powyżej 100% wystąpił lokalnie na krańcach południowych i północnych 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.

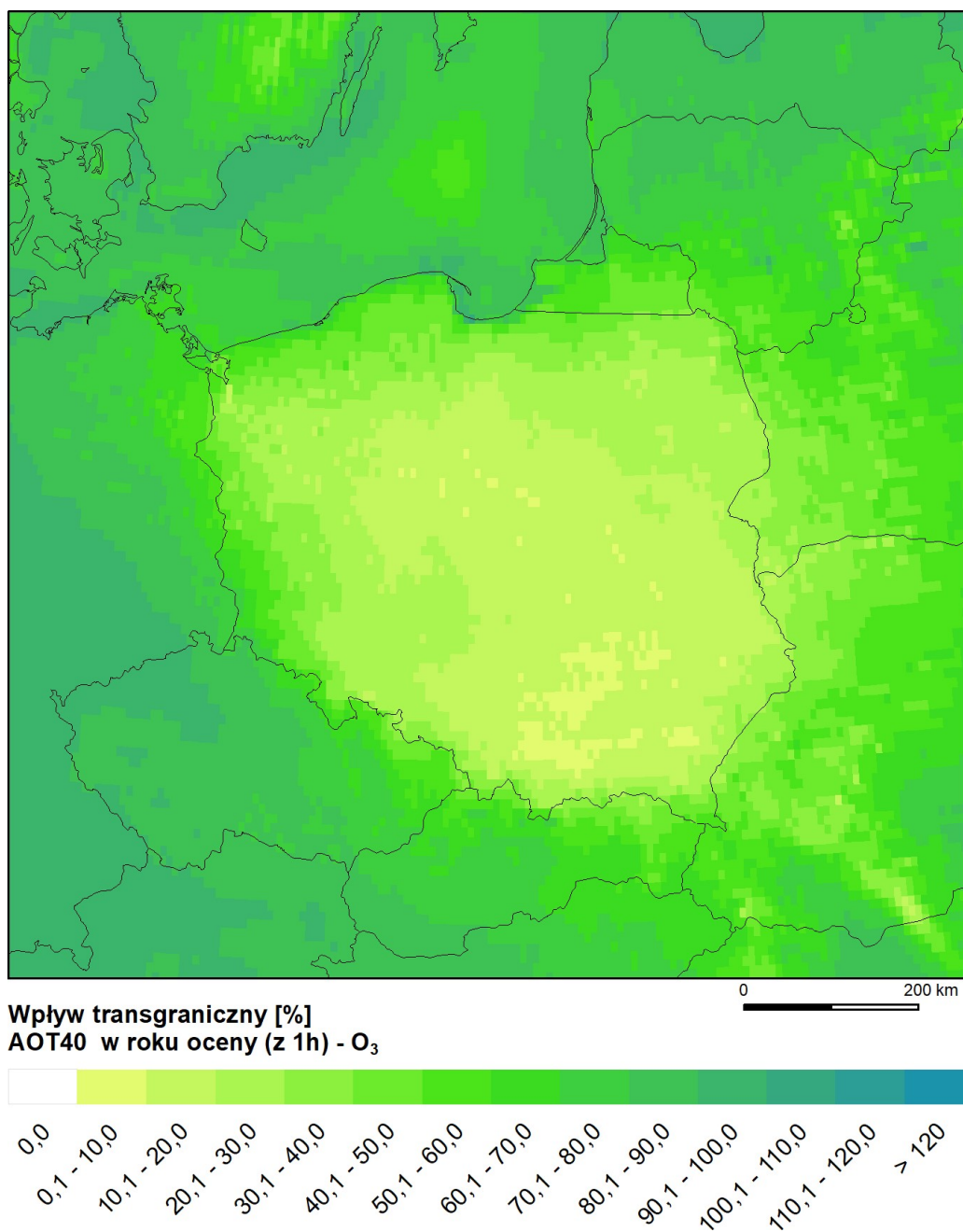
² Wskaźnik ten, obliczany na podstawie stężeń 1-godzinnych, definiowany jest jako zakumulowana ekspozycja na stężenia większe niż 40 ppbv (ok. 80 µg/m³) w okresie od 1 maja do 31 lipca, w godzinach od 8:00 do 20:00 czasu lokalnego:

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



Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężenie ozonu przekraczała 120 µg/m³ na obszarze Polski w 2021 roku

