

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2022



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Analiza wykonana w ramach zadań ustawowych
Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2022 poz. 2556)



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

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

Warszawa 2023

Autorzy:

dr hab. inż. Joanna Strużewska

prof. dr hab. inż. Jacek W. Kamiński

mgr inż. Paweł Durka

mgr inż. Grzegorz Jeleniewicz

inż. Aleksander Norowski

mgr Aneta Gienibor

inż. Aleksandra Starzomska



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Data publikacji: Czerwiec 2023

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	44
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. 2022 poz. 2556) 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 25 lutego 2023 r. w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2023 poz. 350). Zgodnie z ww. aktem prawnym wyniki modelowania zostały przekazane do Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w terminie ustawowym.

Zakres prac obejmował:

- Przygotowanie konfiguracji systemu modelowania,
- Przygotowanie danych emisyjnych,
- Realizację modelowania dla dwóch scenariuszy (scenariusz bazowy i scenariusz bez emisji antropogenicznych z obszaru Polski),
- Wykonanie oceny sprawdzalności wyników modelowania dla scenariusza bazowego względem pomiarów ze stacji PMŚ z roku 2022,
- 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. 2022 poz. 2556). 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 reakcji fotochemicznych.

Obliczenie trójwymiarowych pól stężeń jest osiągnięte 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 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 turbulentyjną 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 PM2,5 są obliczane jako suma odpowiednich frakcji poszczególnych komponentów chemicznych.

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

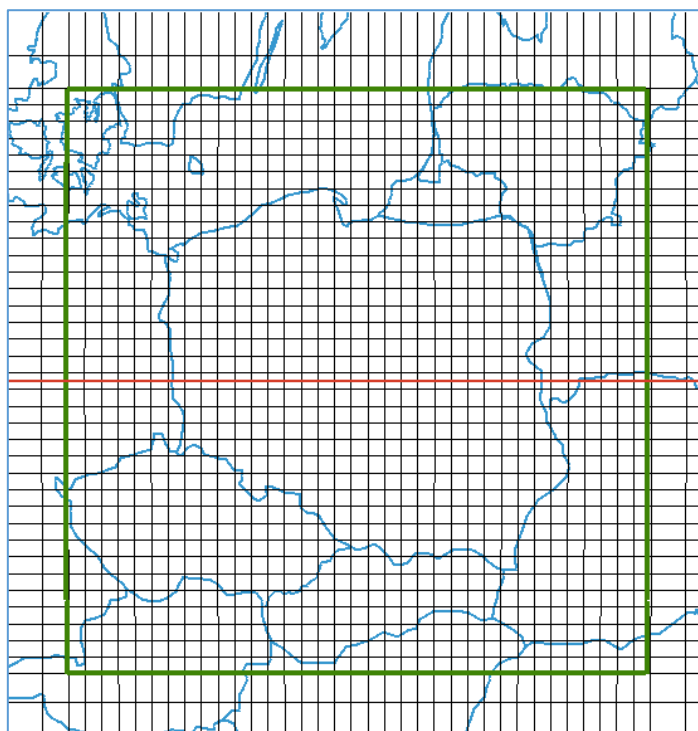
Numer przedziału	Zakres zmienności promienia aerodynamicznego [μm]	Średni promień aerodynamiczny [μm]	Frakcja pyłu
1	0.005 - 0.01	0.0075	Suma (1-8) = PM2,5
2	0.01 - 0.02	0.015	
3	0.02 - 0.04	0.03	
4	0.04 - 0.08	0.06	
5	0.08 - 0.16	0.12	
6	0.16 - 0.32	0.24	
7	0.32 - 0.64	0.48	
8	0.64 - 1.28	0.96	
9	1.28 - 2.56	1.92	Suma (1-11) = PM10
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 lub zbliżonej do 100 tys. oraz pozostały obszar kraju w podziale na województwa (Dz. U. z 2022 r. poz. 1576).

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

Na potrzeby niniejszej analizy wykorzystano pola meteorologiczne - analizy obiektywne z roku 2022, stanowiące warunek początkowy symulacji, pobrane z Kanadyjskiego Centrum Meteorologicznego (Canadian Meteorological Centre - CMC). Warunki początkowe stężeń modelowanych zanieczyszczeń dla 1 stycznia 2022 pochodzą z Serwisu Obserwacji Atmosfery Copernicus.



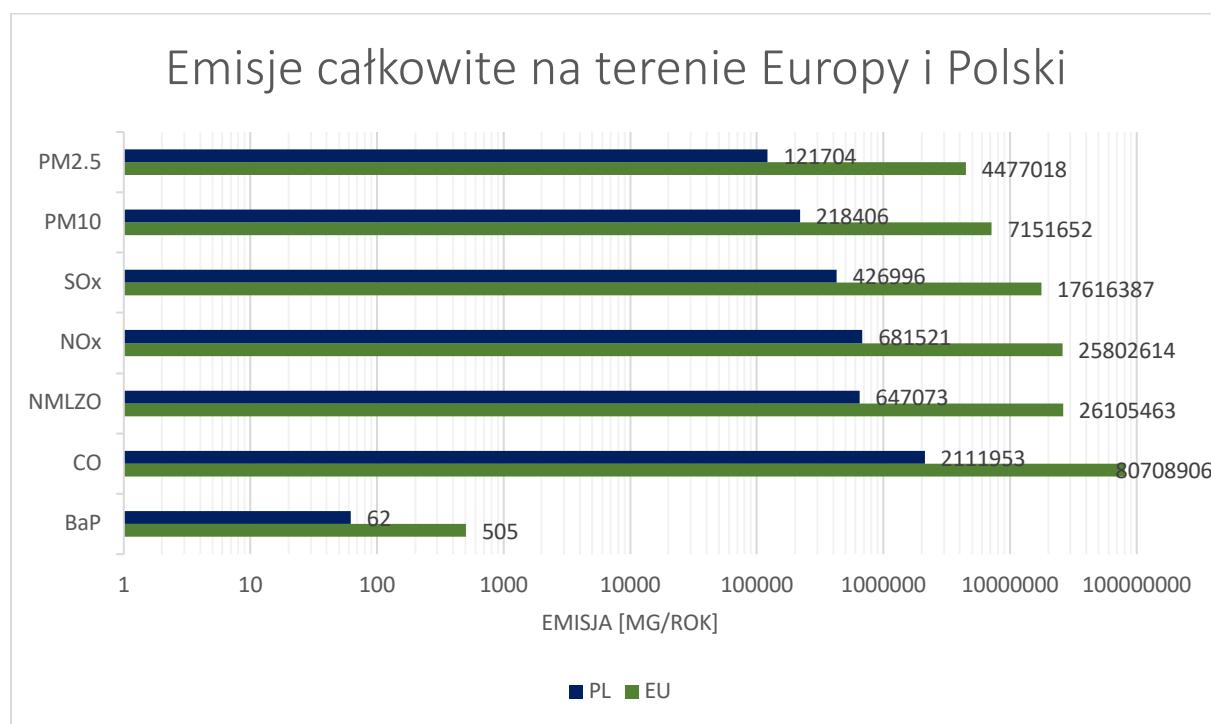
Rysunek 1. Konfiguracja siatki: zielony kwadrat obejmuje obszar analiz o stałej rozdzielczości 10 km, czerwona linia obrazuje równik w obróconym układzie współrzędnych, linie czarne przedstawiają siatkę obliczeniową, kreśloną są co 3 kwadraty siatki

1.3 Dane emisyjne

Modelowanie na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2022 roku wykonano z wykorzystaniem bazy emisji EMEP dla roku 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. Wprawdzie najbardziej aktualna inwentaryzacja EMEP w okresie realizacji modelowania była dostępna dla roku 2020, ale ze względu na fakt, iż był to rok, w którym rozpoczęła się pandemia Covid19, z wprowadzanymi ad-hoc w większości krajów europejskich poważnymi ograniczeniami gospodarczymi, których wpływ na poziom emisji nie był dokładnie zbadany, podjęto decyzję o wykorzystaniu emisji w roku poprzedniego.

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.



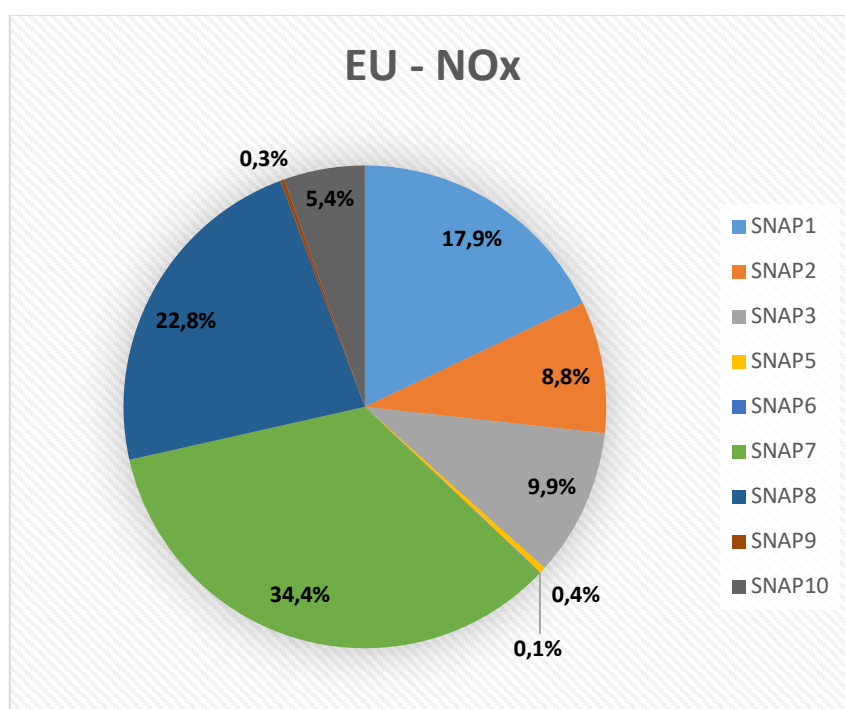
Rysunek 2. Emisje całkowite zanieczyszczeń powietrza na terenie Polski i Europy. Źródło: EMEP 2019

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

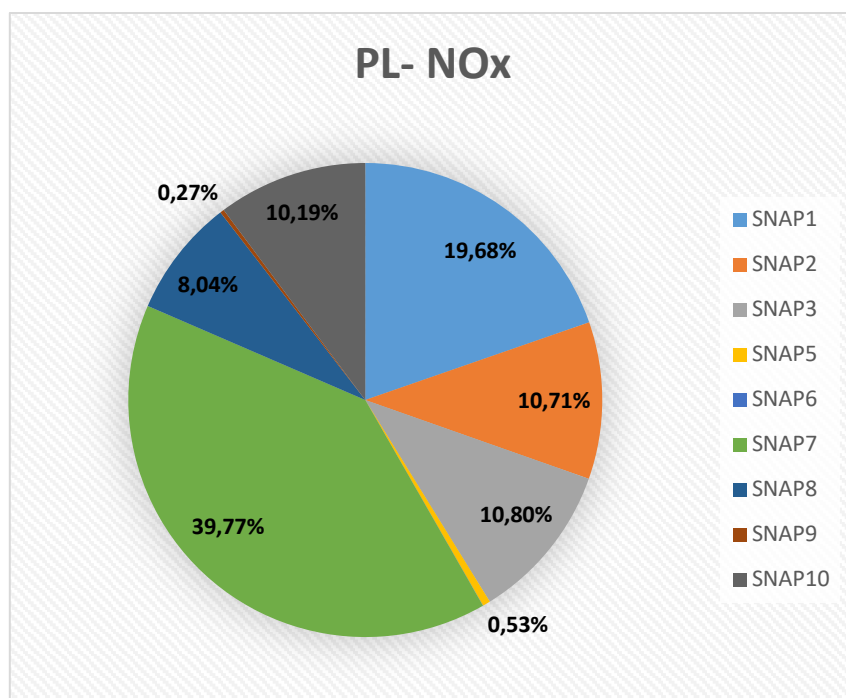
Dane emisyjne udostępniane są przez EMEP w podziale na kategorie źródeł emisji GNFR. Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń dane te zostały zreklasyfikowane na kategorie źródeł emisji SNAP. Poniżej przedstawiono porównanie udziału poszczególnych źródeł w emisji PM₁₀ i NO_x na terenie Polski i Europy. Od następnego roku planowana jest modyfikacja modelu a dane emisyjne będą wprowadzane zgodnie z GNFR.

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%).