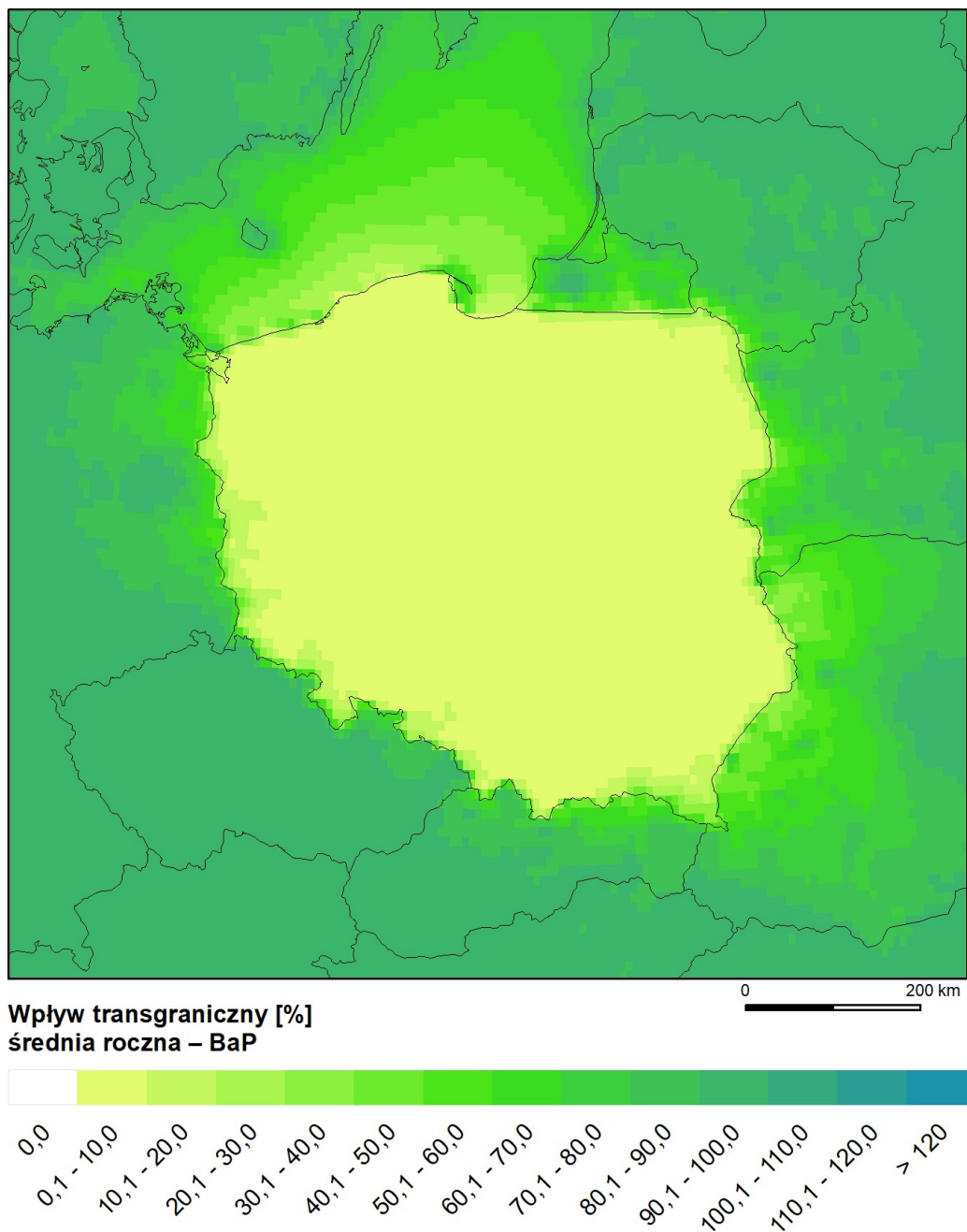
W 2021 roku, udział procentowy źródeł transgranicznych w kształtowaniu się wartości wskaźnika AOT40 na obszarze Polski wykazuje znaczne zróżnicowanie przestrzenne (**Rysunek 18**). Najwyższy udział zanieczyszczeń napływających spoza kraju wystąpił na północy Polski oraz wzdłuż zachodniej granicy – od 50 do ponad 70%. Na przeważającym obszarze kraju udział zanieczyszczeń napływających wynosił od 10 do 30%. Najniższe wartości udziału zanieczyszczeń transgranicznych wystąpiły lokalnie w centrum kraju, wzdłuż doliny Wisły oraz na znacznym terenie Małopolski- poniżej 10%.



Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2021 roku

4.7 Benzo(a)piren

Rysunek 19 przedstawia rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2021 roku. Na przeważającym obszarze Polski udział zanieczyszczeń napływających był niższy niż 10%, co świadczy o przeważającym udziale emisji krajowej. Wyższy udział, do 70% wystąpił miejscowo wzdłuż południowej i zachodniej granicy kraju.



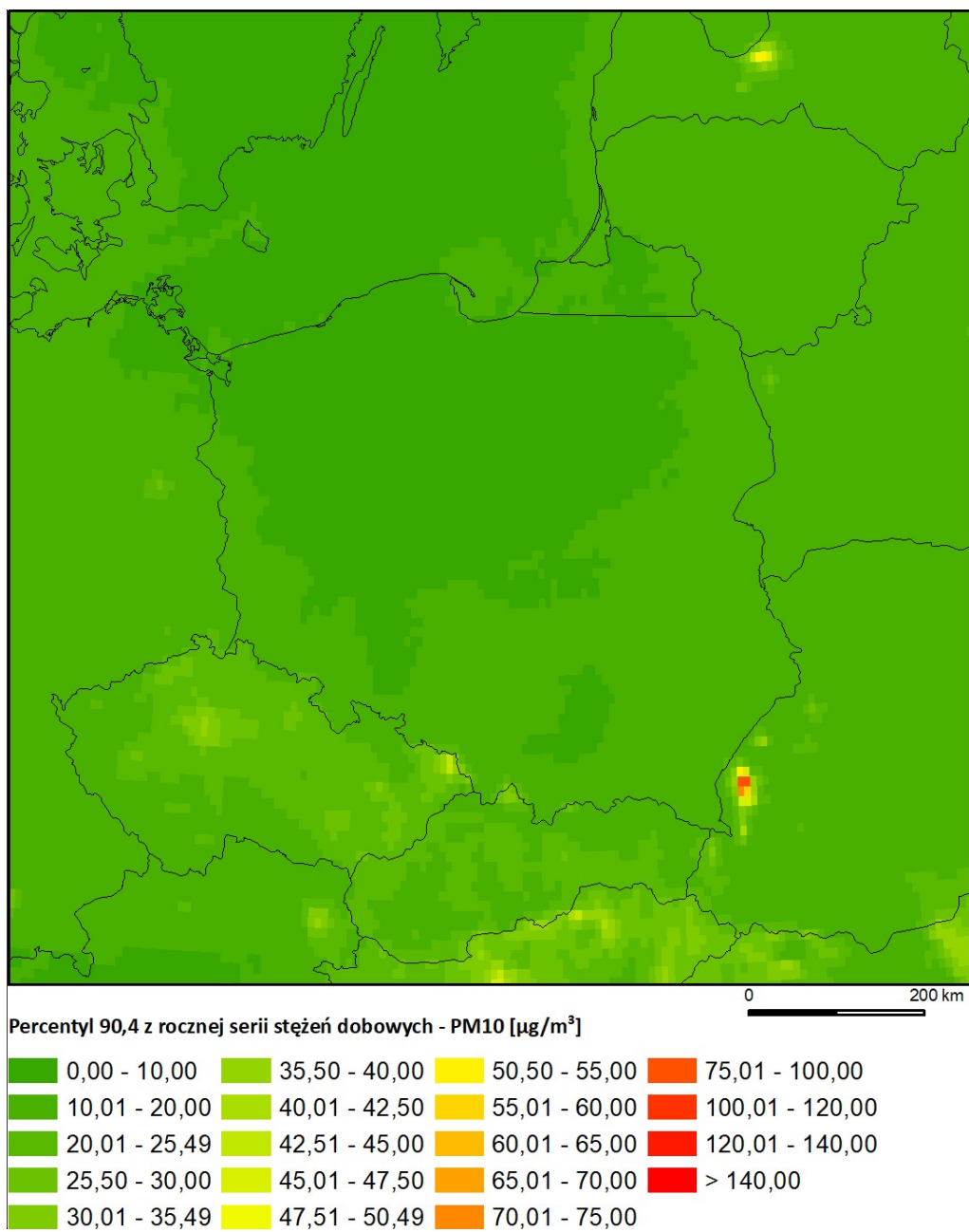
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2021 roku