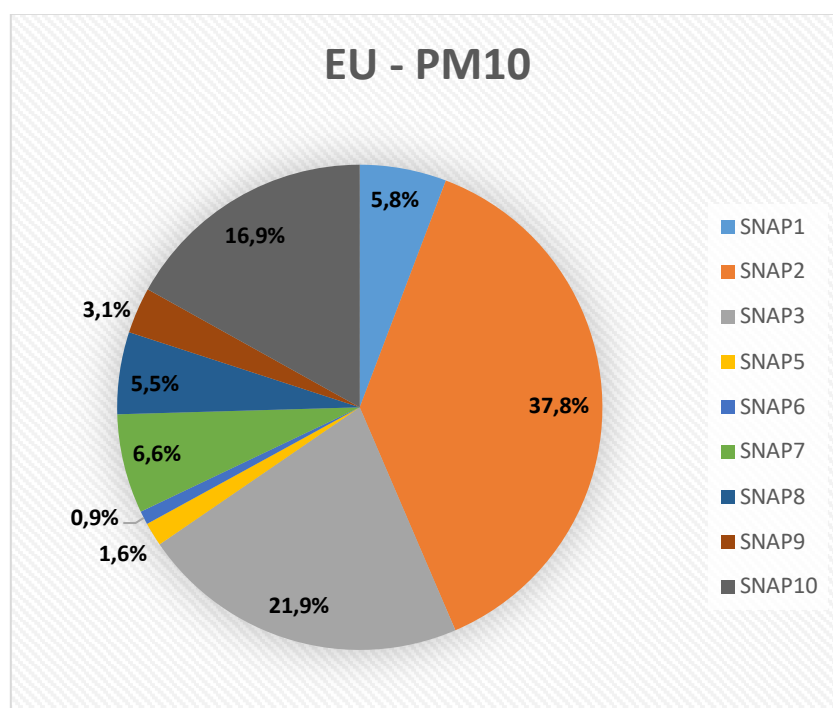
Struktura źródeł emisji PM₁₀ jest inna niż w przypadku NO_x. Zanieczyszczenie to zarówno w Europie jak i w Polsce pochodzi w dużej części z sektora komunalno-bytowego (SNAP2) i jest to odpowiednio 37,8% oraz 40,2%. Tak wysoki udział kategorii SNAP2 w emisjach PM₁₀, stanowi duży problem na terenie Polski.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



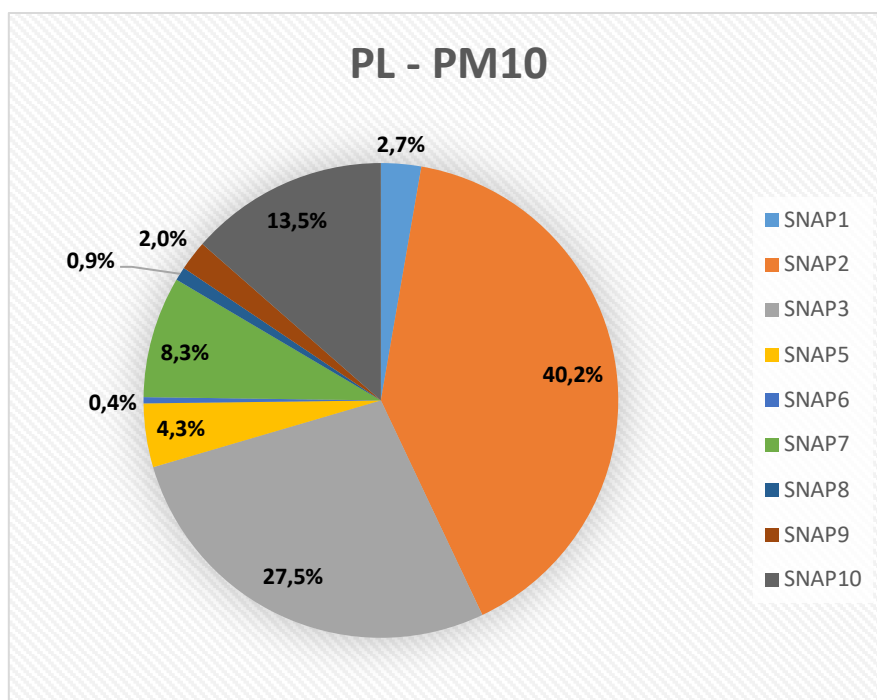
Rysunek 3. Udział procentowy emisji z poszczególnych kategorii SNAP w emisji całkowitej NO_x na terenie Europy; EMEP 2019



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. 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	93,3%
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	97%
6	Dwutlenek siarki (SO ₂) – średnia roczna	81%
7	Benzo(a)piren (B(a)P) – średnia roczna	70,1%

Do szczegółowej ewaluacji wyników modelowania wykorzystano narzędzie DELTA tool w aktualnie dystrybuowanej dostępnej wersji (wersja 7.2, październik 2022 r.). Analizie poddano wyniki modelowania uzyskane dla symulacji bazowej, dla roku 2022. 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 w Załączniku nr 1.

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 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}. Rygorystyczny sposób obliczania rocznego wskaźnika MQI jest dyskutowany w dedykowanych grupach roboczych FAIRMODE, gdyż sprawdzalność rocznych stężeń pyłu z warunkiem zawartym w dyrektywie CAFE została spełniona. Ponadto 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. Pomimo to należy podkreślić, że wyniki dla NO₂ uległy poprawie względem roku poprzedniego. W przypadku ewaluacji modelowanych stężeń SO₂, pomimo dobrych wskaźników statystycznych, kryterium dyrektywy CAFE nie zostało spełnione. Podobnie jak w poprzednich latach występują przeszacowania na pojedynczych stacjach.

Zgodność wyników modelowania z pomiarami dla symulacji bazowej roku 2022, podobnie jak w roku poprzednim, wykazała sprawdzalność niższą od oczekiwanej w przypadku NO_x, SO₂ i B(a)P. Powodem może być wykorzystana baza emisji, która 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 2022 obliczono parametry statystyczne zgodnie z Załącznikiem nr 4 do Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 lutego 2023 r., w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2023 poz. 350).

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 PM10	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do stężenia średniego rocznego
12	Pył zawieszony PM10	Udział procentowy napływu transgranicznego w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniami wartości dobowej 50 µg/m³ w roku kalendarzowym
13	Pył zawieszony PM10	Wartość percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych dla napływu transgranicznego
14	Pył zawieszony PM2,5	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/m³ 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

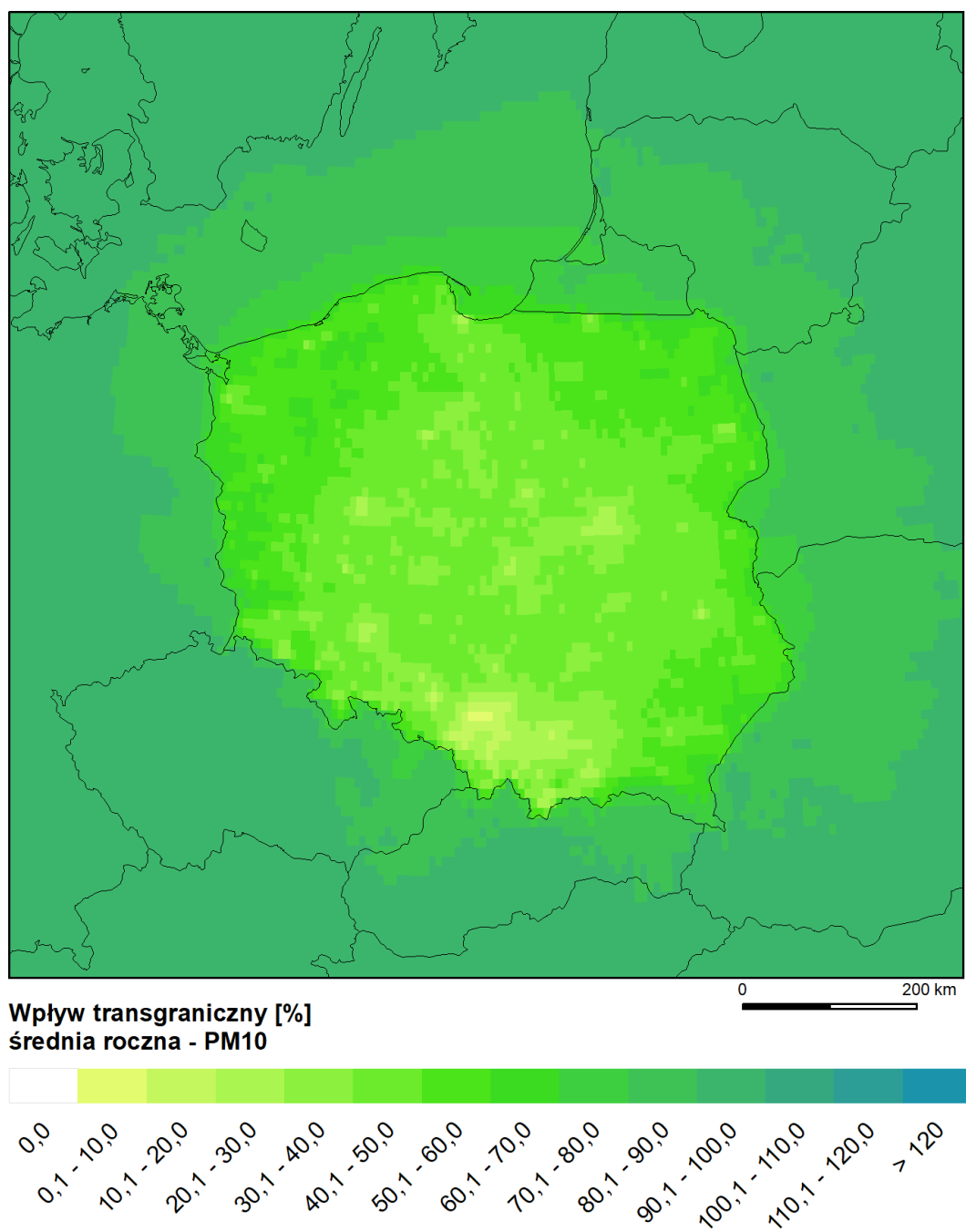
Wyniki modelowania zostały wykorzystane do analizy rozkładu przestrzennego procentowego udziału transportu transgranicznego w poziomie stężeń zanieczyszczeń i diagnostyk narażenia na podwyższone wartości zanieczyszczeń na obszarze Polski w roku 2022.

4.1 Pył PM₁₀

Rysunek 7 i

Rysunek 8 przedstawiają rozkłady przestrzenne udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM₁₀ oraz w liczbie dni z przekroczeniem poziomu 50 µg/m³ ze względu na średniodobowe stężenie pyłu PM₁₀.

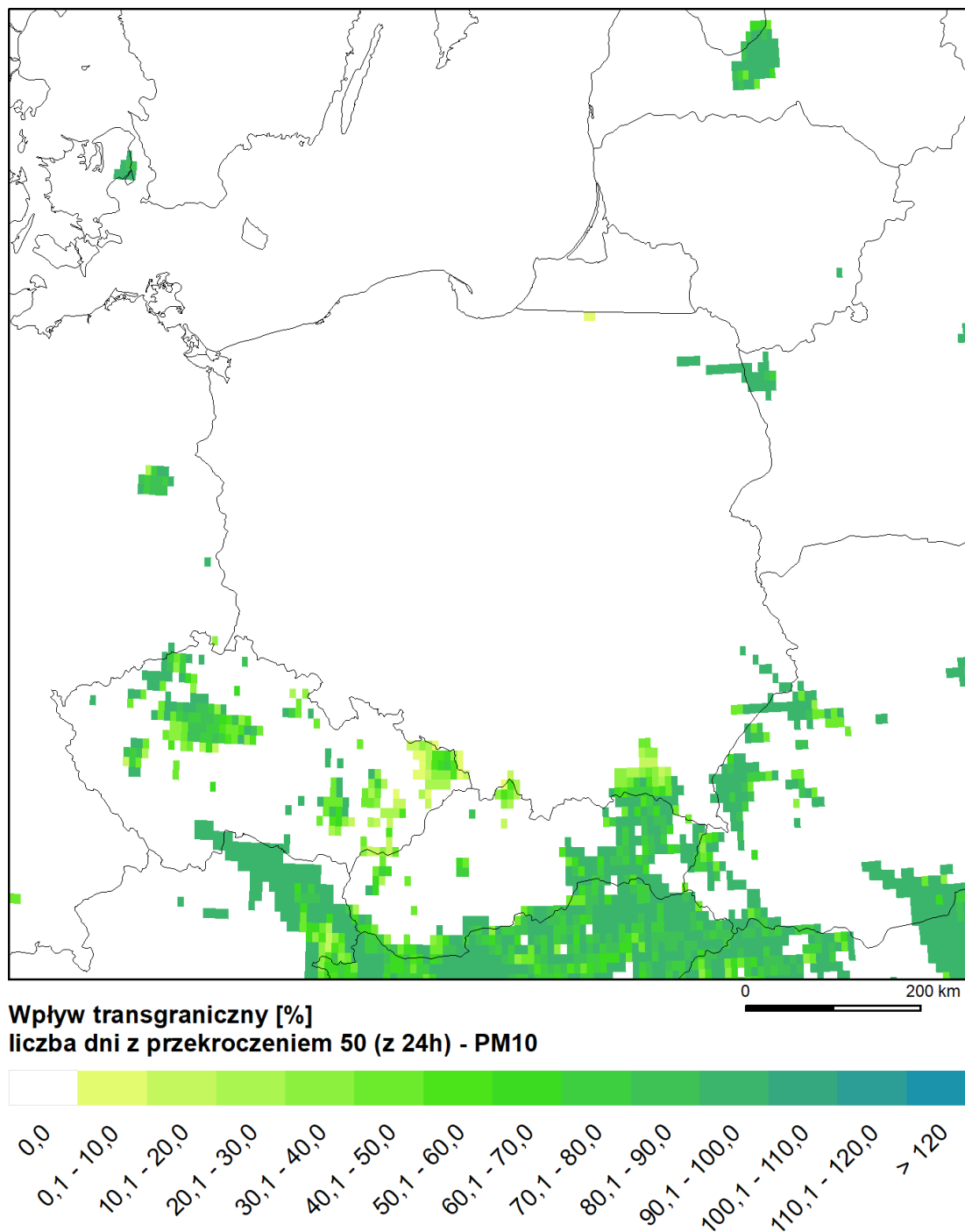
Udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu PM₁₀ na obszarze Polski w 2022 roku wahał się w zakresie od 9% do 91% (**Rysunek 7**). Najniższy wpływ transportu spoza granic kraju (do 30%) wystąpił na obszarach dużych miast, głównie Warszawy, Łodzi, Gdańska, Bydgoszczy, Poznania, Wrocławia, Opola, Kielc, Kalisza oraz na obszarze Śląska i Małopolski - co świadczy o wysokim udziale źródeł krajowych na tym terenie. Im bliżej granic kraju, tym wpływ transgraniczny rośnie. Najwyższe wartości procentowe napływu transgranicznego występowały wzdłuż północnej, wschodniej i zachodniej granicy kraju – głównie od 55 do 70%. Lokalnie udział transgraniczny był wyższy głównie w rejonie wybrzeża morza Bałtyckiego oraz na południowym krańcu w Bieszczadach i w Sudetach od 73 do 91%.