5. Ocena poziomu ekspozycji na skutek napływu transgranicznego

Zgodnie z Załącznikiem 4 Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 13 listopada 2020 r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2020 poz. 2221) 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 PM_{10}

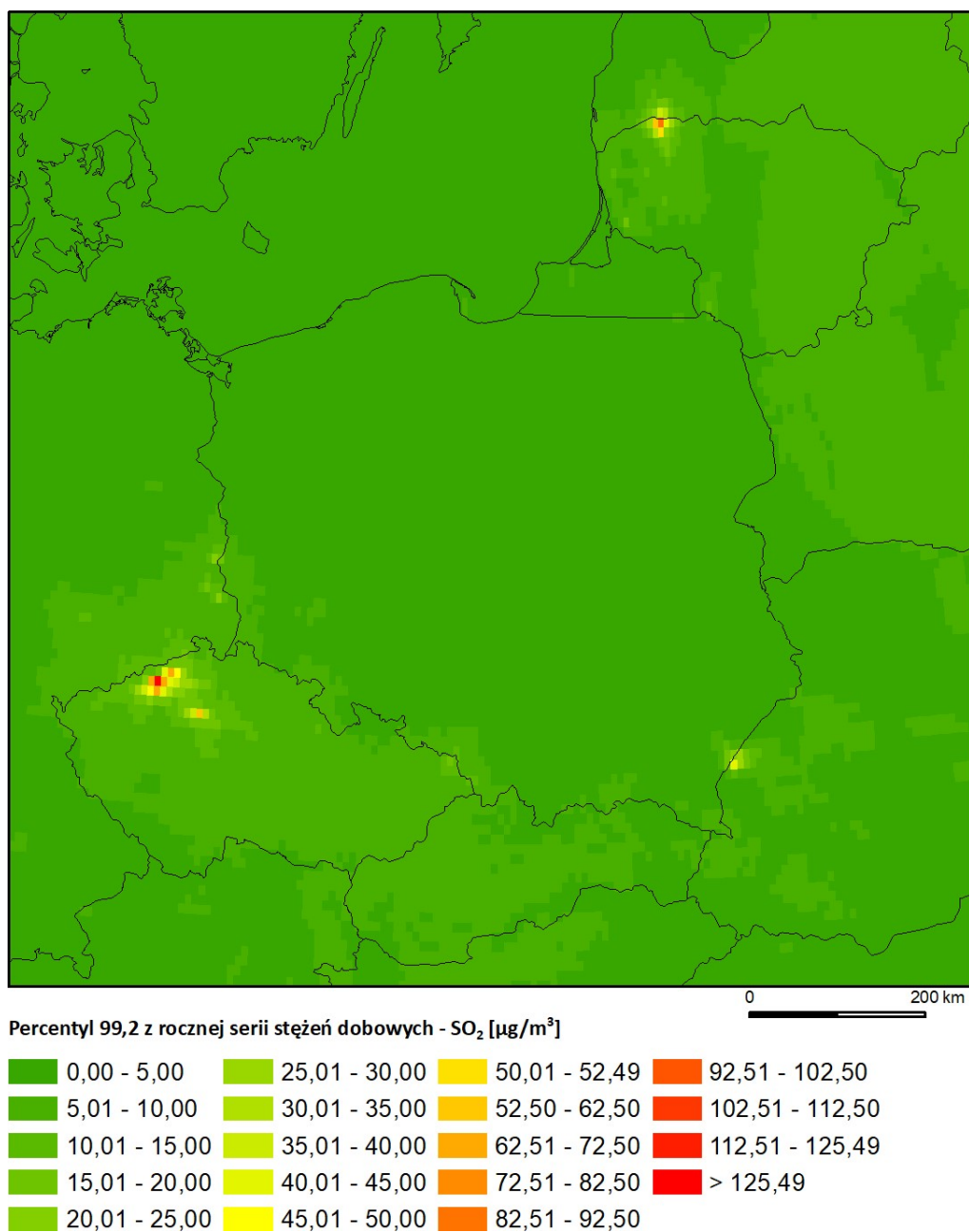
Na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w stężeniu pyłu PM_{10} wyrażonego jako percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych z obszaru Polski, na północy i w centrum kraju wykazywał wartości w poniżej $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 20**). Na południu, wschodzie i południowym zachodzie Polski udział zanieczyszczeń transgranicznych był wyższy, między 10 a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast w rejonie Bramy Morawskiej wzrósł do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W 2021 roku na obszarze całej Polski na skutek wpływu zanieczyszczeń transgranicznych nigdzie nie nastąpiło przekroczenie poziomu $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



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 2021 roku

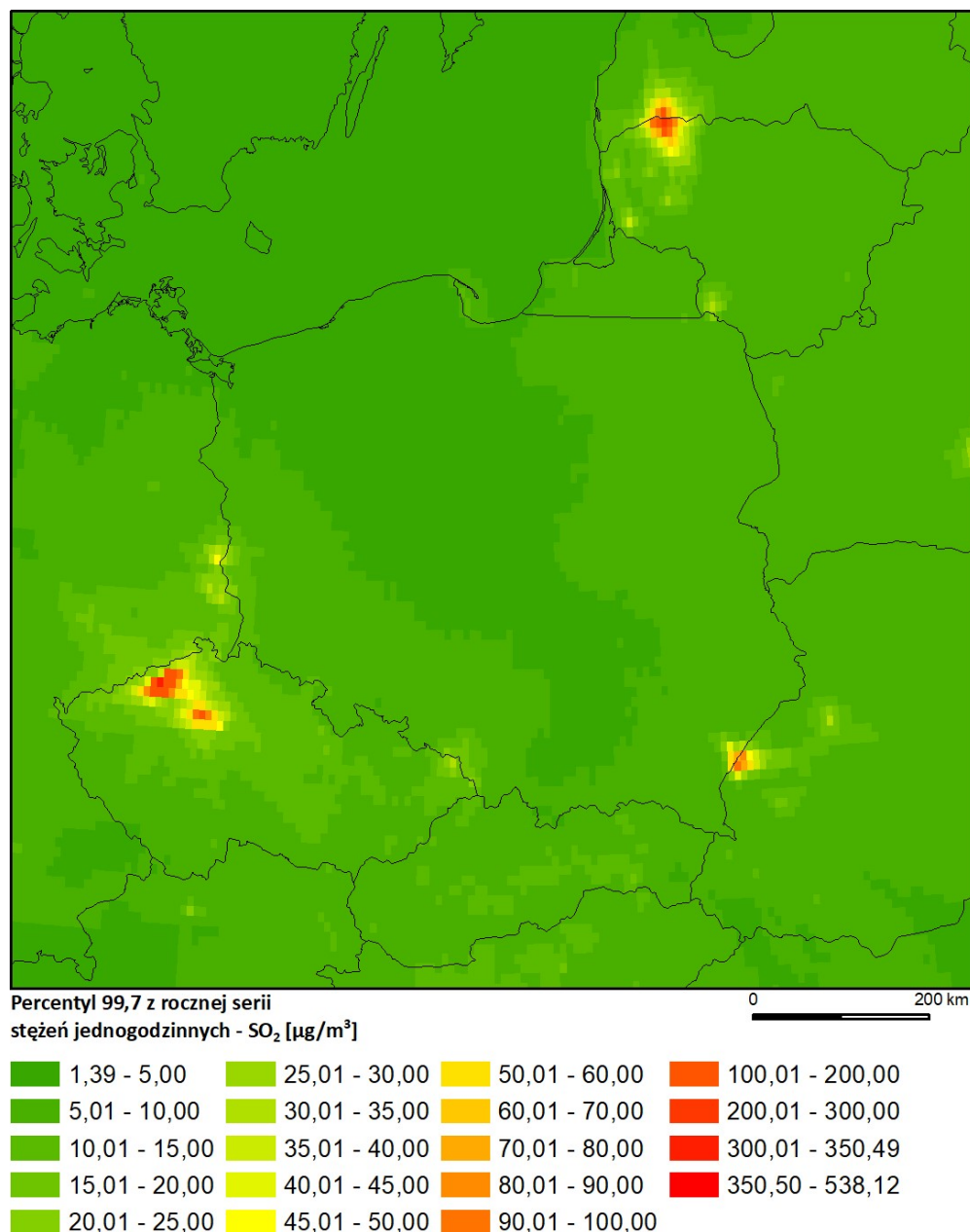
5.2 Dwutlenek siarki SO₂

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 był niższy od 5 µg/m³ (**Rysunek 21**). Wyższe wartości percentyla wystąpiły jedynie na krańcach południowych i południowo-zachodnich Polski oraz w okolicach Trójmiasta - do 10 µg/m³, natomiast w rejonie Przemysła wartości wzrosły do około 20 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 2021 roku