Rysunek 7. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM10 na obszarze Polski w 2022 roku

Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni ze średniodobowym stężeniem pyłu PM10 wyższym niż $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, był mało zróżnicowany na obszarze Polski w 2022 roku (

Rysunek 8). Na przeważającym obszarze kraju przekroczenia $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stężenia średniodobowego zależne od napływu transgranicznego nie wystąpiło. Wyjątkiem są okolice Raciborza, Jastrzębie Zdroju gdzie wpływ wynosi do 22%. Wyższe wartości wystąpiły na podkarpaciu, w rejonie Przemyśla, lokalnie na wschodzie a także w okolicy Augustowa.



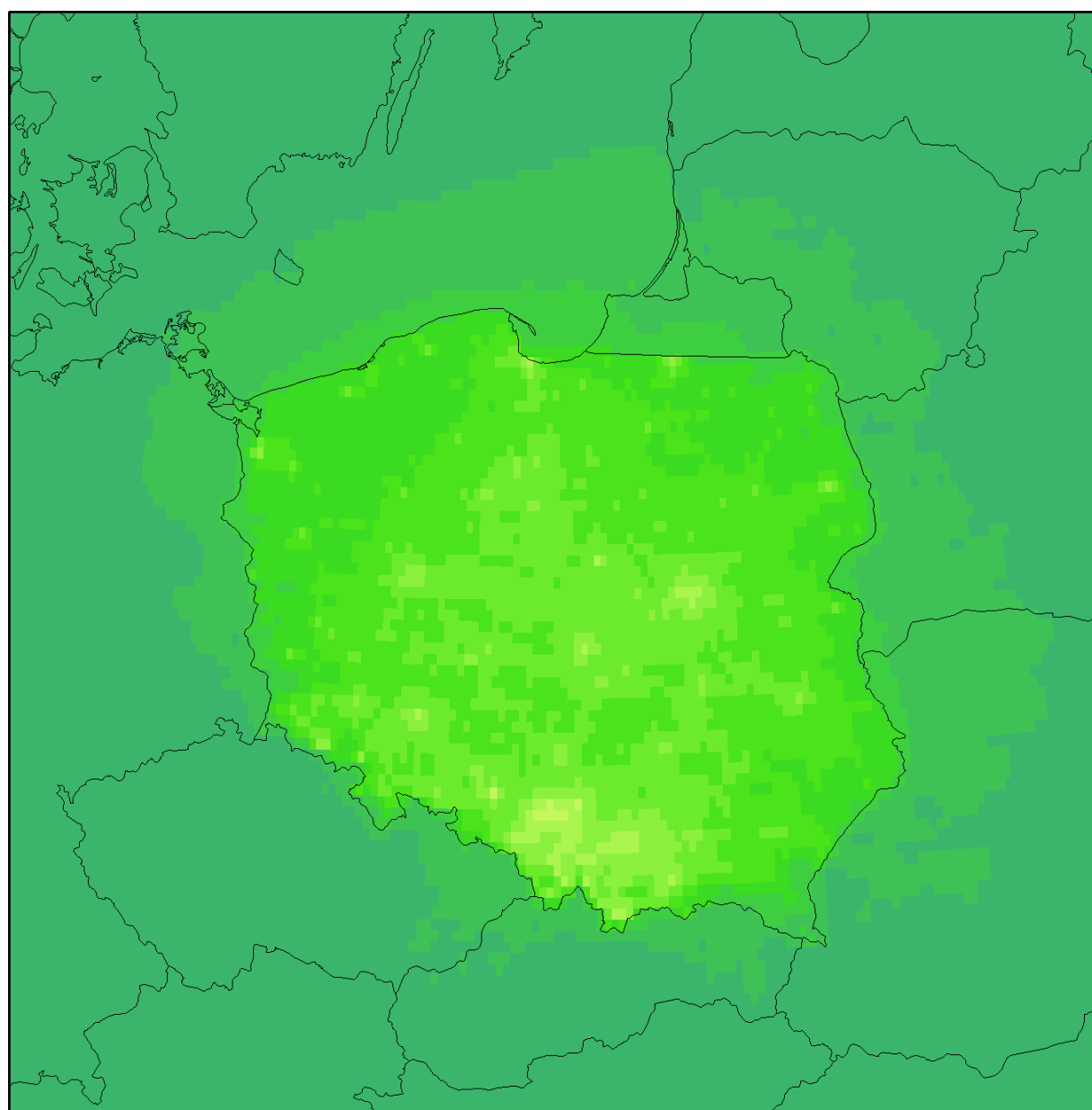
Rysunek 8. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ze względu na średniodobowe stężenia pyłu PM_{10} na obszarze Polski w 2022 roku

Należy zwrócić uwagę, że z punktu widzenia analiz krajowych sformułowanie napływu transgranicznego zgodnie z uregulowaniami prawnymi nie dostarcza oczekiwanej informacji. Warto byłoby poddać analizie zagadnienie odwrotne – w ilu przypadkach na indywidualnych stacjach napływ transgraniczny zdecydował o przekroczeniu dobowego progu $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

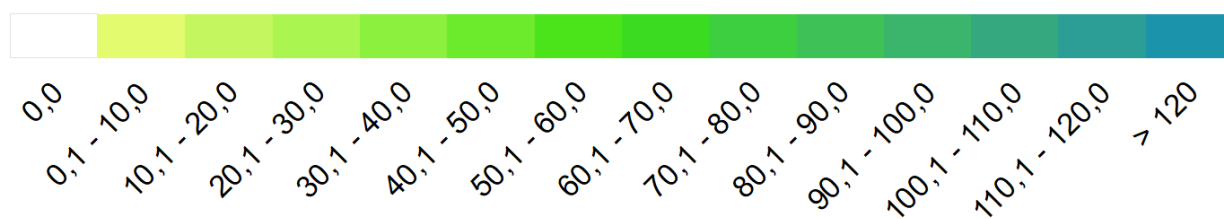
4.2 Pył $\text{PM}_{2,5}$

Rysunek 9 przedstawia rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu $\text{PM}_{2,5}$ na obszarze Polski w roku 2022.

W 2022 roku na obszarze Polski udział źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu pyłu $\text{PM}_{2,5}$ zawierał się w przedziale od 17 do około 92%. Wyższe udziały źródeł transgranicznych występujące wzdłuż wybrzeża morza Bałtyckiego, wschodniej, zachodniej i południowo-zachodniej granicy Polski, wahały się głównie w przedziale od 65 do 80%, a w kilku lokalizacjach były wyższe od 80%. Na przeważającym obszarze kraju napływ transgraniczny wynosi od 17 do 55%. Najniższy udział zanieczyszczeń napływających, do 30% wystąpił na obszarach Śląska i Małopolski oraz w rejonie Warszawy, Łodzi, Płocka, Wrocławia, Opola, Zakopanego, Nowego Sącza i Trójmiasta.



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

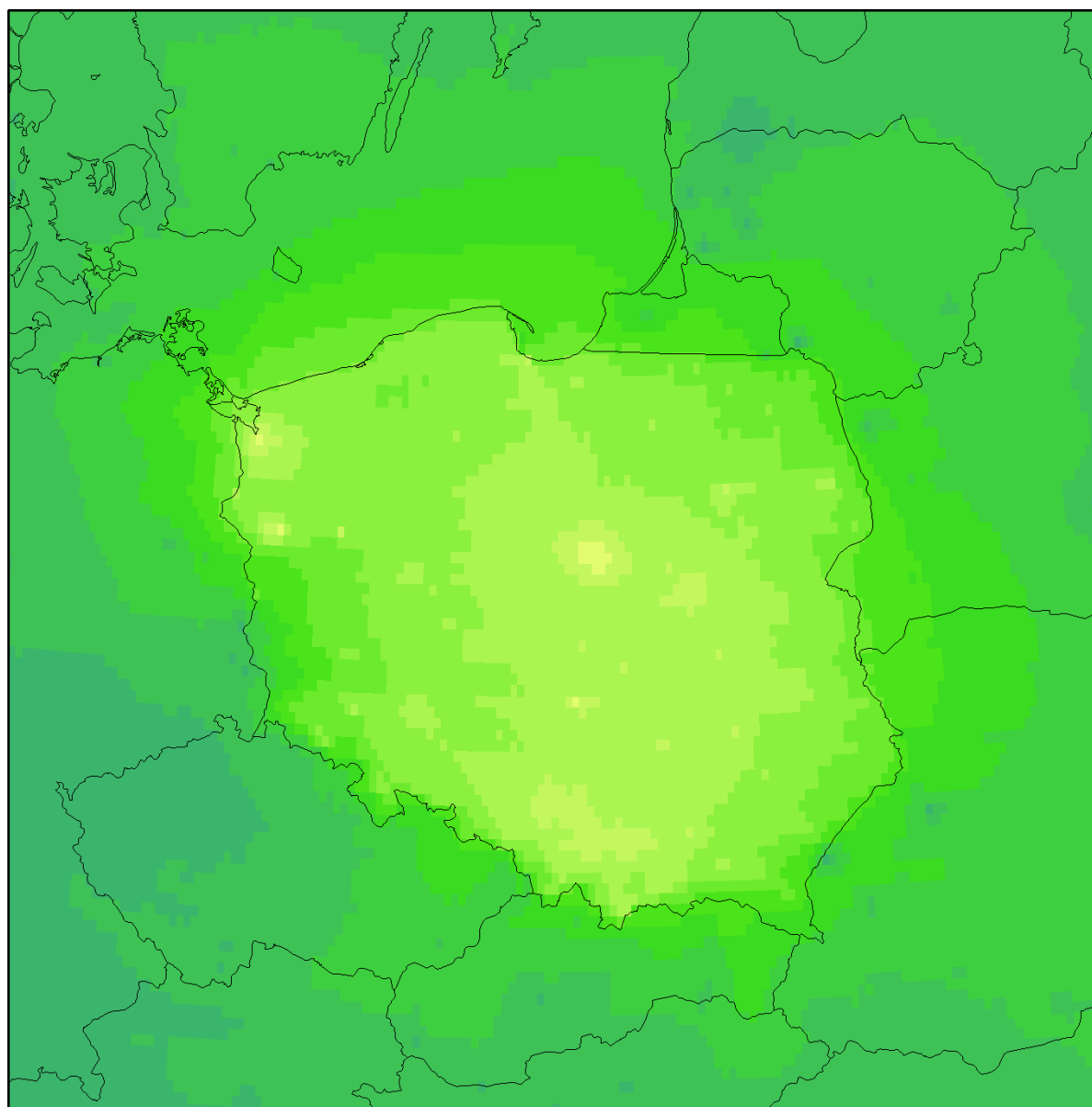


Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM_{2,5} na obszarze Polski w 2022 roku

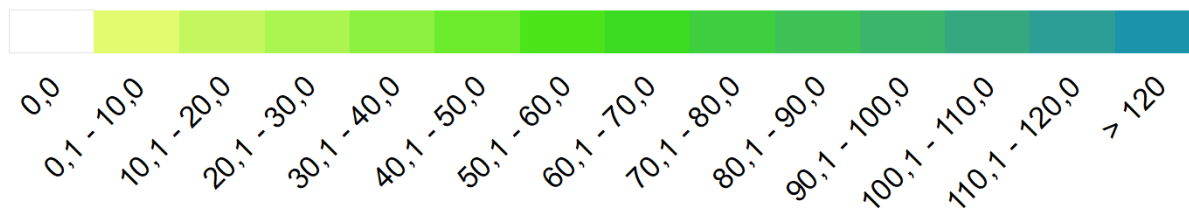
4.3 Dwutlenek siarki SO₂

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 2022 roku.

W 2022 roku rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku siarki na obszarze Polski wahał się od 1 do 95% (**Rysunek 10**). Najwyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic Polski oraz w północno-wschodniej, południowo-zachodniej oraz północno-wschodniej części kraju – głównie od 40 do 76%, jednakże lokalnie w części południowo-zachodniej i w okolicy Przemyśla wzrasta nawet do 95%. 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 1-20%, najniższy wystąpił w okolicach Łodzi, Płocka, Gorzowa Wielkopolskiego i Szczecina.

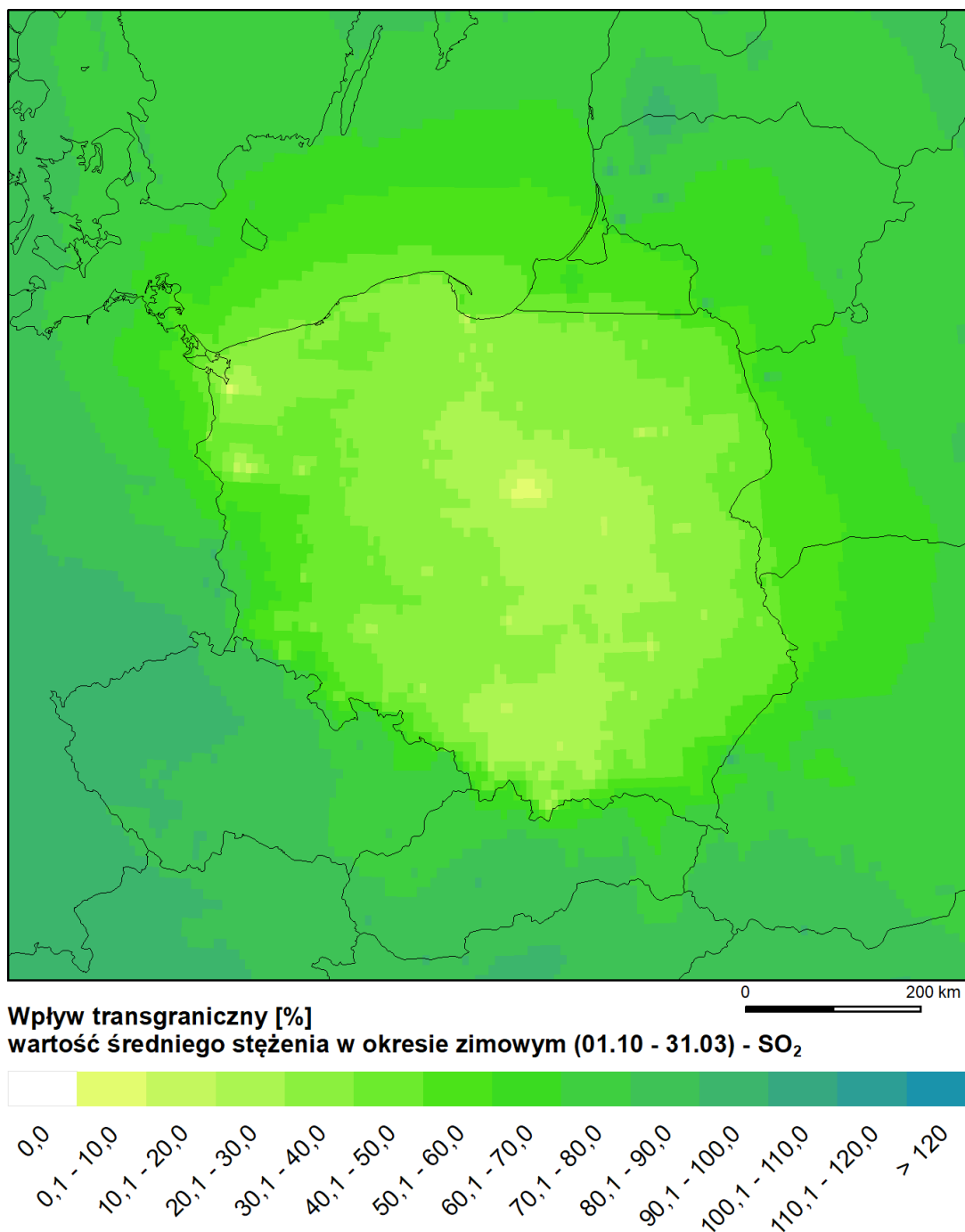


**Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - SO₂**



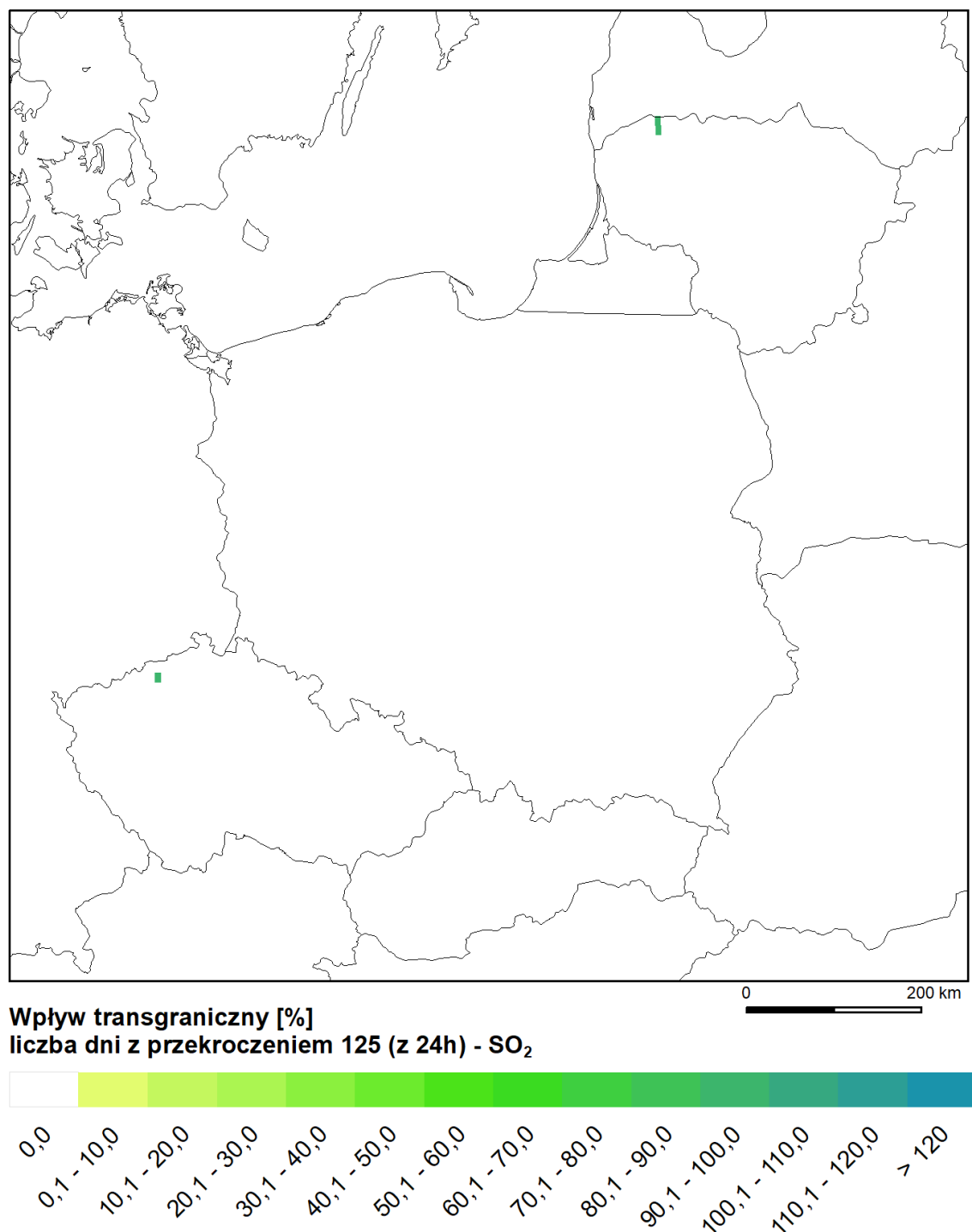
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2022 roku

Udział źródeł transgranicznych w stężeniach dwutlenku siarki w okresie zimowym ma podobny rozkład przestrzenny jak w przypadku wartości średniorocznych (**Rysunek 11**). Wzdłuż zachodniej, południowej i południowo-wschodniej granicy kraju udział źródeł transgranicznych wahał się głównie od 60 do 75%, a lokalnie wzrósł do około 95%. Niższy udział źródeł transgranicznych, od 10 do 35% wystąpił na dużym obszarze w centralnej Polsce oraz na obszarze dużych miast, w pobliżu dużych źródeł emisji.



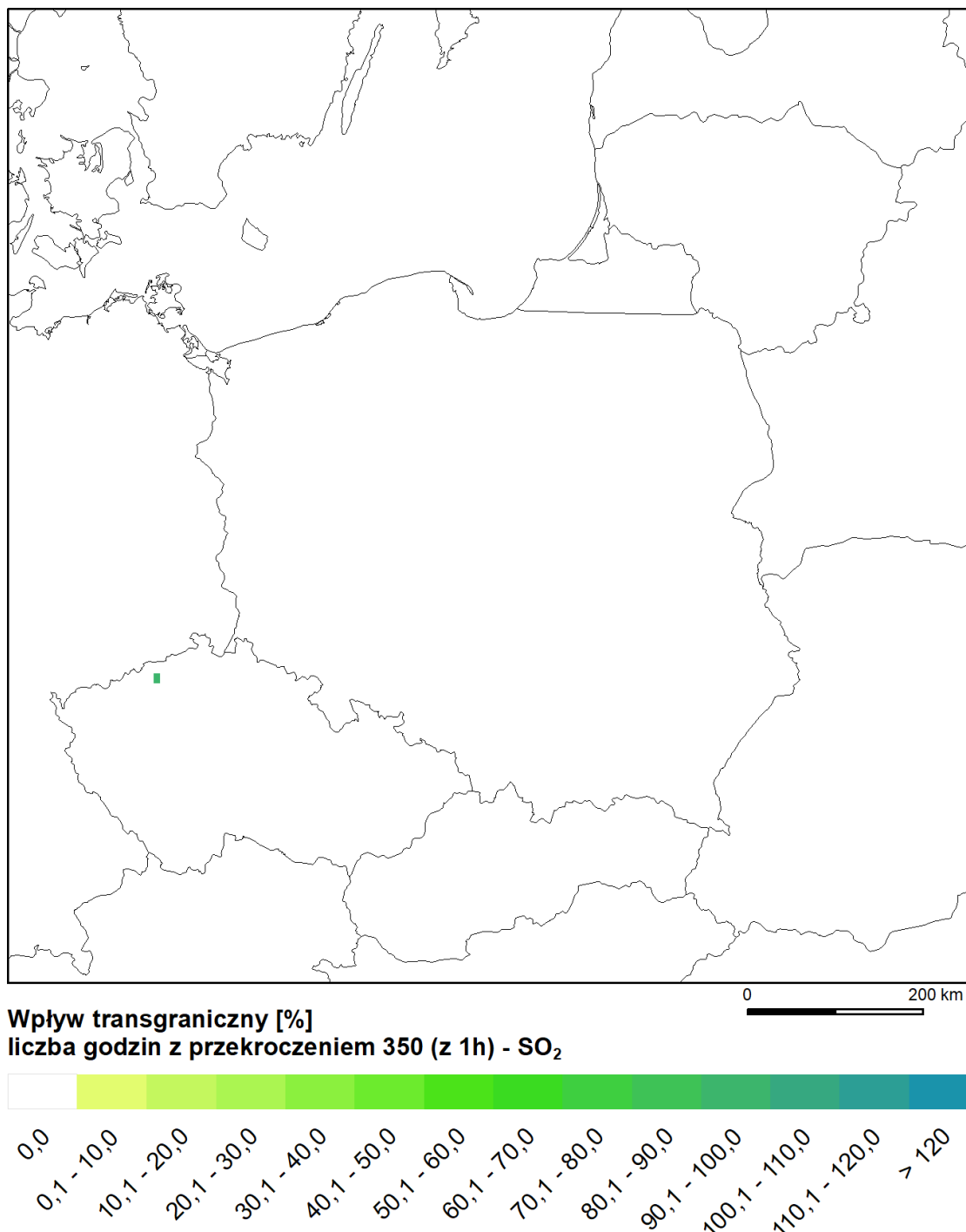
Rysunek 11. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego dwutlenku siarki w okresie zimowym na obszarze Polski w roku 2022

Wyniki modelowania w 2022 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 12**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.



Rysunek 12. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni z przekroczeniem wartości średniodobowej dwutlenku siarki powyżej $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2022 roku

Wyniki modelowania w 2022 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia przypadków przekroczeń wartości jednogodzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Rysunek 13**). Ze względu na sformułowanie funkcji, udział transgraniczny wynosi 0%.