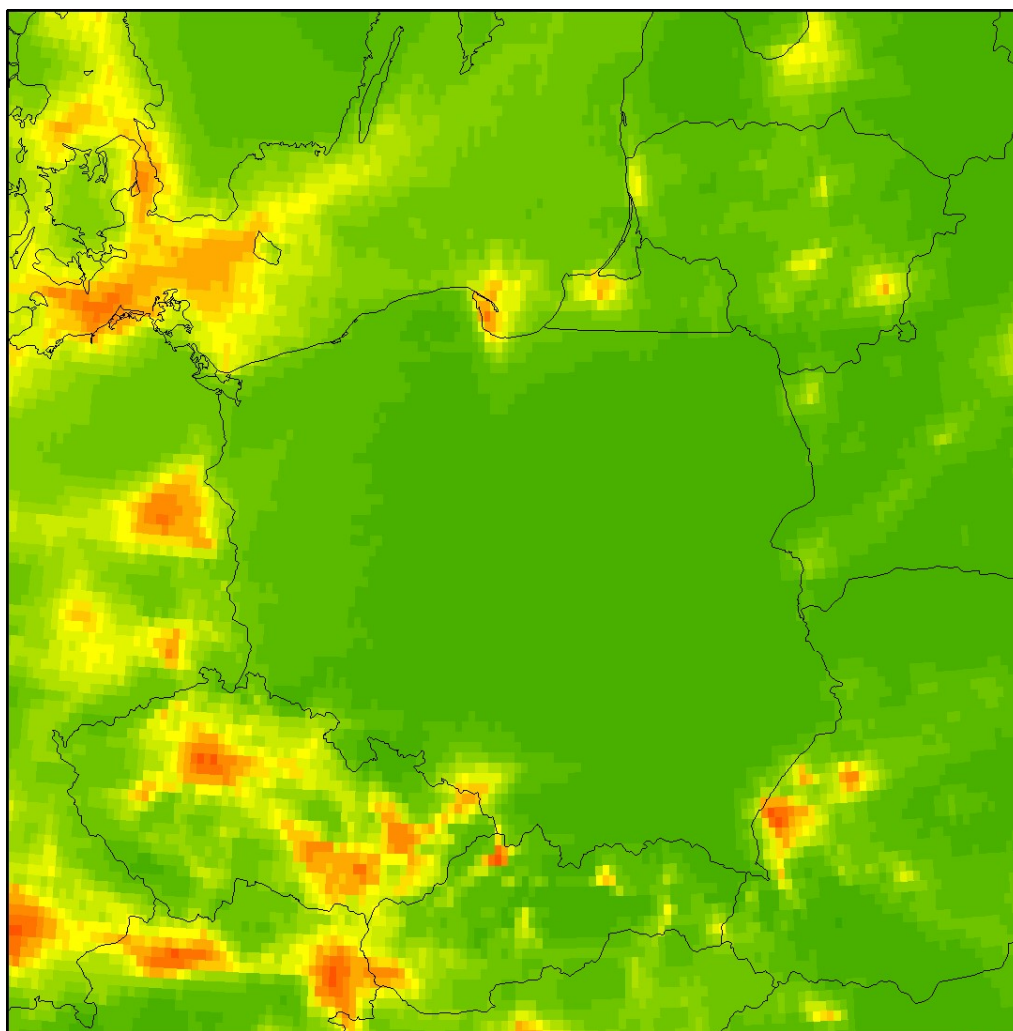
W 2021 roku na przeważającym obszarze Polski wartości udziału źródeł transgranicznych stężeń SO_2 wyrażonych jako percentyl 99,7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, wahały się od 2 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 22**). Niższe stężenia, do $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły częściowo w centrum i w północno-zachodniej części kraju. Na pozostałym obszarze Polski stężenia wahały się od 5 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wyższe wartości wystąpiły w rejonie Trójmiasta, Przemyśla, Bramy Morawskiej i lokalnie wzdłuż południowo-zachodniej granicy kraju.



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 2021 roku

5.3 Dwutlenek azotu NO₂

Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych stężeń NO₂ wyrażonych jako percentyl 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, był mało zróżnicowany na obszarze kraju w 2021 roku (**Rysunek 23**). Najniższe wartości związane z wpływem źródeł transgranicznych, do 20 µg/m³ wystąpiły w centrum, na wschodzie i południu Polski. W zachodniej i północno-zachodniej części kraju wartości wzrosły do 30 µg/m³. Najwyższe stężenia, do około 60 µg/m³ wystąpiły w rejonie Przemyśla, Rybnika i Bramy Morawskiej. Rozkład percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski pokazuje, że dominujący jest transport z kierunków zachodnich, nie tylko ze względu na klimatologicznie przeważające kierunki wiatrów, ale także ze względu na wielkość strumienia emisji raportowanego w krajach ościennych.