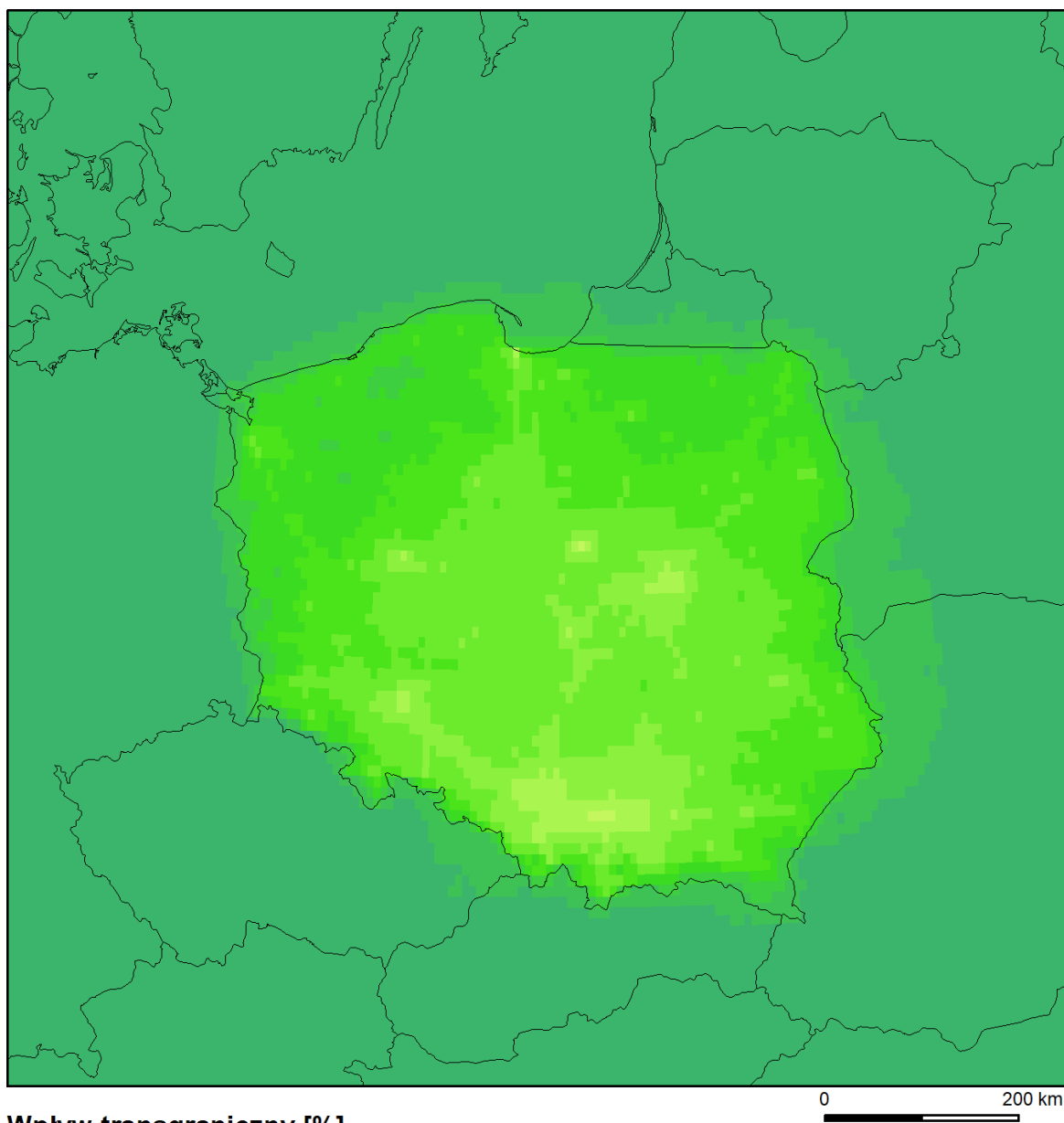


Rysunek 13. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej dwutlenku siarki powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2022 roku

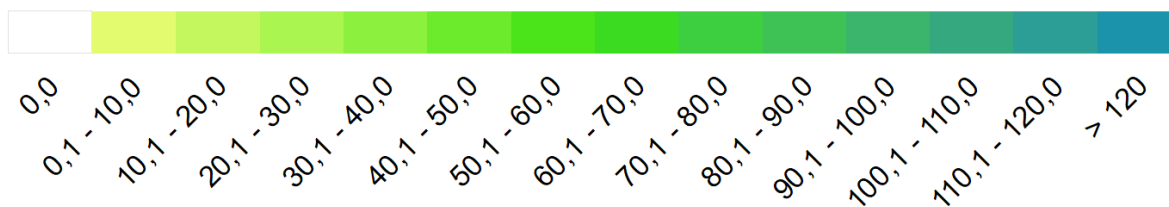
4.4 Dwutlenek azotu NO₂

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 2022.

Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2022 roku był dość zróżnicowany. Wzdłuż północnej i południowej granicy wartości wpływu transgranicznego wahają się w zakresie 70-90%, lokalnie na krańcach wystąpiły wartości do 96%. Im dalej od granicy, tym wpływ ten jest mniejszy. Na przeważającym obszarze kraju, głównie w centralnej jego części napływ z zagranicy wahał się przeważnie od 30 do 60%. Najniższy udział zanieczyszczeń transgranicznych, do 30%, wystąpił w rejonie Warszawy, Wrocławia, Łodzi, Poznania, Płocka, Tarnowa, Krakowa, Bielsko-Białej oraz aglomeracji górnośląskiej, ze względu na wysoką emisję lokalną (**Rysunek 14**).

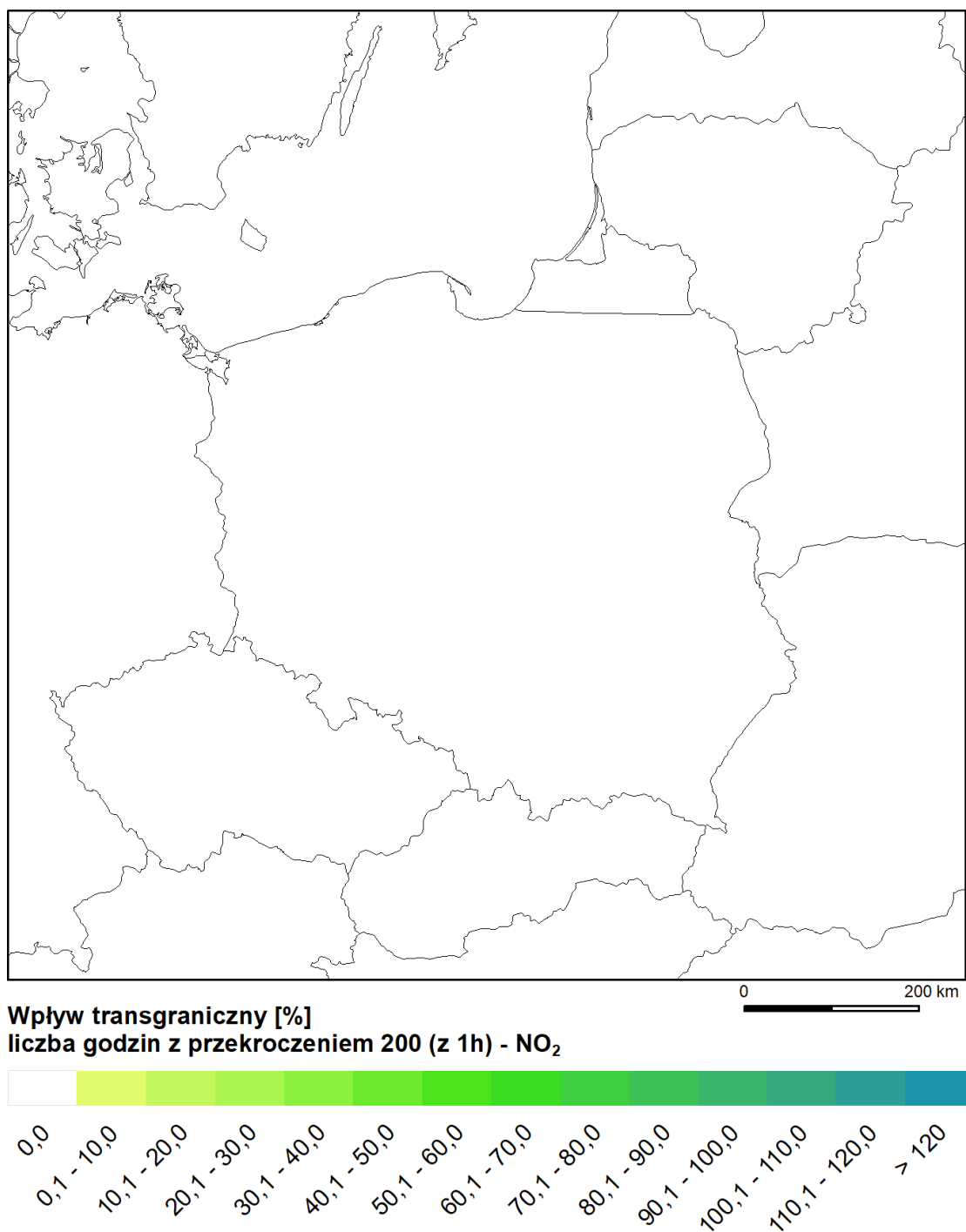


Wpływ transgraniczny [%]
średnia roczna - NO₂



Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2022 roku

Wyniki modelowania w 2022 roku na obszarze Polski nie wykazały wystąpienia w wyniku oddziaływania wyłącznie źródeł transgranicznych przekroczeń 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%.

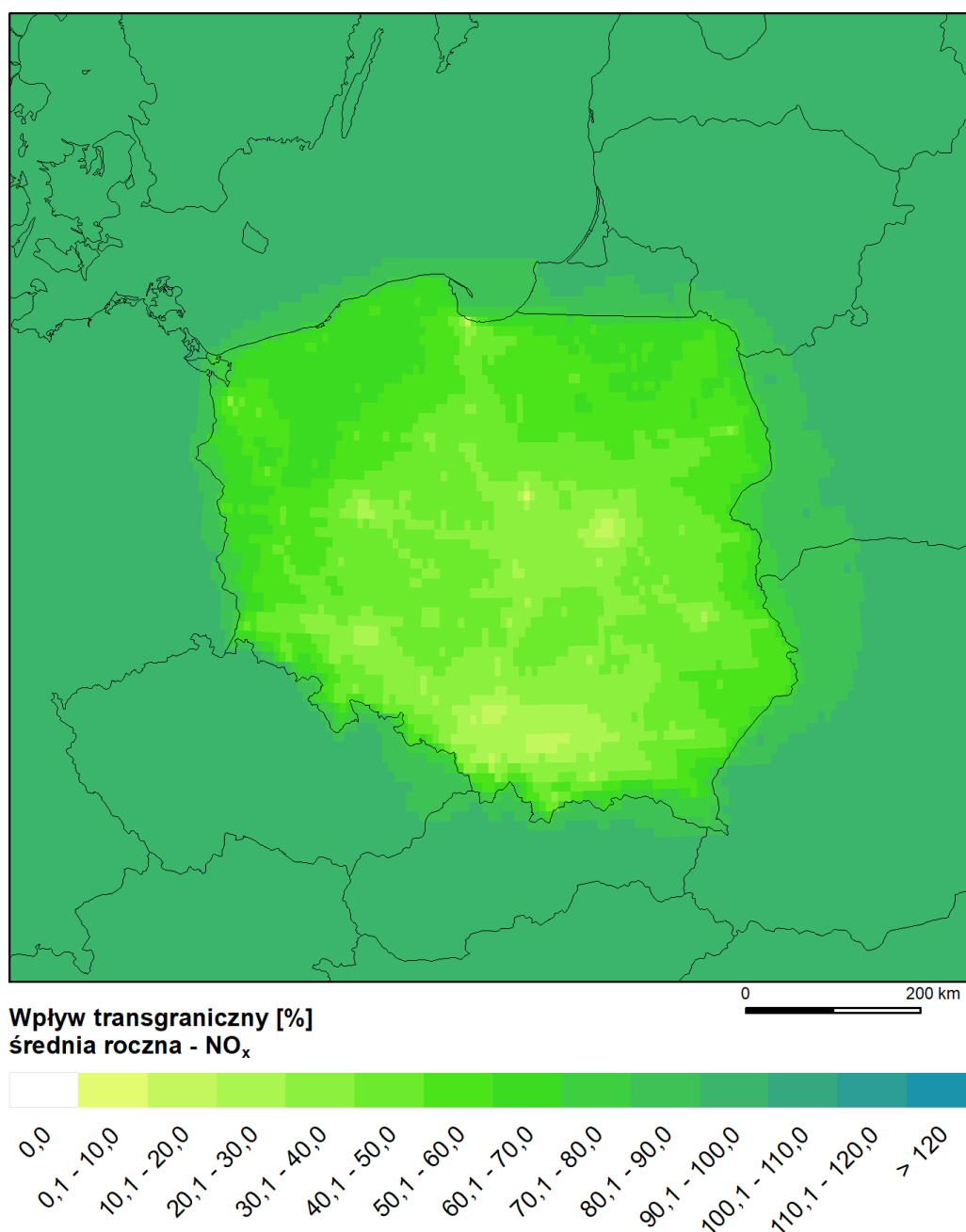


Rysunek 15. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby godzin z przekroczeniem wartości 1-godzinnej wartości stężeń NO₂ powyżej $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na obszarze Polski w 2022 roku

4.5 Tlenki azotu NO_x

Rysunek 16 przedstawia rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu NO_x na obszarze Polski w 2022 roku.

Najniższy wpływ źródeł transgranicznych do 30%, wystąpił na znacznym obszarze Śląska i Małopolski oraz w okolicach Gdańska, 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 północy i lokalnie na południu wartości wahały się w przedziale 85-96%.



Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2022 roku

4.6 Ozon O₃

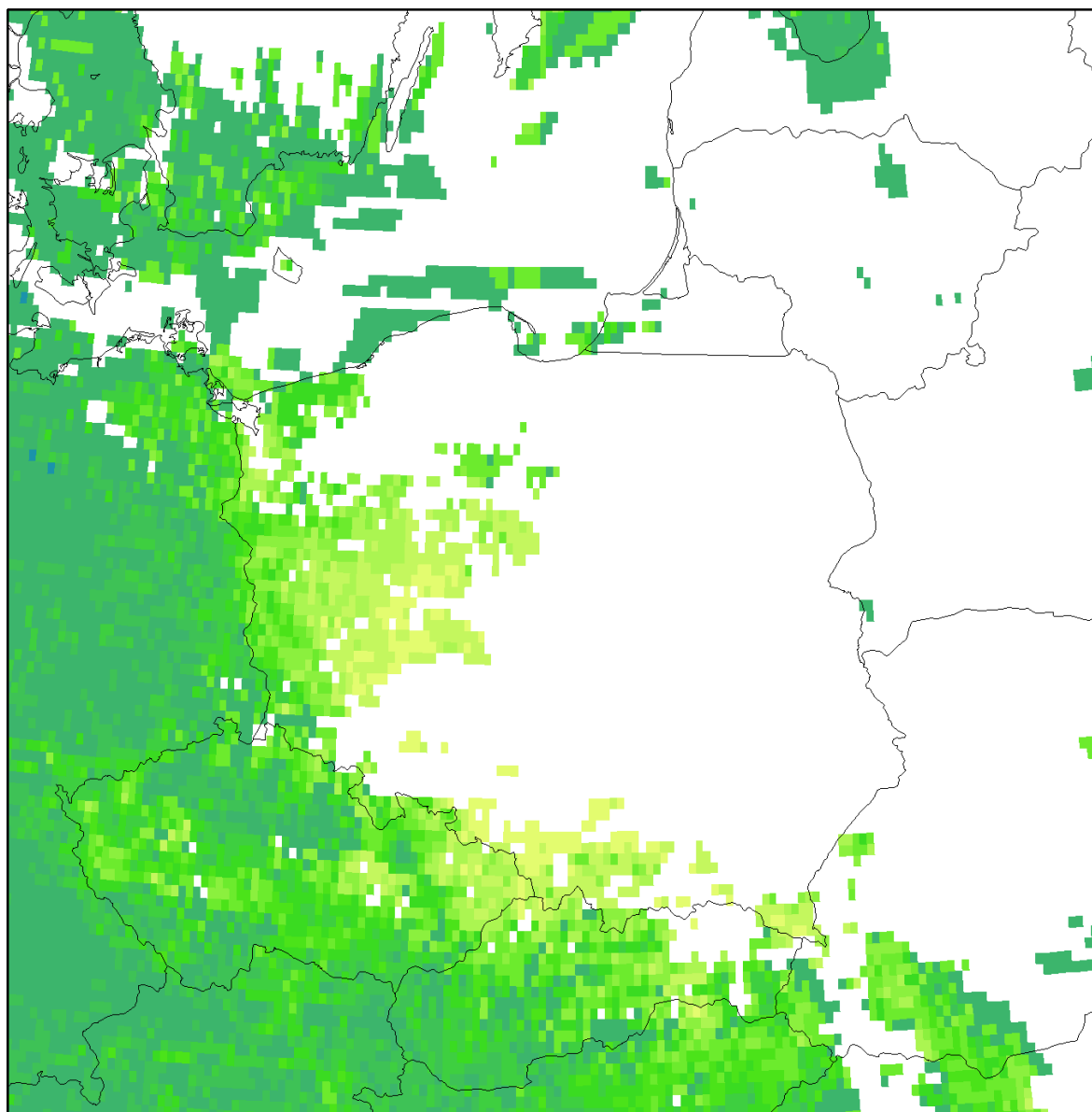
Rysunek 17 i Rysunek 18 przedstawiają odpowiednio rozkłady przestrzenne udziału procentowego źródeł transgranicznych w liczbie dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m³ oraz udział źródeł transgranicznych w wartości wskaźnika AOT40² na obszarze Polski w roku 2022.

W 2022 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 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 100% wystąpił lokalnie na krańcach południowo-zachodnich 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.

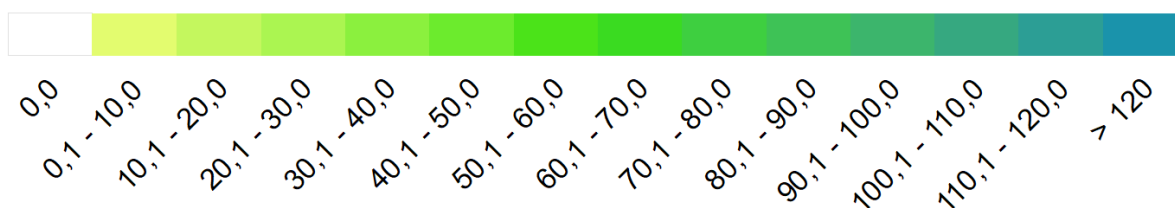
Jednocześnie należy wziąć pod uwagę, że scenariusz transgraniczny zakłada brak jedynie emisji antropogenicznych. Emisje biogenne (NMLZO z lasów i NO_x z gleb) są nadal aktywne, ponieważ są poza możliwością zarządzania i planowania działań redukcyjnych.

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:

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

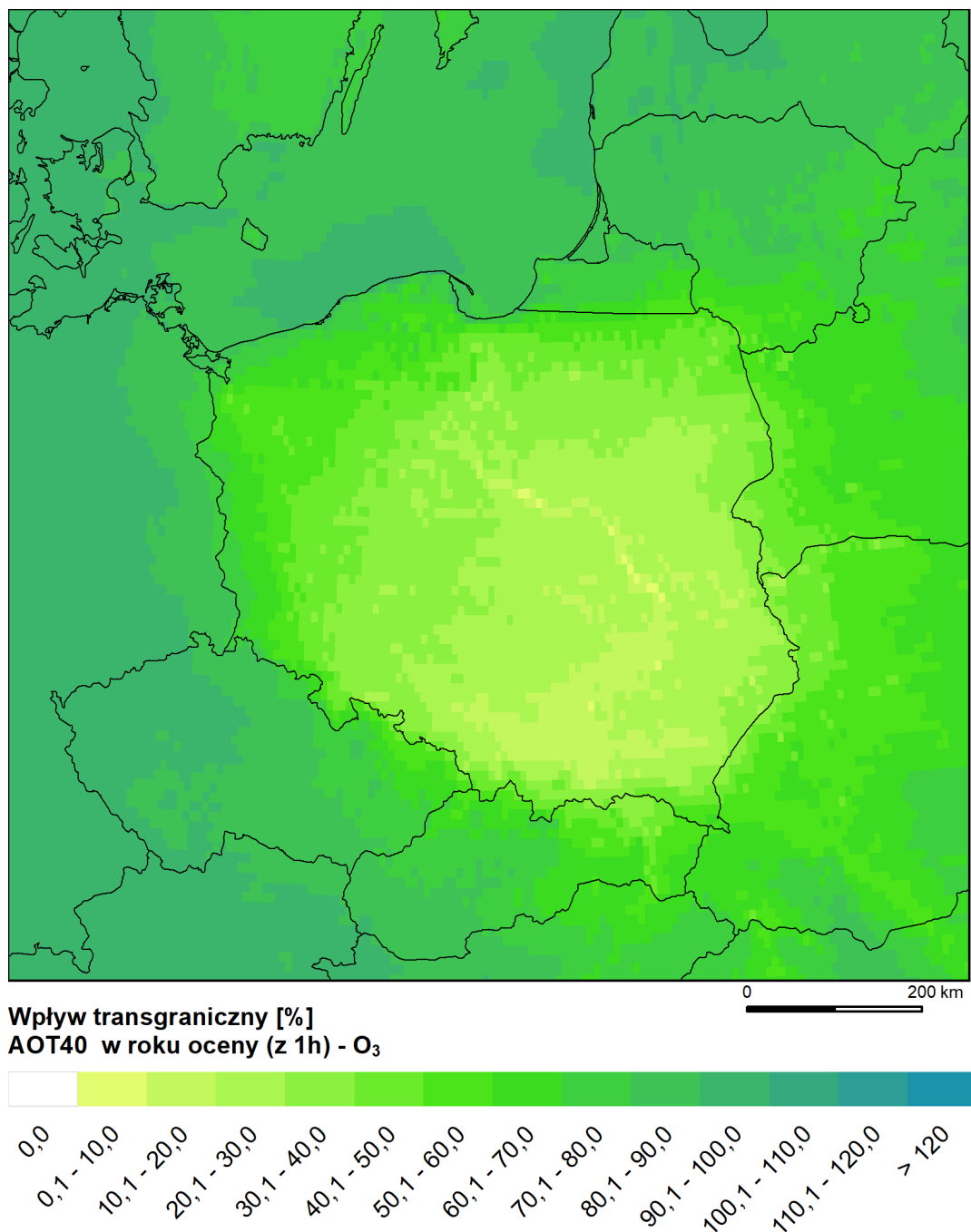


Wpływ transgraniczny [%]
liczba dni z przekroczeniem 120 w roku oceny (z 8k) - O₃



Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocąca stężenia ozonu przekraczała 120 µg/m³ na obszarze Polski w 2022 roku

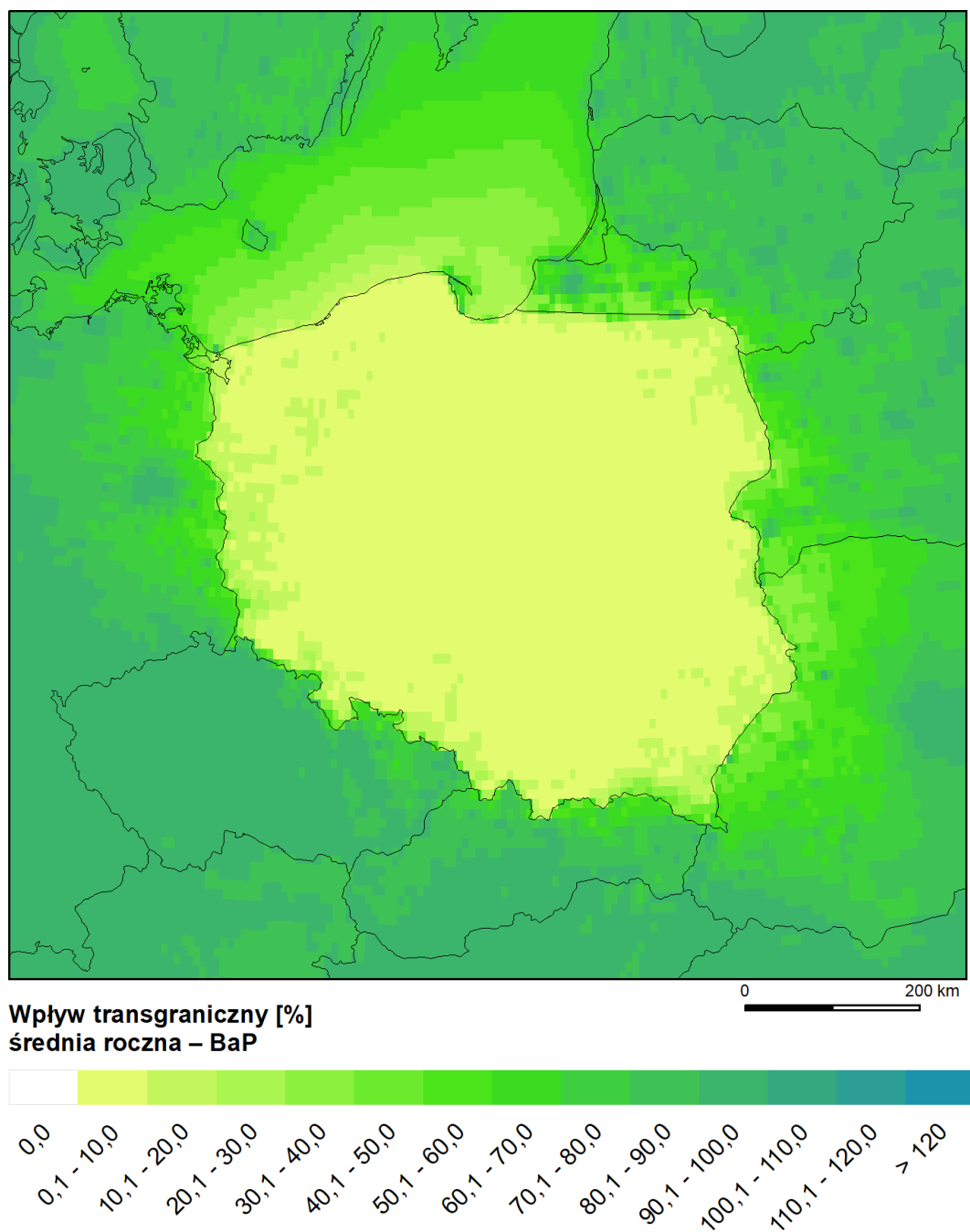
W 2022 roku, udział procentowy źródeł transgranicznych w kształtowaniu się wartości wskaźnika AOT40 na obszarze Polski wykazuje zróżnicowanie przestrzenne (**Rysunek 18**). Najwyższy udział zanieczyszczeń napływających spoza kraju wystąpił na północy Polski- wzdłuż wybrzeża morza Bałtyckiego oraz lokalnie na południu w okolicy Szklarskiej Poręby i Świeradowa Zdrój wartości wahały się w przedziale 81 – 96%. Im dalej od granicy kraju tym wartości są niższe, w zachodniej części Polski udział źródeł transgranicznych wyniósł 45 – 80%. Najniższe wartości wystąpiły we wschodniej i centralnej Polsce, a także na terenie dużych miast i wzdłuż Doliny Wisły do 25%.



Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2022 roku

4.7 Benzo(a)piren

Rysunek 19 przedstawia rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych w średniorocznym stężeniu benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2022 roku. Na przeważającym obszarze Polski udział zanieczyszczeń napływających był niższy niż 10%, co świadczy o przeważającym udziale emisji krajowej. Wyższy udział, do 95% wystąpił miejscowo wzdłuż północnej i południowej granicy kraju.