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

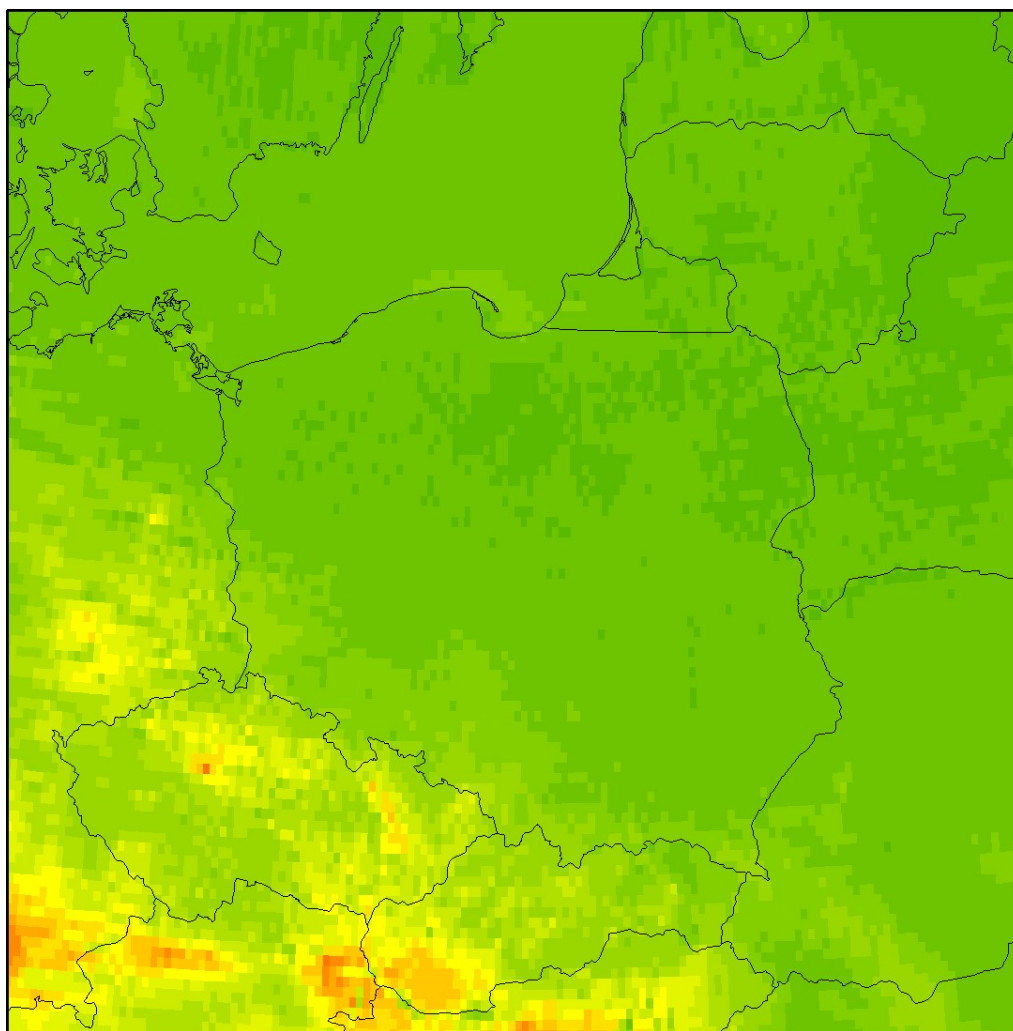
0 200 km

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

Rysunek 23. Rozkład przestrzenny percentyla 99.8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku azotu NO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2021 roku

5.4 Ozon O₃

W 2021 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w stężeniu ozonu wyrażony jako percentyl 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, był dość zróżnicowany (**Rysunek 24**). Na północno- wschodniej części kraju wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był najniższy, a wartość percentyla wynosiła od 70 do 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Najwyższe wartości percentyla związane z wpływem zanieczyszczenia transgranicznego wystąpiły na południu i południowym-zachodzie kraju – do ponad 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



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

0 200 km

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

Rysunek 24. Rozkład przestrzenny percentyla 93.2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu O_3 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2021 roku

6. Podsumowanie

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

6.1 Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym

Dla wartości średniorocznych pyłu PM_{10} udział zanieczyszczeń pochodzących spoza Polski dla stref jest dość wysoki i waha się w granicach od 18 do 55% (średnia w strefach 36%). Udział źródeł transgranicznych w występowaniu dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu g/m^3$ wystąpił jedynie w rejonie Bramy Morawskiej i Przemyśla – 10%. 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 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 średniorocznego 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, wschodniej i południowej granicy kraju, do 70%. Natomiast najwyższy udział źródeł krajowych wystąpił na terenie Śląska i Małopolski oraz w rejonie Warszawy, Łodzi, Wrocławia, Poznania, Bydgoszczy i Trójmiasta. 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 SO_2 , kształtuje się na zbliżonym poziomie – uśredniony dla stref od około 8 do około 65% (średnio 45%). Świadczy to o przeważającym udziale źródeł krajowych i dużej roli struktury emisji na terenie kraju (np. udział transgraniczny w rejonie Płocka i Szczecina na poziomie niższym niż 10%). Udział procentowy wpływu źródeł transgranicznych w odniesieniu do średniej rocznej oraz średniej w okresie zimowym dwutlenku siarki ma również zbliżony rozkład przestrzenny. Najwyższe wpływy źródeł napływających występowały wzdłuż granic kraju. W na obszarach uprzemysłowionych i większych miast udział źródeł napływających jest niski - 10-30%.

6.3 Tlenki azotu

W przypadku średniej rocznej NO_2 i NO_x udział transgraniczny uśredniony dla stref wynosi odpowiednio od 22 do 73% (średnio 50%) dla NO_2 i od 15 do 70% (średnio 45%) dla NO_x . Wyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju i pobrzeża morza Bałtyckiego, 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 Śląska i Małopolski oraz na terenie dużych miast: Warszawy, Trójmiasta, Płocka, Poznania, Łodzi, Wrocławia. W przypadku NO_2 i NO_x znaczącym źródłem emisji jest sektor transportu (SNAP7 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 południowej i zachodniej granic kraju, gdzie udział źródeł napływających sięgał miejscowo do 70%. 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 emisji 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%, a lokalnie sięgał nawet 100% 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 w przypadku wartości indeksu AOT40 uśredniony udział transportu transgranicznego dla stref wyniósł około 24%.

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 rozpadu ozonu w reakcjach z NO , na skutek zmniejszenia strumienia emisji po usunięciu źródeł krajowych NO_x . Napływ ozonu oraz jego prekursorów na poziom narażenia roślin wyrażony indeksem AOT40, ma najwyższe znaczenie wzdłuż zachodniej, północnej oraz wschodniej granicy kraju. W centrum i na południowym wschodzie Polski udział zanieczyszczeń transgranicznych jest niższy.

6.6 Przekroczenia poziomów dopuszczalnych

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

- Wartość percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych pyłu PM_{10} na północy i w centrum kraju nie przekroczył $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast na południu i wschodzie była niższa od $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- 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 był niższy od $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyższe wartości wystąpiły jedynie w rejonie Przemyśla i Bramy Morawskiej.
- 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 w rejonie Bramy Morawskiej, Przemyśla i Trójmiasta.
- Rozkład przestrzenny wartości percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących ozonu jest bardziej zróżnicowany przestrzennie niż pozostałych zanieczyszczeń. Wartości wahały się od 70 do ponad $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Niższe wartości percentyla wystąpiły w północno-wschodniej 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.

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 2019.....	8
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Europy; EMEP 2019.....	9
Rysunek 4. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO _x na terenie Polski; EMEP 2019	10
Rysunek 5. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Europy; EMEP 2019.....	10
Rysunek 6. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej PM ₁₀ na terenie Polski; EMEP 2019	11
Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM ₁₀ na obszarze Polski w 2021 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 2021 roku	18
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM _{2.5} na obszarze Polski w 2021 roku.....	20
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2021 roku	22
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2021	23
Rysunek 12. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej 125 µg/m ³ na obszarze Polski w 2021 roku	24
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 2021 roku	25
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2021 roku	27

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 2021 roku	28
Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2021 roku	29
Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężenie ozonu przekraczała $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2021 roku	31
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2021 roku	32
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2021 roku	33
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 2021 roku	35
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 2021 roku	36
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 2021 roku	37
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 2021 roku	39
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 2021 roku	41

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