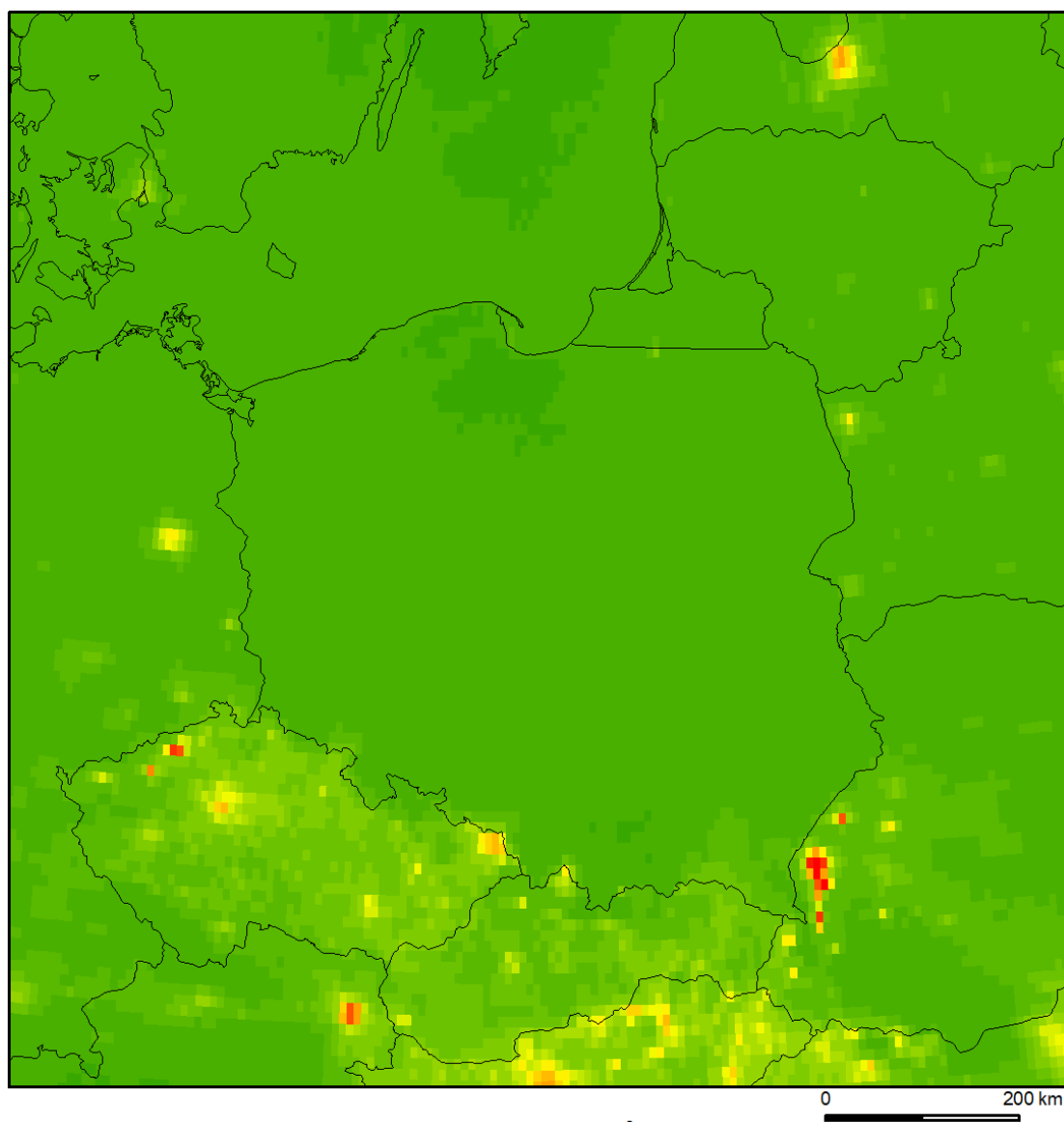
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2022 roku

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 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, na północy, w centrum kraju oraz na obszarze Wrocławia, aglomeracji górnośląskiej i okolic Krakowa wykazywał wartości w poniżej 10 µg/m³ (**Rysunek 20**). Na południu, wschodzie i południowym zachodzie Polski udział zanieczyszczeń transgranicznych był wyższy, między 10 a 20 µg/m³. Najwyższy udział był na południu Polski – im bliżej granicy tym udział większy. Przy południowej granicy kraju nastąpiło lokalne przekroczenie dopuszczalnej wartości 50 µg/m³ wartości sięgnęły do 55 µg/m³.



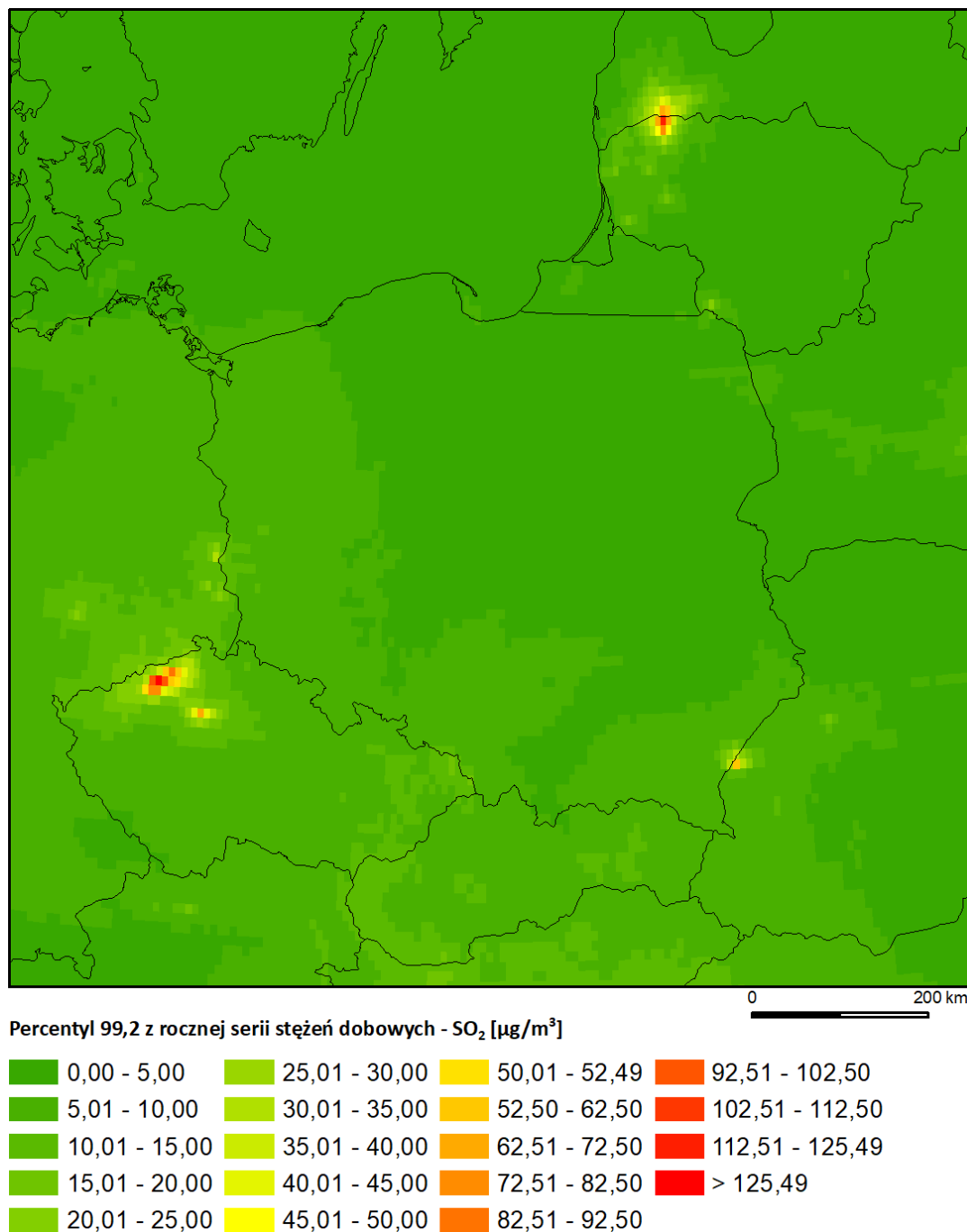
Percentyl 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych - PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

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

Rysunek 20. Rozkład przestrzenny percentyla 90,4 z rocznej serii stężeń dobowych stężeń pyłu PM10 obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2022 roku

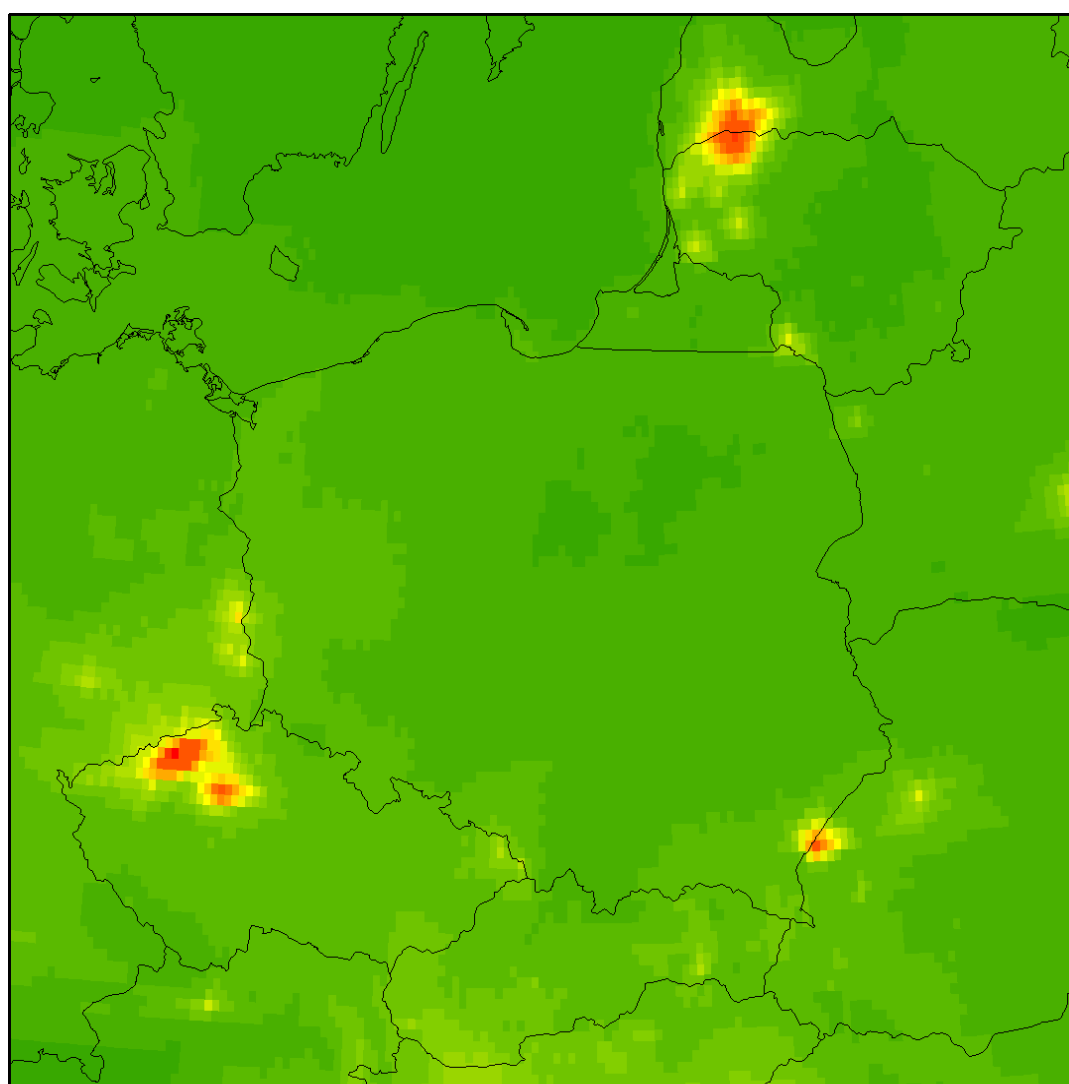
5.2 Dwutlenek siarki SO₂

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 na południu, zachodzie oraz lokalnie na wschodzie kraju - do 10 µg/m³, natomiast w rejonie Przemyśla i Gubina wartości wzrosły do około 53 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 2022 roku

W 2022 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**). Niższe stężenia, do $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wystąpiły częściowo w centrum i na północy kraju. Na pozostałym obszarze Polski stężenia wahały się od 5 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wyższe wartości wystąpiły na zachodzie i południu kraju do $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W rejonie Przemyśla, lokalnie na południu, zachodzie i wschodzie kraju wartości były wyższe do 78%. Podwyższone wartości w Polsce południowo-wschodniej mają związek ze źródłami emisji na Ukrainie. Należy zwrócić uwagę, że w świetle toczących się tam działań wojennych ocena poziomu emisji z obszaru Ukrainy jest wysoce niepewna.



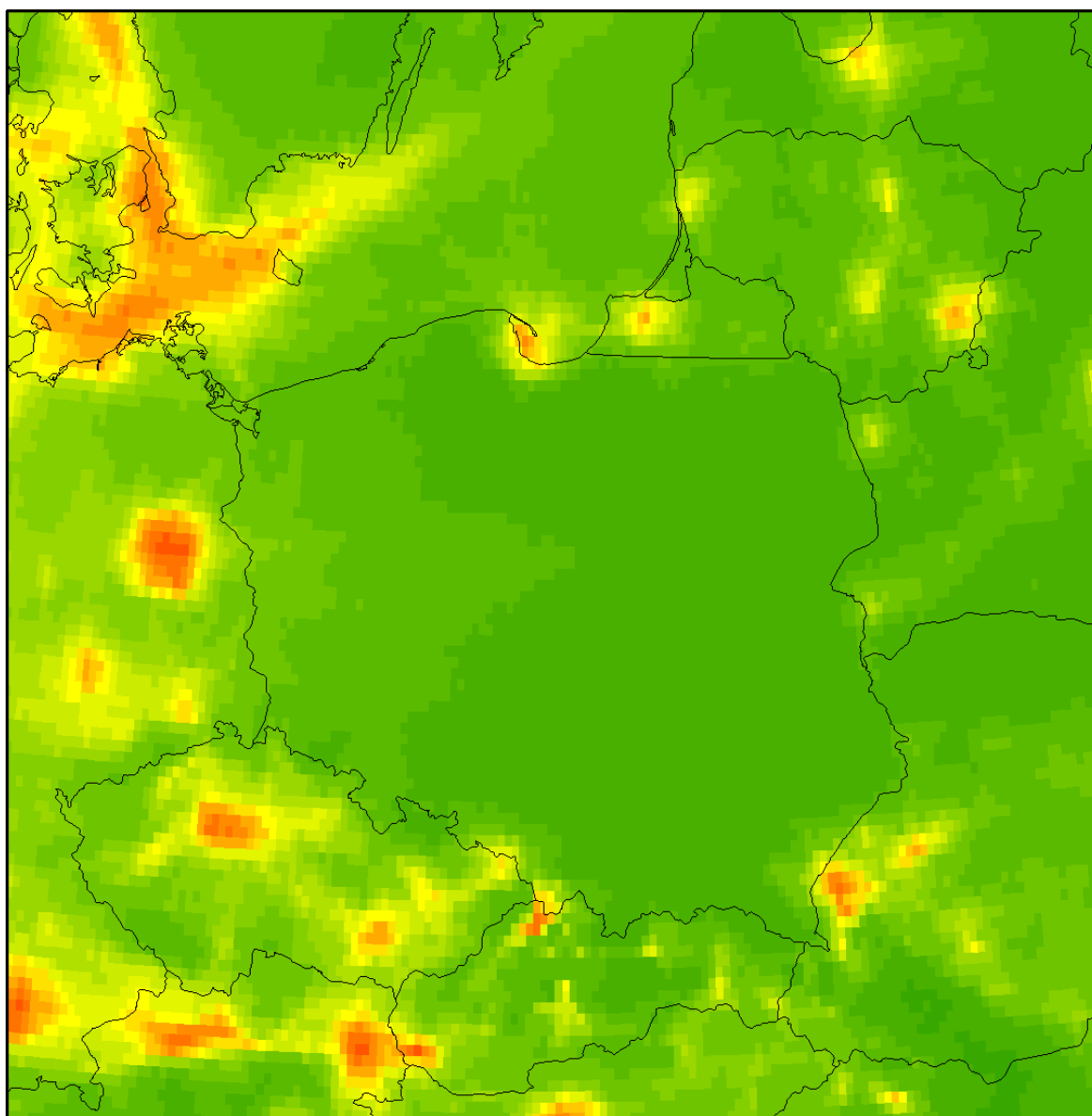
Percentyl 99,7 z rocznej serii
stężeń jednogodzinnych - SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

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

Rysunek 22. Rozkład przestrzenny percentyla 99.7 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych stężeń dwutlenku siarki SO₂ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2022 roku

5.3 Dwutlenek azotu NO₂

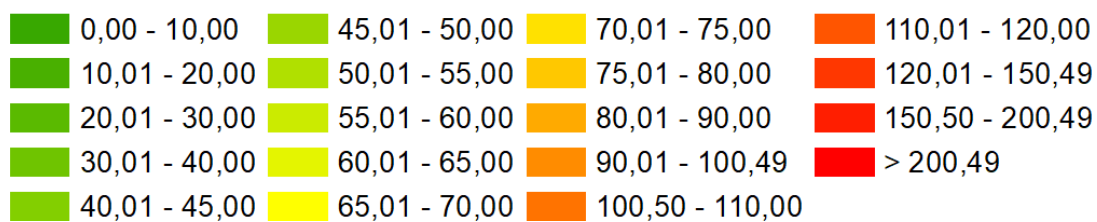
Rozkład przestrzenny udziału źródeł transgranicznych stężeń NO₂ wyrażonych jako percentyl 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski, był mało zróżnicowany na obszarze kraju w 2022 roku (**Rysunek 23**). Najniższe wartości związane 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 wystąpiły w rejonie Trójmiasta, Przemysła oraz lokalnie na południu przy granicy kraju (okolice Żywca i Skoczowa) do około 94 µg/m³. Rozkład percentyla 99,8 z rocznej serii stężeń jednogodzinnych, obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznej z obszaru Polski pokazuje, że dominujący jest transport z kierunków zachodnich, nie tylko ze względu na klimatologicznie przeważające kierunki wiatrów, ale także ze względu na wielkość strumienia emisji raportowanego w krajach ościennych.



Percentyl 99,8 z rocznej serii

stężeń jednogodzinnych - NO₂ [µg/m³]

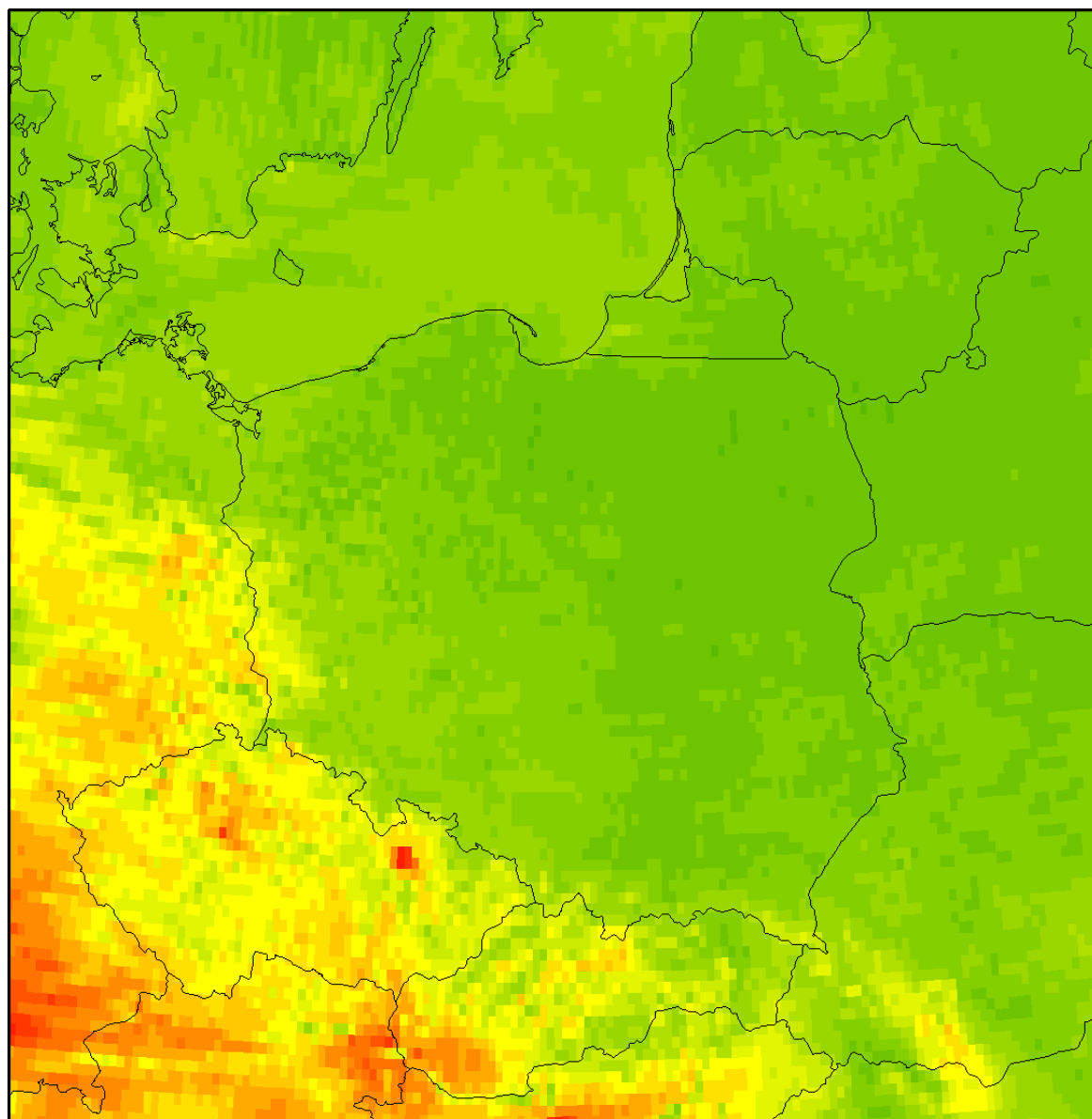
0 200 km



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 2022 roku

5.4 Ozon O₃

W 2022 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 oraz wzdłuż doliny Wisły wpływ zanieczyszczeń transgranicznych był najniższy, a wartość percentyla wynosiła od 77 do 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 85 do 92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Najwyższe wartości percentyla związane z wpływem zanieczyszczenia transgranicznego wystąpiły na południu i południowym- zachodzie kraju – do 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wysoka wartość percentyla 92,3, zbliżona do poziomu docelowego może świadczyć o tym że rola czynnika transgranicznego w kształtowaniu się przekroczeń liczby dni z przekroczeniem progu 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla 8-godzinnej najwyższej średniej kroczącej stężeń jest wysoka.



Percentyl 93,2 w rocznej serii maksimów dobowych stężenia
ośmiogodzinnego kroczącego - O₃ [µg/m³]

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 O₃ obliczonych przy założeniu braku emisji antropogenicznych na obszarze Polski w 2022 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 PM₁₀ udział zanieczyszczeń pochodzących spoza Polski dla stref jest dość wysoki i waha się w granicach od 14 do 65%. Udział źródeł transgranicznych w występowaniu dni z przekroczeniem wartości dopuszczalnej 50 µg/m³ wystąpił na południu i wschodzie kraju – do 100%. W pozostałej części kraju przekroczenia dopuszczalnej normy dla wartości 50 µg/m³ w stężeniach średniodobowych nie wystąpiło. Jest to istotna informacja z punktu widzenia podejścia do problemu redukcji PM₁₀ na terenie Polski. Konkluzja wynikająca z przedstawionej analizy jest następująca:

- za kształtowanie się stężeń o wartościach średniodobowych przekraczających 50 µg/m³ w przeważającym stopniu odpowiedzialne są źródła krajowe, podczas gdy w odniesieniu do wartości średniorocznej udział transgraniczny jest zdecydowanie wyższy,
- konieczne jest podjęcie dodatkowych analiz, nieuwzględnionych w przepisach prawnych, mających na celu określenie w ilu przypadkach transport transgranicznych przyczynił się do wystąpienia przekroczeń na indywidualnych stacjach oraz opracowanie metodyki syntetycznego podsumowania takiej analizy w skali kraju,
- 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 PM₁₀. Najwyższy wpływ źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granicy kraju z wyjątkiem wschodniej części do ponad 80%. Natomiast najwyższy udział źródeł krajowych

wystąpił na terenie Śląska i Małopolski oraz w rejonie Warszawy, Łodzi, Płocka, Wrocławia, Opola, Zakopanego, Nowego Sącza 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 SO₂, kształtuje się na zbliżonym poziomie – uśredniony dla stref od około 2 do około 64% (średnio 32%). 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 transgranicznych jest niski do 20%.

6.3 Tlenki azotu

W przypadku średniej rocznej NO₂ i NO_x udział transgraniczny uśredniony dla stref wynosi odpowiednio od 19 do 67% (średnio 45%) dla NO₂ i od 14 do 65% (średnio 41%) dla NO_x. Wyższy udział źródeł transgranicznych wystąpił wzdłuż granic kraju i pobraża morza Bałtyckiego, w przypadku NO_x głównie na północy i wzdłuż 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 NO₂ 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 95%. 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 północno- zachodniej, 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 35%.

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 PM₁₀ na północy i w centrum kraju oraz na obszarze większych miast nie przekroczył $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast w Trójmieście i lokalnie przy granicy z Rosją wartości sięgnęły do $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ co świadczy o znaczącej roli przygranicznych źródeł w powstawaniu przekroczeń na terenie Polski.
- W przypadku percentyla 99,2 z rocznej serii stężeń dobowych dwutlenku siarki wartości zawierały się głównie w przedziale od 0 do $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wyjątkiem jest rejon Przemysła i Gubina gdzie wartości dochodziły do $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- 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 Przemysła, lokalnie na południu, zachodzie i wschodzie 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 w rejonie Trójmiasta, Przemysła oraz lokalnie na południu przy granicy kraju.

- Rozkład przestrzenny wartości percentyla 93,2 z najwyższych ośmiogodzinnych średnich kroczących ozonu jest bardziej zróżnicowany przestrzennie niż pozostałych zanieczyszczeń. Wartości wahały się od 77 do ponad 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wysokie wartości – powyżej 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ świadczą o możliwej znaczącej roli transportu transgranicznego w powstawaniu przekroczeń wartości dopuszczalnej. Niższe wartości percentyla wystąpiły w 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.

Spis rysunków

Rysunek 1. Konfiguracja siatki: 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 2022 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 2022 roku	19
Rysunek 9. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego pyłu PM _{2,5} na obszarze Polski w 2022 roku	20
Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku siarki na obszarze Polski w 2022 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 2022	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 2022 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 2022 roku .	25
Rysunek 14. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego dwutlenku azotu na obszarze Polski w 2022 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 µg/m ³ na obszarze Polski w 2022 roku	28

Rysunek 16. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do stężenia średniego rocznego tlenków azotu na terenie Polski w 2022 roku	29
Rysunek 17. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do liczby dni, w których najwyższa ośmiogodzinna średnia krocząca stężeń ozonu przekraczała 120 µg/m ³ na obszarze Polski w 2022 roku	31
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w odniesieniu do wskaźnika AOT40 na obszarze Polski w 2022 roku	33
Rysunek 19. Rozkład przestrzenny udziału procentowego źródeł transgranicznych w stężeniu średniorocznym benzo(a)pirenu na obszarze Polski w 2022 roku.....	34
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 2022 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 2022 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 2022 roku.....	38
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 2022 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 2022 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